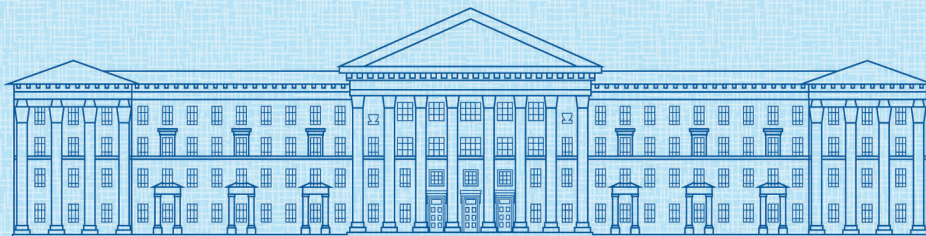




ISSN 2307-3489 (Print)

ISSN 2307-6666 (Online)



# НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ  
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

№ 5(89)

•• 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

№ 5 (89) 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); Біляєв 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 02.11.2020 р., протокол № 3

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 Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта»;
- 1993–2002 рр. – «Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту» (за серіями);
- 2003–2012 рр. – «Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна», (ISSN 1993-9175);
- 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. 5 (89) 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 02.11.2020, Protocol no. 3
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: <a href="http://stp.diit.edu.ua/">http://stp.diit.edu.ua/</a>

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:[628.334.5/.6:519.87]

M. M. BILIAIEV<sup>1\*</sup>, M. V. LEMESH<sup>2\*</sup>, V. V. BILIAIEVA<sup>3\*</sup>, P. B. MASHYKHINA<sup>4\*</sup>,  
Z. M. YAKUBOVSKA<sup>5\*</sup>

<sup>1\*</sup>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

<sup>2\*</sup>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 0000-0002-1230-8040

<sup>3\*</sup>Dep. «Fluid Dynamics, Energy and Mass Transfer», Oles Honchar Dnipro National University, Haharina Av., 72, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (056) 374 98 22, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0003-2399-3124

<sup>4\*</sup>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 gidro\_eko@ukr.net, ORCID 0000-0003-3057-9204

<sup>5\*</sup>Dep. «Physics», Ukrainian State University of Chemical Technology, Haharina Av., 8, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 753 56 38, e-mail physics@udhtu.edu.ua, ORCID 0000-0002-9893-3479

### COMPUTER SIMULATION OF BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT PROCESSES IN AEROTANKS WITH PLATES

**Purpose.** Efficiency determination of the aeration tank at the stage of design or reconstruction of bioreactors in which biological wastewater treatment is carried out requires the use of special mathematical models and calculation methods. The main purpose of the article is to develop CFD models for evaluating the operation efficiency of aeration tanks. **Methodology.** A numerical model has been developed for the computer calculation of the biological wastewater treatment process in aerotanks, taking into account hydrodynamics. The model is based on two-level mass conservation equations for the substrate and activated sludge and the velocity potential equation. The process of biological transformation of the substrate is calculated based on the Monod model. For the numerical integration of the mass transfer equations of activated sludge and substrate, the alternating-triangular difference splitting scheme is used. In this case, the basic equations are divided into two equations of a more simplified form. For the numerical integration of the equations for the velocity potential, it is split into two one-dimensional equations. Further, each equation is solved according to explicit scheme. For the numerical integration of equations that describe the process of substrate transformation based on the Monod model, the Euler method is used. **Findings.** The software implementation of the constructed numerical model has been carried out. The results of a computational experiment on the study of the wastewater treatment process in an aeration tank with plates are presented. This leads to the conclusion that the quality control of wastewater treatment in aeration tanks is possible with the help of plates. **Originality.** A multivariate CFD model has been developed, which makes it possible to quickly assess the efficiency of the aeration tank. A feature of the model is the ability to evaluate the operation of the aeration tank, taking into account its geometric shape and location of additional plates in the construction. **Practical value.** The constructed numerical model can be used during calculations in the case of designing aeration tanks, or in determining the efficiency of wastewater treatment under new operating conditions.

**Keywords:** water purification; numerical modeling; aerotank; model Mono; CFD models; biological cleaning; wastewater; activated sludge; concentration of pollutants

## Introduction

Biological treatment is one of the most effective methods of wastewater treatment [3, 4, 6]. Efficiency determination of this treatment at the stage of design or reconstruction of bioreactors, in which this method of wastewater treatment is carried out, requires the use of special mathematical models and calculation methods. Moreover, these theoretical calculation methods are the main toolkit, since a physical experiment in the field of biological treatment always requires a long time and expensive equipment. To date, a significant number of mathematical models have been developed that allow, with different approximation degrees, determining the bioreactor efficiency. But the existing mathematical models (empirical, balance, analytical) [1–5, 7–17] do not take into account a number of important parameters affecting the efficiency of bioreactors (their geometric shapes and design features, movement hydrodynamics activated sludge and substrate in them, the presence of additional elements, various modes of operation), or require significant time when implemented on computers (CFD-models). Therefore, the development of mathematical models for assessing the efficiency of biological reactors, which allow taking into account these important factors and quickly determining the values of the parameters necessary for the designer, is an important scientific task.

## Purpose

This work provides for the development of a numerical model to assess the efficiency of wastewater treatment in aerotanks. The task is to create a multifactorial computer model that makes it possible to quickly calculate the process of biological wastewater treatment, taking into account the geometric shape of the bioreactor.

## Methodology

When building a model, we will take into account the following factors:

- geometric shapes of aerotank;
- the process of changing the substrate concentration in aerotanks over time;
- the process of changing the of activated sludge concentration in aerotanks over time;

– the presence of additional elements in aerotanks.

The material balance equations for the substrate and activated sludge in the reactor based on the Monod model has the following form:

$$\frac{\partial X}{\partial t} + \frac{\partial uX}{\partial x} + \frac{\partial vX}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial X}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial X}{\partial y} \right) = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) = 0; \quad (2)$$

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

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

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{S}{S + K_s}, \quad (5)$$

where  $K_d$  – activated sludge measurement coefficient;  $t$  – time;  $X$  – averaged concentration of activated sludge in the bioreactor;  $S$  – averaged concentration of substrate in the bioreactor;  $\mu$  – diffusion coefficient;  $Y$  – parameter in the Monod model;  $u, v$  – components of the water flow velocity in the bioreactor in the direction of the  $x, y$  axes, respectively;  $\mu = (\mu_x, \mu_y)$  – components of the diffusion coefficients at the considered plane point in the  $x, y$  direction.

The averaged concentration of activated sludge and substrate over the width of the bioreactor is determined as follows:

$$X(x, z) = \frac{1}{B} \int X(x, y, z) dy;$$

$$S(x, z) = \frac{1}{B} \int S(x, y, z) dy.$$

Equations (1) and (2) describe the change in the concentration of activated sludge and substrate over time in the aeration tank due to movement

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

and diffusion. Equations (3) – (5) describe the process of substrate consumption by activated sludge.

The limiting conditions for modeling equations are as follows:

1) at the inlet, the boundary condition is:

$$S = S_{in}, X = X_{in},$$

where  $S_{in}, X_{in}$  – known concentrations of substrate and sludge, respectively;

2) boundary conditions at the exit from the bioreactor:

$$S(i+1, j) = S(i, j);$$

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

where  $S(i+1, j), X(i+1, j)$  – concentrations in the last computational cell;  $S(i, j), X(i, j)$  – concentrations in the previous computation cell;

3) on rigid surface:

$$\frac{\partial X}{\partial n} = 0;$$

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

where  $n$  – unit normal to the surface.

The initial conditions are as follows: at  $t=0$   $X=X_0, S=S_0$ .

To solve the hydrodynamics problem – determining the components field of the flow velocity vector in the aerotank – a model of potential motion was used [8, 29]:

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

where  $P$  – velocity potential.

Knowing the potential field, the values of the components of the flow velocity vector in the bioreactor are determined by the formulas [8, 9, 14]:

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

Let us consider the difference in dependencies, with the help of which the numerical integration of the modeling equations is carried out. Thus, to calculate the substrate concentration in the bioreactor, an alternating-triangular two-step splitting scheme

is used [2]. At the first stage of splitting, the calculated dependence has the form:

$$S_{ij}^{n+\frac{1}{2}} = S_{ij}^n - Vt \frac{u_{i+1j}^+ S_{ij}^{n+\frac{1}{2}} - u_{ij}^+ S_{i-1j}^{n+\frac{1}{2}}}{Vx} + Vt\mu \frac{-S_{ij}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1j}^{n+\frac{1}{2}}}{2Vx^2} + Vt\mu \frac{-S_{ij}^n + S_{i+1j}^n}{2Vx^2}. \quad (7)$$

At the second step of splitting, the calculated dependence is as follows:

$$S_{ij}^{n+1} = S_{ij}^{n+\frac{1}{2}} - Vt \frac{u_{i+1j}^- S_{i+1j}^{n+1} - u_{ij}^- S_{ij}^{n+1}}{Vx} + Vt\mu \frac{-S_{ij}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1j}^{n+\frac{1}{2}}}{2Vx^2} + Vt\mu \frac{-S_{ij}^{n+1} + S_{i+1j}^{n+1}}{2Vx^2}, \quad (8)$$

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

For the second equation, the difference schemes have the form:

– calculated dependence at the first step:

$$S_{ij}^{n+\frac{1}{2}} = S_{ij}^n - Vt \frac{v_{ij+1}^+ S_{ij}^{n+\frac{1}{2}} - v_{ij}^+ S_{ij-1}^{n+\frac{1}{2}}}{Vy} + Vt\mu \frac{-S_{ij}^{n+\frac{1}{2}} + S_{ij-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2Vy^2} + Vt\mu \frac{-S_{ij}^n + S_{ij+1}^n}{2Vy^2}, \quad (9)$$

– calculated dependence at the second step:

$$S_{ij}^{n+1} = S_{ij}^{n+\frac{1}{2}} - Vt \frac{v_{ij+1}^- S_{ij+1}^{n+1} - v_{ij}^- S_{ij}^{n+1}}{Vy} + Vt\mu \frac{-S_{ij}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1j}^{n+\frac{1}{2}}}{2Vy^2} + Vt\mu \frac{-S_{ij}^{n+1} + S_{i+1j}^{n+1}}{2Vy^2}, \quad (10)$$

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

To construct a local one-dimensional scheme for solving equation (6), we perform the following transformations. First, let us represent this equation in the form:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (11)$$

where  $t$  – fictitious time.

Further, we divide equation (11) as follows:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}; \quad (12)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}. \quad (13)$$

Equation (12) describes the change in the value of  $P$  in the direction of the  $X$  axis, and equation (13) describes the change in the  $Y$  direction.

The calculated dependencies (Richardson's method) for determining the unknown value of  $P$  based on equation (12) have the form:

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^n + Vt \frac{P_{i+1,j}^n - P_{i,j}^n}{\Delta x^2} + Vt \frac{-P_{i,j}^n + P_{i-1,j}^n}{\Delta x^2}. \quad (14)$$

Accordingly, the calculated dependencies (Richardson's method) for determining the unknown value of  $P$  based on equation (13):

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^n + Vt \frac{P_{i,j+1}^n - P_{i,j}^n}{\Delta y^2} + Vt \frac{-P_{i,j}^n + P_{i,j-1}^n}{\Delta y^2}. \quad (15)$$

Since we solve the evolutionary equation, the calculation by dependencies (14)–(15) ends when the following condition is met:

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

where  $\varepsilon$  – small number;  $n$  – iteration number.

We calculate the flow velocity as follows:

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

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

For numerical integration of equations (3)–(4), the Euler method is used.

The algorithm for solving this problem includes two main stages.

At the first stage, the following steps are performed:

1) the velocity potential field  $P(x, y)$  in the aerotank is calculated;

2) the flow velocity field  $u(x, y)$ ,  $v$  in the aerotank is determined.

The second stage (calculation at the time step  $dt$ ) contains the following steps:

1) the change in the concentration of activated sludge in the aerotank due to flow movement and diffusion is calculated;

2) the change in the concentration of the substrate in the aerotank due to the flow movement and diffusion is calculated;

3) the change in the concentration of activated sludge and substrate in each difference cell based on the Monod model is calculated;

4) the calculation is repeated at a new time step, starting from item 1.

Based on the constructed numerical model, the BIO-2K computer program was developed. Programming is carried out in the FORTRAN algorithmic language.

## Findings

Let us present the results of solving the problem of assessing the efficiency of the aeration tank using the developed CFD model. The following scenarios were considered:

scenario no. 1: the aerotank works without additional elements inside the structure;

scenario no. 2: aerotank has one plate inside the structure;

scenario no. 3: aerotank has two plates inside the structure;

scenario no. 4: aerotank works as a reservoir for the substrate destruction, but there is no entry and exit of the substrate and activated sludge. That is, in this scenario, the aerotank is a tank filled with activated sludge and substrate, and the process of changing their concentration was studied using the Monod model.

Calculations were performed with the following initial data:

$S_m = 360$  mg/l – the concentration of the substrate (Biological oxygen demand (complete), which enters the structure;



ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

the reactor (scenario no. 4), i.e., if there is no new portions of the substrate entering the reactor. Thus, it can be concluded that the quality control of wastewater treatment in biological reactors is possible through the use of additional elements in the structure – plates.

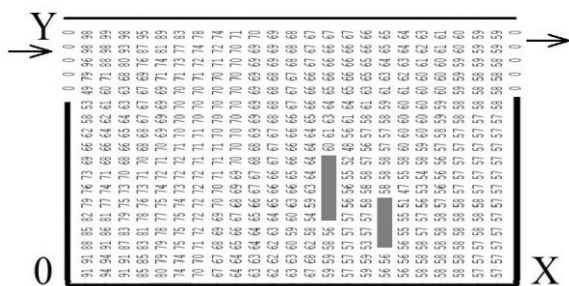


Fig. 5. Activated sludge concentration in the bioreactor,  $t = 1.5$  (two plates, scenario no. 3)

Data analysis of Table 2 shows that approximately from the moment of time  $t = 0.96$ , the deceleration of the water purification process starts in the reactor, where the movement takes place, (scenario no. 1). By the time moment  $t = 1.5$ , the substrate concentration at the outlet from the reactor, where there is movement, is significantly different from the concentration for the reactor, where there is no movement.

Note that the time for calculating each scenario was 5 s.

**Originality and practical value**

A new numerical 2D model is proposed to assess the operation efficiency of the aerotank. A feature of the model is the ability to assess the operation of the aerotank, taking into account its geometric shape and location of additional plates in the structure. The simulated equations reflect the fundamental law of continuum mechanics – the law of mass conservation.

The developed numerical model makes it possible to determine the concentration field of the substrate and activated sludge in the bioreactor. The model can be useful when performing calculations in the case of designing biological treatment facilities or when reconstructing existing bioreactors.

**Conclusions**

In the article, a new numerical model has been developed that allows one to determine the aerotank operation efficiency, taking into account its geometric shape. The results of computational experiments show that the use of additional elements in the aerotank improves the efficiency of water purification.

In the future, this scientific direction should be developed in the field of development of numerical models for evaluating the aerotank operation efficiency based on the Navier-Stokes equation.

Table 1  
**Average value of substrate concentration at the bioreactor outlet**

Scenario	Scenario no. 1	Scenario no. 2	Scenario no. № 3	Scenario no. 4
Concentration	19.95 mg/l	17.37 mg/l	14.71 mg/l	1.63 mg/l

It is also important to compare the dynamics of the water purification rate in the reactor if there is no movement (scenario no. 4) and when there is movement (scenario no. 1). Biological reactors in scenarios no. 1 and no. 4 have the same geometry, so this comparison is logical. Table 2 shows the results of calculations for these reactors.

Table 2  
**Average value of substrate concentration at the bioreactor outlet**

Time (dimensionless)	Scenario no. 4	Scenario no. 1
0.6	148.32 mg/l	133.81 mg/l
0.96	44.71 mg/l	55.38 mg/l
1.2	12.25 mg/l	32.76 mg/l
1.4	2.89 mg/l	22.66 mg/l
1.5	1.63 mg/l	19.95 mg/l

## 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 сточных вод в аэротенках*. Москва : Стройиздат, 1973, 223 с.
5. Ласков Ю. М., Воронов Ю. В., Калищун 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 gas-liquid mass transfer in wastewater treatment : when current knowledge needs to encounter engineering practice and vice-versa. *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., Prysiazniuk I., Prysiazniuk 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)
14. Gao H., Stenstrom M. K. Computational Fluid Dynamics Analysis for Improving Secondary Settling Tank Performance. *Conference : 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. *19<sup>th</sup> Mediterranean Conference on Control and Automation Aquis*. 2011. P. 1128–1133. DOI: <https://doi.org/10.1109/med.2011.5983027>

М. М. БІЛЯЄВ<sup>1\*</sup>, М. В. ЛЕМЕШ<sup>2\*</sup>, В. В. БІЛЯЄВА<sup>3\*</sup>, П. Б. МАШИХІНА<sup>4\*</sup>,  
З. М. ЯКУБОВСЬКА<sup>5\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Гідравліка і 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

<sup>2\*</sup>Каф. «Гідравліка і 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

<sup>3\*</sup>Каф. «Аерогідромеханіка та енергомасоперенос», Дніпровський національний університет імені Олеса Гончара, пр. Гагаріна, 72, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (056) 374 98 22, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0003-2399-3124

<sup>4\*</sup>Каф. «Гідравліка і водопостачання», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта gidro\_eko@ukr.net, ORCID 0000-0003-3057-9204

<sup>5\*</sup>Каф. «Фізика», Український державний хіміко-технологічний університет, пр. Гагаріна, 8, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 753 56 38, ел. пошта physics@udhtu.edu.ua, ORCID 0000-0002-9893-3479

## КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ БІОЛОГІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД В АЕРОТЕНКАХ ІЗ ПЛАСТИНАМИ

**Мета.** Визначення ефективності роботи аеротенків на етапі проектування або реконструкції біореакторів, у яких здійснюється біологічне очищення стічних вод, вимагає використання спеціальних математичних моделей і методів розрахунку. Основною метою статті є розробка CFD-моделі для оцінки ефективності роботи аеротенка. **Методика.** Для комп'ютерного розрахунку процесу біологічного очищення стічних вод в аеротенку, з урахуванням гідродинаміки, розроблена чисельна модель. В основу моделі покладено двовимірні рівняння збереження маси для субстрату та активного мулу та рівняння для потенціалу швидкості. Процес біологічного перетворення субстрату розраховано на базі моделі Monod. Для чисельного інтегрування рівнянь масопереносу активного мулу та субстрату використано поперемінно-трикутну різницеву схему розщеплення. При цьому базові рівняння розщеплено на два рівняння більш спрощеного вигляду. Для чисельного інтегрування рівняння для потенціалу швидкості здійснено його розщеплення на два одновимірних рівняння. Далі кожне рівняння розв'язано за явною схемою. Для чисельного інтегрування рівнянь, що описують процес трансформації субстрату на базі моделі Monod, використано метод Ейлера. **Результати.** Здійснено програмну реалізацію побудованої чисельної моделі. Наведено результати обчислювального експерименту з дослідження процесу очищення стічних вод в аеротенку за рахунок використання додаткових елементів у споруді–пластин. Це дозволяє зробити висновки, що управління якістю очищення стічних вод в аеротенках можливе за допомогою застосування пластин. **Наукова новизна.** Розроблено багатofакторну CFD-модель, що дозволяє швидко оцінити ефективність роботи аеротенка. Особливістю моделі є можливість оцінки роботи аеротенка з урахуванням його геометричної форми та розташування в споруді додаткових пластин. **Практична значимість.** Побудована чисельна модель може бути використана під час проведення розрахунків у випадку проектування споруд аеротенків або під час визначення ефективності очищення стічних вод за нових умов експлуатації.

**Ключові слова:** очищення води; чисельне моделювання; аеротенк; модель Monod; CFD-моделі; біологічне очищення; стічні води; активний мул; концентрація забруднювальних речовин

Н. Н. БЕЛЯЕВ<sup>1\*</sup>, М. В. ЛЕМЕШ<sup>2\*</sup>, В. В. БЕЛЯЕВА<sup>3\*</sup>, П. Б. МАШИХИНА<sup>4\*</sup>,  
З. Н. ЯКУБОВСКАЯ<sup>5\*</sup>

<sup>1\*</sup>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 0000-0002-1230-8040

<sup>2\*</sup>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

<sup>3\*</sup>Каф. «Аэрогидромеханика и энергомассоперенос», Днепропетровский национальный университет имени Олеса Гончара, пр. Гагарина, 72, Днепро, Украина, 49000, тел. +38 (056) 374 98 22, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0003-2399-3124

<sup>4\*</sup>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 gidro\_eko@ukr.net, ORCID 0000-0003-3057-9204

<sup>5\*</sup>Каф. «Физика», Украинский государственный химико-технологический университет, пр. Гагарина, 8, Днепро, Украина, 49005, тел. +38 (056) 753 56 38, эл. почта physics@udhtu.edu.ua, ORCID 0000-0002-9893-3479

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД В АЭРОТЕНКАХ С ПЛАСТИНАМИ

**Цель.** Определение эффективности работы аэротенка на этапе проектирования или реконструкции биореакторов, в которых осуществляется биологическая очистка сточных вод, требует использования специальных математических моделей и методов расчета. Основной целью статьи является разработка CFD-модели для оценки эффективности работы аэротенков. **Методика.** Для компьютерного расчета процесса биологической очистки сточных вод в аэротенках, с учётом гидродинамики, разработана численная модель. В основу модели заложены двухуровневые уравнения сохранения массы для субстрата и активного ила и уравнение для потенциала скорости. Процесс биологического преобразования субстрата рассчитан на базе модели Monod. Для численного интегрирования уравнений массопереноса активного ила и субстрата использована попеременно–треугольная разностная схема расщепления. При этом базовые уравнения разделены на два уравнения более упрощенного вида. Для численного интегрирования уравнения для потенциала скорости осуществлено его расщепление на два одномерных уравнения. Далее каждое уравнение решено по явной схеме. Для численного интегрирования уравнений, описывающих процесс трансформации субстрата на базе модели Monod, использован метод Эйлера. **Результаты.** Осуществлена программная реализация построенной численной модели. Приведены результаты вычислительного эксперимента по исследованию процесса очистки сточных вод в аэротенке за счет использования дополнительных элементов в сооружении – пластин. Это приводит к выводу, что управление качеством очистки сточных вод в аэротенках возможно с помощью применения пластин. **Научная новизна.** Разработана многофакторная CFD-модель, позволяющая быстро оценить эффективность работы аэротенка. Особенностью модели является возможность оценки работы аэротенка с учетом его геометрической формы и расположения в сооружении дополнительных пластин. **Практическая значимость.** Построенная численная модель может быть использована при проведении расчетов в случае проектирования сооружений аэротенков или при определении эффективности очистки сточных вод в новых условиях эксплуатации.

**Ключевые слова:** очистка воды; численное моделирование; аэротенк; модель Monod; CFD-модели; биологическая очистка; сточные воды; активный ил; концентрация загрязняющих веществ

### REFERENCES

1. Biliaiev, N. N., & Nagornaya, E. K. (2012). *Matematicheskoye modelirovaniye massoperenosa v otstoynikakh sistem vodootvedeniya: monografiya*. Dnepropetrovsk: Novaya ideologiya. (in Russian)
2. Biliaiev, N. N., & Kozachina, V. A. (2015). *Modelirovaniye massoperenosa v gorizontalnykh otstoynikakh: monografiya*. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (in Russian)

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

3. Vasylenko, O. A., Hrabovskyi, P. O., Larkina, H. M., Polishchuk, O. V., & Prohulnyi, V. Y. (2010). *Rekonstruktsiia i intensyfikatsiia sporud vodopostachannia ta vodovidvedennia: navchalnyi posibnyk*. Kyiv: IVNVKP «Ukrheliotek». (in Ukrainian)
4. Karelin, Ya. A., Zhukov, D. D., Zhurov, V. N., & Repin, B. N. (1973). *Ochistka proizvodstvennykh stochnykh vod v aerotenkah*. Moscow: Stroiyzdat. (in Russian)
5. Laskov, Yu. M., Voronov, Yu. V., & Kalicun, V. I. (1981). *Primery raschetov kanalizacionnykh sooruzhenij*. Moscow: Vysshaya Shkola. (in Russian)
6. Olynyk, 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 & Technology*, 80(4), 607-619. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2019.253> (in English)
9. Babaei, A., Azadi, R., Jaafarzadeh, N., & Alavi, N. (2013). Application and Kinetic Evaluation of upflow Anaerobic biofilm Reactor for Nitrogen Removal from Wastewater. *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., Prysiazhniuk, I., Prysiazhniuk, 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, G. (2020). A CFD strategy to retrofit an anaerobic digester to improve mixing performance in wastewater treatment. *Water Science & 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 CFD modeling for secondary settling tanks over the last three decades: A review. *Water Environment Research*, 92(6), 796-820. DOI: <https://doi.org/10.1002/wer.1279> (in English)
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. *Conference: 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*. USA, University of New Orleans Publ. (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. *19<sup>th</sup> Mediterranean Conference on Control and Automation Aquis*, 1128-1133. DOI: <https://doi.org/10.1109/med.2011.5983027> (in English)

Received: 05.06.2020

Accepted: 07.10.2020

## УДК 504.5:[628.3:519.87]

В. А. КОЗАЧИНА<sup>1\*</sup>, Е. В. ГРОМОВА<sup>2</sup>, Е. Ю. ГУНЬКО<sup>3</sup>, Л. Г. ТАТАРКО<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, эл. почта v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

<sup>2</sup>Каф. «Архитектурное проектирование, землеустройство и строительные материалы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (095) 304 73 33, эл. почта Gromova\_Elen\_upbbm\_diiit@i.ua, ORCID 0000-0002-5149-4165

<sup>3</sup>Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0001-9257-763X

<sup>4</sup>Каф. «Энергетика», Украинский государственный химико-технологический университет, пр. Гагарина, 8, Днепро, Украина, 49005, тел. +38 (056) 753 56 38, эл. почта larisa.tatarako@gmail.com, ORCID 0000-0002-2080-6090

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД НА БАЗЕ CFD-МОДЕЛИ: ЭКСПРЕСС-РАСЧЕТ

**Цель.** В работе предусмотрена разработка CFD-модели для оценки эффективности очистки сточных вод в горизонтальном отстойнике. CFD-модель может быть применена для расчета гидродинамики течения и массопереноса в сооружениях, имеющих сложную геометрическую форму в области движения потока сточных вод. **Методика.** Для численного моделирования процесса движения сточных вод в горизонтальном отстойнике использованы две математические модели. Первая модель основана на уравнениях движения вязкой несжимаемой жидкости – уравнениях Навье–Стокса. Эти уравнения записаны в переменных «завихренность – функция тока». Для расчета концентрации загрязнителя в горизонтальном отстойнике использовано двухмерное уравнение массопереноса. Для численного интегрирования этого уравнения применена конечно-разностная схема расщепления. Расщепление моделирующего уравнения массопереноса проведено таким образом, чтобы на каждом дробном шаге неизвестное значение концентрации загрязнителя определять по явной формуле. Для численного интегрирования уравнения переноса вихря и уравнения для функции тока (система уравнений Навье–Стокса) использованы конечно-разностные схемы расщепления. **Результаты.** На базе разработанной CFD-модели создан комплекс компьютерных программ, позволяющий определять эффективность очистки воды в горизонтальном отстойнике. Представлены результаты проведенного вычислительного эксперимента по оценке эффективности очистки воды в отстойнике с дополнительными элементами в виде пластин. **Научная новизна.** Создана эффективная CFD-модель, позволяющая оперативно оценивать эффективность очистки сточных вод в горизонтальном отстойнике с дополнительными элементами. Эта модель учитывает геометрическую форму очистного сооружения и наиболее существенные физические факторы, влияющие на эффективность очистки воды в горизонтальных отстойниках: неравномерное поле скорости потока сточных вод, процессы диффузии, различное положение входных и выходных отверстий очистного сооружения. **Практическая значимость.** Построенная CFD-модель относится к классу «диагностических моделей» и может быть использована для оценки эффективности очистных сооружений на этапе их эскизного проектирования.

*Ключевые слова:* очистка сточных вод; численное моделирование; горизонтальные отстойники

### Введение

Повышение качества очистки сточных вод является важной проблемой. В технологических схемах очистки задействованы различные сооружения. При изменении объема сточных вод, которые поступают на очистные станции, и при изменении их состава возникает задача оценки эффективности работы очистных со-

оружений в новых условиях эксплуатации. Для этого широко используют математические модели разного уровня – эмпирические, регрессионные, аналитические, численные [3–5, 7–12]. Наиболее часто на практике используют эмпирические модели, которые позволяют быстро определить необходимые показатели работы очистного сооружения, но данные модели не

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

могут быть использованы для расчета сооружений, которые имеют другую геометрию. С этой точки зрения наиболее эффективными являются CFD-модели [1, 2, 6–10]. Однако в настоящий момент в Украине имеется определенный дефицит CFD-моделей, поэтому актуальной проблемой является создание эффективных численных моделей расчета сооружений по очистке сточных вод.

**Цель**

Основной целью данной работы является разработка CFD-модели процесса очистки сточных вод в отстойниках с дополнительными элементами.

**Методика**

Для математического моделирования процесса очистки сточных вод используют два класса математических моделей, на основе которых рассчитывают гидродинамику течения в сооружении. Первый класс моделей – это модели, которые основаны на уравнениях движения невязкой жидкости [1, 2]. Модели второго класса основаны на уравнениях Навье–Стокса. В данной работе будем использовать уравнения Навье–Стокса, записанные в переменных «завихренность – функция тока»:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u \omega}{\partial x} + \frac{\partial v \omega}{\partial y} = \frac{1}{\text{Re}} \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right); \quad (1)$$

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

где  $\text{Re} = V_0 L / \nu$  – число Рейнольдса (тут  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости);  $\psi$  – функция тока;  $\omega = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y$  – вихрь;  $u = \partial \psi / \partial y$ ;  $v = -\partial \psi / \partial x$  – компоненты вектора скорости водного потока;  $L$  – характерный размер;  $V_0$  – характерная скорость.

Для расчета процесса распространения загрязнителя в очистном сооружении используем уравнение массопереноса [1, 2]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial u C}{\partial x} + \frac{\partial v C}{\partial y} = \text{div}(\mu \text{grad} C), \quad (3)$$

где  $C(x, y) = \frac{1}{H} \int_0^H C(x, y, z) dz$  – усредненная концентрация загрязнителя;  $H$  – глубина сооружения;  $u, v$  – компоненты скорости потока в направлении  $x, y$  соответственно;  $\mu = (\mu_x, \mu_y)$  – коэффициенты диффузии;  $t$  – время.

Граничные условия для уравнения массопереноса (3) такие:

1. На входе:

$$C = C_{in}, \quad (4)$$

где  $C_{in}$  – известная концентрация загрязнителя.

2. На выходе:

$$C(i+1, j) = C(i, j), \quad (5)$$

где  $C(i+1, j)$  – концентрация загрязнителя в последней вычислительной ячейке;  $C(i, j)$  – концентрация загрязнителя в предыдущей вычислительной ячейке.

3. На стенках:

$$\partial C / \partial n = 0,$$

где  $n$  является вектором нормали к границе.

Начальное условие:

$$C = C_0,$$

где  $C_0$  – концентрация загрязнителя в очистном сооружении на момент начала расчета.

*Численная модель.* Для интегрирования моделирующих уравнений будем использовать конечно-разностные методы. Рассмотрим сначала разностную схему расщепления для решения уравнения массопереноса. Исходное уравнение перед построением разностной схемы расщепляется на два уравнения следующим образом:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial u C}{\partial x} + \frac{\partial v C}{\partial y} = 0; \quad (6)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial C}{\partial y} \right). \quad (7)$$

На следующем этапе выполняем аппроксимацию производных для каждого уравнения [1, 2]:

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

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

Производные, связанные со скоростью потока, записываем так:

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

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

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

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

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

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

После проведения таких преобразований разностную схему расщепления представляем в виде:

– на первом этапе  $k = 1/2$ :

$$\frac{C_{ij}^{n+k} - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) = 0; \quad (8)$$

– на втором этапе  $k = 1$ ,  $c = n+1/2$ :

$$\frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^- C^k + L_y^- C^k) = 0. \quad (9)$$

Особенностью этой разностной схемы является то, что неизвестное значение концентрации загрязнителя находят на каждом шаге расщепления по явной формуле.

Аналогичный подход используем к построению разностной схемы для численного интегрирования уравнения переноса вихря:

$$\left( E + \frac{\Delta t}{2} (\Lambda_x^+ + \Lambda_y^+) - \frac{\Delta t}{2 \text{Re}} (L_{xx}^+ + L_{yy}^+) \right) \omega^{n+1/2} =$$

$$= \left( E - \frac{\Delta t}{2} (\Lambda_x^- + \Lambda_y^-) + \frac{\Delta t}{2 \text{Re}} (L_{xx}^- + L_{yy}^-) \right) \omega^n;$$

$$\left( E + \frac{\Delta t}{2} (\Lambda_x^- + \Lambda_y^-) - \frac{\Delta t}{2 \text{Re}} (L_{xx}^- + L_{yy}^-) \right) \omega^{n+1} =$$

$$= \left( E - \frac{\Delta t}{2} (\Lambda_x^+ + \Lambda_y^+) + \frac{\Delta t}{2 \text{Re}} (L_{xx}^+ + L_{yy}^+) \right) \omega^{n+1/2}.$$

Обозначения разностных операторов, которые представлены в приведенной схеме, указаны в [1, 2]. При численном интегрировании уравнения для функции тока применяем разностную схему, описанную в работе [1].

*Алгоритм проведения расчета.* Построенная численная модель была реализована в виде пакета прикладных программ. Процедура расчета такая:

- **этап №1:** формируем вид расчетной области, задаем исходные параметры, определяющие массоперенос в очистном сооружении;
- **этап №2:** осуществляем расчет уравнения переноса вихря;
- **этап №3:** осуществляем расчет уравнения для функции тока;
- **этап №4:** осуществляем расчет поля скорости в очистном сооружении;
- **этап №5:** осуществляем расчет концентрации загрязнителя в очистном сооружении.

Необходимо отметить, что время решения задачи по оценке эффективности работы очистного сооружения на базе разработанной модели составляет порядка 15 с.

## Результаты

На рис. 1 показано распределение концентрации загрязнителя в отстойнике, который имеет два входа и два выхода (плановая модель).

Расчет было выполнено для отстойника, форма которого существенно отличается от классического варианта, а именно: в отстойнике расположены две горизонтальные пластины и одна поперечная. Эти пластины изменяют гидродинамику потока и влияют на эффектив-

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

ность очистки воды в сооружении. Оценку эффективности очистки осуществляют по концентрации загрязнителя на выходе из отстойника. Как видно из представленного рисунка, концентрация загрязнителя на выходе из сооружения составляет порядка 22–29 %.

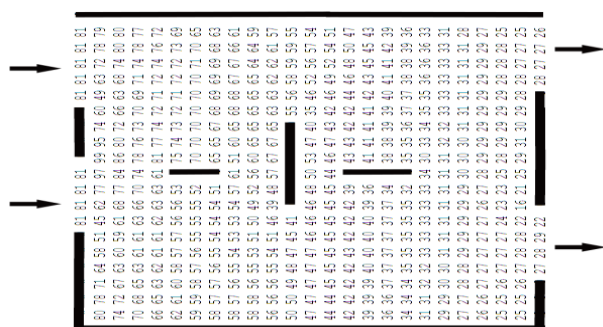


Рис. 1. Поле концентрации загрязнителя в отстойнике

Fig. 1. Pollutant concentration field in the settler

### Научная новизна и практическая значимость

Разработана CFD-модель для расчета концентрации загрязнителя в сооружении используется для очистки сточных вод (отстойнике). Моделирующими уравнениями являются уравнения Навье–Стокса (для расчета гидродинамики течения в очистном сооружении) и двухмерное уравнение массопереноса, учитывающее конвективную и диффузионную составляющие переноса. Модель может быть использована для проведения серийных расчетов при проектировании новых очистных сооружений.

### Выводы

В статье представлено описание эффективной CFD-модели, разработанной для расчета гидродинамики течения и массопереноса загрязнителя в отстойнике. Для решения задачи использованы фундаментальные двухмерные уравнения механики сплошной среды. Последующие работы в этой области будут связаны с разработкой гидродинамической 3D-модели.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Беляев Н. Н., Козачина В. А. *Математическое моделирование массопереноса в горизонтальных отстойниках* : монография. Днепропетровск : Акцент ПП, 2015. 115 с.
2. Беляев Н. Н., Нагорная Е. К. *Математическое моделирование массопереноса в отстойниках систем водоотведения* : монография. Днепропетровск : Новая идеология, 2012. 112 с.
3. Колобанов С. К., Ершов А. В., Кигель М. Е. *Проектирование очистных сооружений канализации*. Киев : Будівельник, 1997. 224 с.
4. Олейник Я. А., Калугин Ю. И., Степовая Н. Г., Зябликов С. М. Теоретический анализ процессов осаждения в системах биологической очистки сточных вод. *Прикладна гідромеханіка*. 2004. Т. 6 (78), № 4. С. 62–67.
5. Олійник О. Я., Айрапетян Т. С. Моделивання очисних стічних вод від органічних забруднень в біореакторах-аеротенках зі зваженим (вільно плаваючим) і закріпленим біоценозом. *Доповідь НАН України*. 2015. № 5. С. 55–60. DOI: <https://doi.org/10/15407/dopovidi2015.05.055>
6. Biliaiev M. M., Kozachyna V. A. Numerical determination of horizontal settlers performance. *Наука та прогрес транспорту*. 2015. № 4 (58). P. 34–43. DOI: <https://doi.org/10.15802/STP2015/49201>
7. Hadad H., Ghaderi J. Numerical Simulation of the Flow Pattern in the Aeration Tank of Sewage Treatment System by the Activated Sludge Process Using Fluent Program. *Biological Forum – An International Journal*. 2015. Vol. 7 (1). P. 382–393.
8. Luna F. D., Silva A. G., Fukumasu N. K., Bazan O., Gouveia J. H. A., Moraes D., ... Vianna A. S. Fluid dynamics in continuous settler. *Chemical Engineering Journal*. 2019. Vol. 362. P. 712–720. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.01.088>
9. Misra A., de Souza L. G. M., Illner M., Hohl L., Kraume M., Repke J.-U., Thévenin D. Simulating separation of a multiphase liquid-liquid system in a horizontal settler by CFD. *Chemical Engineering Science*. 2017. Vol. 167. P. 242–250. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.03.062>

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

10. Panda S. K., Singh K. K., Shenoy K. T., Buwa V. V. Numerical simulations of liquid-liquid flow in a continuous gravity settler using OpenFOAM and experimental verification. *Chemical Engineering Journal*. 2017. Vol. 310. P. 120–133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.10.102>
11. Thaker A. H., Darekar M., Singh K. K., Buwa V. V. Experimental investigations of liquid-liquid disengagement in a continuous gravity settler. *Chemical Engineering Research and Design*. 2018. Vol. 139. P. 174–187. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.09.031>
12. Zhang H., Zheng S., Zhang X., Duan S., Li S. Optimizing the inclined plate settler for a high-rate microaerobic activated sludge process for domestic wastewater treatment : A theoretical model and experimental validation. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2020. Vol. 154. P. 105060. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2020.105060>

В. А. КОЗАЧИНА<sup>1\*</sup>, О. В. ГРОМОВА<sup>2</sup>, О. Ю. ГУНЬКО<sup>3</sup>, Л. Г. ТАТАРКО<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта [v.kozachyna@gmail.com](mailto:v.kozachyna@gmail.com), ORCID 0000-0002-6894-5532

<sup>2</sup>Каф. «Архітектурне проектування, землеустрій та будівельні матеріали», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (095) 304 73 33, ел. пошта [Gromova\\_Elen\\_upbbm\\_diiit@i.ua](mailto:Gromova_Elen_upbbm_diiit@i.ua), ORCID 0000-0002-5149-4165

<sup>3</sup>Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта [water.supply.treatment@gmail.com](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCID 0000-0001-9257-763X

<sup>4</sup>Каф. «Енергетика», Український державний хіміко-технологічний університет, пр. Гагаріна, 8, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 753 56 38, ел. пошта [larisa.tatarcko@gmail.com](mailto:larisa.tatarcko@gmail.com), ORCID 0000-0002-2080-6090

## МОДЕЛЮВАННЯ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД НА БАЗІ CFD-МОДЕЛІ: ЕКСПРЕС-РОЗРАХУНОК

**Мета.** У роботі передбачено розробку CFD-моделі для оцінки ефективності очищення стічних вод у горизонтальному відстійнику. CFD-модель може бути використана для розрахунку гідродинаміки течії і масопереносу в споруді, що мають складну геометричну форму в області руху потоку стічних вод. **Методика.** Для чисельного моделювання процесу руху стічних вод у горизонтальному відстійнику використано дві математичні моделі. Перша модель застосована на рівняннях руху в'язкої нестисливої рідини – рівняннях Нав'є–Стокса. Ці рівняння записано у змінних «завихреність – функція потоку». Для розрахунку концентрації забруднювача в горизонтальному відстійнику використано двовимірне рівняння масопереносу. Для чисельного інтегрування цього рівняння застосовано кінцево-різницеву схему розщеплення. Розщеплення моделювального рівняння масопереносу проведено так, щоб на кожному дробовому кроці невідоме значення концентрації забруднювача визначати за явною формулою. Для чисельного інтегрування рівняння переносу вихору та рівняння для функції потоку (система рівнянь Нав'є–Стокса) використано кінцево-різницеви схеми розщеплення. **Результати.** На базі розробленої CFD-моделі створено комплекс комп'ютерних програм, що дозволяє визначати ефективність очищення води в горизонтальному відстійнику. Представлено результати проведеного обчислювального експерименту з оцінки ефективності очищення води у відстійнику з додатковими елементами у вигляді пластин. **Наукова новизна.** Створено ефективну CFD-модель, що дозволяє оперативно оцінювати ефективність очищення стічних вод у горизонтальному відстійнику з додатковими елементами. Ця модель враховує геометричну форму очисної споруди та найбільш значущі фізичні фактори, які впливають на ефективність очищення води в горизонтальних відстійниках: нерівномірне поле швидкості потоку стічних вод, процеси дифузії, різне положення вхідних і вихідних отворів очисної споруди. **Практична значимість.** Побудована CFD-модель належить до класу «діагностичних моделей» і може бути використана для оцінки ефективності очисних споруд на етапі їх ескізного проектування.

*Ключові слова:* очищення стічних вод; чисельне моделювання; горизонтальний відстійник

V. A. KOZACHYNA<sup>1\*</sup>, O. V. HROMOVA<sup>2</sup>, O. Y. HUNKO<sup>3</sup>, L. H. TATARKO<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup>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) 373 15 09, e-mail v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

<sup>2</sup>Dep. «Architectural Design, Land Management and Building Materials», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (095) 304 73 33, e-mail Gromova\_Elen\_upbbm\_diiit@i.ua, ORCID 0000-0002-5149-4165

<sup>3</sup>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) 373 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0001-9257-763X

<sup>4</sup>Dep. «Energy», Ukrainian State University of Chemical Technology, Haharina Av., 8, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 753 56 38, e-mail larisa.tatarko@gmail.com, ORCID 0000-0002-2080-6090

## SIMULATION OF WASTE WATER TREATMENT BASED ON CFD MODEL: EXPRESS CALCULATION

**Purpose.** Development of CFD model to evaluate the efficiency of wastewater treatment in a horizontal settler. The CFD model can be used to calculate flow hydrodynamics and mass transfer in settlers with complex geometric shape in the area of wastewater flow. **Methodology.** For numerical simulation of the process of wastewater movement in a horizontal settler, two mathematical models are used. The first model is based on the motion equations of a viscous incompressible fluid – the Navier-Stokes equations. The Navier-Stokes equations are written in the variables «vorticity - flow function». A two-dimensional mass transfer equation is used to calculate the concentration of a pollutant in a horizontal settler. To numerically integrate the two-dimensional mass transfer equation, a finite-difference splitting scheme is used. The splitting of the modeling equation of mass transfer is carried out so that at each fractional step to determine the unknown value of the pollutant concentration by an explicit formula. For numerical integration of the vortex transfer equation and the equation for the flow function (the Navier-Stokes system of equations), finite-difference splitting schemes are used. **Findings.** Based on the developed CFD model, a complex of computer programs has been developed, which makes it possible to determine the efficiency of water treatment in a horizontal settler with additional elements. The results of a computational experiment to assess the efficiency of water treatment in a horizontal settler with additional elements in the form of plates are presented. **Originality.** An efficient CFD model has been created, which allows to quickly evaluate the efficiency of wastewater treatment in a horizontal settler with additional elements. The developed CFD model takes into account the geometric shape of the facility and the most significant physical factors, that influence the efficiency of the waste water treatment in horizontal settler: non-uniform flow velocity, diffusion, different position of inlet and outlet openings. **Practical value.** The developed CFD model belongs to the class of «diagnostic models» and can be used to assess the efficiency of treatment facilities at the stage of their preliminary design.

*Keywords:* waste waters treatment; numerical simulation; horizontal settler

### LIST OF REFERENCE LINKS

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. Kolobanov, S. K., Yershov, A. V., & Kigel, M. Ye. (1997). *Proektirovaniye ochistnykh sooruzheniy kanalizatsii*. Kiev: Budivelnik. (in Russian)
4. Oleynik, Ya. A., Kalugin, Yu. I., Stepovaya, N. G., & Zyablikov, S. M. (2004). Teoreticheskiy analiz protsessov osazhdeniya v sistemakh biologicheskoy ochistki stochnykh vod. *Prikladna gidromekhanika*, 6(78(4)), 62-67. (in Russian)
5. Oleynik, A. Y., & Airapetyan, T. S. (2015). The modeling of the clearance of waste waters from organic pollutants 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)

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

6. Biliaiev, M. M., & Kozachyna, V. A. (2015). Numerical determination of horizontal settlers performance. *Science and Transport Progress*, 4(58), 34-43. DOI: <https://doi.org/10.15802/STP2015/49201> (in English)
7. Hadad, H., & Ghaderi, J. (2015). Numerical Simulation of the Flow Pattern in the Aeration Tank of Sewage Treatment System by the Activated Sludge Process Using Fluent Program. *Biological Forum-An International Journal*, 7(1), 382-393. (in English)
8. Luna, F. D. ., Silva, A. G., Fukumasu, N. K., Bazan, O., Gouveia, J. H. A., Moraes, D., ... & Vianna, A. S. (2019). Fluid dynamics in continuous settler. *Chemical Engineering Journal*, 362, 712-720. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.01.088> (in English)
9. Misra, A., de Souza, L. G. M., Illner, M., Hohl, L., Kraume, M., Repke, J.-U., & Thévenin, D. (2017). Simulating separation of a multiphase liquid-liquid system in a horizontal settler by CFD. *Chemical Engineering Science*, 167, 242-250. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.03.062> (in English)
10. Panda, S. K., Singh, K. K., Shenoy, K. T., & Buwa, V. V. (2017). Numerical simulations of liquid-liquid flow in a continuous gravity settler using OpenFOAM and experimental verification. *Chemical Engineering Journal*, 310, 120-133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.10.102> (in English)
11. Thaker, A. H., Darekar, M., Singh, K. K., & Buwa, V. V. (2018). Experimental investigations of liquid-liquid disengagement in a continuous gravity settler. *Chemical Engineering Research and Design*, 139, 174-187. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.09.031> (in English)
12. Zhang, H., Zheng, S., Zhang, X., Duan, S., & Li, S. (2020). Optimizing the inclined plate settler for a high-rate microaerobic activated sludge process for domestic wastewater treatment: A theoretical model and experimental validation. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 154, 105060. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2020.105060> (in English)

Поступила в редколлегию: 05.06.2020

Принята к печати: 06.10.2020

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

УДК 656.073.433

Я. В. ЛІТВІНОВА<sup>1</sup>, О. Д. БАРАНОВСЬКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Управління на транспорті», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 744 62 11, ел. пошта litvinovayana87@gmail.com, ORCID 0000-0003-2806-4076

<sup>2</sup>Каф. «Управління на транспорті», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 744 62 11, ел. пошта enkvaerhs@gmail.com, ORCID 0000-0001-9856-5621

### ПОШУК ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ТАРНО-ШТУЧНИХ ВАНТАЖІВ

**Мета.** За основну мету автори ставлять визначення та методичне обґрунтування шляхів підвищення ефективності перевезень тарно-штучних вантажів, які б забезпечили збільшення прибутку автотранспортного підприємства та якісне обслуговування клієнтів підприємства–виробника. **Методика.** У процесі дослідження було використано: метод теоретичного узагальнення та систематизації – для визначення особливостей формування раціональних маршрутів перевезень вантажів у різних умовах; аналітичний метод – для визначення факторів, що впливають на доцільність прийняття певної стратегії автотранспортного підприємства з метою підвищення ефективності перевезень; метод порівняння – для аналізу стратегій підвищення ефективності перевезень вантажів автотранспортного підприємства у випадку використання маршрутів різного типу. **Результати.** Визначено взаємозв'язок між ефективністю організаційної структури управління виробничого підприємства та ймовірною проблематикою під час вибору типу маршруту доставки вантажів клієнтам. Автори довели, що ефективність перевезень тарно-штучних вантажів залежить від правильно визначеної стратегії підвищення ефективності автотранспортних перевезень. На підставі проведеного дослідження оцінено вплив економічних та організаційних чинників на доцільність рішення щодо раціональної стратегії забезпечення ефективності перевезень. Запропоновано три типи стратегій, зміст яких відбивається в отриманні додаткового прибутку автотранспортним підприємством від виробничого підприємства. У разі використання маятникових маршрутів за рахунок економії їх ресурсів (повернення зворотної тари) та за рахунок знаходження вантажу на зворотному шляху, а також у випадку використання розвізно-збірних маршрутів для мінімізації штрафів за несвоєчасну доставку вантажів. Візуалізація залежності величини обсягу прибутку автотранспортного підприємства від типу прийнятої стратегії дозволяє оцінити перспективність впровадження певних типів маршрутів руху вантажного автотранспорту. **Наукова новизна.** У роботі набули подальшого розвитку методичні підходи до обґрунтування шляхів збільшення прибутку автотранспортного підприємства шляхом вибору раціональних маршрутів згідно зі стратегією підвищення ефективності перевезень тарно-штучних вантажів від виробника до клієнтів. **Практична значимість.** Отримані результати спрямовані на вдосконалення методичних підходів до оптимізації маршрутів перевезень тарно-штучних вантажів, що спираються на вибір маршрутів із двох типів: перший – маятниковий, який застосовують у разі одночасного надходження заявок на доставку вантажів, другий – розвізно-збірний, який враховує штрафи за несвоєчасну доставку.

**Ключові слова:** вантажні перевезення; маршрут руху автотранспорту; стратегія; прибуток; тарно-штучні вантажі; мережа розташування клієнтів

## Вступ

Розвиток економіки країни залежить від успішного функціонування різних галузей виробництва. Останні, у свою чергу, не можуть ефективно функціонувати без налагодженого транспортного процесу, як економічного та організаційного фактора досягнення цілей виробників тієї чи іншої продукції. Важливим питанням в організації ефективних перевезень тарно-штучних вантажів, особливо у випадку розгалуженої мережі клієнтів, є розробка раціональних маршрутів руху автотранспорту. Для багатьох автотранспортних підприємств, що займаються перевезенням тарно-штучних вантажів, значні відстані їх доставки до клієнтів – це досить розповсюджене явище. Для таких вантажів частіше використовують маятникові маршрути перевезень. Використання цих маршрутів обумовлене необхідністю одночасної відправки вантажів до клієнтів, які знаходяться в різних містах країни. Основний недолік застосування цього типу маршруту – порожні пробіги під час зворотного руху, вони значно підвищують собівартість перевізного процесу. Адже існує ситуація, коли перевізник не може завантажити зворотну тару і не має іншого замовлення на перевезення будь-якого вантажу. Тому для підприємств-виробників важливим є питання правильного вибору компанії перевізника, виходячи з технологічних та організаційних умов його роботи.

Враховуючи вищесказане, необхідно створювати умови для побудови маршрутних мереж із найбільшим скороченням порожніх пробігів, використанням автомобілів більшої вантажопідйомності та зниженням витратної частини бюджету транспортного підприємства. Питання набуває особливої актуальності у зв'язку з тим, що номенклатура продукції та місця її доставки до клієнтів є досить різноманітними, що потребує поглиблення методичних досліджень у напрямі підвищення ефективності тарно-штучних перевезень. З огляду на актуальність питання проаналізуємо публікації, що містять теоретичні та науково-методичні засади організації вантажних перевезень в Україні як важливу складову в забезпеченні ефективного господарювання автотранспортних підприємств.

Аналіз обсягів перевезень вантажів автотранспортом, у тому числі для промислових підприємств, свідчить, що сьогодні вони поступово відновлюються. Цей висновок буде значно відбиватися на збільшенні конкуренції серед перевізників у майбутньому [4].

Автор статті [3] стверджує, що стабільне функціонування транспортної системи забезпечує сприятливі умови для підвищення рівня ділової активності населення.

Сьогоднішні потреби у вантажних перевезеннях обумовили появу нових транспортних компаній, які надають ці послуги у міжміському сполученні. Потужні транспортні підприємства мають великий автопарк, який здійснює міжміські перевезення [5]. Ці підприємства працюють переважно на ринку постійних замовлень великих підприємств промислового сектора економіки, тому вони не є конкурентами середньому та малому бізнесу в транспортній сфері, що значно посилює конкурентну боротьбу серед них.

Діяльність перевізників під час міжміської доставки вантажів автотранспортом регулюється Законами України та нормативно-правовими актами, її розвиток спирається на результати багатьох наукових розробок. Так, наприклад, автор статті [10] звертає увагу на те, що під час розробки раціональних маршрутів необхідно враховувати низку факторів, що характеризують елементи технологічного процесу та забезпечують аналітичний опис взаємозв'язку між вхідними параметрами та критеріями ефективності у вигляді функціональних залежностей.

Питання формування раціональних маршрутів викладені в роботах [8, 12]. Думки вчених сходяться на тому, що розвиток ринку автотранспортних перевезень може бути ефективним тільки в разі обґрунтованого вибору раціонального виду транспорту та маршрутів доставки вантажів. Найбільш близько до вирішення питань перевезень вантажів підійшли вчені у працях [1, 2, 7]. Автори наголошують на тому, що технологічні параметри роботи автомобільного транспорту суттєво впливають на функціонування логістичної системи. У зв'язку з цим вони запропонували базову структуру визначення груп недоліків залежно від техніко-експлуатаційних показників роботи вантажного

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

автотранспорту під час планового обслуговування вантажних потоків.

Закордонні вчені багато уваги приділяють питанням складання раціональних маршрутів перевезення вантажів. Наприклад, пропонують використовувати стимуляційний шар, що забезпечує прогнозування стану трафіку та оцінку витрат через незбалансоване навантаження автомобільних доріг під час доставки вантажів [11, 13, 14].

Отже, аналіз теоретичних та методичних результатів досліджень, викладених у розглянутих науково-практичних публікаціях, показав, що багато авторів поділяють думки про важливість підтримки в належному стані логістичної системи та акцентують увагу на низці питань у забезпеченні цього процесу. Причини походження цих питань пов'язані з різними чинниками, але найбільш поширеними є використання нераціональних маршрутів перевезень вантажів.

### Мета

За основну мету автори ставлять визначення та методичне обґрунтування шляхів підвищення ефективності перевезень тарно-штучних вантажів, які б забезпечили збільшення прибутку автотранспортного підприємства та якісне обслуговування клієнтів підприємства–виробника.

### Методика

Відповідно до мети статті в основі наукового дослідження лежить припущення, що під час планування ефективних маршрутів перевезень вантажів слід виходити з того, що використання розвізно-збірного маршруту, який зазвичай характеризується надмірно далекими відстанями перевезень у разі розгалуженого розташування клієнтів, може бути більш вигідним, ніж застосування маятникових. Для доведення чи спростування припущення сформульована мета та визначенні методи її досягнення.

Виконано огляд теоретичних засад щодо тенденцій у сфері побудови та використання ефективних маршрутів перевезень вантажів, для чого використано різноманітні електронні ресурси та наукові бібліотеки. За допомогою методів емпіричного пізнання як ефективного способу аналізу розрізнених уявлень про зако-

номірності природи, суспільства, мислення тощо, а саме теоретичного узагальнення та систематизації, було проаналізовано праці відомих учених у сфері транспортних технологій, які свідчать про непереребільшену роль якості процесу надання послуг із перевезень вантажів. Також вони відзначають, що ефективність маршрутів перевезень вантажів суттєво залежить від обґрунтованого вибору раціонального виду транспорту та використання сучасних технічних засобів прогнозування інтенсивності руху та оцінки збитків від незбалансованого навантаження шляхів під час доставки вантажів. На тлі визначених недоліків наявного становища та проблематики складання раціональних маршрутів доставки вантажів визначена мета дослідження та окреслені методи для її досягнення. Наступним методом досягнення мети є аналітичний, реалізація якого дозволить знайти підходи до підвищення ефективності перевезень вантажів. За допомогою аналітичного методу, а також методу порівняння, використання якого дозволяє виявити спільні риси й відмінності, визначено та порівняно фактори, що впливають на прийняття рішення щодо обрання стратегії підвищення ефективності перевезень вантажів автотранспортного підприємства у випадку використання маршрутів різного типу.

### Результати

Підвищення ефективності перевезень вантажів безпосередньо залежить від вибору типу маршруту, який повинен забезпечувати раціональний обсяг перевезень та необхідну кількість рухомого складу [6]. Найбільш поширеними типами маршрутів є маятниковий, кільцевий та розвізно-збірний. Як зазначалось вище, найраціональнішим є використання маяткового типу маршруту зі зворотним навантаженим пробігом. Притаманними рисами маяткового маршруту є однорідний вантаж та час рейсу по маршруту, який не повинен бути більшим, ніж час у наряді. Не меншою популярністю користуються кільцеві маршрути, які характеризуються тим, що сумарний пробіг із вантажем за рейс в обох напрямках на маршруті повинен бути більшим за суму порожніх пробігів за той же рейс. Використання розвізно-збірного маршруту характеризується тим, що під час розвантаження вантажів відбувається

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

одночасно навантаження інших в одних і тих же пунктах. Він являє собою сукупність двох вищерозглянутих маршрутів. Особливістю цього маршруту є обмежений обсяг вантажу, який перевозять на надмірно далекі відстані, під якими розуміються значні відстані, які долає перевізник. Це пояснюється тим, що в сучасних умовах господарювання мережа клієнтів є розгалуженою, а внаслідок одночасного надходження заявок на доставку вантажу перевізнику доводиться долати значні відстані (з останнього пункту маршруту до пункту відправлення). Перед власником вантажу досить часто постає складне питання щодо вибору транспортної компанії, а саме питання, за якими чинниками відбувається вибір маршруту для доставки вантажу та у які строки. Зачасту пошук маршруту відбувається з урахуванням місцезнаходження клієнтів, а відповідно до цього, за розгалуженої мережі розташування клієнтів та одночасності надходження заявок, обирають маятникові маршрути.

Автори статті пропонують переглянути усталений підхід та обґрунтувати вибір розвізно-збірного маршруту в разі зазначеного розташування клієнтів (штрихпунктирна лінія на рис. 1). Прийняття рішення відбувається в умовах, з одного боку, значних відстаней між місцезнаходженням клієнтів, які є надмірно далекими, та наявності штрафів за несвочасну доставку вантажів (розвезення виконують послідовно, і доставка вантажу в останні пункти клієнтам може відбутись зі значним запізненням), а з іншого – можливості досягти економічного ефекту за рахунок зменшення кількості одиниць рухомого складу та скорочення загального пробігу за рейс в обох напрямках ван-

тажних автотранспортних засобів транспортної компанії (рис. 1). Для обґрунтування зазначеного підходу розглянемо відповідний приклад проекту перевезень кабельної продукції у дерев'яних барабанах. Припустимо, що підприємство–виробник знаходиться у м. Івано-Франківськ, а умовні клієнти – у містах Маріуполь, Суми та Житомир (рис. 2). Виробниче підприємство можна охарактеризувати як таке, що випускає широку номенклатуру продукції та не має в структурі логістичного підрозділу, що відбивається на збільшенні повноважень менеджерів зі збуту під час самостійного пошуку відповідних перевізників. На таких виробничих підприємствах досить часто застосовують дивізіональний тип організаційної структури управління. Це пов'язано з тим, що ці структури є досконалішим різновидом організаційних структур ієрархічного типу [9]. Наявна організаційна структура управління має переваги з точки зору ефективності розвитку ланок виробництва різних видів продукції, але через неузгодженість рішень менеджерів зі збуту щодо відправки продукції до клієнтів з'являються значні транспортні витрати, що впливають на зниження рівня конкурентоспроможності та збільшення собівартості продукції. Тобто менеджер зі збуту продукції «А» сам обирає, яким транспортним засобом перевозити її до клієнта. Відповідно й інші менеджери, проявляючи певну самостійність, організують доставку свого виду продукції. У зв'язку з відсутністю взаємодії між виробниками різних видів продукції процес доставки вантажів стає витратним і негативно впливає на ефективність.

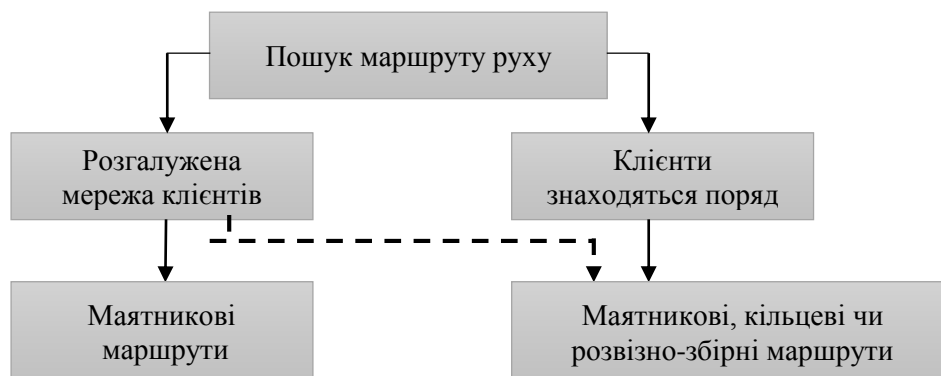


Рис. 1. Схема прийняття рішення щодо вибору типу маршруту

Fig. 1. Scheme of decision-making on the route type choice



Рис. 2. Схематичне розташування клієнтів підприємства-виробника

Fig. 2. Schematic location of customers of the manufacturer

Найбільш близько до питання вибору стратегії поведінки вантажовласників підійшли вчені в роботах [8, 9]. На основі розроблених засад можливо визначити прибуток для кожного з розглянутих рішень перевізника у випадку обслуговування разових замовлень на перевезення вантажів між двома та більше пунктами. Але питання розглянуто в площині обслуговування разових замовлень та без прив'язки до конкретного підприємства-виробника, що потребує подальшого розвитку.

Для визначення умов перевезень тарноштучних вантажів від вантажовласників до клієнтів розглянемо вихідні дані проекту. Для доставки за маятниковими маршрутами використовують автомобілі МАЗ вантажопідйомністю 7–10 т, у разі використання розвізно-збірних маршрутів – автомобілі «Reno Magnum 440» вантажопідйомністю 20 т з відповідною тарифною політикою. Для прийняття рішення щодо підвищення ефективності процесу перевезень, можна виділити такі варіанти: дві групи маршрутів, маятникових та розвізно-збірних, які у свою чергу поділяються на ще два.

Перший варіант реалізації проекту можна характеризувати так: перевізник для доставки продукції використовує, відповідно до складених договорів, три автомобілі МАЗ. Кожен

з них прямує до пункту розвантаження та у зворотному напрямку, що відповідно до розташування клієнтів призводить до значного пробігу (приблизно 5 170 км). Автомобілі повертаються з пункту розвантаження до пункту завантаження або з вантажем, або без нього, залежно від того, чи була звільнена тара (дерев'яні барабани). У випадку, коли перевізник може забрати зворотну тару, його прибуток за поїздки можна визначити за формулою:

$$\Pi_{1,1} = \sum_{m=1}^n L_{ij}(t_{ij} - v_{ij}) + D_6 - \sum_{m=1}^n L_{ji}v_{ji}, \quad (1)$$

де  $L_{ij}$ ,  $L_{ji}$  – відстань доставки вантажів клієнтам відповідно між  $i$ -тим і  $j$ -тим пунктами, км;  $t_{ij}$  – тариф на доставку вантажів між  $i$ -тим і  $j$ -тим пунктами, грн/км;  $D_6$  – бонуси, які виплачує підприємство-виробник за доставку дерев'яних барабанів до підприємства-виробника для подальших партій поставок кабельної продукції, грн;  $v_{ij}$ ,  $v_{ji}$  – відповідно витрати на поїздки з вантажем та без нього (чи зі зворотною тарою) між  $i$ -тим і  $j$ -тим пунктами, грн/км.

У випадку, якщо на зворотному шляху є вантаж, прибуток  $\Pi_{1,2}$  можна визначити за формулою:

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

$$\Pi_{1,2} = \sum_{m=1}^n L_{ij}(t_{ij} - v_{ij}) + \sum_{m=1}^n L_{ji}(t_{ji} - v_{ji}), \quad (2)$$

де  $t_{ji}$  – тариф на доставку вантажів між  $j$ -тим і  $i$ -тим пунктами, грн/км.

Прибуток у випадку використання стратегії  $\Pi_{1,2}$  визначаються за формулою (2), він є значно меншим, оскільки на зворотному шляху транспорт рухається без вантажу.

У разі використання розвізно-збірної маршруту (другий варіант), особливість якого полягає в тому, що відповідно до заявок клієнтів використовують один автотранспортний засіб замість трьох, прибуток буде збільшений від скорочення загального пробігу за маршрутом. Але є і чинники, які можуть суттєво його зменшити. По-перше, у випадку розвантаження дерев'яних барабанів у першому пункті та незавантаження порожніх із попередніх партій досить складно знайти вантаж на зворотній шлях, щоб за параметрами підходив замість вивантаженого дерев'яного барабана. По-друге, заявки на отримання необхідного клієнтам вантажу можуть надходити одночасно, тому, враховуючи специфіку розвізно-збірної маршруту, є ризик отримання штрафів за порушення термінів доставки продукції. Також за рахунок варіанта послідовності розвантаження вантажу можна впливати на рівень прибутку. Прибуток описують за формулою:

$$\Pi_{2,1} = L_v(t_v - v_v) + L_h(t_h - v_h) - \sum \text{Ш} \quad (3)$$

де  $L_v$ ,  $L_h$  – відстань маршруту з вантажем та без нього, км;  $t_v$ ,  $t_h$  – тариф поїздки з вантажем та без нього, грн/км;  $\sum \text{Ш}$  – штрафи за несвоєчасну доставку вантажів, грн;  $v_v$ ,  $v_h$  – витрати на поїздки з вантажем та без нього, грн/км.

Прибуток  $\Pi_{2,2}$ , рівень якого залежить від послідовності розвантаження вантажів, також розраховують за формулою (3). Визначальним параметром для прийняття рішень щодо співпраці з відповідними автотранспортними підприємствами є тип маршруту, за яким прибуток буде більшим, виходячи зі значних порожніх

пробігів, бонусів за повернення зворотної тари, витрат на доставку та сум штрафів за порушення договорів.

Систему обмежень під час визначення стратегії підвищення ефективності перевезень визначаються за формулою:

$$\begin{cases} v_h \rightarrow \min \\ \sum \text{Ш} < \Pi_{\min} \end{cases}, \quad (4)$$

де  $\Pi_{\min}$  – мінімальний рівень прибутку, на який розраховує підприємство, грн.

На основі наведених стратегій підвищення ефективності перевезень визначимо найбільш ефективну. Побудуємо графічне зображення цього процесу в разі середньостатистичному замовлення вантажу у 20 т (рис. 3).

З аналізу рис. 3 випливає, що найбільший вплив на зниження прибутку автотранспортної компанії має використання маятникових маршрутів. Це відбувається за рахунок значного порожнього пробігу вантажного автомобіля. Ці маршрути, відповідно до системи обмежень (4), під час вибору схеми маршруту можна не розглядати. Далі необхідно вибрати, який серед маршрутів групи 2 є найбільш привабливим із точки зору отримання більшого прибутку. Тобто необхідно визначити, який вплив на визначені умови має вибір схеми маршруту для перевезення кабельної продукції. Під час аналізу показників загального пробігу за один рейс у двох напрямках, отриманих за кожною зі стратегій другої групи, встановлено, що зазначений пробіг у разі використання розвізно-збірної маршруту становить 2 384 км. За рахунок оптимальної послідовності розвезення вантажів отримуємо меншу кількість штрафів за рейс, а відтак обираємо стратегію підвищення ефективності перевезень вантажів із розрахунком прибутку  $\Pi_{2,1}$  за формулою (3). Також помічено залежність між прибутком автотранспортного підприємства та показником загального пробігу за рейсом в обох напрямках із вантажем: зі збільшенням пробігу з вантажем прибуток перевізника збільшується.

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

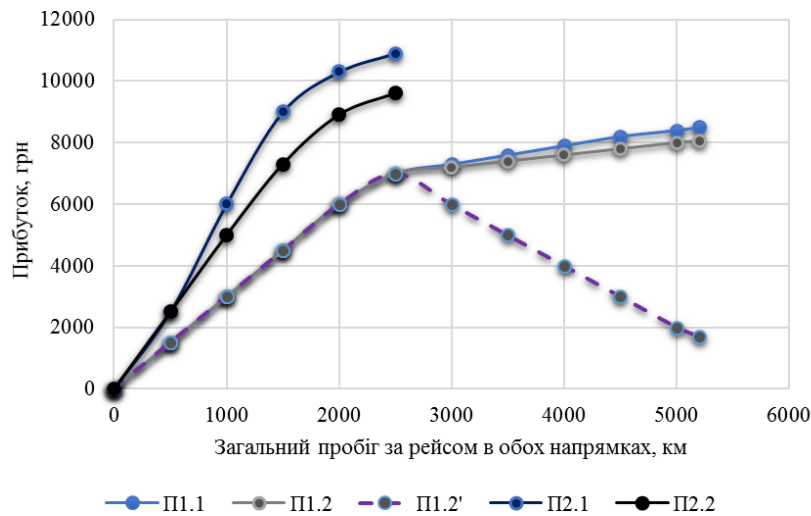


Рис. 3. Залежність прибутку компанії під час перевезення партії вантажів від загального пробігу транспортних засобів за різних схем маршрутів відповідно до стратегій

Fig. 3. Dependence of the company's profit during transportation of a consignment of goods on the total run of vehicles on different route schemes according to strategies

### Наукова новизна та практична значимість

У роботі набули подальшого розвитку методичні підходи до обґрунтування шляхів збільшення прибутку автотранспортного підприємства шляхом вибору раціональних маршрутів згідно зі стратегією підвищення ефективності перевезень тарно-штучних вантажів від виробника до клієнтів. Отримані результати спрямовані на вдосконалення методичних підходів підвищення ефективності перевезень тарно-штучних вантажів, які враховують вибір із двох типів маршрутів: маятникових, які застосовують у разі одночасності надходження заявок на доставку тарно-штучних вантажів, та розвізно-збірних, але з урахуванням наявності штрафів за несвоєчасну доставку.

### Висновки

Визначено, що внаслідок неефективного вирішення питань доставки продукції менеджерами зі збуту виробничого підприємства існує низка проблем. Вони віддзеркалюються у ймовірній проблематиці під час вибору типу маршруту доставки вантажів клієнтам та у зниженні якості обслуговування клієнтів підприємства-виробника.

Для вибору раціонального типу маршруту, відповідно до характеристик використання тих чи інших маршрутів, встановлено, що вибір здійснюється між двома типами – маятниковим маршрутом за значних холостих пробігів, але з наявністю бонусів, якими підприємство-виробник мотивує автотранспортну компанію до перевезення його зворотної тари, та розвізно-збірним, переваги якого відбиваються у значному скороченні загального пробігу вантажного автотранспорту та кількості вантажних автотранспортних засобів, а недоліки – у наявності штрафів у випадку несвоєчасної доставки вантажів до клієнтів. Для проекту, розглянутого в дослідженні, скорочення довжини маршруту за рахунок використання розвізно-збірного маршруту з оптимальною послідовністю розвезення вантажів та розрахунком прибутку за варіантом  $P_{2.1}$  сягає 2 786 км, а зменшення кількості вантажних автомобілів – із трьох до одного.

Автори довели, що ефективність перевезень тарно-штучних вантажів залежить від правильно визначеної стратегії підвищення ефективності автотранспортних перевезень, за якою обрано раціональну транспортно-технологічну схему доставки вантажів у міжміському сполученні. Визначено та графічно інтерпретовано залежність прибутку підприємства від загального пробігу вантажних автотранспортних засобів за рейсом у двох напрямках.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Горбачов П. Ф., Мосьпан Н. В. Формалізація процесу обслуговування разових замовлень на перевезення вантажів у міжміському сполученні. *Вісник ХНАДУ*. 2016. Вип. 72. С. 66–74.
2. Горбачов П. Ф., Наглюк І. С., Макарічев О. В., Мосьпан Н. В. Оцінка ефективності стратегій перевізників з обслуговування разових замовлень на міжміські вантажоперевезення. *Автомобільний транспорт*. 2015. Вип. 37. С. 61–69.
3. Данилків Х. П., Горбова Х. В., Побурко О. Я. Інноваційний розвиток транспортної системи України. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2018. Т. 28, № 4. С. 31–35. DOI: <https://doi.org/10.15421/40280405>
4. Державна служба статистики України. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 10.09.2020).
5. *Діяльність суб'єктів великого, середнього, малого та мікробізнесу* / за ред. М. Кузнецової. Державна служба статистики України : статистичний збірник. Київ, 2019. 139 с.
6. Запара В. М., Продашук С. М., Кравець А. Л. *Транспортно-експедиторська діяльність* : навч. посіб. Харків : УкрДУЗТ, 2017. 214 с.
7. Нагорний Є. В., Шраменко Н. Ю. Аналіз критеріїв ефективності функціонування логістичних систем при доставці вантажів. *Наукові нотатки*. 2010. Вип. 28. С. 353–357.
8. Нагорний Є. В., Шуліка О. О., Вітюк Д. О. Формалізація задачі вибору технології транспортно-експедиторського обслуговування вантажовласників у міжміському сполученні. *Комунальне господарство міст*. 2019. Т. 6, Вип. 152. С. 185–190.
9. Шорохов В. В. Порівняльний аналіз лінійно-функціональної та дивізійної організаційних структур управління. *Ефективність державного управління*. 2015. Вип. 43. С. 201–210.
10. Naumov V., Omelchenko T. Model of the Delivery Routes Forming Process as a Service Provided by Forwarding Companies. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 187. P. 167–172. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.362>
11. Petraška A., Čižiūnienė K., Prentkovskis O., Jarašūnienė A. Methodology of Selection of Heavy and Oversized Freight Transportation System. *Transport and Telecommunication Journal*. 2018. Vol. 19. Iss. 1. P. 45–58. DOI: <http://doi.org/10.2478/tj-2018-0005>
12. Vojtov V., Berezchnaja N., Kravcov A., Volkova T. Evaluation of the Reliability of Transport Service of Logistics Chains. *International Journal of Engineering and Technology*. 2018. Vol. 7. Iss. 4.3. P. 270–274. DOI: <http://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19802>
13. Ziebuhr M., Kopfer H. (2016). Solving an integrated operational transportation planning problem with forwarding limitations. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*. 2016. Vol. 87. P. 149–166. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.tre.2016.01.006>
14. Zhao Y., Ioannou P. A., Dessouky M. M. Dynamic Multimodal Freight Routing Using a Co-Simulation Optimization Approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2018. Vol. 20. Iss. 7. P. 2657–2667. DOI: <http://doi.org/10.1109/tits.2018.2871946>

Я. В. ЛИТВИНОВА<sup>1</sup>, О. Д. БАРАНОВСКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Управление на транспорте», Национальный технический университет, «Днепропетровская политехника», просп. Д. Яворницкого, 19, Днепро, 49005, тел. +38 (056) 744 62 11, эл. почта [litvinovayana87@gmail.com](mailto:litvinovayana87@gmail.com), ORCID 0000-0003-2806-4076

<sup>2</sup>Каф. «Управление на транспорте», Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», просп. Д. Яворницкого, 19, Днепро, 49005, тел. +38 (056) 744 62 11, эл. почта [enkvaerhs@gmail.com](mailto:enkvaerhs@gmail.com), ORCID 0000-0001-9856-5621

## ПОИСК И ОБОСНОВАНИЕ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕВОЗОК ТАРНО-ШТУЧНЫХ ГРУЗОВ

**Цель.** В качестве основной цели авторы предусматривают определение и методическое обоснование путей повышения эффективности перевозок тарно-штучных грузов, которые бы обеспечили увеличение прибыли автотранспортного предприятия и качественное обслуживание клиентов предприятия–производителя. **Методика.** В процессе исследования были использованы: метод теоретического обобщения и систематизации – для определения особенностей формирования рациональных маршрутов грузовых перевозок в раз-

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

личных условиях; аналитический метод – для определения факторов, влияющих на целесообразность принятия определенной стратегии автотранспортного предприятия для повышения эффективности перевозок; метод сравнения – для анализа стратегий повышения эффективности перевозок грузов автотранспортного предприятия при использовании маршрутов разного типа. **Результаты.** Определена взаимосвязь между эффективностью организационной структуры управления производственного предприятия и вероятной проблематикой при выборе типа маршрута доставки грузов клиентам. Авторы доказали, что эффективность перевозок тарно-штучных грузов зависит от правильно определенной стратегии повышения эффективности автотранспортных перевозок. На основании проведенного исследования оценено влияние экономических и организационных факторов на целесообразность решения по рациональной стратегии обеспечения эффективности перевозок. Предложено три типа стратегий, содержание которых отражается в получении дополнительной прибыли автотранспортным предприятием от производственного предприятия: при использовании маятниковых маршрутов за счет экономии его ресурсов (возврат обратной тары) и за счет нахождения груза на обратном пути, а также в случае использования развозочно-сборных маршрутов при минимизации штрафов за несвоевременную доставку грузов. Визуализация зависимости величины объема прибыли автотранспортного предприятия от типа принятой стратегии позволяет оценить перспективность внедрения определенных типов маршрутов движения грузового автотранспорта. **Научная новизна.** В работе получили дальнейшее развитие методические подходы к обоснованию путей увеличения прибыли автотранспортного предприятия путем выбора рациональных маршрутов согласно стратегии повышения эффективности перевозок тарно-штучных грузов от производителя к клиентам. **Практическая значимость.** Полученные результаты направлены на совершенствование методических подходов к оптимизации маршрутов перевозок тарно-штучных грузов, опирающихся на выбор маршрутов из двух типов: первый – маятниковый, который используют при одновременном поступлении заявок на доставку грузов, второй – развозочно-сборный, учитывающий штрафы за несвоевременную их доставку.

*Ключевые слова:* грузовые перевозки; маршрут движения автотранспорта; стратегия; прибыль; тарно-штучные грузы; сеть расположения клиентов

Y. V. LITVINOVA<sup>1</sup>, O. D. BARANOVSKY<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dep. «Transport Management», Dnipro University of Technology, Dniprovsk Polytechnic, D. Yavornytskoho St., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 744 62 11, e-mail litvinovayana87@gmail.com, ORCID 0000-0003-2806-4076

<sup>2</sup>Dep. «Transport Management», Dnipro University of Technology, Dniprovsk Polytechnic, D. Yavornytskoho St., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 744 62 11, e-mail enkvaerhs@gmail.com, ORCID 0000-0001-9856-5621

## SEARCH AND JUSTIFICATION OF WAYS TO INCREASE THE UNITIZED CARGO TRANSPORTATION EFFICIENCY

**Purpose.** Identification and methodological substantiation of ways to increase the unitized cargo transportation efficiency, which would increase the trucking company profits and the manufacturer quality customer service. **Methodology.** In the course of the research the following methods were used: the method of theoretical generalization and systematization to determine the peculiarities of formation of the rational routes of cargo transportation in different conditions; the analytical method to determine the factors influencing the feasibility of adopting a certain strategy of the trucking company to improve the transportation efficiency; comparison to analyze strategies to increase the cargo transportation efficiency of the trucking company when using routes of different types. **Findings.** The relationship between the organizational structure effectiveness of the production enterprise management and the probable problems in choosing the type of route for goods delivery to customers is defined. The authors proved that the efficiency of unitized cargo transportation depends on a well-defined strategy of increasing the road transport efficiency. Based on the conducted research the influence of economic and organizational factors on expediency of the decision concerning rational strategy of transportation efficiency maintenance is estimated. Three types of strategies are proposed, the content of which is reflected in the receipt of additional profit by the transport company from the production enterprise, when using pendulum routes by saving its resources (return of returnable packaging) and by finding cargo on the way back, as well as using delivery-assembling routes while minimizing fines for late goods delivery. The dependence visualization of the amount of the trucking company profit on the type of strategy adopted allows us to assess the prospects for the introduction of certain types of freight vehicles routes. **Originality.** Methodical approaches to ways substantiation of the trucking company profit increase, choosing their

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

rational route according to the efficiency increase strategy of unitized cargo transportations from the manufacturer to clients have received further development. **Practical value.** The obtained results are aimed at improving the methodological approaches to optimizing the unitized cargo routes, based on the choice of two types of routes in certain conditions, the first is the pendulum route with simultaneous receipt of applications for goods delivery, the second – the delivery-assembling routes, taking into account fines for late delivery.

**Keywords:** freight transportations; route of vehicle movement; strategy; profit; unitized cargo; clients location network

## REFERENCES

1. Gorbachov, P. F., & Mospan, N. V. (2016). Formalisation of the service process of single intercity freightages. *Bulletin of Kharkiv national automobile and highway university*, 72, 66-74. (in Ukrainian)
2. Gorbachev, P. F., Nahlyuk, I. S., Makarichev, A. V., & Mospan, N. V. (2015). Evaluation of effectiveness of carrier's strategies in single intercity freightage orders service. *Automobile Transport: Scientific Papers Collection*, 37, 61-69. (in Ukrainian)
3. Danylkiv, K. P., Horbova, K. V., & Poburko, O. Y. (2018). Innovative development of the transport system of Ukraine. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28(4), 31-35. DOI: <https://doi.org/10.15421/40280405> (in Ukrainian)
4. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrayiny. Retrieved from <http://www.ukrstat.gov.ua/> (in Ukrainian)
5. Kuznetsova, M. (Ed.). (2019). *Activity of large, medium, small and micro-entrepreneurship entities*. State statistics service of Ukraine: statistical publication. Kyiv. (in Ukrainian)
6. Zapara, V. M., Prodashhuk, S. M., & Kravec, A. L. (2017). *Transportno-ekspedytorska diyalnist: navchalny posibnyk*. Xarkiv: UkrDUZT. (in Ukrainian)
7. Nagornyj, Ye. V., & Shramenko, N. Yu. (2010). Analiz kryteriyiv efektyvnosti funkcionuvannya logistychnyx system pry dostavci vantazhiv. *Naukovi notatky. Scientific notes: Interuniversity Collections*, 28, 353-357. (in Ukrainian)
8. Nagornyi, Ye., Shulika, O., & Vitiuk, D. (2019). Formalization of the problem of choice of transport-forwarding service technology of freight owners in intercity. *Municipal economy of cities*, 6(152), 185-190. (in Ukrainian)
9. Shorokhov, V. V. (2015). Comparative analysis of linear-functional and divisional organizational structures of management. *Efficiency of Public Administration*, 43, 201-210.
10. Naumov, V., & Omelchenko, T. (2017). Model of the Delivery Routes Forming Process as a Service Provided by Forwarding Companies. *Procedia Engineering*, 187, 167-172. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.362> (in English)
11. Petraška, A., Čižiūnienė, K., Prentkovskis, O., & Jarašūnienė, A. (2018). Methodology of Selection of Heavy and Oversized Freight Transportation System. *Transport and Telecommunication Journal*, 19(1), 45-58. DOI: <http://doi.org/10.2478/ttj-2018-0005> (in English)
12. Vojtov, V., Berezchnaja, N., Kravcov, A., & Volkova, T. (2018). Evaluation of the Reliability of Transport Service of Logistics Chains. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.3), 270-274. DOI: <http://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19802> (in English)
13. Ziebuhr, M., & Kopfer, H. (2016). Solving an integrated operational transportation planning problem with forwarding limitations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 87, 149-166. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.tre.2016.01.006> (in English)
14. Zhao, Y., Ioannou, P. A., & Dessouky, M. M. (2019). Dynamic Multimodal Freight Routing Using a Co-Simulation Optimization Approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(7), 2657-2667. DOI: <http://doi.org/10.1109/tits.2018.2871946> (in English)

Надійшла до редколегії: 29.05.2020

Прийнята до друку: 30.09.2020

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

УДК 629.42.083-047.58

Б. Є. БОДНАР<sup>1</sup>, О. Б. ОЧКАСОВ<sup>2</sup>, Є. Б. БОДНАР<sup>3</sup>, Д. В. БОБИР<sup>4</sup>, М. В. ОЧЕРЕТНЮК<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Локомотиви», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 733 19 01, ел. пошта bodnarz@nz.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-3591-4772

<sup>2</sup>Каф. «Локомотиви», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 733 19 61, ел. пошта abochkasov@gmail.com, ORCID 0000-0002-7719-7214

<sup>3</sup>Каф. «Локомотиви», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 733 19 61, ел. пошта Melnar78@gmail.com, ORCID 0000-0001-6040-913X

<sup>4</sup>Каф. «Локомотиви», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 733 19 61, ел. пошта dmitrob@ua.fm, ORCID 0000-0003-1441-3861

<sup>5\*</sup>Каф. «Локомотиви», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 733 19 61, ел. пошта ocheretniukmaksym@gmail.com, ORCID 0000-0002-9032-8602

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СИСТЕМИ ОБСЛУГОВУВАННЯ ТЕПЛОВОЗІВ НА ОРГАНІЗАЦІЮ РОБОТИ ЛОКОМОТИВНОГО ДЕПО

**Мета.** У роботі передбачено оцінити вплив систем обслуговування тепловозів на показники їх використання та організацію роботи локомотивного депо. **Методика.** Для досягнення мети виконано розрахунок експлуатаційних показників тепловозів серій 2TE116 та TE33AC в умовах локомотивного депо. Удосконалено імітаційну модель роботи цеху з ремонту локомотивів. Із використанням методів теорії систем масового обслуговування виконано імітаційне моделювання роботи цеху з ремонту тепловозів за сервісної та планово-попереджувальної систем обслуговування локомотивів. **Результати.** Розраховано програму ремонту тепловозів за планово-попереджувальної та сервісної систем обслуговування. На основі результатів моделювання роботи ремонтного цеху проведено порівняння впливу показників експлуатації та ремонту на роботу локомотивного депо для двох різних підходів щодо організації технічного обслуговування локомотивів. Імітаційна модель роботи цеху з ремонту локомотивів дозволяє в подальшому проводити порівняльний аналіз використання різних серій локомотивів у депо. Аналіз отриманих результатів демонструє, що запропонований підхід до моделювання технічного обслуговування та ремонту парку тепловозів може бути вдосконалений за рахунок визначення показників надійності під час надходження локомотивів на планові та позапланові види ремонту. **Наукова новизна.** Полягає в удосконаленні імітаційної моделі цеху з ремонту локомотивів, яка дозволяє проводити аналіз впливу експлуатаційних факторів на систему організації ремонту локомотивів, із метою вибору раціональної системи технічного обслуговування локомотивного парку. **Практична значимість.** Отримані результати дозволяють проводити аналіз впливу показників експлуатації й ремонту локомотивів на роботу локомотивного депо та визначити доцільність використання обраного тягового рухомого складу на заданій ділянці обслуговування. Отримані результати свідчать, що використання тепловозів TE33AC із системою сервісного обслуговування має скоротити час перебування на всіх видах технічного обслуговування та поточних ремонтів.

*Ключові слова:* сервісне обслуговування; технічне обслуговування; система масового обслуговування; моделювання; експлуатація тепловозів

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

**Вступ**

У наш час по мірі оснащення тягового рухомого складу більш складним обладнанням і системами досить актуальною постає необхідність обслуговування локомотивів спеціалізованими організаціями. Однією з форм такого обслуговування є обов'язкове післяпродажне сервісне обслуговування тягового рухомого складу (ТРС) компаніями-виробниками. За кордоном компанії-оператори залізниць і підприємства-виробники діяльність у частині забезпечення експлуатаційної надійності локомотивів усе в більшій мірі проводять спільно, на постійній основі й на тривалий період. Додатковим фактором розвитку системи сервісу є масштабність і достатня передбачуваність ринку технічного обслуговування локомотивів, що дозволяє укладати контракти на термін до 30 і більше років. Необхідно відзначити, що у світовій практиці під сервісом локомотивів розуміють не просто один із видів діяльності з метою отримання прибутку. Питання ставлять набагато ширше: мова йде про глобальний сервіс із технічної підтримки експлуатації. У цьому випадку ризику із заміни вузлів і деталей бере на себе виробник. Крім того, під час вибору найбільш вигідної пропозиції на поставку ТРС починають за часту використовувати таке поняття, як супровід локомотива на етапах його життєвого циклу. У взаєминах замовника та виробника показник закупівельної вартості локомотива починає поступово поступатися місцем більш адаптованому до місцевих умов ринкової економіки показнику вартості витрат на життєвий цикл локомотива. Як наслідок такого розвитку подій, компанії-виробники починають більшою мірою приділяти увагу обслуговуванню локомотивів не тільки в гарантійний період, але і в період усього терміну служби локомотива.

Питання вдосконалення організації експлуатації та ремонту локомотивів є актуальним і розглянуто в публікаціях [1–3, 6, 9]. У роботі [5] запропонована технологія, яка дозволяє виконати об'єктивний і обґрунтований підбір тягових ресурсів під конкретний поїзд, забезпечує оцінку експлуатаційних властивостей і технічного стану локомотивів, що перебувають в експлуатації. За умови систематичного аналі-

зу стану ТРС з'являється можливість реінжинірингу системи експлуатаційної роботи і, що дуже важливо, організації цілеспрямованого ремонту рухомого складу. Також уведено в практику безперервний моніторинг технічного стану [4] як складової частини оптимізації функціональної ефективності за даними системного аналізу структури управління надійністю локомотивного парку. Оптимізація полягає у формуванні цифрової діагностичної карти локомотива, яка містить актуальну, постійно оновлювану інформацію про технічний стан, на підставі якої приймають конкретні рішення про експлуатацію або ремонт тягової одиниці.

Скорочення витрат праці й коштів на ремонт локомотивів вимагають проведення комплексу технічних та організаційних заходів. Це стосується насамперед удосконалення управління якістю обслуговування локомотивів у процесі їх експлуатації [13]. Підвищення якості та вдосконалення процесів технічного обслуговування забезпечують скорочення часу простою локомотивів на технічному обслуговуванні, збільшення корисної роботи, а в результаті – прискорення перевезень. Удосконалення системи й організації технічного обслуговування повинно забезпечити краще використання локомотивів за часом і потужністю в поєднанні з підвищенням їх експлуатаційної надійності. Завданням системи технічного утримання транспортних засобів є постійний контроль і підтримання їх технічного стану й надійності на рівні, достатньому для виконання заданих функцій або готовності до використання й виконання поставлених завдань. Для вибору найбільш ефективного варіанта системи технічного утримання, у роботі [11] розглянуто й проаналізовано основні напрями створення та розвитку систем технічного обслуговування й поточного ремонту транспортних засобів. У цілому в теорії організації ремонту й обслуговування технічних засобів виділяють такі системи:

- система обслуговування й ремонту щодо відмови;
- планово-попереджувальна система, система ремонту за фактичним станом;
- комбінована система обслуговування й ремонту.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

У разі використання системи щодо відмови локомотив експлуатують до моменту виникнення відмови (несправності). Під час використання системи ППР ремонт проводять із метою попередження відмов і забезпечення показників якості, які передбачені в нормативній документації. Система ремонту за фактичним станом передбачає проведення технічного обслуговування тільки тоді, коли це необхідно, і в тому обсязі, якого вимагає технічний стан вузла.

### Мета

З огляду на викладене метою роботи є оцінити вплив систем обслуговування тепловозів на показники їх використання та організацію роботи локомотивного депо.

### Методика

Останнім часом в АТ «Укрзалізниця» гостро постало питання реструктуризації локомотивного господарства. Проєкт реструктуризації 2020–2023 передбачає розділення локомотивного господарства на експлуатаційну та ремонтну складову зі створенням локомотиворемонтної філії. Окрім того, за цим проєктом система технічного обслуговування тягового рухомого складу повинна перейти до комбінованої системи обслуговування й ремонту. У такому випадку комбінована система має містити систему планово-попереджувального ремонту та систему ремонту за фактичним станом. Це зумовлено використанням нового рухомого складу та впровадженням дослідної експлуатації локомотивів, у якій технічне обслуговування та ремонт для окремих серій локомотивів виконують зі збільшеними міжремонтними періодами. За останні роки масштабним проєктом із впровадження нового тягового рухомого складу на залізницях України є придбання 30 одиниць тепловозів ТЕ33АС виробництва «General Electric» для компанії АТ «Укрзалізниця». Наразі тепловози серії ТЕ33АС експлуатують на Придніпровській, Донецькій та Одеській філії. Тепловоз ТЕ33АС – вантажний тепловоз з асинхронним тяговим приводом розрахований для залізниць із колією 1520 мм, представник локомотивів GE серії Evolution Series. Він є тепловозом нового покоління як за технічними параметрами, так і за підходами до організації

його технічного обслуговування. У тепловоза ТЕ33АС немає прийнятих у планово-попереджувальній системі ремонту технічного обслуговування (ТО) та планових ремонтів (ПР), натомість є регламент сервісного обслуговування, установлений заводом-виробником. Сервісне обслуговування тепловоза ТЕ33АС організовано таким чином. Локомотиви цієї серії надходять на сервісне обслуговування через фіксований час експлуатації, натомість усі магістральні локомотиви України підлягають технічному обслуговуванню або ремонту залежно від пробігу.

Тепловоз ТЕ33АС здійснює захід на сервісне обслуговування кожні 92 дні, але обсяг виконуваних робіт змінюється залежності від того, скільки часу локомотив перебуває в експлуатації. Так, кожні 92 дні виконують обсяг робіт № 1, кожні 184 дні виконують обсяг робіт № 2, кожні 365 днів – обсяг робіт № 3. Кожні 18 місяців, 2, 3, 4 та 5 років виконують додаткові роботи з обслуговування великих вузлів локомотива. Також передбачено такий вид обслуговування (аналог ТО–1), як регламентні роботи, які виконує локомотивна бригада під час приймання та здачі локомотива. Ще однією з особливостей є те, що заводом-виробником передбачено виконання капітального ремонту лінійного обладнання, а не локомотива в цілому. Залежно від терміну експлуатації окремі вузли повинні бути доставлені на спеціалізоване підприємство для проведення капітального ремонту.

Після аналізу вищезазначеної інформації постає питання порівняння систем утримання нового тепловоза ТЕ33АС та тепловоза 2ТЕ116, який значний час використовують на залізницях України. Так, тепловози ТЕ33АС та 2ТЕ116 обслуговують за різними системами ремонту. Періодичність та види ремонту для тепловоза 2ТЕ116 регламентуються наказом Укрзалізниці від 30.01.2019 № 55-Ц [10]. Обсяг планових робіт та періодичність їх виконання для тепловоза ТЕ33АС регламентуються документом «Плановое техническое обслуживание, ES40ACi/ES44ACi», GE Transportation [8].

У роботі [12] розроблено модель роботи цеху з ремонту локомотивів за допомогою системи масового обслуговування. Запропонована імітаційна модель цеху з ремонту локомотивів

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

дозволяє проводити аналіз впливу різних чинників на систему організації ремонту локомотивів у депо. Використання розробленої моделі та аналіз результатів моделювання дають можливість визначити вплив показників експлуатації та надійності локомотивів на організацію роботи локомотиворемонтного депо.

Розрахунок експлуатаційних показників локомотивів проводять таким чином [1]:

– річний пробіг локомотивів у млн км, які обслуговують задану ділянку, визначають за формулою обертання:

$$\sum MS_{\text{річ}} = 365 \cdot 2 \cdot N \cdot (l_1 + l_2) \cdot (1 + \beta_d), \quad (1.1)$$

де  $l_1, l_2$  – довжина ділянок А – Б та А – В, км;  $\beta_d$  – коефіцієнт, який враховує допоміжний пробіг локомотивів (беремо  $\beta_d = 0,05 \div 0,10$ );

– перевізна робота (вантажобіг) на ділянці обертання в млн т·км бр. за рік:

$$\sum PL = Q_{\text{бр}} \cdot \sum MS_{\text{річ}} \cdot (1 - \beta_d), \quad (1.2)$$

де  $Q_{\text{бр}}$  – маса поїзда брутто, т;

– річна робота локомотивів ц локомотиво-годинах:

$$T_p = \sum T \cdot 365 \cdot (1 + \beta_d); \quad (1.3)$$

– середньодобовий пробіг локомотива на ділянці обертання, км/добу:

$$S_{\text{доб}} = \frac{2 \cdot (l_1 + l_2) \cdot N}{M_e}; \quad (1.4)$$

– середньодобова продуктивність поїзного локомотива в т·км бр./добу:

$$W = S_{\text{доб}} \cdot Q_{\text{бр}}; \quad (1.5)$$

– час повного обертання локомотива в годинах на ділянці обертання; год:

$$T_{\text{П}} = \frac{\sum T}{N}; \quad (1.6)$$

– коефіцієнт потреби локомотивів:

$$K_{\text{П}} = \frac{T_{\text{П}}}{24}; \quad (1.7)$$

– технічна швидкість  $V_T$  може бути взята  $(1,10 \div 1,25) \cdot V_d$ .

– час корисної роботи локомотива в годинах за добу можна визначати за формулою:

$$t_{\text{кор}} = \frac{S_{\text{доб}}}{V_d}; \quad (1.8)$$

– час роботи локомотива в чистому русі (за добу) в годинах:

$$T_{\text{чр}} = \frac{S_{\text{доб}}}{V_T}. \quad (1.9)$$

Під час моделювання [12, 14] вирішують такі завдання: моделювання роботи ремонтного цеху протягом заданої кількості годин; визначення ймовірностей станів ремонтного цеху; визначення середнього числа заявок (локомотивів) у черзі на обслуговування; визначення середнього числа заявок на обслуговування; визначення середнього числа заявок у системі; визначення середньої тривалості перебування заявки в черзі; визначення середньої тривалості перебування заявки в системі; визначення відносної пропускної здатності системи; визначення абсолютної пропускної здатності системи.

Під час моделювання роботи цеху з ремонту локомотивів використовують програмний комплекс Matlab та програмне середовище Simulink [7]. В імітаційному графічному середовищі модель ремонтного цеху виглядає таким чином (структурна схема моделі ремонтного цеху локомотивного депо представлена на рис. 1). Блоки 1 та 2 випадковим чином формують розподілені в часі заявки на ремонт тепловозів. Блок 3 випадковим чином формує час виконання ремонту. Розрахунок кількості заявок і часу обслуговування тепловозів виконано відповідно до чинної нормативної документації. При цьому допускається відхилення часу надходження в ремонт  $\pm 20\%$  від норми. Як ремонтні стійла депо в моделі використано блок «ремонтна позиція» (5). Час, необхідний для виконання відповідного виду ремонту, визначають за цим блоком залежно від виду ремонту  $\pm 20\%$ . Як дисципліна обслуговування заявок узяття дисципліна FIFO. Черга тепловозів в очікуванні ремонту організована блоком 4.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

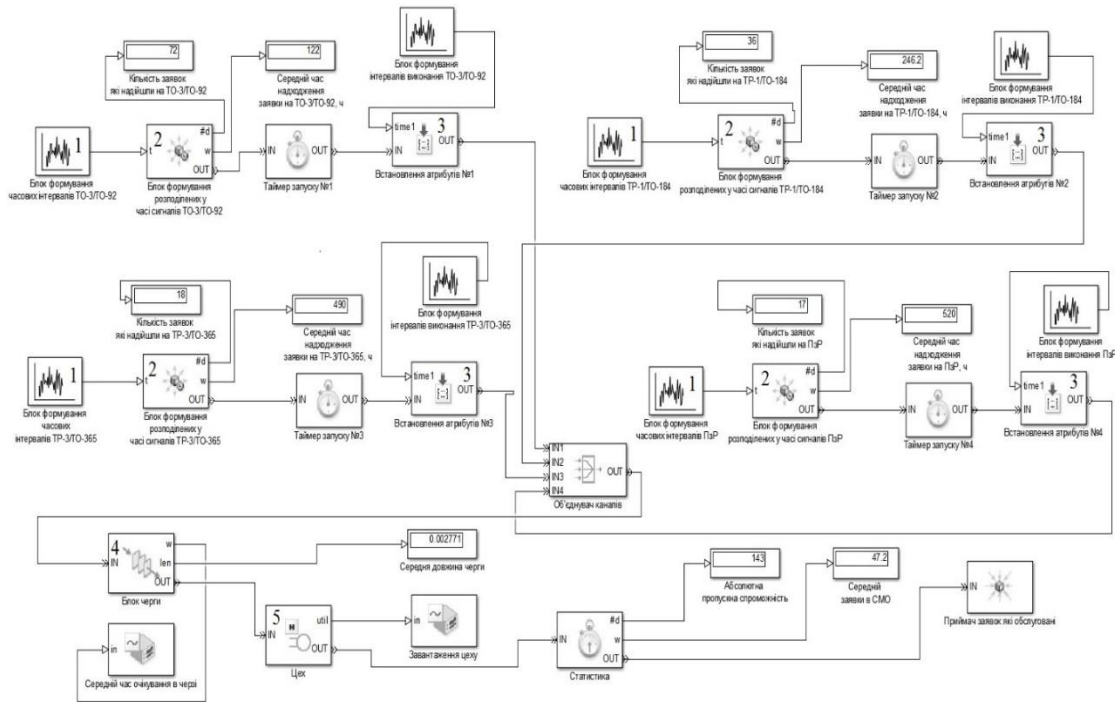


Рис. 1. Модель роботи цеху із ремонту тепловозів ТЕ33АС:

1 – формувач часу надходження тепловозів у ремонт; 2 – блок формування розподілу заявок у часі;  
3 – формувач часу обслуговування тепловозів на ремонтній позиції; 4 – черга тепловозів в очікуванні ремонту;  
5 – позиції ремонту тепловозів

Fig. 1. Model of the TE33AS locomotives' repair shop operation:

1 – former of the locomotive arrival time for repair; 2 – forming unit of the applications distribution over time;  
3 – former of locomotives service time at the repair position;  
4 – queue of the locomotives awaiting repair; 5 – locomotives repair position

## Результати

Питання організації технічного обслуговування та ремонту двох різних серій локомотивів актуальне на етапі впровадження нового тягового рухомого складу. В роботі проведено аналіз експлуатаційних та ремонтних показників тепловозів які вже обслуговують задану ділянку. Це зумовлено тим, що доступ до технічних даних нового рухомого складу було отримано після його запровадження в заданому локомотивному депо.

Результати розрахунку експлуатаційних показників тепловозів наведено в табл. 1. Тепловоз ТЕ33АС порівняно з тепловозом 2ТЕ116 на заданій ділянці руху показує на 15 % менший результат у таких показниках, як вантажообіг

та середньодобова продуктивність локомотива. Це зумовлено тим, що на заданій ділянці руху існує обмеження за масою поїзда, так для тепловоза ТЕ33АС максимальна маса поїзда становить 3 900 т, а для тепловоза 2ТЕ116 4 400 т. Обмеження за максимальною масою поїзда обумовлено технічними показниками локомотивів, а саме їх потужністю. Потужність тепловоза ТЕ33А складає 4 500 к.с., або 3300 кВт, натомість потужність тепловоза 2ТЕ116 складає 2×3 060 к.с., або 2×2 250 кВт. Результати розрахунку програми ремонту наведені в табл. 2 і 3. За наявних підходів до обслуговування тепловозів програма ремонту та відсоток несправних локомотивів за серією ТЕ33АС на 50 % менше за серію тепловоза 2ТЕ116.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Таблиця 1

## Результати розрахунку експлуатаційних показників

Table 1

## Calculation results of performance indicators

Показник	Серія тепловоза	
	ТЕ33А	2ТЕ116
Річний пробіг локомотивів, млн км	3 310	
Вантажообіг, млн т·км бр.	12 100	13 544
Річна робота локомотивів, лок.год	252 507	
Середньодобовий пробіг локомотива, км	470	
Середньодобова продуктивність локомотива, т·км бр./доб	1 833 000	2 068 000
Час повного обертання локомотива, год	48,4	
Коефіцієнт потреби локомотива	2,02	
Технічна швидкість, км/год	40,6	
Час корисної роботи локомотива, год	14,46	
Час роботи локомотива в чистому русі, год	11,58	

Таблиця 2

## Розрахунок програми ремонту локомотивів

Table 2

## Calculation of the locomotive repair program

Вид ремонту	Програма ремонту за серіями, лок.	
	ТЕ33АС	2ТЕ116
КР–2	–	2
КР–1	–	2
ТО–365 дні/ПР–3	18	6
ТО–184 дні/ПР–1	36	50
ТО–92 дні/ТО–3	72	240

Таблиця 3

## Розрахунок відсотка несправних локомотивів

Table 3

## Calculation of the percentage of defective locomotives

Вид ремонту	Відсоток несправних локомотивів за серіями, %	
	ТЕ33А	2ТЕ116
Деповський ремонт	4,42	8,13
Заводський ремонт	–	1
Загальний	4,42	9,1

Таблиця 4

## Результати моделювання роботи цеху з ремонту тепловозів у разі зміни числа ремонтних стійл

Table 4

## Results of modeling the operation of locomotive repair shop in case of change in the number of repair bays

Серія локомотива	Кількість ремонтних стійл, шт.	Середній час очікування в черзі, год	Середня довжина черги, лок.	Завантаження цеху/депо, %	Середній час заявки в СМО, год
ТЕ33АС	1	47,31	0,7	79	89,48
	2	3	0,03	41	48,83
	3	0,6	0,002	27	47,21
2ТЕ116	2	60	1,439	88	83,18
	3	1,5	0,044	59	45,78
	4	0	0	45	44,6

Із використанням розробленої імітаційної моделі цеху з ремонту тепловозів [7, 12] виконано моделювання процесів експлуатації та ремонту тепловозів серії 2ТЕ116 та ТЕ33АС в умовах локомотивного депо. Для порівняльного аналізу експлуатаційних та ремонтних показників локомотивів обрано локомотивне депо Мелітополь, Придніпровської залізниці. Локомотивне депо Мелітополь є основним ремонтним депо тепловозів серії ТЕ33АС та 2ТЕ116. Порівняльний аналіз експлуатаційних показників виконано для магістральних тепловозів серії ТЕ33АС в кількості 18 одиниць та тепловозів 2ТЕ116 в кількості 18 одиниць. Задана довжина ділянок обслуговування: ділянка А – Б 173 кілометри, ділянка А – В 153 кілометри. Характер руху вантажний. Ділянкова швидкість у парному напрямку 31 км/год, у непарному напрямку 34 км/год. Маса поїзда взято 3 900 т.

У табл. 4 та на рис. 2 наведено залежності для порівняння роботи цеху з ремонту тепловозів у разі зміни числа ремонтних стійл. На основі результатів моделювання встановлено, що раціональним із точки зору завантаження цеху, для тепловоза ТЕ33АС є кількість ремонтних позицій, що дорівнює одиниці, а з точки зору часу перебування локомотива в очікуванні ремонту кількість ремонтних позицій повинна дорівнювати двом. Для тепловоза 2ТЕ116 рекомендована кількість ремонтних позицій дорі-

внює трьом, що більше за кількість ремонтних позицій для тепловоза ТЕ33АС і пояснюється його більшими міжремонтними періодами.

У табл. 5 та на рис. 3 наведено результати моделювання в разі збільшення міжремонтних періодів для тепловоза ТЕ33АС та збільшення міжремонтних пробігів для тепловоза 2ТЕ116 на 20–30 %. Отримані результати показують, що збільшення міжремонтних пробігів призводить до зниження завантаження ремонтного цеху, при цьому довжина черги й середній час очікування змінюються незначно.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що запропонований підхід до моделювання технічного обслуговування та ремонту парку тепловозів може бути вдосконалений за рахунок визначення показників надійності під час надходження локомотивів на планові та позапланові види ремонту, визначення ймовірностей переходу локомотива з одного стану в інший, а також обліку показників надійності під час визначення обсягів ремонтних робіт. Також актуальним є питання розробки моделі роботи ремонтного цеху під час змішаної системи утримання локомотивів, що дасть змогу оцінити вплив змін у системі утримання локомотивів для планування використання обладнання, фонду робочої сили, часу постановки локомотивів у ремонт з урахуванням рівномірності завантаження цеху.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

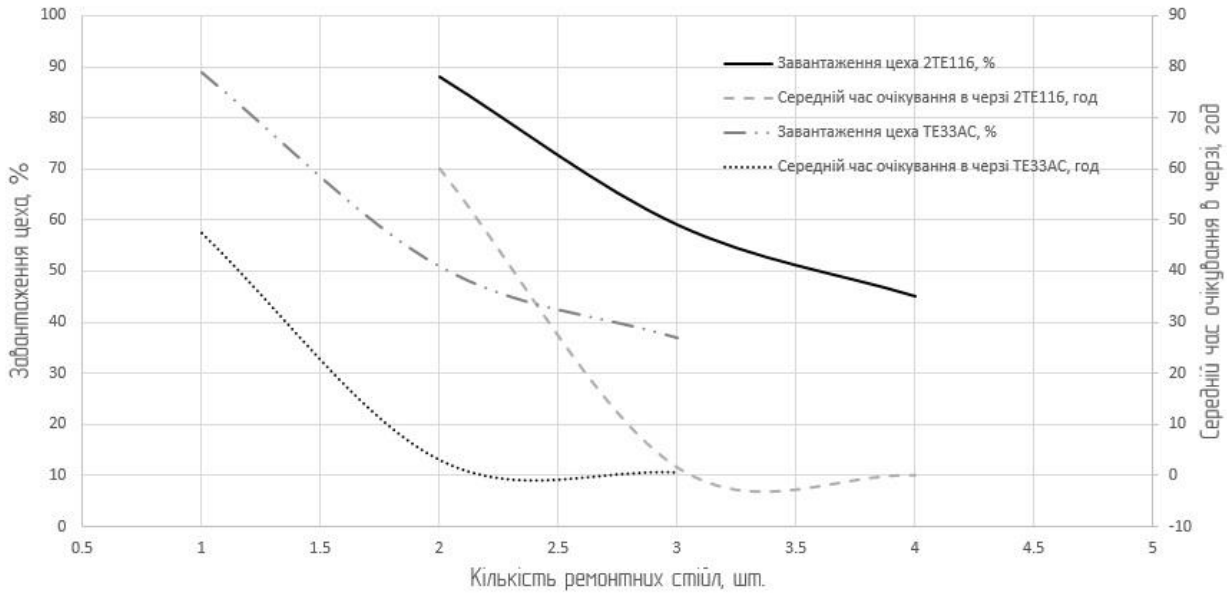


Рис. 2. Графік впливу кількості ремонтних позицій на показники роботи цеху з ремонту локомотивів

Fig. 2. Graph of the influence of the number of repair items on the performance of the locomotive repair shop

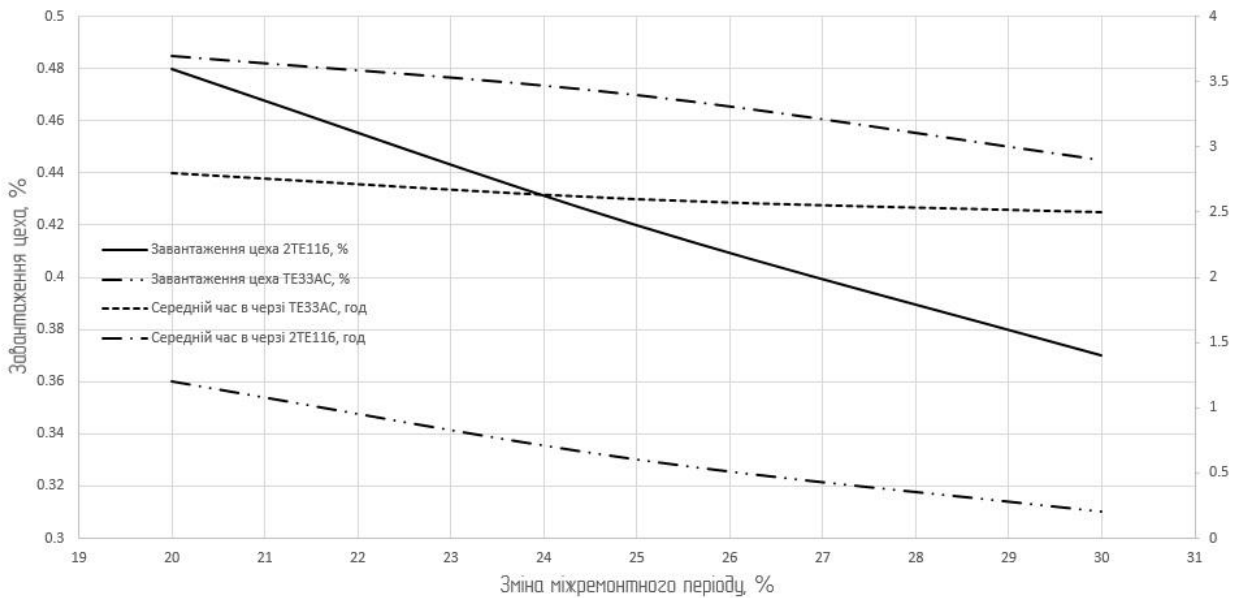


Рис. 3. Графік впливу зміни міжремонтного періоду на показники роботи цеху з ремонту локомотивів

Fig. 3. Schedule of change influence of the inter-repair period on the operation indicators of the locomotive repair shop

Таблиця 5

**Результати моделювання роботи цеху з ремонту тепловозів  
у разі збільшення міжремонтного періоду**

Table 5

**Simulation results of the locomotive repair shop operation  
in case of increasing the inter-repair period**

Серія тепловоза	Зміна міжремонтного періоду, %	Середній час у черзі, год	Середня довжина черги, лок.	Завантаження цеху/депо, %	Середній час в СМО, год
ТЕ33АС	+20	0,31	0,02	0,36	42,75
	+25	0,24	0,02	0,33	31,18
	+30	0,13	0,01	0,31	27,16
2ТЕ116	+20	0,8	0,02	0,48	44,94
	+25	0,68	0,01	0,42	33,4
	+30	0,59	0,01	0,37	31,3

**Наукова новизна та практична значимість**

Наукова новизна полягає в удосконаленні імітаційної моделі цеху з ремонту локомотивів, яка дозволяє проводити аналіз впливу експлуатаційних факторів на систему організації ремонту локомотивів, із метою вибору раціональної системи технічного обслуговування локомотивного парку. Ця модель дає можливість у подальшому проводити порівняльний аналіз використання різних серій локомотивів у депо.

Отримані результати дозволяють проводити аналіз впливу показників експлуатації та ремонту локомотивів на роботу локомотивного депо. Це дає можливість оцінити доцільність використання обраного тягового рухомого складу на ділянці обслуговування за заданими вихідними параметрами експлуатації та ремонту локомотивів.

**Висновки**

У роботі виконано аналіз експлуатації двох серій локомотивів з абсолютно різними підходами до їх систем обслуговування. Отримані результати дають змогу оцінити вплив експлуатаційних та ремонтних показників на роботу локомотивного депо. Так, під час порівняння

експлуатаційних показників роботи локомотивів ТЕ33АС та 2ТЕ116 можна побачити, що більшість із них перебувають на одному рівні, за винятком показників вантажообігу та середньодобової продуктивності, які на 15 % більші у тепловоза 2ТЕ116. Це обумовлено технічними обмеженнями для різних серій локомотивів на заданій ділянці руху. Для тепловоза ТЕ33АС максимальна маса поїзда становить 3 900 т, а для тепловоза 2ТЕ116 – 4 400 т, що напряму впливає на зазначені вище показники.

Аналіз ремонтних показників показує, що програма ремонту та відсоток локомотивів, які перебувають у ремонті за серією ТЕ33АС на 50 % менший за серією 2ТЕ116, а отже, локомотиви серії ТЕ33АС перебувають більший час в експлуатаційній роботі та потребують менше ресурсів на створення ремонтної бази. Це обумовлено використанням системи сервісного обслуговування для тепловозів серії ТЕ33АС, на відміну від планово-попереджувальної системи ремонту для тепловозів 2ТЕ116.

Також аналіз роботи цеху з ремонту локомотивів демонструє, що в разі використання в цеху двох ремонтних позицій усі показники за серією ТЕ33АС на 50 % менші від показників за серією 2ТЕ116. Так, за двох ремонтних позицій завантаження цеху за серією ТЕ33АС

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

на 47 % менше ніж за серією 2ТЕ116, а середній час очікування в черзі на 95 % менший за серією ТЕ33АС.

Унаслідок аналізу отриманих результатів можна зробити висновок, що використання тепловозів ТЕ33АС із системою сервісного об-

слуговування має скоротити час їх перебування на всіх видах ТО та ПР. Для порівняння витрат на утримання парку тепловозів ТЕ33АС та парку тепловозів серії 2ТЕ116 необхідно враховувати вартість проведення ТО та ПР для кожної серії.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Айзинбуд С. Я., Кельперис П. Я. *Эксплуатация локомотивов*. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Транспорт, 1990. 261 с.
2. Бабел М. *Теоретические основы и методология выбора объемов и технологий модернизации тепловозов по критерию стоимости жизненного цикла* : дис. ... д-ра техн. наук. ОАО «ВНИИЖТ». Москва, 2014. 266 с.
3. Головаш А. Н., Куршакова Н. Б. Совершенствование системы технического обслуживания и ремонта локомотивов. *Материалы третьей всероссийской научно-технической конференции с международным участием* (Омск, 10 нояб. 2016 г.). Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2016. С. 52–59.
4. Давыдов Ю. А., Пляскин А. К. Реинжиниринг системы формирования эксплуатируемого парка локомотивов. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2018. № 1 (57). С. 106–111.
5. Кудяров М. М. Выбор оптимальной организации ремонта локомотивов на полигоне железной дороги. *Известия ПГУПС*. 2012. № 3 (32). С. 99–103.
6. Лоза П. А., Гришечкина Т. С. Оценка качества выполнения системы содержания парка электроподвижного состава. *Электрификация транспорта*. 2015. № 9. С. 87–93.
7. Очкасов О. Б., Гришечкина Т. С., Очеретнюк М. В. Подходы к моделированию системы технического обслуживания локомотивов. *Актуальні проблеми автоматизації та управління : V Міжнародна науково-практична інтернет-конференція молодих вчених та студентів* (Луцьк, 30 лист. 2017 р.). Луцький нац. техн. ун-т. Луцьк, 2017. С. 99–104.
8. *Плановое техническое обслуживание, ES40ACi / ES44ACi. Документ № GEK-114350F*. GE Transportation. Київ, 2012. 12 с.
9. Пляскин А. К., Кушнирук А. С. Особенности применения технологии информационного моделирования для мониторинга фактического состояния локомотивов. *Бюллетень результатов научных исследований*. 2019. Вып. 2. С. 58–71.
10. *Положення про планово-попереджувальну систему ремонту і технічного обслуговування тягового рухомого складу (електровозів, тепловозів, електро та дизель-поїздів)* : Наказ М-ва трансп. та зв'язку України від 30.01.19 № 55. Київ : Укрзалізниця, 2019. 29 с.
11. Bodnar V., Ochkasov O. System Choice of the Technical Maintenance of Locomotives Equipped with on-board Diagnostic Systems. *Transport Means : Proceedings of 21st International Scientific Conference* (Kaunas, 20–22 sept. 2017). Kaunas University of Technology, Klaipėda University. Kaunas, Lithuania, 2017. Part I. P. 43–47.
12. Bodnar V. E., Ochkasov O. B., Bodnar E. B., Hryshechkina T. S., Ocheretnyuk M. V. Simulation of locomotive repair organization by the methods of queue systems theory. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 5 (77). P. 28–40. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/147740>
13. Bodnar V. E., Ochkasov O. B., Hryshechkina T. S., Bodnar E. B. Choosing the system of locomotive maintenance in view of the effect of dependent failures. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 6 (78). P. 47–58. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154823>
14. Lovett A. H., Dick C. T., Ruppert C., Saat M. R., Barkan C. Development of an Integrated Model for the Evaluation and Planning of Railroad Track Maintenance. *2013 Joint Rail Conference*. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1115/jrc2013-2407>

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Б. Е. БОДНАРЬ<sup>1</sup>, А. Б. ОЧКАСОВ<sup>2</sup>, Е. Б. БОДНАРЬ<sup>3</sup>, Д. В. БОБЫРЬ<sup>4</sup>,  
М. В. ОЧЕРЕТНЮК<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Локомотивы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 733 19 01, эл. почта bodnarz@nz.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-3591-4772

<sup>2</sup>Каф. «Локомотивы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 733 19 61, эл. почта abochkasov@gmail.com, ORCID 0000-0002-7719-7214

<sup>3</sup>Каф. «Локомотивы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 733 19 61, эл. почта Melnar78@gmail.com, ORCID 0000-0001-6040-913X

<sup>4</sup>Каф. «Локомотивы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 733 19 61, эл. почта dmitrob@ua.fm, ORCID 0000-0003-1441-3861

<sup>5\*</sup>Каф. «Локомотивы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 733 19 61, эл. почта ocheretniukmaksym@gmail.com, ORCID 0000-0002-9032-8602

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СИСТЕМЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ ТЕПЛОВОЗОВ НА ОРГАНИЗАЦИЮ РАБОТЫ ЛОКОМОТИВНОГО ДЕПО

**Цель.** В работе предусмотрено оценить влияние систем обслуживания тепловозов на показатели их использования и организацию работы локомотивного депо. **Методика.** Для достижения цели выполнен расчет эксплуатационных показателей тепловозов серий 2ТЭ116 и ТЕ33АС в условиях локомотивного депо. Усовершенствована имитационная модель работы цеха по ремонту локомотивов. С использованием методов теории систем массового обслуживания выполнено имитационное моделирование работы цеха по ремонту тепловозов при сервисной и планово-предупредительной системах обслуживания локомотивов. **Результаты.** Рассчитано программу ремонта тепловозов при планово-предупредительной и сервисной системах обслуживания. На основе результатов моделирования работы ремонтного цеха проведено сравнение влияния показателей эксплуатации и ремонта на работу локомотивного депо для двух различных подходов к организации технического обслуживания локомотивов. Имитационная модель работы цеха по ремонту локомотивов позволяет в дальнейшем проводить сравнительный анализ использования различных серий локомотивов в депо. Анализ полученных результатов демонстрирует, что предложенный подход к моделированию технического обслуживания и ремонта парка тепловозов может быть усовершенствован за счет определения показателей надежности при поступлении локомотивов на плановые и внеплановые виды ремонта. **Научная новизна.** Заключается в совершенствовании имитационной модели цеха по ремонту локомотивов, которая позволяет проводить анализ влияния эксплуатационных факторов на систему организации ремонта локомотивов, с целью выбора рациональной системы технического обслуживания локомотивного парка. **Практическая значимость.** Полученные результаты позволяют проводить анализ влияния показателей эксплуатации и ремонта локомотивов на работу локомотивного депо и определить целесообразность использования, выбранного тягового подвижного состава на заданном участке обслуживания. Полученные результаты свидетельствуют, что использование тепловозов ТЕ33АС с системой сервисного обслуживания должна сократить время пребывания на всех видах технического обслуживания и текущих ремонтов.

**Ключевые слова:** сервисное обслуживание; техническое обслуживание; система массового обслуживания; моделирование; эксплуатация тепловозов

B. Y. BODNAR<sup>1</sup>, O. B. OCHKASOV<sup>2</sup>, Y. B. BODNAR<sup>3</sup>, D. V. BOBYR<sup>4</sup>,  
M. V. OCHERETNIUK<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>Dep. «Locomotives», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 733 19 01, e-mail bodnarz@nz.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-3591-4772

<sup>2</sup>Dep. «Locomotives», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 733 19 61, e-mail abochkasov@gmail.com, ORCID 0000-0002-7719-7214

<sup>3</sup>Dep. «Locomotives», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 733 19 61, e-mail Melnar78@gmail.com, ORCID 0000-0001-6040-913X

<sup>4</sup>Dep. «Locomotives», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 733 19 61, e-mail dmitrob@ua.fm, ORCID 0000-0003-1441-3861

<sup>5\*</sup>Dep. «Locomotives», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 733 19 61, ocheretniukmaksym@gmail.com, ORCID 0000-0002-9032-8602

## RESEARCH OF INFLUENCE OF LOCOMOTIVE SERVICE SYSTEM ON THE OPERATION ORGANIZATION OF LOCOMOTIVE DEPOT

**Purpose.** The work is aimed to assess the influence of locomotive service systems on the indicators of their use and operation organization of the locomotive depot. **Methodology.** To achieve this purpose the calculation of operational indicators of locomotives of series 2TE116 and TE33AS in the conditions of locomotive depot is performed. The simulation model of the locomotive repair shop has been improved. Using the methods of the queuing systems theory, simulation modeling of the locomotive repair shop with service and schedule preventive systems for locomotive service was performed. **Findings.** The program of locomotives repair at schedule preventive and service systems is calculated. Based on the simulation results of the repair shop operation, we compared the influence of operation and repair on the locomotive depot operation for two different approaches to the organization of locomotives maintenance. The simulation model of the locomotive repair shop allows further comparative analysis of the use of different series of locomotives in the depot. The analysis of the results obtained demonstrates that the proposed approach to modeling the maintenance and repair of a diesel locomotive fleet can be improved by determining the reliability indicators when locomotives arrive for scheduled and unscheduled repairs. **Originality.** We improved the simulation model of the locomotive repair shop, which allows analyzing the influence of operational factors on the system of locomotive repair, in order to select a rational system of the locomotive fleet maintenance. **Practical value.** The results obtained make it possible to analyze the influence of the operation and repair indicators of locomotives on the operation of the locomotive depot and to determine the feasibility of using the selected traction rolling stock at a given service area. The results obtained indicate that the use of TE33AS diesel locomotives with a service system should reduce the residence time for all types of maintenance and repairs.

*Keywords:* service; maintenance; queuing system; simulation; locomotive operation

### REFERENCES

1. Ayzinbud, C. Ya., & Kalperis, P. I. (1990). *Ekspluatatsiya lokomotivov*. Moscow: Transport. (in Russian)
2. Babel, M. (2014). *Teoreticheskie osnovy i metodologiya vybora obemov i tekhnologiy modernizatsii teplovozov po kriteriyu stoimosti zhiznennogo tsikla* (Doctoral dissertation). OAO «VNIIZhT», Moscow, Russia. (in Russian)
3. Golovash, A. N., & Kurshakova, N. B. (2016). Sovershenstvovanie sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta lokomotivov. In *Materialy tret'ey vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* (pp. 52-59). Omsk State Transport University. Omsk, Russia. (in Russian)
4. Davydov, Yu. A., & Plyaskin, A. K. (2018). Reengineering of the operating locomotive fleet formation system. *Modern technologies. System analysis. Modeling*, 1(57), 106-111. (in Russian)
5. Kudayarov, M. M. (2012). Vybora optimalnoy organizatsii remonta lokomotivov na poligone zheleznoy dorogi. *Proceedings of petersburg transport university*, 3(32), 99-103. (in Russian)
6. Loza, P. A., & Grishechkina, T. S. (2015). Estimation of the quality of implementation electric rolling stock maintenance system. *Electrification of Transport*, 9, 87-93. (in Russian)

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

7. Ochkasov, O. B., Grishechkina, T. S., & Ocheretnyuk, M. V. (2017). Approaches to the System Simulation of Maintenance Operations for Locomotives. In *V International Scientific and Practical Internet Conference: Actual Problems of Automation and Control* (pp. 99-104). Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine. (in Ukrainian)
8. *Planovoe tekhnicheskoe obsluzhivanie, ES40ACi/ES44ACi. Dokument № GEK-114350F.* (2012). GE Transportation. (in Russian)
9. Plyaskin, A. K., & Kushniruk, A. S. (2019). Information modeling technology designed to monitor the actual technical state of locomotives: application features. *Bulletin of scientific research results*, 2, 58-71. (in Russian)
10. *Polozhennia pro planovo-poperedzhuvalnu systemu remontu i tekhnichnoho obsluhovuvannia tiahovoho rukhomoho skladu (elektrovoziv, teplovoziv, elektro ta dyzel-poizdiv).* № 55. (2019). (in Ukrainian)
11. Bodnar, B., & Ochkasov, O. (2017). System Choice of the Technical Maintenance of Locomotives Equipped with on-Board Diagnostic Systems. In *Transport Means: Proceedings of 21st International Scientific Conference* (P. I., pp. 43-47). Kaunas University of Technology, Klaipėda University, Kaunas, Lithuania. (in English)
12. Bodnar, B. E., Ochkasov, O. B., Bodnar, E. B., Hryshechkina, T. S., & Ocheretnyuk, M. V. (2018). Simulation of locomotive repair organization by the methods of queue systems theory. *Science and Transport Progress*, 5(77), 28-40. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/147740> (in English)
13. Bodnar, B. E., Ochkasov, O. B., Hryshechkina, T. S., & Bodnar, E. B. (2018). Choosing the system of locomotive maintenance in view of the effect of dependent failures. *Science and Transport Progress*, 6(78), 47-58. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154823> (in English)
14. Lovett, A. H., Dick, C. T., Ruppert, C., Saat, M. R., & Barkan, C. (2013). Development of an Integrated Model for the Evaluation and Planning of Railroad Track Maintenance. *2013 Joint Rail Conference*. DOI: <https://doi.org/10.1115/jrc2013-2407> (in English)

Надійшла до редколегії: 29.05.2020

Прийнята до друку: 30.09.2020

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

УДК 625.42:[621.333.4:621.311.6]

А. О. СУЛИМ<sup>1\*</sup>, П. О. ХОЗЯ<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування» (ДП «УкрНДІВ»), вул. І. Приходька, 33, Кременчук, Україна, 39621, тел. +38 (05366) 6 03 54, ел. пошта sulim1.ua@gmail.com, ORCID 0000-0001-8144-8971

<sup>2</sup>Науково-дослідна лабораторія експериментальних досліджень залізничної техніки, ДП «УкрНДІВ», вул. І. Приходька, 33, Кременчук, Україна, 39621, тел. +38 (05366) 6 20 43, ел. пошта pavel.ua@gmail.com, ORCID 0000-0001-8948-6032

### УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДОЛОГІЇ ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ЄМНІСНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ПОЇЗДА МЕТРОПОЛІТЕНУ

**Мета.** За основну мету автори ставлять визначення раціональної потужності та енергоємності бортового ємнісного накопичувача енергії (ЄНЕ) з використанням комплексного підходу оцінки параметрів, в основу якого покладено методи теоретичних досліджень. **Методика.** Виконано порівняльний аналіз наявних методологій та підходів до визначення параметрів бортових ємнісних накопичувачів для поїзда метрополітену із системами рекуперації, сформульовано переваги й недоліки кожного з них. Установлено, що серед цих методологій найбільш доцільно використовувати комплексний підхід, суть якого полягає у визначенні раціональної потужності та енергоємності одразу за двома параметрами системи накопичення – масою та терміном окупності. Запропоновано процедуру для визначення раціональних параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії з використанням таких методів досліджень: теоретичних основ електричної тяги, математичного моделювання динаміки руху та енергетичних процесів, математичної статистики, техніко-економічного та порівняльного аналізів. **Результати.** Проведений комплекс теоретичних досліджень дозволяє підтвердити економічну доцільність упровадження бортових ємнісних накопичувачів енергії на поїзді метрополітену. Визначено систему накопичення з раціональними параметрами ЄНЕ для заданих умов експлуатації в комунальному підприємстві «Київський метрополітен» та для обраного дослідного поїзда метрополітену. Оцінено кількість заощадженої електроенергії за рахунок упровадження такої системи. **Наукова новизна.** Удосконалено методологію визначення раціональних параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії в частині заміни використання даних експериментальних досліджень теоретичними дослідженнями, суть яких полягає в моделюванні руху поїзда метрополітену із системами рекуперації за допомогою програмного забезпечення, що дозволить зменшити фінансові витрати, час на виконання досліджень та підвищить їх точність. Отримали подальший розвиток дослідження з визначення кількісних показників електроенергії рекуперації для аналізу резервів енергозбереження в метрополітені. **Практична значимість.** Результати теоретичних досліджень можуть стати основою для створення натурних зразків поїздів метрополітену з бортовими ємнісними накопичувачами енергії. Проведені дослідження дозволять створити рекомендації щодо проектування інноваційних енергоощадних поїздів метрополітену з поліпшеними техніко-економічними характеристиками, які здатні підвищити ефективність функціонування перевізного процесу в метрополітені.

**Ключові слова:** бортовий ємнісний накопичувач енергії (ЄНЕ); конденсаторний модуль; поїзд метрополітену; система накопичення; система рекуперації

## Вступ

В останні роки фірми США, Японії, Кореї, країн Європейського Союзу, а також вітчизняні виробники суттєво підвищили електроенергетичні характеристики ємнісних накопичувачів енергії (ЄНЕ), які ще називають суперконденсатори, ультраконденсатори, іоністори, двошарові електрохімічні конденсатори. Це стало поштовхом для проведення чималої кількості досліджень з їх практичного використання як джерел живлення, зокрема і в метрополітені для зберігання електроенергії рекуперативного гальмування та її повторного використання тяговим електроприводом під час розгону поїзда. При цьому одним із маловивчених та актуальних питань залишається визначення необхідних параметрів бортового ЄНЕ для поїзда метрополітену [15–18, 21, 22].

Ця стаття є продовженням циклу наявних досліджень [2–4, 7, 8, 12, 13, 20], у яких розглянуто питання визначення параметрів бортового ЄНЕ, зокрема його потужності та енергоємності. У зазначених роботах визначення параметрів запропоновано виконувати як із використанням теоретичних досліджень, так і за результатами аналізу даних експериментальних досліджень енергетичних процесів між контактною мережею та тяговим електроприводом у штатних умовах експлуатації рухомого складу. В основу цих досліджень покладено такі методи та основні положення: положення теорії електричної тяги та чисельних методів інтегрування, методи аналізу характеристик щільності розподілу потужності та кількості електроенергії рекуперативної, положення теорії ймовірності, теоретичні основи електротехніки та інші. Однак за результатами аналізу робіт [5, 14, 19] відомо, що ці методи та основні положення не дозволяють у повній мірі враховувати ряд факторів реальних умов експлуатації, основними серед яких є: профіль колії, завантаженість вагонів, зміна графіка руху поїзда протягом доби, наявність комбінованого гальмування. Загальним недоліком запропонованих методів та підходів у роботах [2–4, 7, 8, 12, 13, 20] є неможливість визначення раціональних параметрів бортового ЄНЕ. Більш детально аналіз переваг та недоліків кожного з методів описано в роботі [19].

У працях [5, 14] вибір параметрів бортового ЄНЕ запропоновано здійснювати за критерієм

мінімального терміну окупності систем накопичення. Під системою накопичення мається на увазі бортовий ЄНЕ, реверсивний статичний перетворювач та система керування енергообмінними процесами між бортовим ЄНЕ та тяговим електроприводом. Суть цього підходу полягає у визначенні параметрів за результатами аналізу діаграм терміну окупності обраних систем накопичення. Перевага застосування цього підходу полягає у визначенні раціональних параметрів бортового ЄНЕ. При цьому враховують реальні умови експлуатації поїзда метрополітену з системами рекуперативної. Недоліком підходу є визначення раціональних параметрів бортового ЄНЕ за одним критерієм – терміном окупності системи накопичення.

У роботі [19] запропоновано комплексний підхід до оцінки раціональних параметрів бортового ЄНЕ, який дозволяє здійснювати його вибір за двома важливими показниками системи накопичення – масою та терміном окупності. Цей підхід передбачає проведення експериментальних досліджень у реальних умовах експлуатації поїзда, причому дозволяє враховувати ті фактори, які не враховано у вищезазначених роботах.

Однак у комплексному підході, запропонованому в роботі [19], в основу якого покладено аналіз даних експериментальних досліджень, також наявні недоліки, головними з яких є значні витрати часу та фінансів. Ще один суттєвий недолік, який не дозволяє в повній мірі отримувати реальну картину, – це неможливість урахування зміни завантаження поїзда під час його експлуатації на лінії, оскільки організація таких досліджень за умов графікового руху є проблематичною. Як правило, під час експериментальних досліджень припускають, що за добу поїзд експлуатується з мінімальним, номінальним і максимальним завантаженням. І відповідно, такі дослідження за часту виконують за штатної експлуатації поїзда для трьох режимів його завантаження. Отже, під час визначення раціональної потужності та енергоємності бортового ЄНЕ шляхом використання даних експериментальних досліджень існує похибка, яка виникає через відсутність врахування зміни завантаженості поїзда під час експлуатації на лінії. Тому в цій роботі для зменшення фінансових витрат, часу на виконання досліджень та підвищення точності отриманих

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

маних результатів запропоновано визначити раціональні параметри бортового ЄНЕ за допомогою розробленої математичної моделі руху поїзда метрополітену з системами рекуперації.

**Мета**

За основну мету автори роботи ставлять визначення раціональної потужності та енергоємності бортового ЄНЕ з використанням комплексного підходу оцінки параметрів, в основу якого покладено методи теоретичних досліджень.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання:

– розробити комплексний підхід із визначення раціональних параметрів бортового ЄНЕ на основі використання математичної моделі руху поїзда, який дозволить враховувати масові та вартісні показники системи накопичення;

– визначити раціональні параметри бортового ЄНЕ для заданих умов експлуатації поїзда метрополітену з використанням комплексного підходу;

– визначити кількість заощадженої електроенергії для заданих режимів ведення поїзда за рахунок упровадження системи накопичення з раціональними параметрами;

– визначити вплив обраної системи накопичення з раціональними параметрами бортового ЄНЕ на масу та динаміку розгону поїзда метрополітену.

**Методика**

Для вирішення поставлених завдань використано такі методи досліджень: теоретичні основи електричної тяги під час виконання тягових розрахунків, математичне моделювання динаміки руху та енергетичних процесів у штатних умовах експлуатації поїзда метрополітену із системами рекуперації, сучасні методи математичної статистики для обробки даних математичного моделювання, методи техніко-економічного аналізу для оцінки вартості систем накопичення, аналітичні методи досліджень для визначення кількості заощаджень за умов упровадження систем накопичення, методи порівняльного аналізу для визначення системи накопичення з раціональними параметрами за діаграмами терміну окупності від величин енергоємності та потужності.

Комплексний підхід до оцінки раціональних параметрів бортового ЄНЕ передбачає поетапну процедуру досліджень (рис. 1).

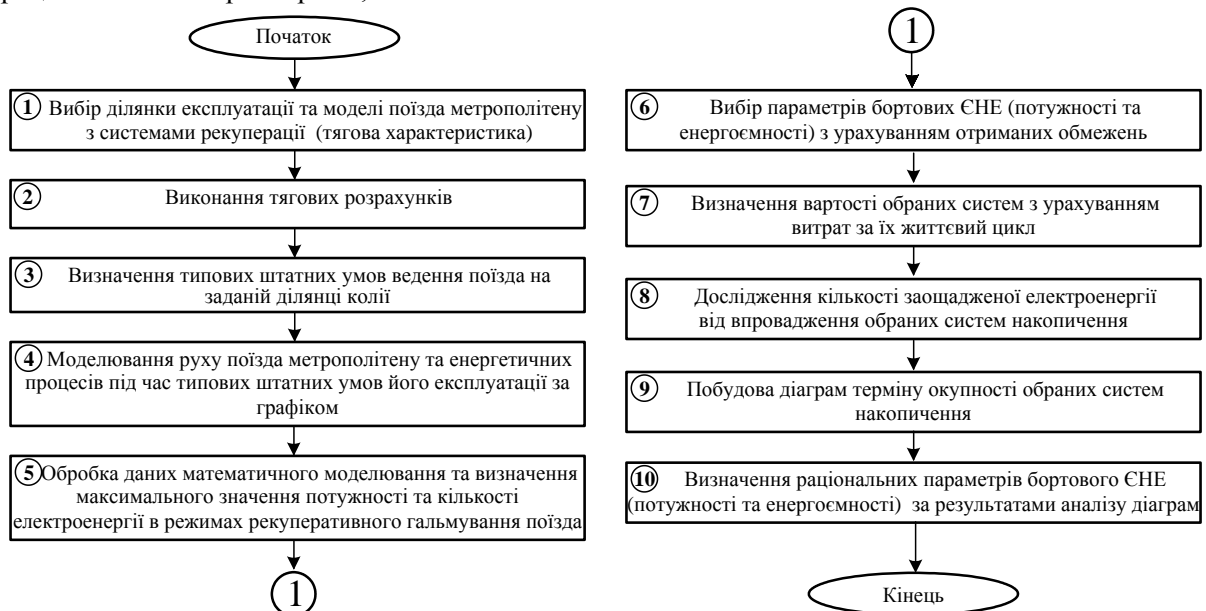


Рис. 1. Процедура визначення раціональних параметрів бортового ЄНЕ з використанням комплексного підходу

Fig.1. Procedure for determining the rational parameters of the onboard capacitive energy storage using an integrated approach

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Як було зазначено раніше, суть цього підходу полягає у визначенні раціональних параметрів одразу за двома параметрами системи накопичення – масою та терміном окупності. При цьому основною відмінністю від підходу в роботі [19] є те, що в основу цієї процедури покладено теоретичні дослідження, суть яких полягає в моделюванні руху поїзда метрополітену із системами рекуперації за допомогою програмного забезпечення.

Узагальнений математичний опис цільової функції комплексного підходу з визначення раціональних параметрів бортового ЄНЕ можна представити в такому вигляді:

$$F(\bar{X}) \rightarrow \text{extremum}, \bar{X} \in D_1 \dots D_k, \quad (1)$$

де  $F(\bar{X})$  – головний критерій оптимальності;  $D$  – область можливих рішень, яку визначають за границями відповідних значень (параметричні обмеження);  $k$  – кількість прийнятих обмежень для пошуку оптимального рішення.

У нашому випадку основним критерієм оптимізації обрано термін окупності системи накопичення. З урахуванням обраного критерію сформулюємо задачу оптимізації: знайти такі значення потужності та енергоємності бортового ЄНЕ ( $P_{\text{ЄНЕ}}, A_{\text{ЄНЕ}}$ ), за яких:

$$T_{\text{ок}} = F(P_{\text{ЄНЕ}}, A_{\text{ЄНЕ}}) \rightarrow \min. \quad (2)$$

Причому для цільової функції було встановлено такі граничні значення параметрів:  $P_{\text{ЄНЕ}} \in [0 \dots P_{\Delta m}]$ ,  $A_{\text{ЄНЕ}} \in [0 \dots A_{\Delta m}]$ ,  $P_{\text{ЄНЕ}} \in [0 \dots P_{\text{max}}]$ ,  $A_{\text{ЄНЕ}} \in [0 \dots A_{\text{рекmax}}]$ , де  $P_{\Delta m}$ ,  $A_{\Delta m}$  – максимальні значення потужності та енергоємності за масою, які залежать від типу поїзда метрополітену із системами рекуперації та конденсаторних модулів;  $P_{\text{max}}$ ,  $A_{\text{рекmax}}$  – максимальні значення потужності та кількості електроенергії рекуперації для заданих штатних умов експлуатації поїзда.

За умов, якщо цільова функція має декілька мінімальних значень, обирають систему накопичення, яка здатна заощаджувати максимальну кількість електроенергії, тобто:

$$\alpha = \begin{pmatrix} T_{\text{ок1}} \\ T_{\text{ок2}} \\ \dots \\ T_{\text{окj}} \end{pmatrix} \rightarrow \max, \quad (3)$$

де  $j$  – кількість систем накопичення з однако- вим мінімальним терміном окупності;  $\alpha$  – кількість заощадженої електроенергії за рахунок упровадження системи накопичення.

Далі із застосуванням цього підходу розглянуто визначення раціональної потужності та енергоємності бортового ЄНЕ для конкретних заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену із системами рекуперації.

## Результати

*Перший етап.* За дослідну обрано ділянку між кінцевими станціями Святошинсько-Броварської лінії КП «Київський метрополітен». Дослідний рухомий склад являє собою п'ятивагонний поїзд з асинхронним тяговим приводом та системами рекуперації, у якому головні вагони – безмоторні, проміжні – моторні. Дослідження виконано для типових умов експлуатації поїзда із системами рекуперації протягом доби.

*Другий етап.* В основу тягових розрахунків покладено принципи вибору сили тяги (гальмування) з урахуванням обмежень за максимальним моментом двигуна, за зчепленням коліс з рейками, та забезпечення тяговими двигунами заданої динаміки руху поїзда. Алгоритм тягових розрахунків для визначення обмежень за масою наведено на рис. 2.

Розрахунок максимально допустимої сили тяги (гальмування) за перевантажувальними можливостями моменту на валу двигуна виконують за умови:

$$F_{\text{max}} \leq \frac{2 \cdot M \cdot \mu \cdot \eta_{\text{ред}} \cdot N_{\text{дв}}}{D}, \quad (4)$$

де  $M$  – максимальний момент на валу тягового двигуна, Н·м;  $\mu$  – передаточне число редуктора;  $\eta_{\text{ред}}$  – коефіцієнт корисної дії редуктора;  $D$  – діаметр колеса, м;  $N_{\text{дв}}$  – кількість тягових двигунів, шт.

Розрахунок максимально допустимої сили тяги (гальмування) за зчепленням коліс з рейками виконують за умови:

$$F_{\text{max}} \leq 1000 \cdot G_{\text{зч}} \cdot \psi, \quad (5)$$

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

де  $G_{зч}$  – сила тяжіння (зчіпна вага), яка припадає на обмоторену вісь поїзда, кН;  $\psi$  – розрахункове значення коефіцієнта зчеплення за нормальних умов.

Примітка. Розрахункове значення коефіцієнта зчеплення колеса з рейкою для поїзда метрополітену з асинхронним тяговим приводом за нормальних умов обирають на рівні 0,22 [1, 6].

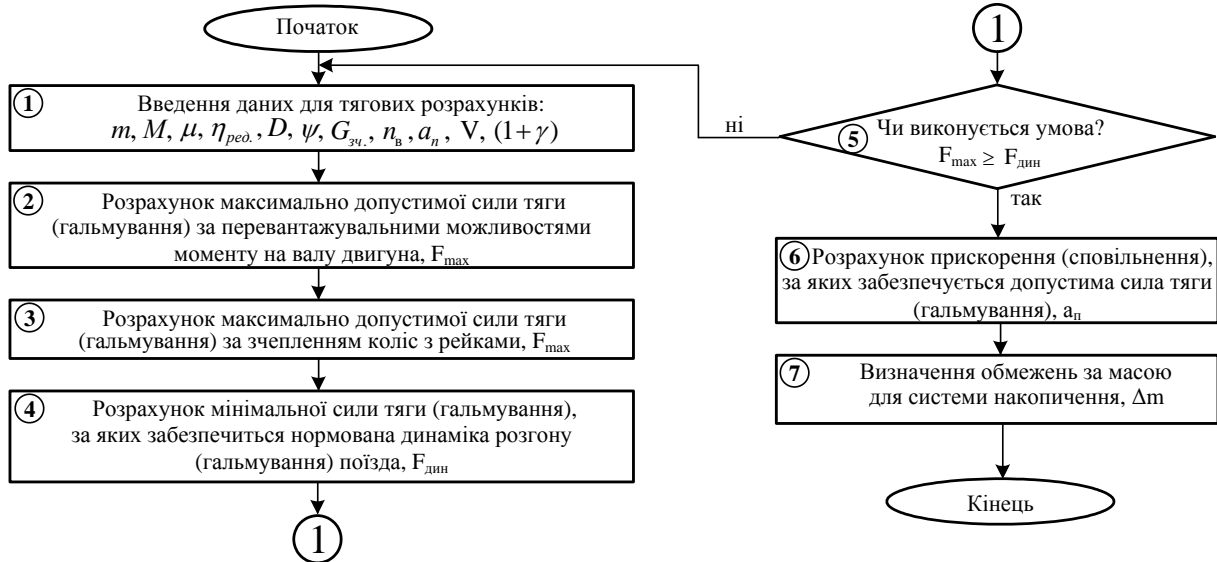


Рис. 2. Алгоритм тягових розрахунків

Fig.2. Traction calculation algorithm

Розрахунок необхідної сили тяги (гальмування), виходячи з вимог нормативної документації щодо значень середнього прискорення (сповільнення), виконують за умови [1, 6]:

$$F_{\text{дин}} \geq m \cdot (1 + \gamma) \cdot a + W, \quad (6)$$

де  $m$  – маса поїзда, т;  $(1 + \gamma)$  – коефіцієнт інерції обертальних мас поїзда;  $a$  – нормоване значення прискорення (сповільнення), м/с<sup>2</sup>;  $W$  – основний опір руху поїзда, кН.

Розрахунок основного опору руху поїзда виконують за формулою [1]:

$$W = \left( 1,1 + \frac{(0,09 + 0,022 \cdot n_{\text{в}}) \cdot V^2}{m} \right) \cdot G, \quad (7)$$

де  $n_{\text{в}}$  – кількість вагонів поїзда, шт;  $V$  – значення швидкості руху поїзда, км/год.

Розрахунок максимально допустимої сили тяги (гальмування) виконуються з урахуванням умов (1) – (3). У випадку, якщо максимально допустима сили тяги (гальмування) не відповідає жодній і наведених умов, розміщення ЄНЕ на поїзді неможливе тоді (необхідно збільшити число моторних осей поїзда метрополітену, об-

рати тягові двигуни з іншими параметрами тощо). В іншому випадку виконують розрахунок значення прискорення (сповільнення), при якому забезпечується допустима сила тяги (гальмування), за формулою:

$$a_n = \frac{F_{\text{max}} - W}{m(1 + \gamma)}. \quad (8)$$

При цьому для розрахунків беруть менше значення допустимої сили тяги ( $F_{\text{max}} \rightarrow \min$ ), виходячи із зазначених умов (4) та (5).

Визначення обмежень за масою виконують за формулою:

$$\Delta m \leq \frac{F_{\text{max}} - F_{\text{дин}}}{a \cdot (1 + \gamma)} \quad (9)$$

Чиним нормативним документом [9] встановлено вимоги до динаміки розгону (гальмування) поїзда метрополітену. Згідно з цим документом під час розгону поїзда до швидкості 33 км/год повинно забезпечуватись середнє прискорення не менше ніж 1,2 м/с<sup>2</sup>, а також у разі гальмування поїзда за швидкості 90 км/год – середнє сповільнення не менше ніж

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

1,15 м/с<sup>2</sup> за умов його номінального завантаження. Ураховуючи, що на дослідному поїзді метрополітену наявне комбіноване гальмування (суміщення електричного та пневматичного), на перший план виходить забезпечення нормованого прискорення. Таким чином, тягові розрахунки виконано для перевірки умови забезпечення розгону поїзда.

Параметри тягових асинхронних двигунів (ТАД), що встановлені на модернізованому поїзді метрополітену, такі:  $P_n = 150$  кВт;  $U_n = 610$  В;  $I_n = 185$  А;  $n_n = 1\,900$  об/хв;  $f_n = 65$  Гц;  $M = 2,21$  кН·м. Параметри тягової передачі та поїзда метрополітену:  $D = 0,825$  м;  $\eta_{ред} = 0,975$ ;  $\mu = 6,95$ ;  $m = 238,7$  т (номінальне завантаження);  $(1+\gamma) = 1,06$ ;  $G_{зч} = 1,44$  кН;  $a = 1,2$  м/с<sup>2</sup>.

Результати тягових розрахунків, виконаних за формулами (4) – (9), представлено в табл. 1.

Таким чином, за результатами тягових розрахунків для заданих умов встановлено, що маса системи накопичення для обраного типу поїзда не повинна перевищувати 7,86 т.

*Третій етап.* Типові режими ведення поїзда метрополітену із системами рекуперації отримано експериментальним шляхом під час його руху згідно з «непіковим» та «піковим» графіками на заданих ділянках колії. При цьому кількість проїздів для кожного перегону та графіка руху становила не менше ніж 20 разів

( $n \geq 20$ ). Отримані дані було піддано методам статистичної обробки. Результати обробки даних, отриманих під час експлуатації поїзда на перегоні Хрещатик – Театральна, наведено на рис. 3.

Таблиця 1

## Результати тягових розрахунків

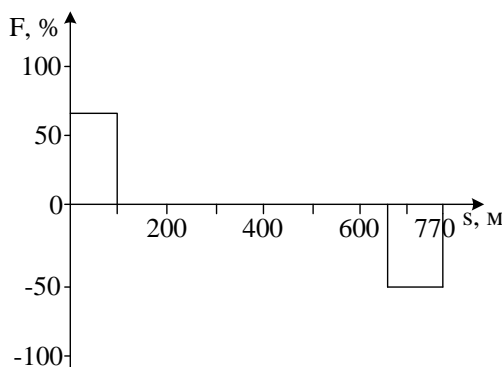
Table 1

Results of traction calculations	
Параметр	Значення
$F_{max}$ за формулою (4), кН	$\leq 436$
$F_{max}$ за формулою (5), кН	$\leq 317$
$F_{дин}$ , кН	$\geq 307$
$W$ , кН	2,9
$a_n$ , м/с <sup>2</sup>	1,24
$\Delta m$ , т	7,86

Аналогічним чином було визначено середньостатистичні керуючі впливи на інших ділянках колії (перегонах).

Завантаженість поїзда протягом доби в робочі та вихідні за його «пікового» й «непікового» графіків руху залежно від перегону зображено на рис. 4–6.

а – а



б – б

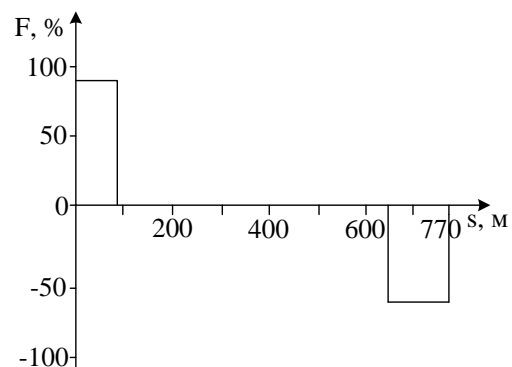


Рис. 3. Результати обробки даних під час визначення типових керуючих впливів на перегоні Хрещатик – Театральна за «непікового» (а) та «пікового» (б) графіків руху

Fig. 3. The results of data processing when determining the typical control actions on the Khreshchatyk – Teatralna run on «off-peak» (a) and «peak» (b) schedules

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

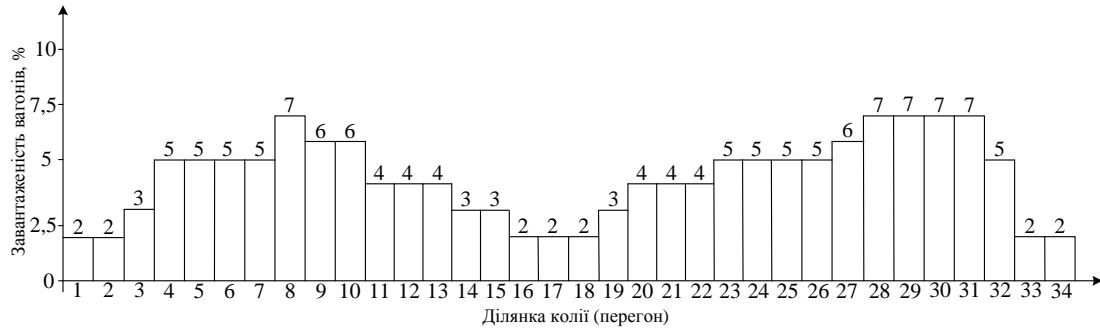
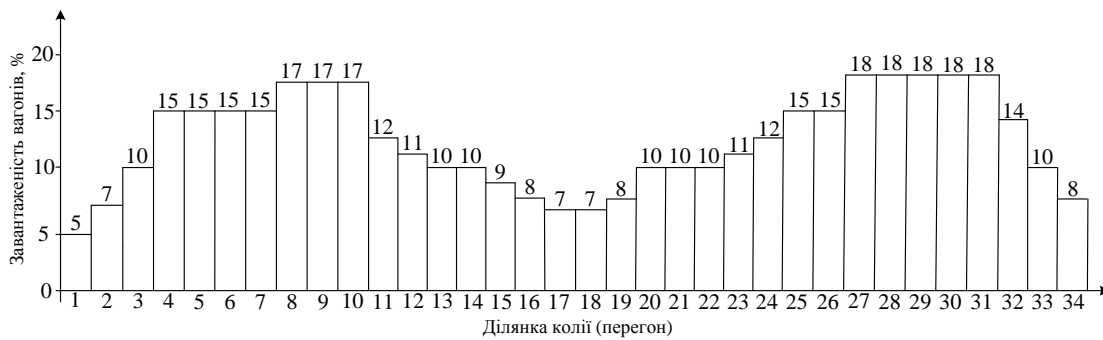
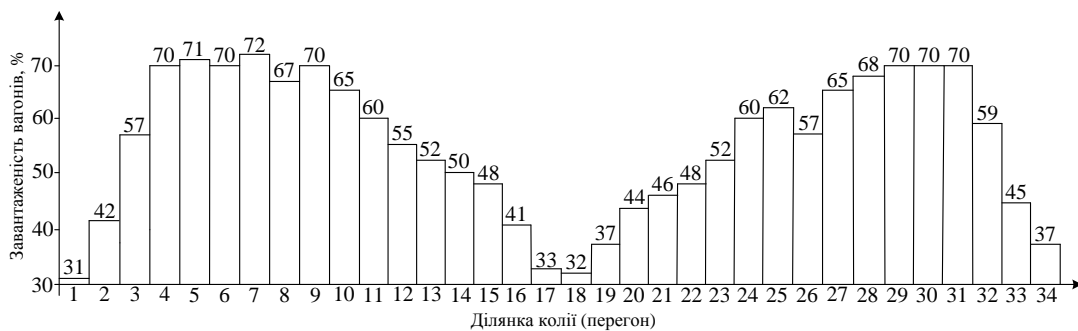
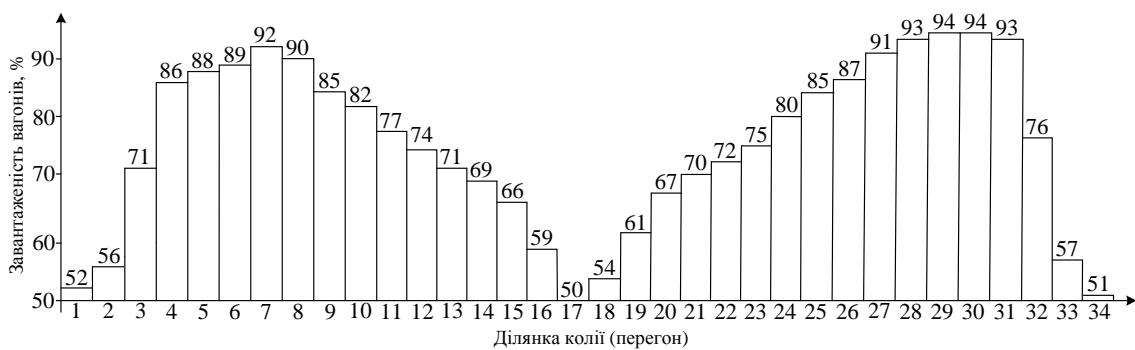
*a – a**б – b**в – c**г – d*

Рис. 4. Завантаженість поїзда протягом доби в робочий день під час його експлуатації за «непіковим» графіком:

*a* – 5<sup>30</sup>–7<sup>00</sup>; 21<sup>00</sup>–23<sup>30</sup>; *b* – 7<sup>00</sup>–8<sup>00</sup>; 20<sup>00</sup>–21<sup>00</sup>; *c* – 10<sup>00</sup>–18<sup>00</sup>; *d* – 9<sup>00</sup>–10<sup>00</sup>; 19<sup>00</sup>–20<sup>00</sup>

Fig. 4. Train loading during the day on a weekday when it is operated according to «off-peak» schedule:  
*a* – 5.30–7.00; 21.00–23.30; *b* – 7.00–8.00; 20.00–21.00; *c* – 10.00–18.00; *d* – 9.00–10.00; 19.00–20.00

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

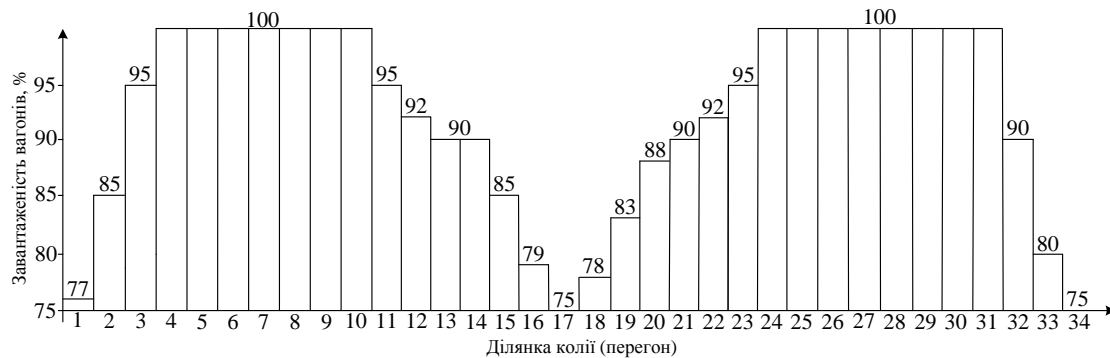
Рис. 5. Завантаженість поїзда протягом доби в робочий день під час його експлуатації за «піковим» графіком (8<sup>00</sup>–9<sup>00</sup>; 17<sup>00</sup>–18<sup>00</sup>)

Fig. 5. Train loading during the day on a weekday when it is operated according to «peak» schedule (8.00–9.00; 17.00–18.00)

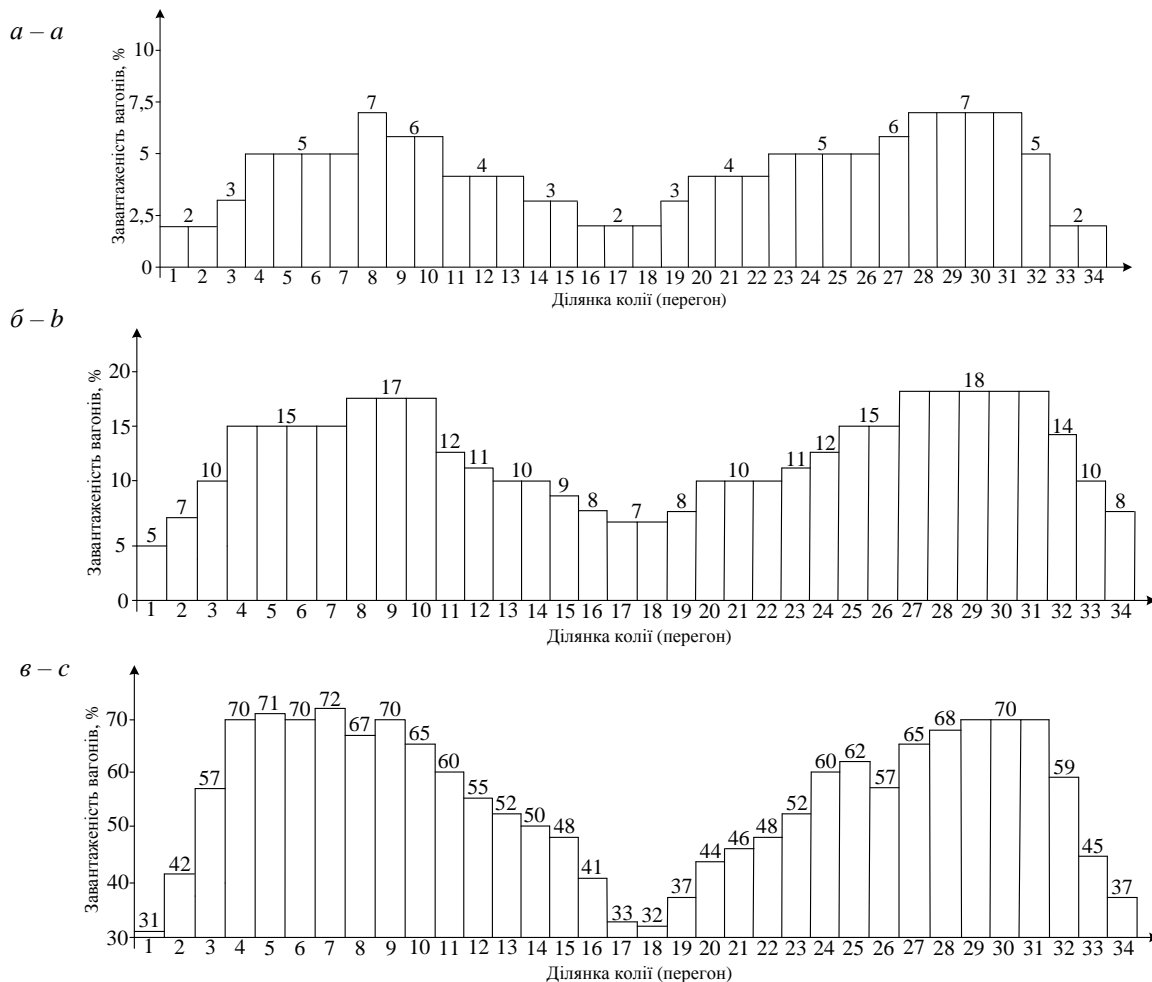
Рис. 6. Завантаженість поїзда протягом доби у вихідний день під час його експлуатації за «непіковим» графіком: а – 5<sup>30</sup>–8<sup>00</sup>; 22<sup>00</sup>–23<sup>30</sup>; б – 8<sup>00</sup>–9<sup>00</sup>; 21<sup>00</sup>–22<sup>00</sup>; в – 9<sup>00</sup>–21<sup>00</sup>

Fig. 6. Train loading during the day on a weekend when it is operated according to «peak» schedule а – 5.30–8.00; 22.00–23.30; б – 8.00–9.00; 21.00–22.00; в – 9.00–21.00

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

На рис. 4–6 узяті такі позначення перегонів: Лісова – Чернігівська (1); Чернігівська – Дарниця (2); Дарниця – Лівобережна (3); Лівобережна – Гідропарк (4); Гідропарк – Дніпро (5); Дніпро – Арсенальна (6); Арсенальна – Хрещатик (7); Хрещатик – Театральна (8); Театральна – Університет (9); Університет – Вокзальна (10); Вокзальна – Політехнічний інститут (11); Політехнічний інститут – Шулявська (12); Шулявська – Берестейська (13); Берестейська – Нивки (14); Нивки – Святошин (15); Святошин – Житомирська (16); Житомирська – Академістечко (17); Академістечко – Житомирська (18); Житомирська – Святошин (19); Святошин – Нивки (20); Нивки – Берестейська (21); Берестейська – Шулявська (22); Шулявська – Політехнічний інститут (23); Політехнічний інститут – Вокзальна (24); Вокзальна – Університет (25); Університет – Театральна (26); Театральна – Хрещатик (27); Хрещатик – Арсенальна (28); Арсенальна – Дніпро (29); Дніпро – Гідропарк (30); Гідропарк – Лівобережна (31); Лівобережна – Дарниця (32); Дарниця – Чернігівська (33); Чернігівська – Лісова (34).

Дослідження (моніторинг) завантаженості поїзда виконали фахівці КП «Київський метрополітен» під час штатних умов його експлуатації в період з 24 по 30 листопада 2019 року на Святошинсько-Броварській лінії.

Узято, що протягом доби поїзд експлуатують таким чином:

– у робочі дні (5 днів на тиждень) сім повних кіл з дотриманням «непікового» графіка руху (2 кола із мінімальним завантаженням (рис. 4, а); 1 коло – завантаження (рис. 4, б); 2 кола – завантаження (рис. 4, в); 2 кола – завантаження (рис. 4, г)) та два повних кола з дотриманням «пікового» графіка (рис. 5);

– у вихідні (2 дні на тиждень) сім повних кіл з дотриманням «непікового» графіка (1 коло з мінімальним завантаженням (рис. 6, а); 1 коло – завантаження (рис. 6, б); 5 кіл – завантаження (рис. 6, в)).

Протягом року поїзд експлуатують 315 днів, із яких 225 робочих і 90 вихідних.

*Четвертий етап* передбачає моделювання руху поїзда метрополітену. Із використанням розробленого й атестованого програмного забезпечення Motion Simulation (далі – ПЗ «Motion Simulation») виконано моделювання динамічних та енергетичних процесів під час заданих штатних умов експлуатації поїзда метрополітену. Вхідні дані, показники динамічних та енергетичних процесів, а також результуючі вихідні показники, визначені під час моделювання, формули розрахунків цих показників більш детально розглянуто й описано в роботі [11]. Тому зупинитись на цьому питанні немає необхідності. Слід лише зазначити, що вхідні дані містять: енергетичну характеристику (залежність ККД тягового двигуна від швидкості руху), кількість заданих режимів ведення поїзда на перегоні, параметри профілю колії, статичні та динамічні параметри для кожного режиму ведення. Результуючим є визначення таких показників: кількість витраченої електроенергії на тягу ( $A_{\text{тяги}}$ ), кількість електроенергії, яку генерує поїзд під час рекуперативного гальмування ( $A_{\text{рек}}$ ), максимальна потужність у режимі рекуперативного гальмування ( $P_{\text{max}}$ ).

Графіки залежностей швидкості від пройденої відстані та швидкості від часу, отримані за результатами математичного моделювання під час «пікового» графіка руху на ділянці Політехнічний інститут – Шулявська, зображено на рис. 7 і 8 відповідно.

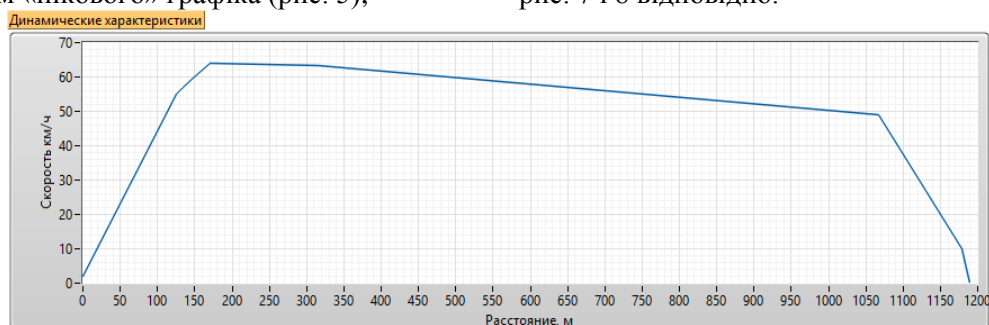


Рис. 7. Графік швидкості залежно від пройденої відстані

Fig. 7. Speed chart depending on the distance traveled

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

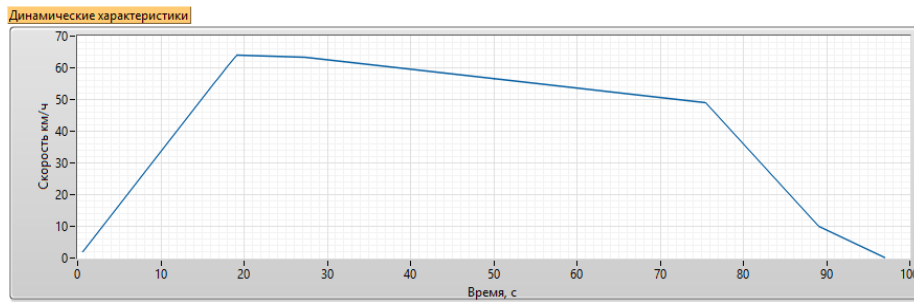


Рис. 8. Графік швидкості залежно від часу

Fig. 8 Speed chart depending on time

Також було отримано графіки енергетичних процесів. Аналогічним чином виконано моделювання та отримано графіки для інших умов руху (ділянок, завантажень поїзда, графіка руху тощо).

На *n'ятому етапі* виконано обробку даних математичного моделювання з використанням ПЗ «Motion Simulation». Результати обробки даних представлено в табл. 2–3.

Таблиця 2

## Результати обробки даних під час руху поїзда в робочий день

Table 2

## Data processing results during the train operation on a weekday

Досліджувана ділянка	«Непіковий» графік руху за умов мінімального завантаження поїзда (рис. 4, а) / завантаження поїзда (рис. 4, б) / завантаження поїзда (рис. 4, в) / завантаження поїзда (рис. 4, г) / «піковий» графік руху за умов максимального завантаження (рис. 5)		
	$A_{тяги}$ , кВт·год	$A_{рек}$ , кВт·год	$P_{max}$ , МВт
Лісова – Чернігівська	8,05/8,27/8,79/9,07/13,44	2,84/3,11/4,76/5,05/8,96	2,14/2,54/1,8/2,47/3,88
Чернігівська – Дарниця	8,78/9,02/9,78/10,8/15,63	2,12/2,35/2,63/3,37/6,75	1,12/1,24/2,09/2,12/2,43
Дарниця – Лівобережна	7,92/8,03/10,85/12,47/14,03	2,41/2,84/3,03/2,36/6,42	1,15/1,42/1,54/1,66/2,44
Лівобережна – Гідропарк	7,41/8,3/10,54/12,53/16,47	3,1/3,5/4,18/5,06/9,74	1,66/1,73/2,58/2,46/2,72
Гідропарк – Дніпро	13,55/15,58/19,77/22,31/23,74	2,2/2,41/4,29/4,59/8,34	1,21/1,36/2,22/2,1/2,49
Дніпро – Арсенальна	3,73/3,54/3,43/4,06/2,83	8,13/7,98/8,87/9,14/8,36	1,32/1,25/2,22/2,49/2,1
Арсенальна – Хрещатик	7,78/8,75/12,03/12,4/15,45	3,11/3,34/4,63/4,69/5,9	0,99/1,17/1,94/1,56/2,31
Хрещатик – Театральна	5,97/6,05/7,78/7,59/8,02	1,96/2,02/4,07/3,76/4,25	0,92/1,01/1,33/1,28/1,74
Театральна – Університет	5,91/6,13/7,49/8,67/12,43	2,25/3,02/3,41/3,63/5,25	0,87/1,18/1,18/2,03/2,73
Університет – Вокзальна	6,22/6,15/8,04/9,15/12,07	1,82/1,8/2,78/3,41/4,85	0,51/0,65/1,01/1,74/3,06
Вокзальна – Політехнічний інститут	10,52/10,74/13,94/16,99/17,51	2,85/2,91/3,74/4,68/4,86	1,13/1,2/1,8/2,31/2,19

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Продовження табл. 2  
Continuation of Table 2

Досліджувана ділянка	«Непіковий» графік руху за умов мінімального завантаження поїзда (рис. 4, а) / завантаження поїзда (рис. 4, б) / завантаження поїзда (рис. 4, в) / завантаження поїзда (рис. 4, г) / «піковий» графік руху за умов максимального завантаження (рис. 5)		
	$A_{тяги}$ , кВт·год	$A_{рек}$ , кВт·год	$P_{max}$ , МВт
Політехнічний інститут – Шулявська	9,74/10,05/11,08/12,36/15,88	3,3/3,53/4,29/3,95/5,98	1,11/1,45/1,26/2,06/2,66
Шулявська – Берестейська	52,39/53,99/64,76/79,97/81,8	3,45/3,47/3,22/4,13/4,48	1,18/1,38/1,17/1,9/1,67
Берестейська – Нивки	8,84/9,02/11,07/13,22/18,81	3,18/3,27/6,65/8,01/9,64	1,76/2,15/2,56/3,07/3,71
Нивки – Святошин	9,17/9,3/11,23/13,65/13,15	2,44/3,36/3,49/3,62/3,66	0,66/1,78/1,07/2,48/1,75
Святошин – Житомирська	6,04/6,24/6,75/7,04/9,0	8,67/8,69/9,01/9,13/10,47	2,2/2,18/2,85/2,8/3,44
Берестейська – Шулявська	4,91/5,23/4,8/5,14/5,21	23,27/23,48/30,05/45,09/44,96	1,79/2,14/2,76/3,34/3,83
Шулявська – Політехнічний інститут	7,49/8,51/9,28/12,9/17,82	3,43/3,86/5,18/7,32/10,12	1,72/1,86/2,46/2,93/3,38
Політехнічний інститут – Вокзальна	11,03/11,51/13,74/15,04/15,53	1,84/2,27/3,72/5,2/5,67	0,85/0,77/1,29/1,27/1,32
Вокзальна – Університет	6,75/6,99/8,04/8,15/10,45	1,76/1,96/2,4/2,53/4,02	0,65/0,72/0,78/0,91/1,82
Університет – Театральна	6,22/6,37/7,94/8,68/10,74	1,75/1,61/2,7/3,21/4,1	0,5/0,61/0,81/0,99/1,4
Театральна – Хрещатик	6,3/6,71/8,13/11,44/13,67	0,95/1,1/2,14/4,14/5,65	0,55/0,78/0,65/1,44/1,92
Хрещатик – Арсенальна	10,08/11,5/12,86/13,73/13,88	2,15/2,78/3,36/4,41/4,12	1,7/1,83/1,9/1,81/1,57
Арсенальна – Дніпро	15,75/16,36/22,46/22,79/23,09	4,39/4,52/3,38/4,34/4,57	1,85/2,48/1,63/1,4/2,21
Дніпро – Гідропарк	9,45/10,49/13,1/13,6/15,84	9,1/9,87/11,43/11,83/13,69	2,23/2,75/2,76/2,17/3,11
Гідропарк – Лівобережна	12,4/12,6/13,11/15,08/17,75	2,54/2,78/3,2/4,66/5,94	1,3/0,84/0,95/1,99/1,96
Лівобережна – Дарниця	8,75/9,22/9,96/10,2/12,65	4,8/5,03/5,46/5,56/7,22	1,64/1,39/2,4/1,82/1,85
Дарниця – Чернігівська	10,17/10,66/11,34/11,52/12,67	5,16/5,34/5,9/6,15/7,08	1,79/2,6/2,08/2,2/1,11
Чернігівська – Лісова	9,88/10,34/11,8/13,4/15,69	1,76/2,44/3,29/3,06/6,24	1,00/1,38/1,08/1,51/3,02

Таблиця 3

## Результати обробки даних під час руху поїзда у вихідний день

Table 3

## Data processing results during train operation on a weekend

Досліджувана ділянка	«Непиковий» графік руху за умов мінімального завантаження поїзда (рис. 6, а) / завантаження поїзда (рис. 6, б) / завантаження поїзда (рис. 6, в)		
	$A_{тяги}$ , кВт·год	$A_{рек}$ , кВт·год	$P_{max}$ , МВт
Лісова – Чернігівська	8,05/8,27/8,79	2,84/3,11/4,76	2,14/2,54/1,8
Чернігівська – Дарниця	8,78/9,02/9,78	2,12/2,35/2,63	1,12/1,24/2,09
Дарниця – Лівобережна	7,92/8,03/10,85	2,41/2,84/3,03	1,15/1,42/1,54
Лівобережна – Гідропарк	7,41/8,3/10,54	3,1/3,5/4,18	1,66/1,73/2,58
Гідропарк – Дніпро	13,55/15,58/19,77	2,2/2,41/4,29	1,21/1,36/2,22
Дніпро – Арсенальна	3,73/3,54/3,43	8,13/7,98/8,87	1,32/1,25/2,22
Арсенальна – Хрещатик	7,78/8,75/12,03	3,11/3,34/4,63	0,99/1,17/1,94
Хрещатик – Театральна	5,97/6,05/7,78	1,96/2,02/4,07	0,92/1,01/1,33
Театральна – Університет	5,91/6,13/7,49	2,25/3,02/3,41	0,87/1,18/1,18
Університет – Вокзальна	6,22/6,15/8,04	1,82/1,8/2,78	0,51/0,65/1,01
Вокзальна – Політехнічний інститут	10,52/10,74/13,94	2,85/2,91/3,74	1,13/1,2/1,8
Політехнічний інститут – Шулявська	9,74/10,05/11,08	3,3/3,53/4,29	1,11/1,45/1,26
Шулявська – Берестейська	52,39/53,99/64,76	3,45/3,47/3,22	1,18/1,38/1,17
Берестейська – Нивки	8,84/9,02/11,07	3,18/3,27/6,65	1,76/2,15/2,56
Нивки – Святошин	9,17/9,3/11,23	2,44/3,36/3,49	0,66/1,78/1,07
Святошин – Житомирська	6,04/6,24/6,75	8,67/8,69/9,01	2,2/2,18/2,85
Житомирська – Академмістечко	2,15/2,3/2,63	2,01/2,11/2,44	0,88/0,91/1,0
Академмістечко – Житомирська	15,05/16,34/18,31	3,49/3,57/4,01	1,5/1,68/1,85
Житомирська – Святошин	14,61/15,09/17,22	2,78/2,86/3,47	0,91/0,86/1,22
Святошин – Нивки	6,29/5,84/6,31	4,32/4,13/4,36	2,05/2,17/3,11
Нивки – Берестейська	11,04/11,43/12,41	5,21/5,29/5,89	1,69/1,72/2,33
Берестейська – Шулявська	4,91/5,23/4,8	23,27/23,48/30,05	1,79/2,14/2,76
Шулявська – КПІ	7,49/8,51/9,28	3,43/3,86/5,18	1,72/1,86/2,46
КПІ – Вокзальна	11,03/11,51/13,74	1,84/2,27/3,72	0,85/0,77/1,29
Вокзальна – Університет	6,75/6,99/8,04	1,76/1,96/2,4	0,65/0,72/0,78
Університет – Театральна	6,22/6,37/7,94	1,75/1,61/2,7	0,5/0,61/0,81
Театральна – Хрещатик	6,3/6,71/8,13	0,95/1,1/2,14	0,55/0,78/0,65
Хрещатик – Арсенальна	10,08/11,5/12,86	2,15/2,78/3,36	1,7/1,83/1,9

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Продовження таблиці 3

Continuation of Table 3

Досліджувана ділянка	«Непиковий» графік руху за умов мінімального завантаження поїзда (рис. 6, а) / завантаження поїзда (рис. 6, б) / завантаження поїзда (рис. 6, в)		
	$A_{тяги}$ , кВт·год	$A_{рек}$ , кВт·год	$P_{max}$ , МВт
Арсенальна – Дніпро	15,75/16,36/22,46	4,39/4,52/3,38	1,85/2,48/1,63
Дніпро – Гідропарк	9,45/10,49/13,1	9,1/9,87/11,43	2,23/2,75/2,76
Гідропарк – Лівобережна	12,4/12,6/13,11	2,54/2,78/3,2	1,3/0,84/0,95
Лівобережна – Дарниця	8,75/9,22/9,96	4,8/5,03/5,46	1,64/1,39/2,4
Дарниця – Чернігівська	10,17/10,66/11,34	5,16/5,34/5,9	1,79/2,6/2,08
Чернігівська – Лісова	9,88/10,34/11,8	1,76/2,44/3,29	1,00/1,38/1,08

Із результатів обробки даних математичного моделювання (табл. 2–3) видно, що значення максимальної потужності та кількості електроенергії під час рекуперативного гальмування складають 3,88 МВт та 45,09 кВт·год відповідно. Отже, встановлено перші граничні значення параметрів бортового ЄНЕ за результатами аналізу отриманих даних:  $P_{ЄНЕ} \in [0 \dots 3,88]$ ,  $A_{ЄНЕ} \in [0 \dots 45,09]$ . Інші граничні значення потужності та енергоємності визначають з урахуванням обмежень за масою, вони залежать від обраних типів ЄНЕ.

На шостому етапі обирають параметри бортових ЄНЕ (потужність та енергоємність). У нашому випадку область граничних значень потужності та енергоємності бортових ЄНЕ визначено за умов застосування систем накопичення, зібраних на базі конденсаторних модулів таких відомих виробників як «ЕКОНД» (Росія), «Nesscap» (Корея), «Maxwell» (США), «Epcos» (Німеччина). Загальний вигляд обраних конденсаторних модулів зображено на рис. 9, їх технічні характеристики представлено в табл. 4.

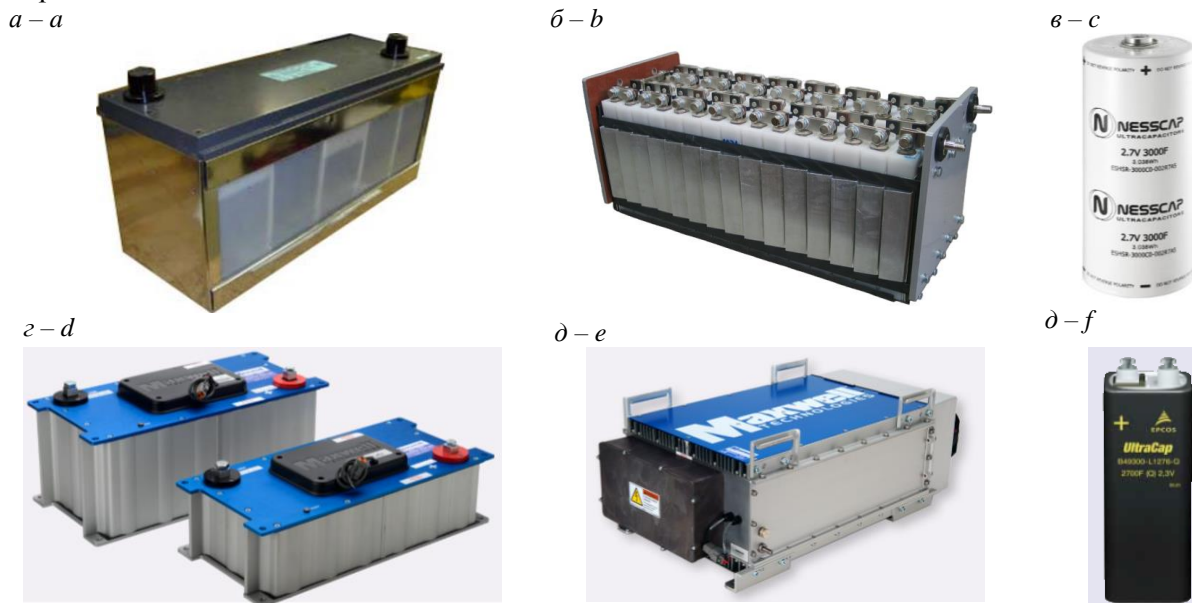


Рис. 9. Загальний вигляд конденсаторних модулів 10EK303 (а), 30EK404 (б), ESHSR-3000C0-002R7A5 (в), BMOD0063P125 B08 (г), BMOD0165P048 B01 (д), B49300 L1276 Q (е)

Fig. 9. General view of condenser modules 10EK303 (a), 30EK404 (b), ESHSR-3000C0-002R7A5 (c), BMOD0063P125 B08 (d), BMOD0165P048 B01 (e), B49300 L1276 Q (f)

## Технічні характеристики обраних конденсаторних модулів

## Technical characteristics of the chosen condenser modules

Назва показника	Тип конденсаторного модуля					
	10ЕК303	30ЕК404	ESHSR–3000C0–002R7A5	BMOD0063 P125 B08	BMOD0165 P048 BXX	B49300 L1276 Q
Робоча напруга, В	15–7,5	45–22,5	2,7–1,08	136–68	51–25,5	2,7–1,35
Ємність, Ф	4 500	400	3 000	63	200	2 700
Внутрішній опір, мОм	20	12	0,3	18	6,3	0,6
Маса, кг	34	38	0,53	61	13,5	0,73
Загальна (максимальна) кількість енергії, яку здатний запасати накопичувач, кДж	506	378	12,2	703	260	8,8
Енергія, що запасється в діапазоні робочої напруги, кДж	380	303	10,4	583	215	7,2
Габаритні розміри, мм	512x181x251	560x219x245	Ø60x144	619x33x265	418x194x179	167x61x61
Максимальна потужність, кВт	28	42	3,3	220	92	2,2
Робоча температура, °С	–50...+70	–50...+60	–40...+65	–40...+65	–40...+65	–30...+70

Системи накопичення необхідного значення робочої напруги, потужності та енергоємності було сформовано шляхом послідовно-паралельного з'єднання зазначених конденсаторних модулів. Маса систем накопичення визначено шляхом сумування мас конденсаторних модулів (бортового СНЕ), керованих перетворювачів, металоконструкцій, з'єднувальних проводів (шин), датчиків струму та напруги, елементів систем охолодження й систем керування та інших додаткових матеріалів. Для систем накопичення з обраних конденсаторних модулів побудовано графіки залежностей маси від потужності та маси від енергоємності, які зображено на рис. 10.

У результаті аналізу графіків (рис. 10) визначено граничні значення та області можливих

значень потужності та енергоємності з урахуванням обмежень за масою. Зокрема, для систем накопичення з робочою напругою 450–900 В, зібраних із конденсаторних модулів типу 10ЕК303, максимально допустиме значення потужності й енергоємності не повинно перевищувати відповідно 4,04 МВт і 15,3 кВт·год; із модулів типу 30ЕК404 – 5,43 МВт і 10,9 кВт·год; із модулів типу ESHSR–3000C0–002R7A5 – 30,6 МВт і 26,9 кВт·год; із модулів типу BMOD0063P125 B08 – 17,7 МВт і 13,0 кВт·год; із модулів типу BMOD0165P048 BXX – 33,5 МВт і 21,7 кВт·год; із модулів типу B49300L1276Q – 14,8 МВт і 13,5 кВт·год. Отже, встановлено другі граничні значення параметрів бортового СНЕ з урахуванням обмежень за масою.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

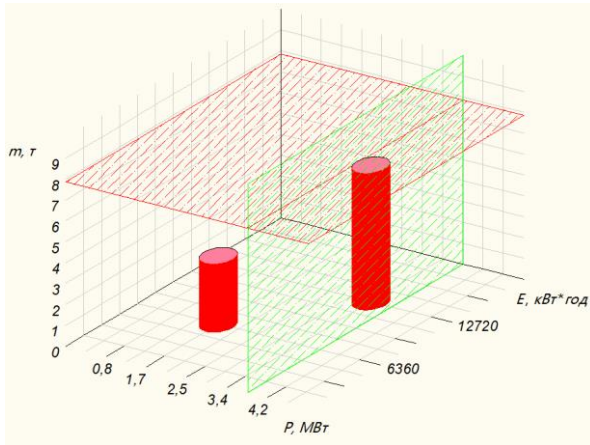
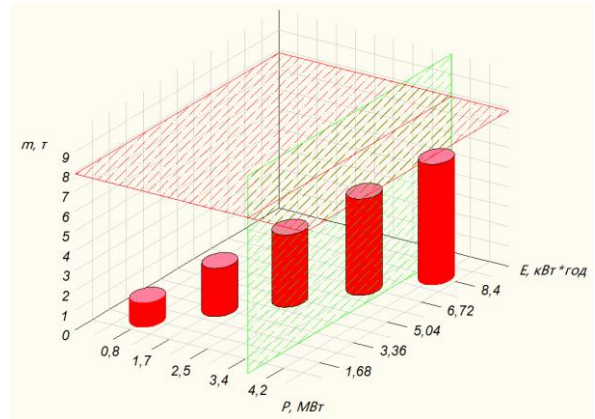
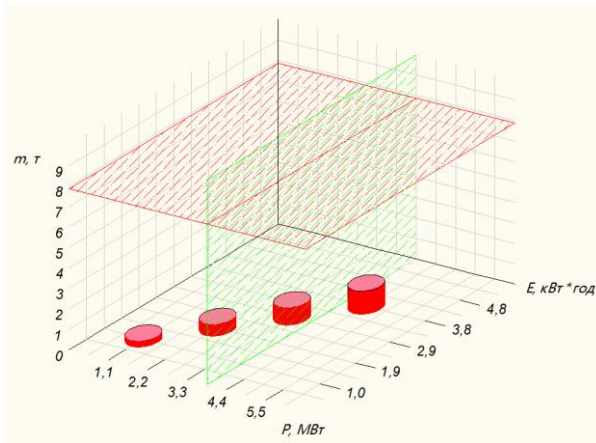
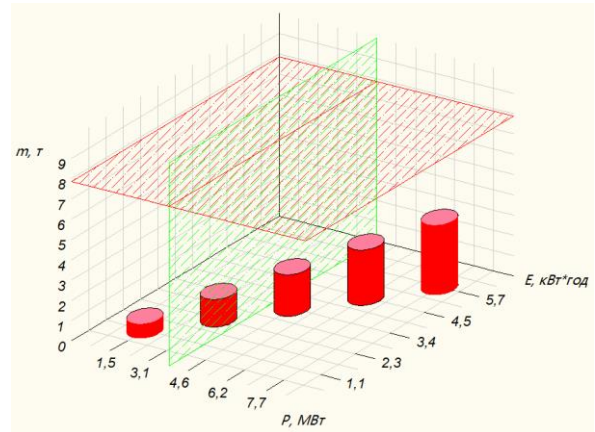
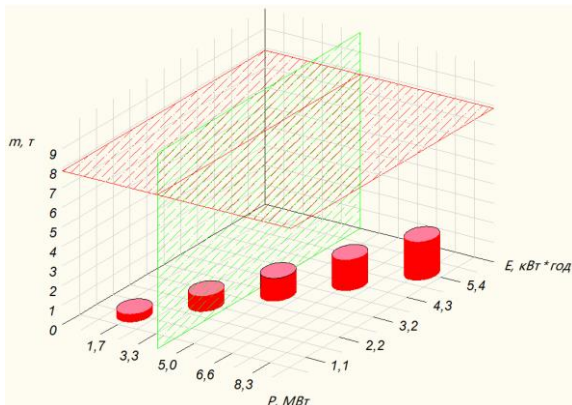
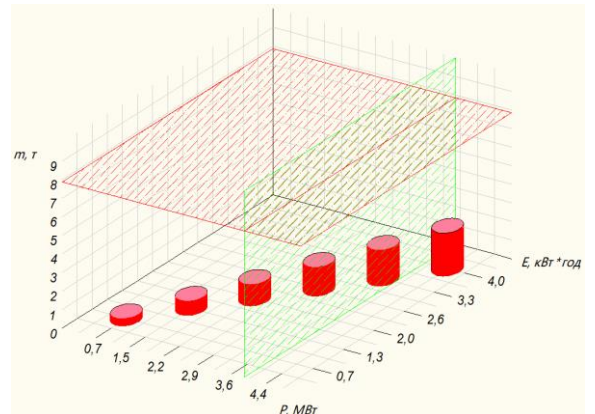
*a – a**б – б**в – в**г – г**д – д**е – е*

Рис. 10. Графіки залежності маси від потужності та енергоємності систем накопичення, зібраних з конденсаторних модулів типу:  
*a* – 10EK303; *б* – 30EK404; *в* – ESHSR–3000C0–002R7A5; *г* – BMOD0063P125 B08;  
*д* – BMOD0165 P048 BXX; *е* – B49300L1276Q

Fig. 10. Graphs of mass on power and energy consumption of storage systems collected from condenser modules type:  
*a* – 10EK303; *b* – 30EK404; *c* – ESHSR–3000C0–002R7A5;  
*d* – BMOD0063P125 B08; *e* – BMOD0165 P048 BXX; *f* – B49300L1276Q

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

З урахуванням визначених обмежень за обробкою даних математичного моделювання та за масою встановлено такі граничні значення параметрів:

– для систем накопичення з конденсаторних модулів типу 10ЕК303 –  $P_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots 3,88]$ ,  $A_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots 15,3]$ ;

– для систем накопичення з конденсаторних модулів типу 30ЕК404 –  $P_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots 3,88]$ ,  $A_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots 10,9]$ ;

– для систем накопичення з конденсаторних модулів типу ESHSR–3000C0–002R7A5 –  $P_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots 3,88]$ ,  $A_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots 26,9]$ ;

– для систем накопичення з конденсаторних модулів типу BMOD0063P125 B08 –  $P_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots 3,88]$ ,  $A_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots 13,0]$ ;

– для систем накопичення з конденсаторних модулів типу BMOD0165P048 BXX –  $P_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots 3,88]$ ,  $A_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots 21,7]$ ;

– для систем накопичення з конденсаторних модулів типу B49300L1276Q –  $P_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots 3,88]$ ,  $A_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots 13,5]$ .

Виходячи з отриманих граничних значень параметрів бортових СНЕ, для подальших розрахунків залежно від типу конденсаторних модулів, обрано бортові СНЕ з рівнем потужності й робочої енергоємності, які наведено в табл. 5.

Таблиця 5

## Обрані параметри бортових СНЕ

Table 5

## Chosen parameters of the on-boards CESS

Тип конденсаторного модуля	Потужність, МВт	Енергоємність, кВт·год
10ЕК303	1,7; 3,4	6,4; 12,7
30ЕК404	0,8; 1,7; 2,5; 3,4	1,7; 3,4; 5,0; 6,7
ESHSR–3000C0–002R7A5	1,1; 2,2; 3,3	1,0; 1,9; 2,9
BMOD0063 P125 B08	1,5; 3,1	1,1; 2,2
BMOD0165 P048 BXX	1,7; 3,3	1,1; 2,2
B49300L1276Q	0,7; 1,5; 2,2; 2,9; 3,6	0,7; 1,3; 2,0; 2,6; 3,3

У цьому випадку загальна кількість обраних систем накопичення з різним рівнем потужності й енергоємності бортових СНЕ, які задовольняють умовам (визначеними обмеженнями), складає 18.

*Сьомий етап.* Оцінку вартості систем накопичення здійснюють за результатами техніко-економічного аналізу вартості обраних бортових СНЕ, реверсивних перетворювачів та іншого комплектуючого обладнання від фірм-виробників цієї продукції.

Виконаний техніко-економічний аналіз дозволив установити, що основними складовими вартості систем накопичення є власне бортовий СНЕ та реверсивний перетворювач. При цьому питома вартість обраних систем накопичення, залежно від їх параметрів та типу застосованих конденсаторних модулів, складає 1,1–3,9 млн грн за 1 т.

*Восьмий етап* полягає в дослідженні кількості заощадженої електроенергії від упровадження обраних систем накопичення. Для кожного типу обраної системи накопичення виконують окремі дослідження. Спочатку для кожної типової умови експлуатації та обраної системи накопичення виконують перевірку на обмеження за потужністю, за результатами якої, у разі необхідності, відбувається перерахунок кількості рекуперованої електроенергії в накопичувач. Далі виконують оцінку кількості заощадженої електроенергії з урахуванням обмежень за енергоємністю з допомогою підпрограми «Рекуперація енергії». Алгоритм роботи цієї підпрограми детально описано в роботі [10].

Під час оцінки кількості заощадженої електроенергії взято такі припущення: перед проведенням розрахунків накопичувач повністю розряджений, коефіцієнт корисної дії (ККД) накопичувача складає 0,98 ( $\eta_{\text{СНЕ}} = 0,98$ ), ККД реверсивного перетворювача – 0,96 ( $\eta_{\text{РП}} = 0,96$ ), ККД тягового двигуна – 0,94 ( $\eta_{\text{ТД}} = 0,94$ ), ККД редуктора – 0,98 ( $\eta_{\text{РЕД}} = 0,98$ ).

Спрощений алгоритм виконання цих досліджень показано на рис. 11.

Під час досліджень визначають такі показники: кількість заощадженої електроенергії за цикл збереження електроенергії (рекуперативне гальмування та її акумуляування під час розгону поїзда), кількість заощадженої електроенер-

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

гії для кожної типової умови експлуатації, кількість заощадженої електроенергії за один день та рік.

Кількість заощадженої електроенергії за цикл «рекуперативне гальмування – розгін поїзда» визначають за формулою [19]:



Рис. 11. Алгоритм з оцінки кількості заощадженої електроенергії

Fig.11. Algorithm for estimating the amount of saved electricity

$$E = A_{\text{рек}} \cdot \eta_{\text{тяги}}, \quad (10)$$

де  $\eta_{\text{тяги}} = \eta_{\text{СНЕ}} \cdot \eta_{\text{рп}}^2 \cdot \eta_{\text{ТД}} \cdot \eta_{\text{РЕД}}$  – ККД енергообмінних процесів за цикл збереження та акумуляції електроенергії рекуперативної.

Кількість заощадженої електроенергії для кожної типової умови експлуатації визначають за формулою [19]:

$$E_k = E_1 + E_2 + \dots + E_N. \quad (11)$$

де  $N$  – кількість циклів для типової умови експлуатації поїзда.

Кількість заощадженої електроенергії за один день визначаються за формулою [19]:

$$E_d = m_1 \cdot E_{k1} + m_2 \cdot E_{k2} + \dots + m_n \cdot E_{kn}, \quad (12)$$

де  $m$  – кількість кіл за день для типової умови експлуатації поїзда;  $n$  – кількість типових умов експлуатації поїзда.

Кількість заощадженої електроенергії за рік визначаються за формулою [19]:

$$E_r = l_1 \cdot E_{d1} + l_2 \cdot E_{d2}. \quad (13)$$

де  $l_1, l_2$  – кількість робочих і вихідних днів на рік;  $E_{d1}, E_{d2}$  – кількість заощадженої електроенергії в робочий та вихідний дні відповідно.

Із використанням вищезазначеного алгоритму (рис. 12) та формул (10) – (13) визначено величини кількості заощадженої електроенергії від упродовження обраних систем накопичення.

*Дев'ятий етап* передбачає побудову характеристик (діаграм) терміну окупності систем накопичення залежно від робочої потужності та енергоємності обраних бортових СНЕ.

Величину терміну окупності визначають за відношенням вартості від упродовження системи накопичення до вартості заощадженої електроенергії цією системою за рік [19]:

$$T_{\text{ок}} = \frac{Q}{T_e \cdot E_r}, \quad (14)$$

де  $Q$  – вартість системи накопичення;  $T_e$  – тариф на електроенергію ( $T_e = 2,27371$  грн/кВт·год).

Результати розрахунку терміну окупності для обраних систем накопичення зображено у вигляді діаграм на рис. 12.

*Десятий етап* (визначення системи з раціональними параметрами). Із результатів аналізу діаграм терміну окупності обраних систем накопичення видно, що для заданих умов експлуатації поїзда метрополітену найбільш раціональною є система з величиною робочої енергоємності 1,7 кВт·год та максимальною потужністю 0,8 МВт, зібраної з конденсаторних модулів типу 30ЕК404 (рис. 12). Термін окупності цієї системи мінімальний і складає 3,2 роки, а маса – близько 1,2 тонни.

За умов упродовження системи накопичення з раціональними параметрами розраховано кількість заощадженої електроенергії відносно кількості спожитої електроенергії за формулою [19]:

$$\alpha = \frac{E_r}{A_{\text{тяги(рік)}}} \cdot 100, \quad (15)$$

де  $A_{\text{тяги(рік)}}$  – кількість спожитої електроенергії за рік, кВт·год.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

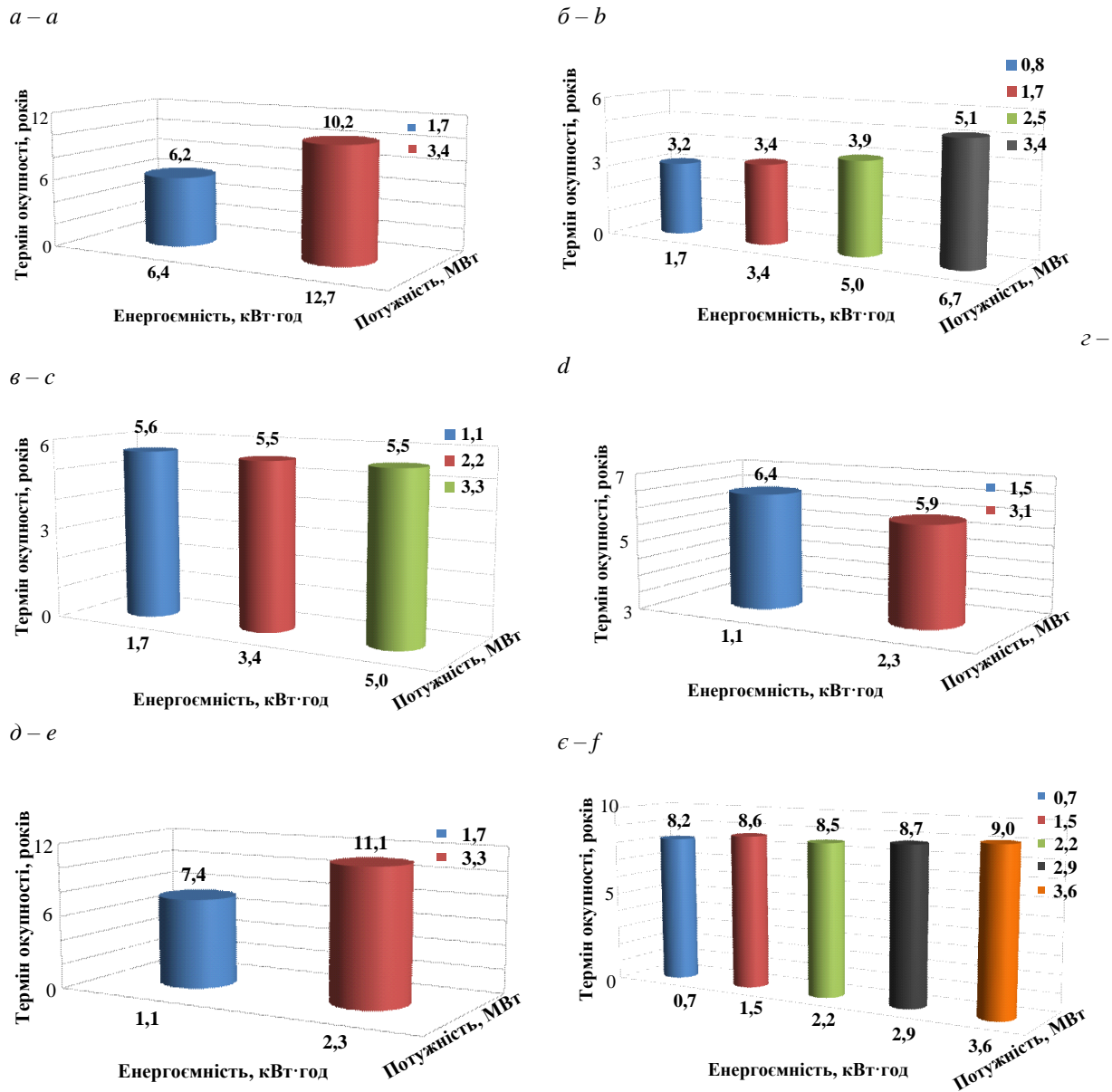


Рис. 12. Діаграми терміну окупності обраних систем накопичення, зібраних із конденсаторних модулів типу: а – 10ЕК303; б – 30ЕК404; в – ESHSR–3000C0–002R7A5; г – BMOD0063P125 B08; д – BMOD0165 P048 BXX; е – B49300L1276Q

Fig. 12. Payback diagrams of selected storage systems collected from capacitor modules of the type: а – 10ЕК303; б – 30ЕК404; в – ESHSR–3000C0–002R7A5; д – BMOD0063P125 B08; е – BMOD0165 P048 BXX; ф – B49300L1276Q

За формулою (15) визначено, що для заданих умов експлуатації впровадження системи накопичення з раціональними параметрами бортового ЄНЕ дозволить заощадити 11,4 % від обсягу спожитої електроенергії на тягу. При цьому маса системи накопичення з раціональ-

ними параметрами складає близько 0,5 та 0,8 % від маси поїзда метрополітену з максимальним завантаженням та в порожньому стані відповідно. За умов установлення цієї системи накопичення динаміка розгону поїзда погіршиться на 0,5 %.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

**Наукова новизна та практична значимість**

Удосконалено методологію визначення раціональних параметрів бортового емнісного накопичувача енергії в частині заміни використання даних експериментальних досліджень теоретичними дослідженнями, суть яких полягає в моделюванні руху поїзда метрополітену з системами рекуперації за допомогою програмного забезпечення, що дозволить зменшити фінансові витрати, час на виконання досліджень та підвищить їх точність. Отримали подальший розвиток дослідження з визначення кількісних показників електроенергії рекуперації для аналізу резервів енергозбереження в метрополітені. Також отримали подальший розвиток теорії створення енергоощадного рухомого складу метрополітену із системами рекуперації, яка заснована на впровадженні як додаткового джерела живлення бортового емнісного накопичувача, що дозволить ефективно використовувати енергію рекуперативного гальмування поїзда та розширити його експлуатаційні можливості.

**Висновки**

Із використанням комплексного підходу оцінки параметрів, в основу якого покладено методи теоретичних досліджень, визначено ра-

ціональні параметри бортового ЄНЕ (максимальну потужність та робочу енергоемність) для заданих умов експлуатації поїзда метрополітену із системами рекуперації.

У результаті виконаних досліджень встановлено, що для заданих режимів ведення поїзда раціональним є застосування системи накопичення з бортовим ЄНЕ, зібраного з конденсаторних модулів типу 30ЕК404, робоча енергоемність якого складає 1,7 кВт·год, а максимальна потужність – 0,8 МВт. Визначено, що термін окупності цієї системи складає 3,2 роки, а маса – 1,2 тонни.

Упровадження системи накопичення з раціональними параметрами для заданих умов експлуатації дозволить заощадити 11,4 % від обсягу спожитої електроенергії на тягу, а маса системи складає від маси поїзда метрополітену з максимальним завантаженням та в порожньому стані близько 0,5 та 0,8 % відповідно.

Подальші дослідження необхідно зосередити на розвитку теорії з визначення величин раціональної потужності та енергоемності бортових накопичувачів енергії, що дозволить їх оптимальні енергетичні параметри розраховувати за результатами визначення раціональних режимів ведення поїздів метрополітену із системами рекуперації на заданих ділянках.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Байрыева Л. С., Прокопович А. В. *Теория электрической тяги. Методическое пособие*. Москва : Изд-во МЭИ, 2004. 40 с.
2. Васильев В. А. *Повышение энергетической эффективности электропоездов постоянного тока* : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Петербургский гос. ун-т. путей сообщения. Санкт-Петербург, 2012. 16 с.
3. Костин Н. А., Никитенко А. В. Автономность рекуперативного торможения – основа надежной энергоэффективной рекуперации на электроподвижном составе постоянного тока. *Заліз. трансп. України*. 2014. № 3. С. 15–23.
4. Муха А. М., Костін М. О., Куриленко О. Я., Ципля Г. В. Підвищення ефективності роботи електроприводу постійного струму на основі використання суперконденсаторних накопичувачів електроенергії. *Наука та прогрес транспорту*. 2017. № 5 (71). С. 48–60. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/114624>
5. Мятаж, А. В., Ярославцев М. В. Определение энергоемкости бортового буферного конденсаторного накопителя энергии для городского электрического транспорта. *Транспорт Российской Федерации*. 2013. № 4 (47). С. 62–65.
6. Розенфельд В. Е., Исаев И. П., Сидоров Н. Н., Озеров М. И. *Теория электрической тяги* / под ред. И. П. Исаева. Москва : Транспорт, 1995. 294 с.
7. Рыбалко А. Я., Дыбрин С. В. Выбор емкости накопителя энергии для обеспечения снижения максимума потребляемой мощности. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2008. № 8. С. 356–361.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

8. Рябов Е. С. Определение параметров накопителя энергии для электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом в режиме ограничения тока тяговой сети. *Вісник НТУ «ХПИ». Серія : Математичне моделювання в техніці та технологіях*. 2015. № 6 (1115). С. 132–137.
9. *СОУ МПП 45.060-253:2008. Вагони метрополітену. Загальні технічні вимоги*. [Чинний від 2010-01-01] Вид. офіц. Київ : Міністерство промислової політики України, 2008. 29 с.
10. Сулим А. А., Ломонос А. И. Расчет энергии рекуперации при установке накопителя на электропоезде метрополитена. *Збірник наукових праць ДЕТУТ : Серія «Транспортні системи і технології»*. 2013. Вип. 23. С. 22–29.
11. Сулим А. О., Сіора О. С., Хозя П. О., Мельник О. О. Програмне забезпечення для моделювання руху поїзда метрополітену. *Збірник наукових праць ДУИТ : Серія «Транспортні системи і технології»*. 2019. № 34. С. 182–198. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-34-2-2>
12. Шевлюгин М. В., Желтов К. С. Снижение расхода электроэнергии на движение поездов в Московском метрополитене при использовании емкостных накопителей энергии. *Наука и техника транспорта*. 2008. № 1. С. 15–20.
13. Щуров Н. И., Щеглов К. В., Штанг А. А. Применение накопителей энергии в системах электрической тяги. *Сборник научных трудов НГТУ*. 2008. № 1 (51). С. 99–104.
14. Fomin O., Sulym A., Kulbovskiy I., Khozia P., Ishchenko V. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 2. Iss. 1 (92). P. 63–71. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080>
15. Ghaviha N., Campillo J., Bohlin M., Dahlquist E. Review of application of energy storage devices in railway transportation. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 105. P. 4561–4568. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.980>
16. Iannuzzi D., Tricoli P. Metro trains equipped onboard with supercapacitors : a control technique for energy saving. *SPEEDAM 2010*. P. 750–756. DOI: <https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2010.5542102>
17. Khodaparastan M., Mohamed A. A., Brandauer W. Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems. *IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems*. 2018. Vol. 20. Iss. 8. P. 831–2847. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2886809>
18. Mensah-Darkwa K., Zequine C., Kahol P., Gupta R. Supercapacitor Energy Storage Device Using Biowastes : A Sustainable Approach to Green Energy. *Sustainability*. 2019. Vol. 11. Iss. 2. P. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11020414>
19. Sulym A., Fomin O., Khozia P., Palant O., Stamatina V. Development of a comprehensive approach to determining the rational parameters of an onboard capacitive energy accumulator for a subway train. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 6, № 3 (102). P. 28–38. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183304>
20. Sulym A., Fomin O., Khozia P., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of onboard capacitive energy storage of the rolling stock. *Науковий Вісник НГУ*. 2018. № 5. P. 79–87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
21. Wiczorek M., Lewandowski M. Zasobnik energii umożliwiający przejazd tramwaju przez skrzyżowanie bez użycia sieci trakcyjnej. *TTS Technika Transportu szynowego*. 2018. Vol. 25, № 10. P. 39–43.
22. Xia H., Chen H., Yang Z., Lin F., Wang B. Optimal energy management location and size for stationary energy storage system in a metro line based on genetic algorithm. *Energies*. 2015. Vol. 8. Iss. 10. P. 11618–11640. DOI: <https://doi.org/10.3390/en81011618>

А. А. СУЛИМ<sup>1\*</sup>, П. А. ХОЗЯ<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения» (ГП «УкрНИИВ»), ул. И. Приходько, 33, Кременчуг, Украина, 39621, тел. +38 (05366) 6 03 54, эл. почта [sulim1.ua@gmail.com](mailto:sulim1.ua@gmail.com), ORCID 0000-0001-8144-8971

<sup>2</sup>Научно-исследовательская лаборатория экспериментальных исследований железнодорожной техники, ГП «УкрНИИВ», ул. И. Приходько, 33, Кременчуг, Украина, 39621, тел. +38 (05366) 6 20 43, эл. почта [pavel.ua@gmail.com](mailto:pavel.ua@gmail.com), ORCID 0000-0001-8948-6032

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОЛОГИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЕМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПОЕЗДА МЕТРОПОЛИТЕНА

**Цель.** В качестве основной цели авторы ставят определение рациональной мощности и энергоёмкости бортового емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) с использованием комплексного подхода оценки параметров, в основу которого положены методы теоретических исследований. **Методика.** Выполнен сравнительный анализ существующих методологий и подходов к определению параметров бортовых емкостных накопителей энергии для поезда метрополитена с системами рекуперации, сформулированы преимущества и недостатки каждого из них. Установлено, что среди существующих методологий наиболее целесообразно использовать комплексный подход, суть которого состоит в определении рациональной мощности и энергоёмкости одновременно по двум параметрам системы накопления – массе и сроке окупаемости. Предложено процедуру для определения рациональных параметров бортового емкостного накопителя энергии с использованием следующих методов исследований: теоретических основ электрической тяги, математического моделирования динамики движения и энергетических процессов, математической статистики, технико-экономического и сравнительного анализов. **Результаты.** Проведенный комплекс теоретических исследований позволяет подтвердить экономическую целесообразность внедрения бортовых емкостных накопителей энергии на поезде метрополитена. Определена система накопления с рациональными параметрами ЕНЭ для заданных условий эксплуатации в коммунальном предприятии «Киевский метрополитен» и для избранного опытного поезда метрополитена. Выполнена оценка количества сэкономленной электроэнергии за счет внедрения данной системы. **Научная новизна.** Усовершенствована методология определения рациональных параметров бортового емкостного накопителя энергии в части замены использования данных экспериментальных исследований теоретическими исследованиями, суть которых заключается в моделировании движения поезда метрополитена с системами рекуперации с помощью программного обеспечения, что позволит уменьшить финансовые затраты, время на выполнение исследований и повысить их точность. Получили дальнейшее развитие исследования по определению количественных показателей электроэнергии рекуперации для анализа резервов энергосбережения в метрополитене. **Практическая значимость.** Результаты теоретических исследований могут стать основой для создания натуральных образцов поездов метрополитена с бортовыми емкостными накопителями энергии. Проведенные исследования позволят разработать рекомендации по проектированию инновационных энергосберегающих поездов метрополитена с улучшенными технико-экономическими характеристиками, которые способны повысить эффективность функционирования перевозочного процесса в метрополитене.

*Ключевые слова:* бортовой емкостной накопитель энергии (ЕНЭ); конденсаторный модуль; поезд метрополитена; система накопления; система рекуперации

А. О. SULYM<sup>1\*</sup>, Р. О. KHOZIA<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>State Enterprise «Ukrainian Research Railway Car Building Institute» (SE «UkrNIIV»), I. Prikhodka St., 33, 39621, Kremenchuk, Ukraine, tel. +38 (05366) 6 03 54, e-mail sulim1.ua@gmail.com, ORCID 0000-0001-8144-8971

<sup>2</sup>Research Laboratory of Experimental Research of Railway Technique (SE «UkrNIIV»), I. Prikhodka St., 33, 39621, Kremenchuk, Ukraine, tel. +38 (05366) 6 20 43, e-mail pavel.ua@gmail.com, ORCID 0000-0001-8948-6032

## IMPROVEMENT OF THE METHODOLOGY FOR RATIONAL PARAMETERS DETERMINATION OF THE CAPACITIVE ENERGY STORAGE FOR THE METRO TRAIN

**Purpose.** The purpose of the work is to determine the rational capacity and energy consumption of the onboard capacitive energy storages using a complex approach for estimating the parameters, which is based on the methods of theoretical research. **Methodology.** The article performs a comparative analysis of existing methodologies and approaches for determination of the onboard capacitive storages parameters for subway trains with recovery systems, formulates the advantages and disadvantages of each of them. It is determined that among the existing methodologies it is most reasonable to use a complex approach, the aim of which is to determine the rational capacity and energy consumption according to two parameters of the energy storage system – weight and payback period. A pro-

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

cedure for determining the rational parameters of the onboard capacitive energy storage using theoretical research methods is proposed: theoretical basis of electric traction, mathematical modeling of dynamic motion and energy processes, mathematical statistics, technical-economic and comparative analysis. **Findings.** According to the results of the complex theoretical researches, the economic expediency of implementation of onboard capacitive energy storages on the subway train is confirmed. The energy storage system with rational parameters of the onboard capacitive energy storage for established operating conditions in the Municipal Enterprise «Kyiv Metro» and selected experimental train of the subway is determined. The amount of saved electricity due to the implementation of the energy storage system with rational parameters is estimated. **Originality.** The methodology for determining the rational parameters of the onboard capacitive energy storage in terms of replacing the use of experimental research data with theoretical research, the purpose of which is to model the movement of subway trains with recovery systems using software to reduce financial costs, research time and increase their accuracy. The research on determination of quantitative indicators of recovery electricity for the analysis of energy saving reserves was further developed in the subway. **Practical value.** The results of theoretical research can be the basis for the creation of full-scale samples of subway trains with onboard capacitive energy storages. The researches will create recommendations for the design of innovative energy-saving subway trains with improved technical and economic characteristics that can increase the efficiency of the transportation process in the subway.

**Keywords:** on-board capacitive energy storage; condenser module; subway train; energy storage system; recovery system

## REFERENCES

1. Bayryeva, L. S., & Prokopovich, A. V. (2004). *Teoriya elektricheskoy tyagi. Metodicheskoe posobie*. Moscow: izdatelstvo MEI. (in Russian)
2. Vasilyev, V. A. (2012). *Povyshenie energeticheskoy effektivnosti elektropoezdov postoyannogo toka*. (Extended abstract of PhD dissertation). Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia. (in Russian)
3. Kostin, N. A., & Nikitenko, A. V. (2014). Autonomy regenerative braking-the basis for reliable energy-efficient heat recovery in electric rolling stock DC. *Railway Transport of Ukraine*, 3, 15-23. (in Russian)
4. Mukha, A. M., Kostin, N. O., Kurylenko, O. Y., & Tsyplia, H. V. (2017). Enhancing the operational efficiency of direct current drive based on use of supercondenser power storage units. *Science and Transport Progress*, 5(71), 48-60. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/114624> (in Ukrainian)
5. Myatezh, A. V., & Yaroslavtsev, M. V. (2013). Opredelenie energoemkosti bortovogo buferного конденсаторного накопителя энергии для городского электрического транспорта. *Transport of Russian Federation*, 4(47), 62-65. (in Russian)
6. Rozenfeld, V. Ye., Isaev, I. P., Sidorov, N. N., & Ozerov, M. I. (1995). *Teoriya elektricheskoy tyagi*. (Isaev, I. P. (Ed.)). Moscow: Transport. (in Russian)
7. Rybalko, A. Ya., & Dybrin, S. V. (2008). Vybor emkosti nakopitelya energii dlya obespecheniya snizheniya maksi-muma potrebyaemoy moshchnosti. *Mining informational and analytical bulletin*, 8, 356-361. (in Russian)
8. Ryabov, Ye. S. (2015). Opredelenie parametrov nakopitelya energii dlya elektropodvizhnogo sostava s asinkhronnym tyagovym privodom v rezhime ogranicheniya toka tyagovoy seti. *Bulletin NTU KhPI. Series: Mathematical modeling in engineering and technologies*, 6(1115), 132-137. (in Russian)
9. *Vaghony metropolitenu. Zagaljni tekhnichni vymoghy*, 29 *SOU MPP 45.060-253:2008* (2010). (in Ukrainian)
10. Sulim, A. A., & Lomonos, A. I. (2013). Raschet energii rekuperatsii pri ustanovke nakopitelya na elektropoezde metropolitena. *Transport Systems and Technologies: Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technologies*, 23, 22-29. (in Russian)
11. Sulym, A., Siora, O., Khozia, P., & Melnyk, O. (2019). Programne zabezpechennja dlja modeljuvannja rukhu pojizda metropolitenu. *Collection of Scientific Works of the State University of Infrastructure and Technologies Series «Transport Systems and Technologies»*, 34, 182-198. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-34-2-2> (in Ukrainian)
12. Shevlyugin, M. V., & Zheltov, K. S. (2008). On reduction of electric power consumption in moscow underground by application of capacitive energy storage devices. *Science and Technology of Transport*, 1, 15-20. (in Russian)

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

13. Shchurov, N. I., Shcheglov, K. V., & Shtang, A. A. (2008). The application of devices storage energy in system in the systems of electric traction. *Transaction of Scientific Papers of the Novosibirsk State Technical University*, 1(51), 99-104. (in Russian)
14. Fomin, O., Sulym, A., Kulbovskiy, I., Khozia, P., & Ishchenko, V. (2018). Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(1(92)), 63-71. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080> (in English)
15. Ghaviha, N., Campillo, J., Bohlin, M., & Dahlquist, E. (2017). Review of Application of Energy Storage Devices in Railway Transportation. *Energy Procedia*, 105, 4561-4568. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.980> (in English)
16. Iannuzzi, D., & Tricoli, P. (2010). Metro trains equipped onboard with supercapacitors: A control technique for energy saving. *SPEEDAM 2010*, 750-756. DOI: <https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2010.5542102> (in English)
17. Khodaparastan, M., Mohamed, A. A., & Brandauer, W. (2019). Recuperation of Regenerative Braking Energy in Electric Rail Transit Systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(8), 2831-2847. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2886809> (in English)
18. Mensah-Darkwa, K., Zequine, C., Kahol, P., & Gupta, R. (2019). Supercapacitor Energy Storage Device Using Biowastes: A Sustainable Approach to Green Energy. *Sustainability*, 11(2), 1-22. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11020414> (in English)
19. Sulym, A., Fomin, O., Khozia, P., Palant, O., & Stamatina, V. (2019). Development of a comprehensive approach to determining the rational parameters of an onboard capacitive energy accumulator for a subway train. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(3(102)), 28-38. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183304> (in English)
20. Sulym, A. O., Fomin, O. V., Khozia, P. O., & Mastepan, A. G. (2018). Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the rolling stock. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 5, 79-87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8> (in English)
21. Wiczorek, M., & Lewandowski, M. (2018). Zasobnik energii umożliwiający przejazd tramwaju przez skrzyżowanie bez użycia sieci trakcyjnej. *TTS Technika Transportu szynowego*, 25(10), 39-43. (in Polish)
22. Xia, H., Chen, H., Yang, Z., Lin, F., & Wang, B. (2015). Optimal Energy Management, Location and Size for Stationary Energy Storage System in a Metro Line Based on Genetic Algorithm. *Energies*, 8(10), 11618-11640. DOI: <https://doi.org/10.3390/en81011618> (in English)

Надійшла до редколегії: 22.05.2020

Прийнята до друку: 23.09.2020

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

UDC 004.056.53:[004.7:004.032.26]

I. V. ZHUKOVYTS'KYI<sup>1\*</sup>, V. M. PAKHOMOVA<sup>2\*</sup>, D. O. OSTAPETS<sup>3\*</sup>, O. I. TSYHANOK<sup>4\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Electronic Computing Machines», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 89, e-mail ivzhukl@ua.fm, ORCID 0000-0002-3491-5976

<sup>2\*</sup>Dep. «Electronic Computing Machines», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 89, e-mail viknikpakh@gmail.com, ORCID 0000-0002-0022-099X

<sup>3\*</sup>Dep. «Electronic Computing Machines», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 89, e-mail odaua@i.ua, ORCID 0000-0003-1778-7770

<sup>4\*</sup>Dep. «Electronic Computing Machines», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 89, e-mail tsiganok.oleg@yandex.ua, ORCID 0000-0001-9846-7669

### DETECTION OF ATTACKS ON A COMPUTER NETWORK BASED ON THE USE OF NEURAL NETWORKS COMPLEX

**Purpose.** The article is aimed at the development of a methodology for detecting attacks on a computer network. To achieve this goal the following tasks were solved: to develop a methodology for detecting attacks on a computer network based on an ensemble of neural networks using normalized data from the open KDD Cup 99 database; when performing machine training to identify the optimal parameters of the neural network which will provide a sufficiently high level of reliability of detection of intrusions into the computer network. **Methodology.** As an architectural solution of the attack detection module, a two-level network system is proposed, based on an ensemble of five neural networks of the multilayer perceptron type. The first neural network to determine the category of attack class (DoS, R2L, U2R, Probe) or the fact that there was no attack; other neural networks – to detect the type of attack, if any (each of these four neural networks corresponds to one class of attack and is able to identify types that belong only to this class). **Findings.** The created software model was used to study the parameters of the neural network configuration 41–1–132–5, which determines the category of the attack class on the computer network. It is determined that the optimal training speed is 0.001. The ADAM algorithm proved to be the best for optimization. The ReLU function is the most suitable activation function for the hidden layer, and the hyperbolic tangent function – for the output layer activation function. Accuracy in test and validation samples was 92.86 % and 91.03 %, respectively. **Originality.** The developed software model, which uses the Python 3.5 programming language, the integrated development environment PyCharm 2016.3 and the Tensorflow 1.2 framework, makes it possible to detect all types of attacks of DoS, U2R, R2L, Probe classes. **Practical value.** Graphical dependencies of accuracy of neural networks at various parameters are received: speed of training; activation function; optimization algorithm. The optimal parameters of neural networks have been determined, which will ensure a sufficiently high level of reliability of intrusion detection into a computer network.

*Keywords:* architectural solution; neural network; training speed; activation function; optimization algorithm

## Introduction

Efficiency of modern information systems is largely related to the problem of protecting the information processed in them. According to the Verizon 2018 Data Breach Investigations Report [14], the problem of intrusion detection is relevant. From year to year, the value of the average cost of hacking increases by 6 %. There are many algorithms for classification and detection of anomalies, each of which has its advantages and disadvantages [11]. Intrusion detection systems based on anomalies are also used to detect new types of attacks. Based on a set of queries, a model of normal behavior is formed, with which each subsequent query to the system is compared.

The capabilities of existing security systems do not allow ensuring the security of the information system at a sufficient level. The reason for this is that the process of creating attack detection systems involves a number of unsolved scientific and technical problems. Existing attack detection systems use the simplest algorithms for processing incoming information, which does not allow detecting a significant number of attacks on information systems. The main methods of detecting attacks include misuse and anomaly detection [11]. Misuse detection involves the presence of attack signatures and is based on a simple notion of coincidence of the sequence with the sample. Because the signature-based attack detection method is static, it is vulnerable to new types of attacks. To detect them, it is necessary to use systems capable of self-training in real time [6]. Creating an efficient attack detection system requires the use of qualitatively new approaches to information processing, which should be based on adaptive algorithms capable of self-training. It is known that there are two main types of implementation of intrusion detection systems based on neural networks: IDS (Intrusion-Detection System) based on a combination of expert system and neural network; IDS using neural networks (NN) as autonomous systems [6]. The most promising direction in the creation of such attack detection systems is the use of artificial intelligence. It should be noted that both large foreign commercial companies (Cisco, Computer Associates, ISS, Symantec and others) and research centers at various universities (Columbia University, Florida Institute of Technology, Purdue Univer-

sity, Ohio University, etc.) carry out research in this aspect.

*Analysis of scientific sources.* The most promising direction is IDS, built on the basis of NN: Multi Layer Perceptron (MLP); Radial Basis Function Network (RBF) and Kohonen or Self Organizing Maps (SOM). For example, in [10] only DDoS-attacks on TCP, UDP and ICMP protocols were analyzed due to their popularity among malefactors. In [13], some threats were detected in the network based on the analysis and processing of network connection parameters, which use the TCP/IP protocol stack, using a neural network configuration 19–1–25–5 (19 – is the number of input neurons; 1 – is the number of hidden layers, 25 – is the number of hidden neurons, 5 – is the number of output neurons), but other types of attacks also require research.

At the present stage, on the one hand, there are more and more works that use a combined approach to solving the problem. For example, the work [5] proposed a new ensemble classifier that uses RBF and fuzzy clustering to increase detection accuracy, reduce the number of false positives, and provide a higher detection rate for infrequent attacks. In [1] the approach with the use of neural networks, immune systems, neurofuzzy classifiers and their combinations is considered. The essence of hybrid approaches is to implement various schemes of combining basic classifiers, which allow eliminating shortcomings in their operation separately. However, an important disadvantage of such methodologies is the lack of universality of their application. In [4] to improve the efficiency of IDS, it is proposed to use the method of coincidence, based on the fact that NN with different topologies (MLP, RBF, SOM) can detect different attacks, but false positives also do not always occur on the same network packages during the analysis with the help of different types of NN. In addition, each type of neural network has its advantages and disadvantages that need to be considered or additional research conducted.

On the other hand, there are attempts to use NN at different levels. For example, in [2] a new approach to the construction of a multilevel network intrusion detection system is considered. It consists in the fact that groups of similar parameters of interconnection interaction are fed to the inputs of individual first-level modules, each of which is

a hierarchical structure of several NN of different types and detects anomalies for a given group of parameters. The results of the first level modules are fed to the input of the second level solver, which makes the final decision about the presence of the attack and its classification. According to this approach, the probability of identifying known attacks was 91%, the detection of intrusions, about which there was no information during training, was 86 %. However, the developed prototype has a relatively significant probability of type II errors – 18 %, analysis and correction of the causes of these errors is promising for further study.

In addition, in large information systems (in particular, the information and telecommunication system of railway transport) there is a problem of large amounts of network traffic, this is caused by the fact that network traffic is constantly changing, and it is difficult to establish the cyclical nature of such changes. To increase the efficiency of detecting situations related to possible intrusions into the computer network, which is the basis of various information systems, recently widely used modern technologies of data mining (in particular, DataMining technologies) [8]. Network intrusion detection systems based on the anomaly detection paradigm have a high false alarm frequency, which complicates their use. To solve this weakness, in [7] it was proposed to smooth the outputs of anomaly detectors using local adaptive multifactor smoothing.

We believe that during processing a large amount of constantly changing network traffic, the use of a multi-level network system to detect various categories of MLP-based attacks using machine training (especially deep one) leads to a large number of false positives and skip attacks. Therefore, one of the approaches to solving this problem is to conduct additional research to determine the rational parameters of NN.

### Purpose

Our study aims to develop a methodology for detecting attacks on a computer network. Achieving this goal involves solving the following tasks:

- develop a method of detecting attacks on a computer network based on neural networks ensemble;

- during machine training to find the optimal parameters of the neural network (MLP), which will provide a sufficiently high level of reliability of detection of intrusions into the computer network.

### Methodology

*Researched materials used during modeling.* Attack detection system based on neural networks such as a multilayer perceptron is considered. In [3], the authors investigated two approaches to the detection of attacks on a computer network and proved the rationality of using a neural networks ensemble. In our work, the source of data for training and testing of neural networks is the KDD Cup 99 database [9], which contains more than four gigabytes of characteristics of TCP connections. The database presents the following categories of attacks: DoS, R2L, U2R, Probe. Each of these categories, in turn, is represented by several types.

DoS – network attacks aimed at creating a situation where in the attacked system denial of service takes place. Such attacks are characterized by generation of large amounts of traffic, which leads to overloading and blocking the server. There are six types of DoS-attacks: back, land, neptune, pod, smurf, teardrop.

R2L attacks are characterized by access by an unregistered user from a remote computer. There are eight types of R2L attacks: ftp\_write, guess\_passwd, imap, multihop, phf, spy, warezclient, warezmaster.

U2R attacks involve obtaining a privilege of a local superuser (network administrator) by a registered user. There are four types of U2R attacks: buffer\_overflow, loadmodule, perl, rootkit.

Probe attacks are about scanning network ports for confidential information. There are four types of Probe attacks: ipsweep, nmap, portsweep, satan.

The input vector for the attack detection system is a set of 41 TCP connection parameters, the full description of which is given in [9], examples of the description are in Table 1.

As an architectural solution of the attack detection module, five neural networks of the multilayer perceptron type are proposed: NN1 – to determine the category of the attack class (DoS, R2L, U2R, Probe) or the fact that there was no attack; NN2...NN5 – to detect the type of attack, if any

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

(each of these four neural networks corresponds to one attack class and is able to identify types that belong only to this class). Fig. 1 shows the structure of a hypothetical complex that uses this architectural solution.

The complex contains a module for detecting network attacks, which receives connection data

from network sensors and provides the result to the response module. The signal from NN1, which represents the category of the attack class, through the key «key» turns on one of the neural networks NN2...NN5, which will determine the type of attack of this class.

Table 1

Description of TCP connection parameters

No.	Title	Description	Type
1	duration	Connection duration s)	numerical
2	protocol_type	type of protocol (TCP, UDP, etc.)	symbolic
3	service	end network service (HTTP, Telnet, etc.)	symbolic
4	flag	connection status (normal or false)	symbolic
5	src_byte	the number of bytes transmitted from transmitter to receiver	numerical
6	dst_byte	the number of bytes transmitted from the receiver to the transmitter	numerical
7	land	equality of hosts/ports of receiver and transmitter	symbolic
8	wrong_fragment	the number of «wrong» fragments	numerical
9	hot	number of hot indicators	numerical
10	num_failed_logins	the number of failed login attempts	numerical
...	...	...	...
41	dst_host_srv_rerror_rate	the percentage of REJ error connections for the customer service	numerical

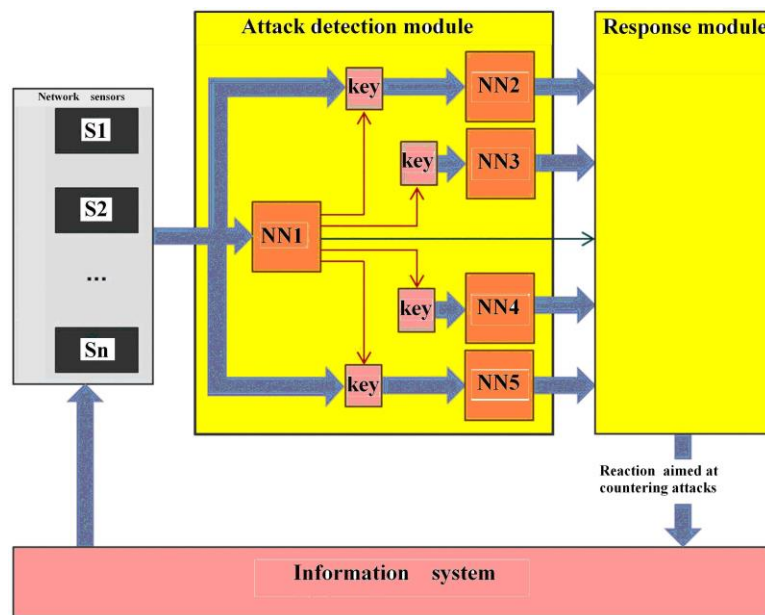


Fig. 1. Structure of hypothetical complex

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

*Neural network to identify the category of attack class or determine the fact of its absence.* The input vector is 41 TCP connection parameters, the output is a vector of five values, four of which represent the attack class, and the fifth is the regular connection. This is the so-called one-hot vector – a vector whose components are equal to zero, except for one, which is equal to one. This component will indicate the neural network-defined attack class or the normal connection, if there was no attack. The number of neurons in the hidden layer of the multilayer perceptron can be determined by a known formula, which is a consequence of the Kolmogorov–Arnold–Hecht–Nielsen theorem:

$$\frac{N_y Q}{1 + \log_2(Q)} \leq N_w \leq N_y \left( \frac{Q}{N_x} + 1 \right) (N_x + N_y + 1) + N_y, \quad (1)$$

where  $N_y$  – the length of the output signal;  $Q$  – the number of elements of the set of training examples;  $N_w$  – the required number of synaptic connections;  $N_x$  – dimension of the input signal.

Having estimated the required number of synaptic connections, you can calculate the required number of neurons in the hidden layer:

$$N = \frac{N_w}{N_x + N_y}. \quad (2)$$

The values  $N_x$ ,  $N_y$ ,  $Q$  are 41, 5 and 1024 records, respectively. It is found out that  $466 \leq N_w \leq 6110$ ;  $11 \leq N \leq 132$ . Let us take a larger value – 132 neurons, then NN1 will have the configuration 41–1–132–5, which is presented in Fig. 2, where 41 is the number of input neurons, 1 is the number of hidden layers, 132 is the number of hidden neurons, and 5 is the number of output neurons.

By the way, the architectures of all other NN are similar and differ only in the number of neurons in different layers, the results of the calculations are summarized in Table 2.

*General characteristics of the software model.* Python 3.5 programming language, PyCharm 2016.3 integrated development environment and Tensorflow 1.2 framework were used to create the software model [12].

The software allows you to build a multilayer perceptron (add layers of a given length), train and test the neural model. In addition, you can set such parameters as the convergence coefficient, the number of training epochs, size of the data portion for the training step. The ADAM optimizer is taken as the optimization function. In the program, you can calculate the difference between the responses of the neural network and reference networks and obtain the values of accuracy.

The Tensorboard visualization tool was used to analyze neural models.

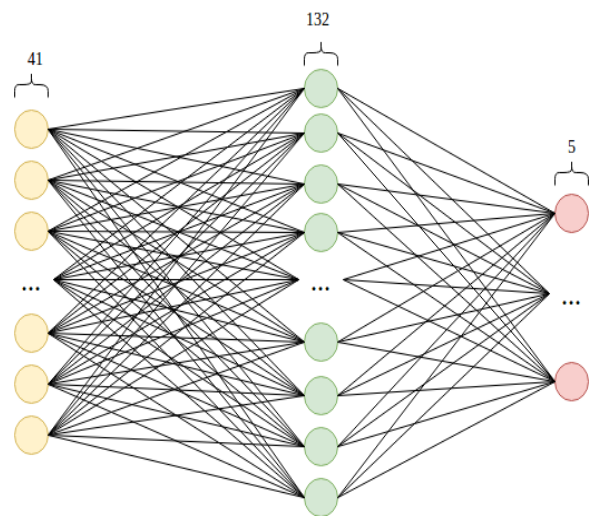


Fig. 2. NN configurations 41–1–132–5 to identify the attack class category

## Findings

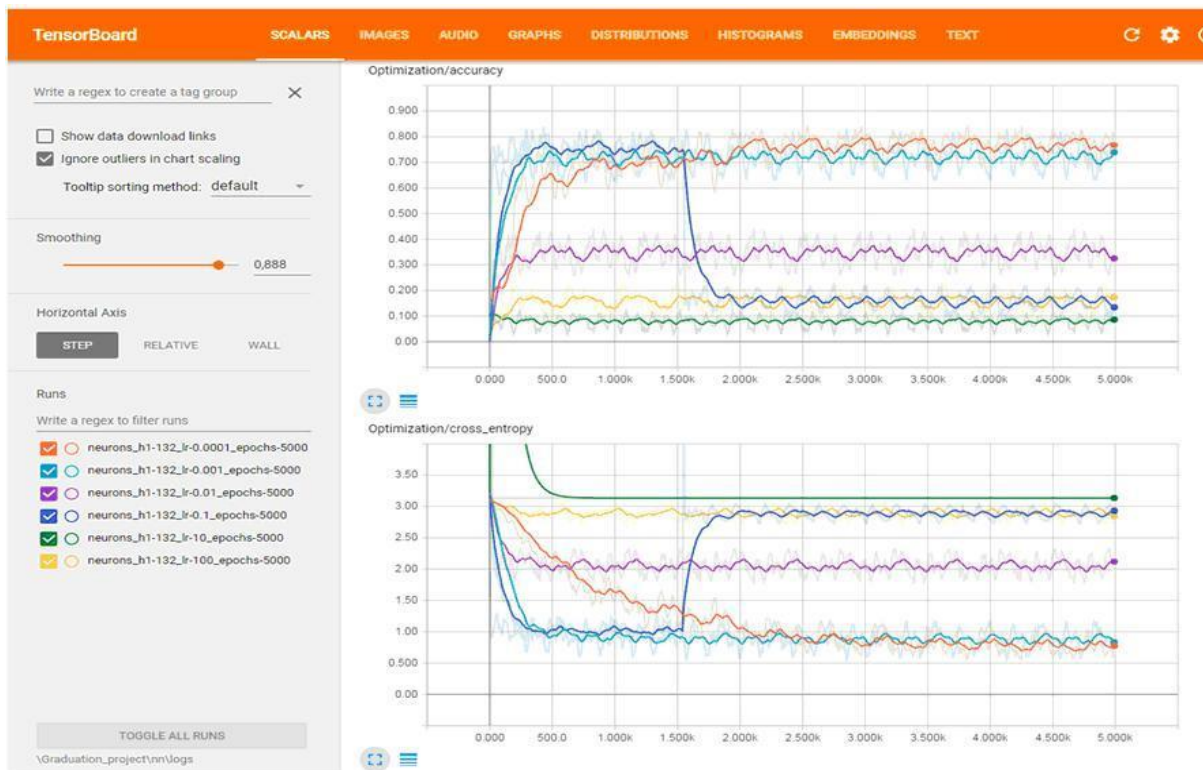
As an example, the analysis of NN1, which defines the category of attack class. For NN1 of configuration 41–1–132–5, the length of the training, test and validation sample is 1024, 294 and 156 examples, respectively.

The obtained graphs of accuracy and error of training of NN1 of configuration 41–1–132–5 by iterations for different training speeds are presented in Fig. 3. The total number of training iterations is 5000; training data come in 100 lines per iteration. The Smoothing parameter is responsible for approximating the curves on the graphs, which allows you to estimate the rate of their growth or decline. Bright colors indicate approximated graphics, pale – their true view.

Table 2

**NN parameters and configuration**

NN	Appointment	NN parameters					Configuration
		$N_x$	$N_y$	$Q$	$N_w$	$N$	
NN1	Detection of attack class category	41	5	1 024	$466 \leq N_w \leq 6110$	$11 \leq N \leq 132$	41–1–132–5
NN2	Detection of the attack type of DoS category	41	7	1 024	$559 \leq N_w \leq 7487$	$12 \leq N \leq 160$	41–1–160–5
NN3	Detection of the attack type of R2L category	41	9	512	$410 \leq N_w \leq 5404$	$9 \leq N \leq 111$	41–1–111–5
NN4	Detection of the attack type of U2R category	41	5	32	$22 \leq N_w \leq 332$	$1 \leq N \leq 8$	41–1–8–5
NN5	Detection of the attack type of Probe category	41	5	1 024	$373 \leq N_w \leq 4787$	$9 \leq N \leq 107$	41–1–107–5



neurons\_h1-N\_lr-M\_epochs-P:

$N$  – the number of neurons in the hidden layer,  $M$  – training speed,  $P$  – number of training iterations

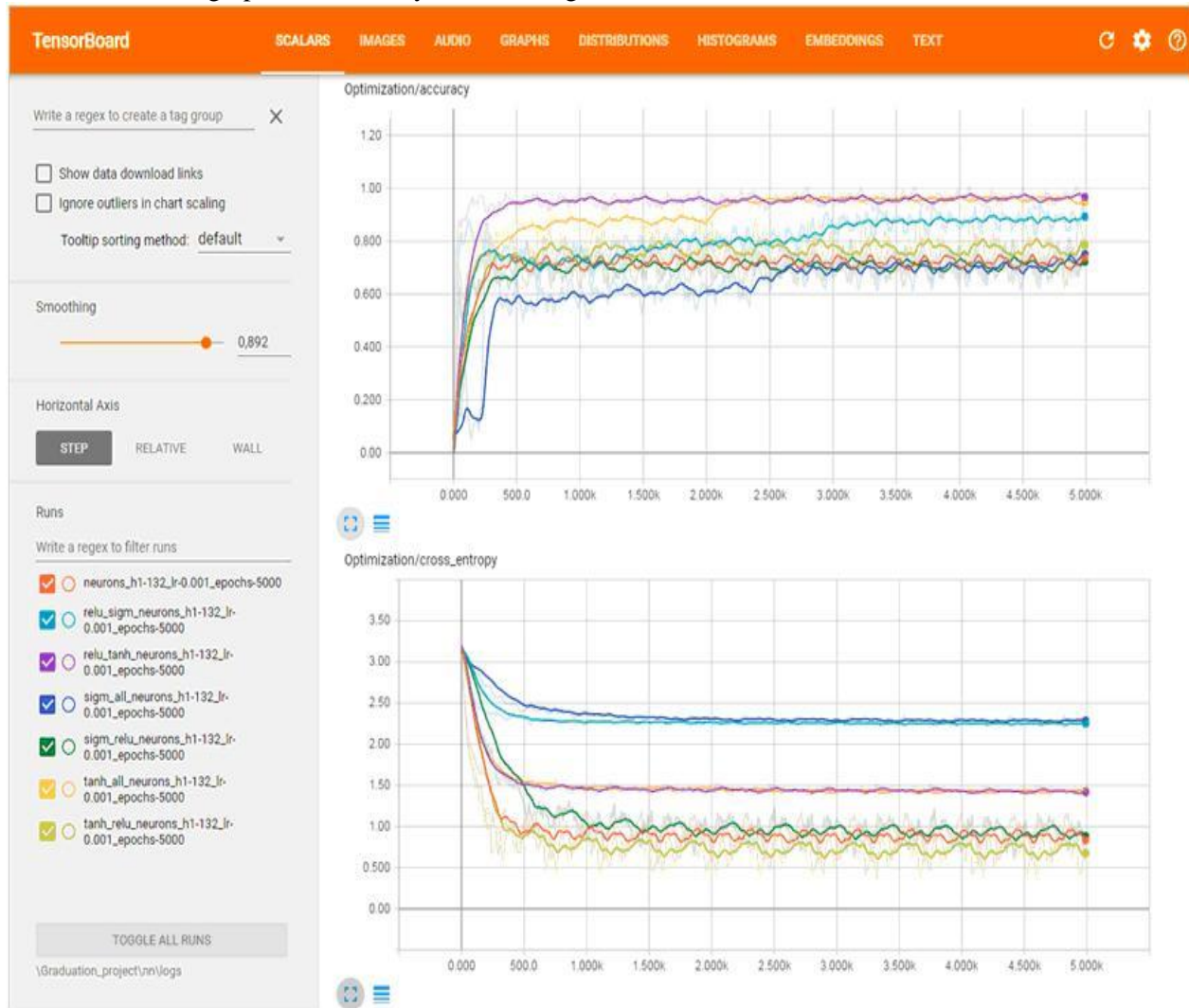
Fig. 3. Accuracy and error of NN training 41–1–132–5 by iterations (for different training speeds)

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

As can be seen from Fig. 3, at a training speed of 0.1, the accuracy dropped sharply between the second and third thousand iterations, which may be the result of a poor sample. However, at a training speed of 0.0001 the result is satisfactory, and at a training speed of 0.001 – the result is the best.

The obtained graphs of accuracy and training

error of NN1 of configuration 41–1–132–5 by iterations for different activation functions are presented in Fig. 4. The training speed is 0.001, the number of training iterations is 5000, the length of the data portion on each iteration is 100 lines.



[f1\_][f2\_]neurons\_h1-132\_lr-0,001\_epochs-5000:

$f1, f2$  – hidden and output layer activation functions; by default – relu; all –  $f2$  repeats  $f1$

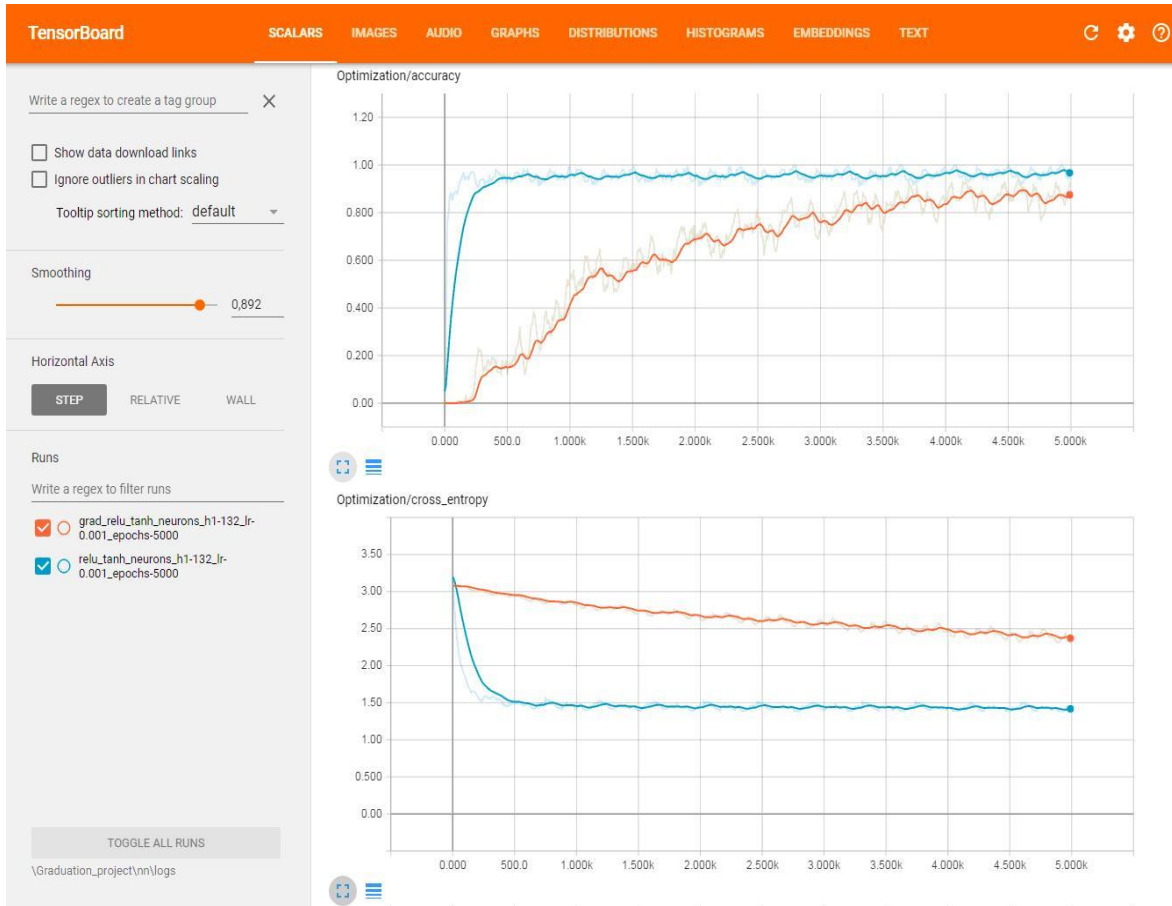
Fig. 4. Accuracy and error of NN 41–1–132–5 training by iterations (for different activation functions)

Fig. 4 shows that the best results (less time spent on NN training) are achieved when using the ReLU function in the hidden layer and the hyperbolic tangent in the output layer.

The obtained graphs of accuracy and error of training NN 41–1–132–5 by iterations for different

optimization algorithms are presented in Fig. 5. Parameters of NN1: training speed – 0.001, number of iterations – 5000, data portion length – 100, hidden layer activation function – ReLU, output layer activation function – hyperbolic tangent.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ



grad\_relu\_tanh\_neurons\_h1-132\_lr-0.001\_epochs-5000 – the optimization algorithm is a gradient descent,  
 relu\_tanh\_neurons\_h1-132\_lr-0.001\_epochs-5000 – the optimization algorithm is ADAM

Fig. 5. Accuracy and error of NN 41–1–132–5 training by iterations (for different optimization algorithms)

Fig. 5 shows that for NN1 the ADAM algorithm works faster.

It was determined that NN1 of configuration 41–1–132–5 provides the best accuracy value at a training speed of 0.001 and requires the least training time when using the semilinear ReLU activation function in the hidden layer and the hyperbolic tangent in the output layer; ADAM algorithm compared to gradient descent algorithm works faster, gives higher accuracy and lower error.

According to the results of the study of NN1 of configuration 41–1–132–5 to identify the category

of attack class the following parameters were determined: learning speed – 0.001; number of iterations – 5000; data portion length – 100; activation function in the hidden layer – ReLU; activation function in the output layer – hyperbolic tangent; optimization algorithm – ADAM, for which the accuracy of the test and validation samples was 92.86 and 91.03 %, respectively.

The simulation results on other neural networks (attack detection accuracy) are summarized in Table 3.

Table 3

**NN simulation results**

NN	NN1	NN2	NN3	NN4	NN5
Configuration	41–1–132–5	41–1–160–5	41–1–111–5	41–1–8–5	41–1–107–5
Accuracy, %	91.03	98.93	94.77	–	97.35

The table shows that the best result is achieved when determining the type of attacks of the DoS and Probe classes, slightly worse – for the R2L class. For the U2R class, it was not possible to configure the NN4 neural network to obtain acceptable results. This is due to the small number of records (52 in total) in the KDD Cup 99 database that belong to the U2R class.

### Originality and practical value

In our work, the detection of network attacks was carried out using the apparatus of neural networks (multilayer perceptron), as in other works [10, 13], which is not a contradiction to those works [1, 4, 5], where a hybrid (immune mechanisms and SOM; neural, immune and neuro-fuzzy classifiers) or combined approach used based on different types of neural networks (MLP and neural fuzzy network; multiple SOM and neural fuzzy network; MLP, RBF and SOM). Herewith, in our work all types of attacks of DoS classes are investigated; U2R; R2L; Probe, not individual, as in [10, 13].

We believe that the use of a multi-layer perceptron as a mathematical apparatus is appropriate and sufficient. For example, although the RBF network is trained faster than the MLP network, it is necessary to determine the number of radial elements, location of their centers and deviation values, the RBF model requires slightly more elements, i.e. will run slower and requires more memory than the MLP model.

Processing a large amount of constantly changing network traffic, based on MLP using machine training (especially deep) leads to a large number of false positives and skip attacks, which requires additional research using DataMining technology [8]. Thus, in particular, in our work on the software model it is determined that the ADAM optimization algorithm works faster than the gradient descent algorithm. It gives higher accuracy and lower error; this cannot be a contradiction to the use of other means (in particular, local adaptive multifactor smoothing, proposed in [7]).

The study used a multilevel (namely two-level) approach to building a network system for detect-

ing intrusions into a computer network: determining the category of attack class (first level); assigning the type of attack to the appropriate class (second level), which is also not a contradiction to the modular approach in [2]. But the probability of error of the second kind (the number of skip of attacks) in our work is about 10 vs. 18 % for the modular approach, which is implemented in [2], which is 1.8 times better.

### Conclusions

1. When processing a large amount of constantly changing network traffic, it is appropriate to use a two-level network system based on five neural networks of the following configurations: 41–1–132–5 to determine the category of attack class at the first level, as well as 41–1–160–7, 41–1–8–5, 41–1–111–9, 41–1–107–5 to detect the type of attack from the DoS classes (back, land, neptune, pod, smurf, teardrop), U2R (buffer\_overflow, loadmodule, perl, rootkit), R2L (ftp\_write, guess\_passwd, imap, multihop, phf, spy, warezclient, warez-master), Probe (ipsweep, nmap, portsweep, sa-tan) respectively at the second level. The training data are taken from the open KDD Cup 99 database, which stores a large number of characteristics of TCP connections. The Google TensorFlow machine training framework was chosen to build all neural networks because of its flexibility and speed.

2. We conducted a study of the parameters of the neural network configuration 41–1–132–5, which determines the category of the attack class on the computer network. It is determined that the optimal training speed is 0.001. The ADAM algorithm proved to be the best for optimization. As a function of activation for the hidden layer, the ReLU function is the most suitable, for the activation function of the output layer – the hyperbolic tangent function. The accuracy in the test and validation samples was 92.86 and 91.03 %, respectively. The probability of a type II error is about 10%.

3. The study showed that for training a neural network of 41–1–8–5 configuration, which determines the type of attack of the U2R class, the available training sample is not enough.

## LIST OF REFERENCE LINKS

1. Браницкий А. А. *Обнаружение аномальных сетевых соединений на основе гибридизации методов вычислительного интеллекта* : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2018. 18 с.
2. Жульков Е. В. *Построение модульных нейронных сетей для обнаружения классов сетевых атак* : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2007. 16 с.
3. Пахомова В. М., Коннов М. С. Дослідження двох підходів до виявлення мережних атак із використанням нейромережної технології. *Наука та прогрес транспорту*. 2020. № 3 (87). С. 81–93. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/208233>
4. Фролов П. В., Чухраев И. В., Гришанов К. М. Применение искусственных нейронных сетей в системах обнаружения вторжений. *Системный администратор*. 2018. № 9 (190). URL: <http://samag.ru/archive/article/3724> (дата звернення: 04.09.2020).
5. Amini M., Rezaeeneour J., Hadavandi E. A Neural Network Ensemble Classifier for Effective Intrusion Detection using Fuzzy Clustering and Radial Basis Function Networks. *International Journal on Artificial Intelligence Tools*. 2016. Vol. 25. Iss. 02. P. 1–32. DOI: <https://doi.org/10.1142/s0218213015500335>
6. Esteban J. A New GHSOM Model applied to network security. *Artificial Neural Networks-ICANN 2008*. 2008. P. 680–689.
7. Grill M., Pevný T., Rehak M. Reducing false positives of network anomaly detection by local adaptive multivariate smoothing. *Journal of Computer and System Sciences*. 2017. Vol. 83. Iss. 1. P. 43–57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcss.2016.03.007>
8. Hadi, A. A. A. Performance Analysis of Big Data Intrusion Detection System over Random Forest Algorithm. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2018. Vol. 13, No. 2. P. 1520–1527.
9. KDD Cup 1999 Data. URL: <http://kdd.ics.uci.edu/databases/kddcup99/kddcup99.html> (дата звернення: 04.09.2020).
10. Saied A., Overill R. E., Radzik T. Detection of known and unknown DDoS attacks using Artificial Neural Networks. *Neurocomputing*. 2016. Vol. 172. P. 385–393. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.04.101>
11. Sikos L. F. *AI in Cybersecurity*. New York : Springer, 2018. 205 p.
12. TensorFlow. URL: <http://www.tensorflow.org> (дата звернення: 04.09.2020).
13. Zhukovyts'kyu I. V., Pakhomova V. M. Identifying threats in computer network based on multilayer neural network. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 2 (74). P. 114–123. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/130797>
14. 2018 Data Breach Investigations Report. URL: [https://enterprise.verizon.com/resources/reports/DBIR\\_2018\\_Report.pdf](https://enterprise.verizon.com/resources/reports/DBIR_2018_Report.pdf) (дата звернення: 04.09.2020).

I. В. ЖУКОВИЦЬКИЙ<sup>1\*</sup>, В. М. ПАХОМОВА<sup>2\*</sup>, Д. О. ОСТАПЕЦЬ<sup>3\*</sup>, О. І. ЦИГАНОК<sup>4\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Електронні обчислювальні машини», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта [ivzhukl@ua.fm](mailto:ivzhukl@ua.fm), ORCID 0000-0002-3491-5976

<sup>2\*</sup>Каф. «Електронні обчислювальні машини», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта [viknikpakh@gmail.com](mailto:viknikpakh@gmail.com), ORCID 0000-0002-0022-099X

<sup>3\*</sup>Каф. «Електронні обчислювальні машини», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта [odaia@i.ua](mailto:odaia@i.ua), ORCID 0000-0003-1778-7770

<sup>4\*</sup>Каф. «Електронні обчислювальні машини», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта [tsiganok.oleg@yandex.ua](mailto:tsiganok.oleg@yandex.ua), ORCID 0000-0001-9846-7669

## ВИЯВЛЕННЯ АТАК НА КОМП'ЮТЕРНУ МЕРЕЖУ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ КОМПЛЕКСУ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

**Мета.** За основну мету дослідження ми ставимо розвиток методики визначення атак на комп'ютерну мережу. Досягнення поставленої мети передбачає вирішення таких завдань: розробити методику виявлення атак на комп'ютерну мережу на основі ансамблю нейронних мереж із використанням нормалізованих да-

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

них відкритої бази KDDCup99; під час виконання машинного навчання виявити оптимальні параметри нейронної мережі, що забезпечить достатньо високий рівень достовірності виявлення вторгнень у комп'ютерну мережу. **Методика.** Як архітектурне рішення модуля виявлення атак запропоновано дворівневу мережну систему, основу якої складає ансамбль із п'яти нейронних мереж типу багатослового перцептрона: перша нейронна мережа – для визначення категорії класу атаки (DoS, R2L, U2R, Probe) або факту того, що атаки не було; інші нейронні мережі – для виявлення типу атаки, якщо така мала місце (кожна з цих чотирьох нейронних мереж відповідає одному класу атаки і вміє визначати типи, що належать тільки цьому класу). **Результати.** На створеній програмній моделі проведено дослідження параметрів нейронної мережі конфігурації 41–1–132–5, яка визначає категорію класу атаки на комп'ютерну мережу. Встановлено, що оптимальна швидкість навчання дорівнює 0,001. Для оптимізації найкраще себе показав алгоритм ADAM. Як функція активації для прихованого шару найбільше підходить функція ReLU, для функції активації вихідного шару – функція гіперболічного тангенса. Точність на тестовій та валідаційній вибірках склала 92,86 та 91,03 % відповідно. **Наукова новизна.** Розроблена програмна модель, для якої використана мова програмування Python 3.5, інтегроване середовище розробки PyCharm 2016.3 та фреймворк Tensorflow 1.2, дає можливість виявляти всі типи атак класів DoS, U2R, R2L, Probe. **Практична значимість.** Отримано графічні залежності точності нейронних мереж за різних параметрів: швидкості навчання; активаційної функції; алгоритму оптимізації. Визначено оптимальні параметри нейронних мереж, що забезпечать достатньо високий рівень достовірності виявлення вторгнень у комп'ютерну мережу.

*Ключові слова:* архітектурне рішення; нейронна мережа; швидкість навчання; функція активації; алгоритм оптимізації

И. В. ЖУКОВИЦКИЙ<sup>1\*</sup>, В. Н. ПАХОМОВА<sup>2\*</sup>, Д. А. ОСТАПЕЦ<sup>3\*</sup>, О. И. ЦЫГАНOK<sup>4\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Электронные вычислительные машины», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, эл. почта ivzhukl@ua.fm, ORCID 0000-0002-3491-5976

<sup>2\*</sup>Каф. «Электронные вычислительные машины», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, эл. почта viknikpakh@gmail.com, ORCID 0000-0002-0022-099X

<sup>3\*</sup>Каф. «Электронные вычислительные машины», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, эл. почта odaua@i.ua, ORCID 0000-0003-1778-7770

<sup>4\*</sup>Каф. «Электронные вычислительные машины», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, эл. почта tsiganok.oleg@yandex.ua, ORCID 0000-0001-9846-7669

## ОБНАРУЖЕНИЕ АТАК НА КОМПЬЮТЕРНУЮ СЕТЬ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПЛЕКСА НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

**Цель.** В качестве основной цели исследования поставлено развитие методики определения атак на компьютерную сеть. Достижение поставленной цели предусматривает решение следующих задач: разработать методику выявления атак на компьютерную сеть на основе ансамбля нейронных сетей с использованием нормализованных данных открытой базы KDDCup99; при выполнении машинного обучения выявить оптимальные параметры нейронной сети, что обеспечит достаточно высокий уровень достоверности обнаружения вторжений в компьютерную сеть. **Методика.** В качестве архитектурного решения модуля обнаружения атак предложено двухуровневую сетевую систему, основу которой составляет ансамбль из пяти нейронных сетей типа многослойного перцептрона: первая нейронная сеть – для определения категории класса атаки (DoS, R2L, U2R, Probe) или факта того, что атаки не было; другие нейронные сети – для выявления типа атаки, если таковая имела место (каждая из этих четырех нейронных сетей соответствует одному классу атаки и умеет определять типы, принадлежащих только этому классу). **Результаты.** На созданной программной модели проведено исследование параметров нейронной сети конфигурации 41–1–132–5, которая определяет категорию класса атаки на компьютерную сеть. Установлено, что оптимальная скорость обучения равна 0,001. Для оптимизации лучше всего себя показал алгоритм ADAM. В качестве функции активации для скрытого слоя более всего подходит функция ReLU, для функции активации выходного слоя – функция гиперболического тангенса. Точность на тестовой и валідаційній вибірках составила 92,86

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

и 91,03 % соответственно. **Научная новизна.** Разработанная программная модель, для которой использован язык программирования Python 3.5, интегрированная среда разработки PyCharm 2016.3 и фреймворк Tensorflow 1.2, дает возможность обнаруживать все типы атак классов DoS, U2R, R2L, Probe. **Практическая значимость.** Получены графические зависимости точности нейронных сетей при различных параметрах: скорости обучения; активационной функции; алгоритма оптимизации. Определены оптимальные параметры нейронных сетей, которые обеспечат достаточно высокий уровень достоверности обнаружения вторжений в компьютерную сеть.

*Ключевые слова:* архитектурное решение; нейронная сеть; скорость обучения; функция активации; алгоритм оптимизации

## REFERENCES

1. Branitskiy, A. A. (2018). *Obnaruzhenie anomalnykh setevykh soedineniy na osnove gibridizatsii metodov vychislitel'nogo intellekta* (Extended abstract of PhD dissertation). St. Petersburg, Russia. (in Russian)
2. Zhulkov, Ye. V. (2007). *Postroenie modulnykh neyronnykh setey dlya obnaruzheniya klassov setevykh atak* (Extended abstract of PhD dissertation). St. Petersburg, Russia. (in Russian)
3. Pakhomova, V. M., & Konnov, M. S. (2020). Research of two approaches to detect network attacks using neural network technologies. *Science and Transport Progress*, 3(87), 81-93. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/208233> (in Ukrainian)
4. Frolov, P. V., Chukhraev, I. V., & Grishanov, K. M. (2018). Application of artificial neural networks in intrusion detection systems. *System administrator*, 9(190). Retrieved from [samag.ru/archve/article/3724](http://samag.ru/archve/article/3724) (in Russian)
5. Amini, M., Rezaeenour, J., & Hadavandi, E. (2016). A Neural Network Ensemble Classifier for Effective Intrusion Detection Using Fuzzy Clustering and Radial Basis Function Networks. *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, 25(02), 1-32. DOI: <https://doi.org/10.1142/s0218213015500335> (in English)
6. Esteban, J. (2008). A New GHSOM Model applied to network security. *Artificial Neural Networks-ICANN 2008* (pp. 680-689). (in English)
7. Grill, M., Pevný, T., & Rehak, M. (2017). Reducing false positives of network anomaly detection by local adaptive multivariate smoothing. *Journal of Computer and System Sciences*, 83(1), 43-57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcss.2016.03.007> (in English)
8. Hadi, A. A. A. (2018). Performance Analysis of Big Data Intrusion Detection System over Random Forest Algorithm. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(2), 1520-1527 (in English)
9. KDD Cup 1999 Data. Retrieved from <http://kdd.ics.uci.edu/databases/kddcup99/kddcup99.html> (in English)
10. Saied, A., Overill, R. E., & Radzik, T. (2016). Detection of known and unknown DDoS attacks using Artificial Neural Networks. *Neurocomputing*, 172, 385-393. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.04.101> (in English)
11. Sikos, L. F. (2018). *AI in Cybersecurity*. New York: Springer. (in English)
12. TensorFlow. Retrieved from <http://www.tensorflow.org> (in English)
13. Zhukovyts'kyu, I. V., & Pakhomova, V. M. (2018). Identifying threats in computer network based on multilayer neural network. *Science and Transport Progress*, 2(74), 114-123. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/130797> (in English)
14. 2018 Data Breach Investigations Report. Retrieved from [https://enterprise.verizon.com/resources/reports/DBIR\\_2018\\_Report.pdf](https://enterprise.verizon.com/resources/reports/DBIR_2018_Report.pdf) (in English)

Received: May 28, 2020

Accepted: September 28, 2020

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 669.15-194.2:621.785.4

В. И. ЗУРНАДЖИ<sup>1\*</sup>, В. С. ВОЛОШИН<sup>2\*</sup>, Р. А. КУССА<sup>3\*</sup>, В. Г. ЕФРЕМЕНКО<sup>4\*</sup>,  
А. В. ДЖЕРЕНОВА<sup>5\*</sup>, Е. В. ЦВЕТКОВА<sup>6\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Физика», Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87555, тел. +38 (0629) 44 61 31, эл. почта vadim.zurnadzy@gmail.com, ORCID 0000-0003-0290-257X

<sup>2\*</sup>Каф. «Охрана труда и окружающей среды», Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87555, тел. +38 (0629) 44 65 55, эл. почта rector@pstu.edu, ORCID 0000-0002-9922-5618

<sup>3\*</sup>ЧАО «МК «АЗОВСТАЛЬ», ул. Лепорского, 1, Мариуполь, Украина, 87500, тел. +38 (0629) 44 61 31, эл. почта kussaroman1@gmail.com, ORCID 0000-0001-9003-2003

<sup>4\*</sup>Каф. «Физика», Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87555, тел. +38 (0629) 44 61 31, эл. почта vgefremenko@gmail.com, ORCID 0000-0002-4537-6939

<sup>5\*</sup>Каф. «Физика», Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87555, тел. +38 (0629) 44 61 31, эл. почта dzherenovs.all@gmail.com, ORCID 0000-0002-4249-4147

<sup>6\*</sup>Каф. «Физика», Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87555, тел. +38 (0629) 44 61 31, эл. почта tsvetkova.elena.0957@gmail.com, ORCID 0000-0001-5216-6641

## СОВРЕМЕННЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ С TRIP-ЭФФЕКТОМ

**Цель.** Основной целью данной работы является выполнение на основе последних литературных данных анализа современного состояния вопроса о направлениях в разработке химического состава и режимов термической обработки сталей, реализующих TRIP-эффект при нагружении. Благодаря протеканию деформационного мартенситного превращения остаточного аустенита эти стали обладают повышенным комплексом механических и эксплуатационных свойств при достаточно экономном легировании. **Методика.** В работе использованы сведения, полученные из опубликованной за длительный период времени научной литературы, включая отечественные источники и высокорейтинговые зарубежные издания. Сведения систематизированы по основным типам TRIP-сталей и касаются их химического состава и технологии термической обработки. **Результаты.** Представлена история развития исследований по разработке конструкционных сталей, использующих TRIP-эффект, а именно: высоколегированных однофазных метастабильных аустенитных сталей, а также низколегированных многофазных TRIP-assisted сталей, в которых TRIP-эффект играет вспомогательную роль как дополнительный механизм упрочнения и обеспечения повышенной пластичности. К последней группе сталей относятся: низколегированные TRIP-assisted стали,  $\delta$ -TRIP-стали и мартенситно-старяющиеся TRIP-стали. Описаны типичные схемы легирования и применяемые схемы термической обработки, позволяющие достигнуть в сталях оптимальных соотношения фазово-структурных составляющих, количества и степени стабильности остаточного аустенита к деформационному мартенситному превращению и, как результат, – обеспечить повышенный комплекс механических и эксплуатационных свойств. Отмечена ключевая роль формирования бескарбидной структуры, достигаемой легированием кремнием и/или алюминием, в обеспечении высоких свойств стали. Показана перспективность применения современных конструкционных сталей, реализующих TRIP-эффект, в автомобилестроении и в машиностроительной отрасли. Даны рекомендации по дальнейшим направлениям исследований в данной области. **Научная новизна.** В статье проведен анализ и систематизация актуальных литературных данных о направлениях в разработке технологий получения многофазных конструкционных сталей с остаточным метастабильным аустенитом, реализующих TRIP-эффект при нагружении. **Практическая значимость.** Результаты,

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

полученные в рамках данной работы, могут быть использованы в качестве справочных материалов при решении конструкторских задач, а также в образовательных целях при подготовке профильных специалистов по инженерным специальностям.

*Ключевые слова:* высокопрочные стали; метастабильный аустенит; TRIP-эффект; термообработка

### Вступление

Задача повышения эффективности производства современных высокопрочных сталей не теряет своей актуальности. Ее решение подразумевает экономию энергетических и сырьевых ресурсов, в том числе за счет оптимизации химического состава и технологии термической обработки стального проката. В настоящее время разработан и опробован целый ряд технологических подходов, нацеленных на получение в конструкционных сталях многофазных структурных состояний с повышенным количеством остаточного аустенита, склонного к проявлению TRIP-эффекта (Transformation Induced Plasticity – пластичность, наведенная превращением) [25, 34]. Такой аустенит претерпевает мартенситное превращение при деформации, что приводит к значительному росту прочности при сохранении достаточно высокой пластичности и вязкости стали. В отечественной литературе в недостаточной мере освещено современное состояние вопроса по разработке и применению конструкционных сталей с TRIP-эффектом, поэтому анализ этого вопроса представляет определенный интерес.

### Цель

Основной целью статьи является аналитический обзор литературных данных о направлениях в разработке химического состава и режимов термической обработки современных конструкционных сталей, реализующих TRIP-эффект при нагружении.

### Методика

В статье представлена история развития направления исследования конструкционных TRIP-сталей. Использованные данные почерпнуты из отечественных источников и ведущих зарубежных журналов материаловедческой направленности. На основании анализа данных выделены основные направления разработки современных сталей с реализацией TRIP-

эффекта, а также рассмотрены перспективы адаптации технологий их термообработки к промышленным условиям.

### Результаты

Начало изучения TRIP-эффекта относится к первой половине прошлого века, когда Sheil открыл мартенситное превращение в Fe–Ni сталях под действием напряжений (1932 г.), а Wassermann впервые описал кристаллографию  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращения, протекающего в никелевой стали при растяжении (1933 г.). Основы современных представлений о TRIP-эффекте и его практическом использовании для повышения механических свойств сталей были заложены в 50–60-х годах работами уральской школы металлургов под руководством Богачева [1], а также исследованиями зарубежных ученых (Patel, Cohen, Houdremont, Krisement, Lihl и др.). Впоследствии эти исследования были продолжены и развиты в работах Малинова, Zackay, Parker, Филиппова, Попова, Matsumura, Чейляха, Sugimoto, White, Sakuma и других авторов [5, 6]. На первых этапах исследования развивались в направлении разработки однофазных  $\gamma$ -сталей, в которых метастабильный аустенит получали за счет введения большого количества легирующих элементов (Ni, Mn, Cr, Mo). Более перспективным направлением стало создание безникелевых МАС(метастабильный аустенит)-сталей систем легирования Fe–C–Mn, Fe–C–Mn–Cr, Fe–C–Mn–Cr–N, что позволяло использовать TRIP-эффект при снижении затрат на легирование. В зависимости от химического состава предел прочности безникелевых МАС-сталей варьируется в интервале 600–1750 МПа, при этом относительное удлинение достигает 50 % [2]. Универсальность концепции МАС-сталей была подтверждена многочисленными исследованиями отечественных и зарубежных ученых, убедительно доказавших высокую эффективность метастабильного аустенита в повышении не только механических свойств, но и эксплуатационной долговечности стальных и чугуновых изделий, работаю-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

щих в условиях деформации поверхности при кавитации, трении, абразивном и ударно-абразивном изнашивании [4, 14, 23]. Тем не менее широкое внедрение МАС-сталей сдерживалось их высокой стоимостью.

В 80-х годах Matsumura (Nippon Steel Corporation) с целью дальнейшего удешевления металлопродукции при сохранении максимально высокого комплекса механических свойств выполнил комплекс исследований в направлении разработки многофазных сталей с повышенным количеством метастабильного остаточного аустенита [29]. В результате была предложена и развита концепция получения низколегированных сталей с многофазной структурой, в которых TRIP-эффект используется лишь как один из механизмов упрочнения. Для обозначения сталей этого класса был введен термин «TRIP-assisted» (или «TRIP-aided») [8, 33]. Содержание аустенита в TRIP-assisted сталях ограничено 5–20 % [33], что, тем не менее, позволяет получать в них повышенный комплекс свойств, недостижимый в сталях с низким уровнем легирования. Классический химический состав TRIP-assisted сталей лежит в диапазоне 0,15–0,4 % C; 1,0–2,5 % Si (или Al); 1–2 % Mn [15]. Низкое содержание углерода в данных сталях (как правило, не более 0,2 %) обусловлено необходимостью обеспечения их хорошей свариваемости [15]. Для стабилизации аустенита в TRIP-assisted сталях используют выдержку в бейнитном интервале температур после предварительного нагрева в межкритический интервал. TRIP-assisted стали вошли в группу высокопрочных AHSS сталей (AHSS – Advanced High-Strength Steel) первого поколения [15], и в настоящее время широко используют в автомобилестроении.

Концепция низколегированных TRIP-сталей получила мощное развитие в конце 80 – начале 90-х годов в связи с возникшей потребностью зарубежного автопрома в листовой стали повышенной прочности и штампуемости. Эта потребность была связана со взятым ведущими автомобильными компаниями мира направлением на кардинальное снижение веса автомобиля и расхода горючего. Преимуществом TRIP-assisted сталей является сочетание высокой прочности и удовлетворительной пластичности, достигаемое наличием повышенного ко-

личества остаточного аустенита и оптимальной степенью его стабильности к деформационному мартенситному превращению. Низкое отношение  $\sigma_T/\sigma_B$  (0,5–0,6) обеспечивает этим сталям хорошую штампуемость, а упрочнение при деформации – высокую прочность в готовом изделии, что позволяет снижать толщину листа, облегчая вес автомобиля.

Ключевым моментом в формировании конечной структуры TRIP-assisted сталей является получение бескарбидного бейнита, поскольку цементитные включения являются концентраторами напряжений и облегчают зарождение и развитие трещин. Для получения такой структуры большинство современных высокопрочных сталей, использующих TRIP-эффект, легируют кремнием или алюминием в количестве 1–2 % [10]. Кремний подавляет выделение цементита из аустенита на стадии изотермической выдержки, что позволяет насытить аустенит углеродом и увеличить долю остаточного аустенита по завершении термической обработки. Способность кремния подавлять выделение цементита объясняется его чрезвычайно низкой растворимостью в последнем [11]. Кроме того, кремний значительно повышает коэффициент активности углерода в феррите и аустените, а также снижает растворимость углерода в феррите. При температурах бейнитной выдержки кремний имеет низкую способность к диффузии на дальние расстояния [11]. Следовательно, накопление кремния вокруг зародыша цементита может значительно повысить локальную активность углерода и увеличить свободную энергию системы, предотвращая диффузию углерода к зародышу цементита [7]. Торможение выделения цементита под влиянием кремния описано в работах Курдюмова [3], Bhadeshia [7], Caballero [11] и других. Существенным недостатком легирования большим количеством кремния является формирование прочного слоя марганце-кремниевых оксидов, которые закатываются в поверхность металла во время горячей прокатки [27]. Это препятствует нанесению антикоррозионного покрытия: формирующиеся при содержании кремния свыше 0,5 % окисные пленки не позволяют покрыть сталь цинком во время горячего цинкования и, как следствие, вызывают появление на поверхности листа оголенных участков [26, 30].

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

В попытках решения этой проблемы кремний стараются заменять алюминием. Алюминий так же, как и кремний, не растворяется в цементите и является сильным стабилизатором феррита, увеличивает время образования карбидов и снижает термодинамическую стабильность цементита [9]. Кроме того, алюминий ускоряет бейнитное превращение [16]. В отличие от кремния, алюминий не препятствует нанесению гальванических покрытий при содержании до 1,5 % [28]. Легирование стали большим количеством алюминия способствует более сильному насыщению остаточного аустенита углеродом [27]. Недостатками использования алюминия являются низкая степень твердорастворного упрочнения [20] и значительное повышение температуры начала мартенситного превращения [26].

Не менее важным элементом с точки зрения современных TRIP-assisted сталей является марганец. Его основная роль заключается в увеличении прокаливаемости и росте количества остаточного аустенита [13]. Вместе с тем слишком высокое содержание марганца приводит к полосчатой структуре и чрезмерной стабилизации остаточного аустенита, поэтому количество этого элемента в TRIP-assisted сталях не превышает 2,5 % [22]. Содержание марганца свыше 2 % также затрудняет нанесение цинкового покрытия даже в отсутствие кремния [30].

После прокатки TRIP-assisted стали подвергают термической обработке, которую проводят в два этапа (рис. 1). Первый заключается в нагреве в межкритический интервал (МКИ) температур (т. е. между точками  $A_{c1}$  и  $A_{c3}$ ) для получения аустенито-ферритной структуры с примерно равной долей фаз [9]. Во время выдержки в МКИ углерод перераспределяется из феррита в аустенит, в результате чего концентрация углерода в последнем повышается до 0,3–0,4 % [13]. Следующий этап заключается в изотермической выдержке при температурах бейнитного превращения (300–500 °C) [13], которую можно совмещать со смоткой в рулоны. В результате превращения количество аустенита уменьшается, однако содержание углерода в оставшейся части аустенита возрастает до 1–1,5 % [13], что стабилизирует его к дальнейшему превращению [39]. При длительных выдержках в интервале 400–500 °C содержание уг-

лерода в остаточном аустените может достигать 1,5–2,0 % [13]. Причиной обогащения аустенита углеродом является его низкая растворимость в бейнитном феррите и подавление выделения карбидов из аустенита введением кремния и(или) алюминия. После указанной термической обработки TRIP-assisted стали имеют структуру, состоящую из 40–60 % феррита, 35–45 % бескарбидного бейнита и высокоуглеродистого остаточного аустенита, залегающего между пластинами бейнитного феррита (возможно присутствие и некоторой доли мартенсита) [19] (рис. 2). В зависимости от легирования, в структуре также могут присутствовать дисперсные специальные карбиды. Формирование многофазной «композитной» структуры вызывает перераспределение напряжений между фазами из-за различий в их пластических свойствах, что существенно влияет на поведение стали при деформации [21]. Такая структура обеспечивает достижение предела прочности 850–1000 МПа при удлинении 20–30 %.

Комплекс свойств AHSS сталей зачастую оценивают показателем PSE (Product of Strength and Elongation), представляющим собой произведение предела прочности на относительное удлинение. Для TRIP-assisted сталей значение PSE составляет 18–25 ГПа·%. Данный класс сталей освоен производителями стального проката, в частности компания «US Steel Corporation» предлагает тонколистовую сталь TBF 980 (TRIP Assisted Bainite-Ferrite), обладающую следующими свойствами:  $\sigma_b = 1010$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 820$  МПа,  $\delta = 14$  %. Дополнительное повышение свойств обеспечивают введением микродобавок ниобия, ванадия и титана, что позволяет формировать нанодисперсные карбидные и карбонитридные упрочняющие включения [18].

К преимуществам низколегированных TRIP-assisted сталей можно отнести достаточно высокий комплекс свойств при низкой стоимости, а также высокие технологические свойства, такие как штампуемость и свариваемость. Тем не менее, наличие мягких структурных составляющих (феррита и аустенита) снижает предел текучести, что сужает сферу применения данных сталей.

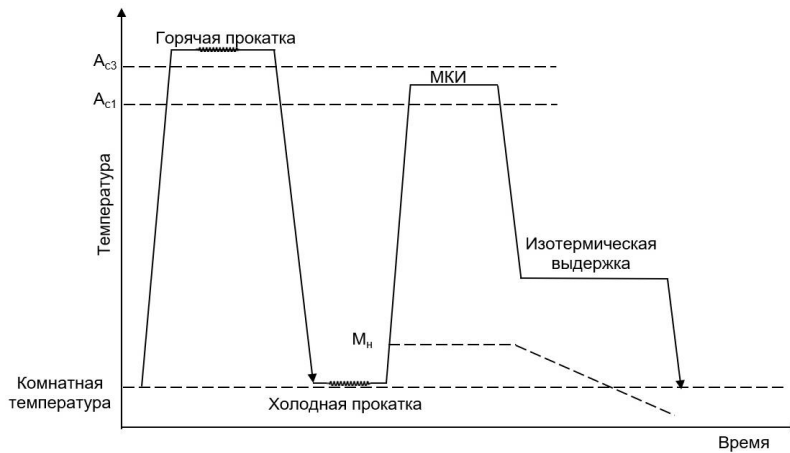


Рис. 1. Схема термической обработки TRIP-assisted сталей

Fig. 1. Scheme of heat treatment of TRIP-assisted steels

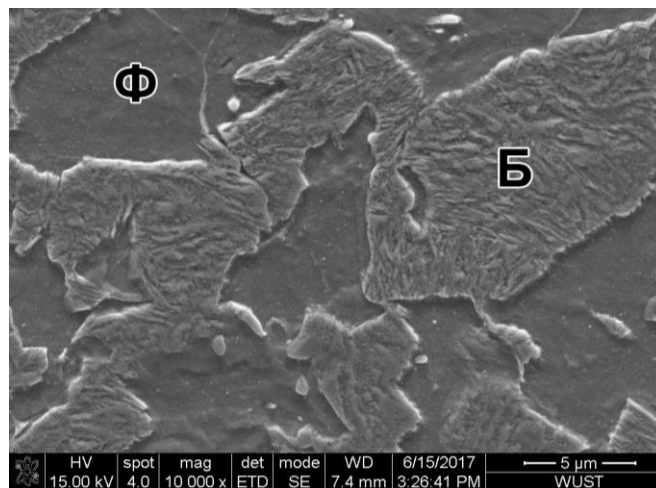


Рис. 2. Микроструктура TRIP-assisted стали после двухстадийной термообработки с нагревом в межкритическом интервале температур (Ф – феррит, Б – бескарбидный бейнит)

Fig. 2. Microstructure of TRIP-assisted steel after two-stage heat treatment with heating in the intercritical temperature range (Ф – ferrite, Б – carbide-free bainite)

Как было сказано выше, классические TRIP-assisted стали, как правило, имеют микроструктуру, состоящую из аллотриоморфного (т. е. зарождающегося по границам зерен) феррита, реечного бейнитного феррита и остаточного аустенита. В 2007 году Chatterjee и Bhadeshia предложили концепцию  $\delta$ -TRIP-assisted сталей, в которых аллотриоморфный феррит заменен на  $\delta$ -феррит, формирующийся в виде дендритов из жидкой фазы [12]. Такой феррит стабилен к превращению при температурах вплоть до 900–1 200 °C [38] и остается в структуре стали после термической

обработки [36]. Стабилизацию  $\delta$ -феррита обеспечивают легированием, аналогичным классической TRIP-assisted стали, но при повышенном до ~0,4 % содержании углерода и 2–4 % алюминия [12, 37]. В литом состоянии эти стали имеют структуру, состоящую из дендритов  $\delta$ -феррита и перлита [12], что обеспечивает высокий (с учетом относительно низкого содержания легирующих элементов) комплекс механических свойств.  $\delta$ -TRIP сталь, содержащая 0,36 % C, 1,96 % Mn, 0,73 % Si, 2,22 % Al, 0,022 % P, 0,52 % Cu, в литом состоянии имеет предел прочности 1 000 МПа при удлинении

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

27 % [12], что делает возможным применение этих сталей в литом состоянии.

Термическая обработка  $\delta$ -TRIP сталей аналогична классическим TRIP-assisted сталям. Микроструктура в термообработанном состоянии имеет несколько уменьшенное, по сравнению с литым состоянием, количество дендритов  $\delta$ -феррита, пластинчатого бейнитного феррита и остаточного аустенита. Такая структура обеспечивает стали, содержащей 0,39 % C, 0,21 % Si, 0,51 % Mn, 3,84 % Al, предел прочности 661 МПа при удлинении 41 % [37]. Кроме относительно высокого уровня механических свойств,  $\delta$ -TRIP стали имеют ряд преимуществ, делающих их перспективными для более широкого промышленного применения. Речь идет о снижении плотности стали за счет легирования алюминием [35]. Добавление 3,5 % Al снижает плотность на  $\approx 5$  % [35], что особенно актуально для автомобильной отрасли, где стремятся снизить массу деталей (при сохранении прочностных свойств) с целью снижения расхода топлива и выбросов парниковых газов в атмосферу. Кроме того, в  $\delta$ -TRIP сталях при сварке в зоне термического влияния невозможно получить полностью мартенситную структуру, что положительно сказывается на свариваемости стали и короблении сварных конструкций [37].

Еще одним современным вектором развития данного направления являются мартенситно-стареющие TRIP-стали (Maraging-TRIP), концепция которых была предложена Raabe в 2009 году [32]. Эта концепция позволяет сочетать высокую прочность, обеспечиваемую упрочнением наноразмерными интерметаллидными частицами, выделяющимися при старении мартенсита, с высокой пластичностью за счет реализации TRIP-эффекта [31, 32]. Комбинация этих эффектов обеспечивается особой системой легирования. Как правило, в мартенситно-стареющих TRIP-сталях содержание углерода ограничивается 0,01 % для обеспечения формирования интерметаллидных включений, подобно классическим мартенситно-стареющим сталям. Кроме того, эти TRIP-стали содержат 9–15 % Mn, 1–3 % Mo и 1–2 % Ni [10, 31].

Термическая обработка мартенситно-стареющих TRIP-сталей на первом этапе предполагает получение однородной аустенитной структуры (нагревом до 1 100 °C) с последую-

щей закалкой. Вторым этапом является старение мартенсита при 450–600 °C. Во время старения происходит выделение интерметаллидных фаз, а также «реверсия» мартенсита в аустенит: за счет перераспределения углерода и марганца на границе раздела «мартенсит/аустенит» происходит образование и рост новых аустенитных зерен [31]. По завершении термической обработки микроструктура стали имеет упрочненный наноразмерными частицами мартенсит и  $\approx 15$  % остаточного аустенита [10]. Такая микроструктура обеспечивает в стали предел прочности на уровне 1 500 МПа при общем удлинении 15–20 % [31, 32]. Несмотря на комбинацию TRIP-эффекта и старения мартенсита, а также использование существенно более дорогого легирования, данная концепция ощутимо проигрывает по комплексу механических свойств Q&P-сталям и сталям с нанобейнитом [17, 24]. Тем не менее, она легче реализуется в промышленных условиях при обработке широкого спектра изделий, следовательно, может найти промышленное применение в будущем.

Химический состав TRIP-сталей и соответствующие механические свойства приведены в табл. 1, из которой следует, что низколегированные TRIP-assisted стали характеризуются хорошим соотношением «стоимость/комплекс свойств», что делает их перспективными для промышленного использования в автомобилестроении и машиностроительной отрасли промышленности. Направления дальнейшего исследования этих сталей лежат в области адаптации TRIP-сталей к условиям реального металлургического производства и к специфическим условиям эксплуатации различных металлоизделий.

#### Научная новизна и практическая значимость

В работе произведен анализ публикаций, посвященных исследованию современных конструкционных сталей, реализующих TRIP-эффект. Показано, что ключевую роль в обеспечении высокого комплекса свойств в TRIP-сталях играет формирование многофазной структуры с повышенной долей остаточного аустенита, склонного к деформационному мартенситному превращению.

Таблица 1

## Химический состав и механические свойства современных сталей, использующих TRIP-эффект

Table 1

## Chemical composition and mechanical properties of modern steels using the TRIP effect

Стали	Источник	Содержание легирующих элементов								$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
		C	Si	Al	Mn	Cu	Ni	Mo	V/ Ti			
Низколегированные TRIP-assisted	[34]	0,20	1,50	–	1,8	–	–	–	–	988	–	21,5
	[25]	0,27	1,38	–	1,88	–	–	–	–	860	–	38,0
$\delta$ -TRIP	[12]	0,36	0,73	2,22	1,96	0,52	–	–	–	1000	–	27
	[37]	0,39	0,21	3,84	0,51	–	–	–	–	661	–	41
Maraging-TRIP	[32]	0,01	0,06	0,11	11,9	–	2,06	1,12	1,09 Ti	1300	–	21,0

## Выводы

1. Современные TRIP-assisted стали принадлежат к группе высокопрочных сталей AHSS (Advanced High-Strength Steel) первого поколения, которые обеспечивают повышенный комплекс механических и технологических свойств (штампуемость, свариваемость) при относительно невысоком уровне легирования.

2. После проведения термической обработки TRIP-assisted стали имеют многофазную структуру, состоящую из феррита, бескарбидного бейнита, мартенсита и 5–20 % метастабильного

остаточного аустенита, склонного к деформационному мартенситному превращению. Реализация TRIP-эффекта сопровождается ростом прочности и пластичности стали.

3. Ввиду своей технологичности концепция получения  $\delta$ -TRIP-сталей, обладающих повышенным комплексом механических свойств в литом состоянии, является перспективной для широкого промышленного применения.

Статья подготовлена в рамках проекта 0120U102087, финансируемого Министерством образования и науки Украины.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Богачев И. Н., Минц Р. И. *Кавитационное разрушение железоуглеродистых сплавов*. Москва : Машгиз, 1959. 110 с.
2. Гольдштейн М. И., Грачев С. В., Векслер Ю. Г. *Специальные стали*. Москва : МИСИС, 1999. 408 с.
3. Курдюмов Г. В., Утевский Л. М., Энтин Р. И. *Превращения в железе и стали*. Москва : Наука, 1977. 238 с.
4. Малинов Л. С., Малинов В. Л. Повышение износостойкости сталей и чугунов за счет получения в их структуре метастабильного аустенита и реализации эффекта самозакалки при нагружении. *Металл и литье Украины*. 2001. № 1–2. С. 8–12.
5. Малинов Л. С., Малинов В. Л. *Экономнолегированные сплавы с мартенситными превращениями и упрочняющие технологии* : монография. Харьков : ННЦ ХФТИ, 2007. 346 с.
6. Чейлях А. П. *Экономнолегированные метастабильные сплавы и упрочняющие технологии* : монография. Мариуполь : ПГТУ, 2009. 483 с.
7. Bhadeshia H. K. D. H., Edmonds D. V. The bainite transformation in a silicon steel. *Metall Trans A*. 1979. Vol. 10. Iss. 7. A. P. 895–907. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02658309>
8. Bhadeshia H. K. D. H. TRIP-assisted steels? *ISIJ International*. 2002. Vol. 42. Iss. 9. P. 1059–1060. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.42.1059>
9. Bhattacharyya T., Singh S. B., Das S., Haldar A., Bhattacharjee D. Development and characterisation of C–Mn–Al–Si–Nb TRIP aided steel. *Materials Science and Engineering : A*. 2011. Vol. 528. Iss. 6. P. 2394–2400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.11.054>

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

10. Bleck W., Guo X., Ma Y. The TRIP effect and its application in cold formable sheet steels. *Steel Research International*. 2017. Vol. 88. Iss. 10. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.201700218>
11. Caballero F. G., Miller M. K., Babu S. S., Garcia-Mateo C. Atomic scale observations of bainite transformation in a high carbon high silicon steel. *Acta Materialia*. 2007. Vol. 55. Iss. 1. P. 381–390. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.08.033>
12. Chatterjee S., Muruganath M., Bhadeshia H. K. D. H.  $\delta$ TRIP steel. *Materials Science and Technology*. 2007. Vol. 23. Iss. 7. P. 819–827. DOI: <https://doi.org/10.1179/174328407X179746>
13. De Cooman B. C. Structure–properties relationship in TRIP steels containing carbide-free bainite. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2004. Vol. 8. Iss. 3–4. P. 285–303. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2004.10.002>
14. Efremenko V. G., Zurnadzi V. I., Chabak Y. G., Tsvetkova O. V., Dzherenova A. V. Application of the Q-n-P-Treatment for Increasing the Wear Resistance of Low-Alloy Steel with 0.75% C. *Material Science*. 2017. Vol. 53. Iss. 1. P. 67–75. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-017-0045-3>
15. Fonstein N. *Advanced high strength sheet steels : physical metallurgy, design, processing, and properties*. Berlin : Springer, 2015. 396 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19165-2>
16. Garcia-Mateo C., Caballero F. G., Bhadeshia H. K. D. H. Acceleration of Low-temperature Bainite. *ISIJ International*. 2003. Vol. 43. Iss. 11. P. 1821–1825. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.43.1821>
17. Garcia-Mateo C., Caballero F. G., Sourmail T., Kuntz M., Cornide J., Smanio V., Elvira R. Tensile behaviour of a nanocrystalline bainitic steel containing 3wt% silicon. *Materials Science and Engineering : A*. 2012. Vol. 549. P. 185–192. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.04.031>
18. Hashimoto S., Ikeda S., Sugimoto K. I., Miyake S. Effects of Nb and Mo Addition to 0.2%C-1.5%Si-1.5%Mn Steel on Mechanical Properties of Hot Rolled TRIP-aided Steel Sheets. *ISIJ International*. 2004. Vol. 44. Iss. 9. P. 1590–1598. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.1590>
19. Jacques P., Delannay F., Cornet X., Harlet P., Ladiere J. Enhancement of the mechanical properties of a low-carbon, low-silicon steel by formation of a multiphased microstructure containing retained austenite. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 1998. Vol. 29. Iss. 9. P. 2383–2393. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-998-0114-1>
20. Jacques P. J., Girault E., Mertens A., Verlinden B., Humbeeck J. V., Delannay F. The developments of cold rolled TRIP-assisted multiphase steels Al-alloyed TRIP-assisted multi-phase steels. *ISIJ International*. 2001. Vol. 41. Iss. 9. P. 1068–1074. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.1068>
21. Jacques P. J. Transformation-induced plasticity for high strength formable steels. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2004. Vol. 8. Iss. 3–4. P. 259–265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2004.09.006>
22. Kim S. J., Lee C. G., Choi I., Lee S. Effects of heat treatment and alloying elements on the microstructure and mechanical properties of 0.15 wt pct C transformation-induced plasticity-aided cold rolled steel sheet. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2001. Vol. 32. Iss. 3. P. 505–514. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-001-0067-0>
23. Koval' A. D., Efremenko V. G., Brykov M. N., Andrushchenko M. I., Kulikovskii R. A., Efremenko A. V. Principles for developing grinding media with increased wear resistance. Part 1. Abrasive wear resistance of iron-based alloys. *Journal of Friction and Wear*. 2012. Vol. 33. Iss. 1. P. 39–46. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068366612010072>
24. Kučerová L., Jirkova H., Mašek B. The effect of alloying on mechanical properties of advanced high strength steels. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2014. Vol. 59. Iss. 3. P. 1189–1192. DOI: <https://doi.org/10.2478/amm-2014-0206>
25. Lee K. Y. Tensile properties of different chemical compositions for TRIP-assisted multiphase steel for automobile structures. *International Journal of Automotive Technology*. 2008. Vol. 9. Iss. 1. P. 87–93. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12239-008-0011-z>
26. Mahieu J., Claessens S., De Cooman B. C. Galvanizability of highstrength steels for automotive applications. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2001. Vol. 32. Iss. 11. P. 2905–2907. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-001-1042-5>
27. Mahieu J., De Cooman B. C., Maki J. Phase transformation and mechanical properties of Si-free CMnAl transformation-induced plasticity-aided steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2002. Vol. 33. Iss. 8. P. 2537–2580. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-002-0378-9>

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

28. Maki J., Mahieu J., De Cooman B. C., Claessens S. Galvanisability of silicon free CMnAl TRIP steels. *Materials science and technology*. 2003. Vol. 19. Iss. 1. P. 125–131. DOI: <https://doi.org/10.1179/026708303225009300>
29. Matsumura O., Sakuma Y., Takechi H. Trip and its kinetic aspects in austempered 0.4 C-1.5 Si-0.8 Mn steel. *Scripta Metallurgica*. 1987. Vol. 21. Iss. 10. P. 1301–1306. DOI: [https://doi.org/10.1016/0036-9748\(87\)90103-7](https://doi.org/10.1016/0036-9748(87)90103-7)
30. Mintz B. Hot dip galvanising of transformation induced plasticity and other intercritically annealed steels. *International Materials Reviews*. 2001. Vol. 46. Iss. 4. P. 169–197. DOI: <https://doi.org/10.1179/095066001771048754>
31. Raabe D., Ponge D., Dmitrieva O., Sander B. Designing ultrahigh strength steels with good ductility by combining transformation induced plasticity and martensite aging. *Advanced Engineering Materials*. 2009. Vol. 11. Iss. 7. P. 547–555. DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.200900061>
32. Raabe D., Ponge D., Dmitrieva O., Sander B. Nanoprecipitate-hardened 1.5 GPa steels with unexpected high ductility. *Scripta Materialia*. 2009. Vol. 60. Iss. 12. P. 1141–1144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2009.02.062>
33. Sugimoto K. I., Usui N., Kobayashi M., Hashimoto S. I. Effects of volume fraction and stability of retained austenite on ductility of TRIP-aided dual-phase steels. *ISIJ International*. 1992. Vol. 32. Iss. 12. P. 1311–1318. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.32.1311>
34. Xu D., Li J., Meng Q., Liu Y., Li P. Effect of heating rate on microstructure and mechanical properties of TRIP-aided multiphase steel. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014. Vol. 614. P. 94–101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.06.075>
35. Yi H. L., Chen P., Hou Z. Y., Hong N., Cai H. L., Xu Y. B., Wu D., Wang G. D. A novel design: partitioning achieved by quenching and tempering (Q–T&P) in an aluminium-added low-density steel. *Scripta Materialia*. 2013. Vol. 68. Iss. 6. P. 370–374. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.10.018>
36. Yi H. L., Ghosh S. K., Liu W. J., Lee K. Y., Bhadeshia H. K. D. H. Non-equilibrium solidification and ferrite in  $\delta$ -TRIP steel. *Materials Science and Technology*. 2010. Vol. 26. Iss. 7. P. 817–823. DOI: <https://doi.org/10.1179/174328409X428918>
37. Yi H. L., Lee K. Y., Bhadeshia H. K. D. H. Extraordinary ductility in Al-bearing  $\delta$ -TRIP steel. *Proceedings of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2011. Vol. 467. Iss. 2125. P. 234–243. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.2010.0127>
38. Yi H. L., Lee K. Y., Bhadeshia H. K. D. H. Stabilisation of ferrite in hot rolled  $\delta$ -TRIP steel. *Materials Science and Technology*. 2011. Vol. 27. Iss. 2. P. 525–529. DOI: <https://doi.org/10.1179/026708309X12506934374001>
39. Zhang Z., Manabe K., Li Y., Zhu F. X. Effect of isothermal bainite treatment on microstructure and mechanical properties of low-carbon TRIP seamless steel tube. *Steel Research International*. 2012. Vol. 83. Iss. 7. P. 645–652. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.201200012>

В. І. ЗУРНАДЖИ<sup>1\*</sup>, В. С. ВОЛОШИН<sup>2\*</sup>, Р. О. КУССА<sup>3\*</sup>, В. Г. ЄФРЕМЕНКО<sup>4\*</sup>,  
А. В. ДЖЕРЕНОВА<sup>5\*</sup>, О. В. ЦВЕТКОВА<sup>6\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Фізика», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87555, тел. +38 (0629) 44 61 31, ел. пошта [vadim.zurnadzy@gmail.com](mailto:vadim.zurnadzy@gmail.com), ORCID 0000-0003-0290-257X

<sup>2\*</sup>Каф. «Охорона праці й навколишнього середовища», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87555, тел. +38 (0629) 44 65 55, ел. пошта [rector@pstu.edu](mailto:rector@pstu.edu), ORCID 0000-0002-9922-5618

<sup>3\*</sup>ПрАТ «МК «АЗОВСТАЛЬ», вул. Лепорського, 2, Маріуполь, Україна, 87500, тел. +38 (0629) 44 61 31, ел. пошта [kussaroman1@gmail.com](mailto:kussaroman1@gmail.com), ORCID 0000-0001-9003-2003

<sup>4\*</sup>Каф. «Фізика», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87555, тел. +38 (0629) 44 61 31, ел. пошта [vgefremenko@gmail.com](mailto:vgefremenko@gmail.com), ORCID 0000-0002-4537-6939

<sup>5\*</sup>Каф. «Фізика», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87555, тел. +38 (0629) 44 61 31, ел. пошта [dzherenovs.all@gmail.com](mailto:dzherenovs.all@gmail.com), ORCID 0000-0002-4249-4147

<sup>6\*</sup>Каф. «Фізика», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87555, тел. +38 (0629) 44 61 31, ел. пошта [tsvetkova.elena.0957@gmail.com](mailto:tsvetkova.elena.0957@gmail.com), ORCID 0000-0001-5216-6641

## СУЧАСНІ КОНСТРУКЦІЙНІ СТАЛІ ІЗ TRIP-ЕФЕКТОМ

**Мета.** Основною метою цієї роботи є виконання на основі останніх літературних даних аналізу сучасного стану питання про напрями в розробці хімічного складу й режимів термічної обробки сталей, що реалізують TRIP-ефект під час навантаження. Завдяки протіканню деформаційного мартенситного перетворення залишкового аустеніту ці сталі мають підвищений комплекс механічних та експлуатаційних властивостей за умови досить економного легування. **Методика.** У роботі використані відомості, отримані з опублікованої за тривалий період часу наукової літератури, включаючи вітчизняні джерела та високореєтингові зарубіжні видання. Відомості систематизовано за основними типами TRIP-сталей і стосуються їх хімічного складу й технології термічної обробки. **Результати.** Подано історію розвитку досліджень із розробки конструкційних сталей, що використовують TRIP-ефект, а саме: високолегованих однофазних метастабільних аустенітних сталей, а також низьколегованих багатофазних TRIP-assisted сталей, у яких TRIP-ефект відіграє допоміжну роль як додатковий механізм зміцнення та забезпечення підвищеної пластичності. До останньої групи сталей належать: низьколеговані TRIP-assisted сталі,  $\delta$ -TRIP-сталі та мартенситностаріючі TRIP-сталі. Описано типові схеми легування і схеми термічної обробки, що дозволяють досягти в сталях оптимального співвідношення фазово-структурних складових, кількості і ступеня стабільності залишкового аустеніту до деформаційного мартенситного перетворення і, як результат, – забезпечити підвищений комплекс механічних та експлуатаційних властивостей. Відзначено ключову роль формування безкарбідної структури, що досягається легуванням кремнієм та/або алюмінієм, у забезпеченні високих властивостей сталі. Показано перспективність застосування сучасних конструкційних сталей, що реалізують TRIP-ефект, в автомобілебудуванні та в машинобудівній галузі. Подано рекомендації щодо подальших напрямів досліджень у цій галузі. **Наукова новизна.** У статті проведено аналіз і систематизацію актуальних літературних даних про напрями в розробленні технологій отримання багатофазних конструкційних сталей із залишковим метастабільним аустенітом, що реалізують TRIP-ефект під час навантаження. **Практична значимість.** Результати, отримані в рамках цієї роботи, можуть бути використані як довідкові матеріали в разі розв'язання конструкторських задач, а також в освітніх цілях під час підготовки профільних фахівців з інженерних спеціальностей.

*Ключові слова:* високоміцні сталі; метастабільний аустеніт; TRIP-ефект; термообробка

V. I. ZURNADZHY<sup>1\*</sup>, V. S. VOLOSHYN<sup>2\*</sup>, R. A. KUSSA<sup>3\*</sup>, V. G. EFREMENKO<sup>4\*</sup>,  
A. V. DZHERENOVA<sup>5\*</sup>, O. V. TSVETKOVA<sup>6\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Physics», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87555, tel. +38 (0629) 44 61 31, e-mail vadim.zurnadzhy@gmail.com, ORCID 0000-0003-0290-257X

<sup>2\*</sup>Dep. «Labor and Environmental Protection», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87555, tel. +38 (0629) 44 65 55, e-mail rector@pstu.edu, ORCID 0000-0002-9922-5618

<sup>3\*</sup>PJSC «Azovstal Iron & Steel Works», Leporskyi St., 1, Mariupol, Ukraine, 87500, tel. +38 (0629) 44 61 31, ORCID 0000-0001-9003-2003

<sup>4\*</sup>Dep. «Physics», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87555, tel. +38 (0629) 44 61 31, e-mail vgefremenko@gmail.com, ORCID 0000-0002-4537-6939

<sup>5\*</sup>Dep. «Physics», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87555, tel. +38 (0629) 44 61 31, e-mail dzherenovs.all@gmail.com, ORCID 0000-0002-4249-4147

<sup>6\*</sup>Dep. «Physics», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87555, tel. +38 (0629) 44 61 31, e-mail tsvetkova.elena.0957@gmail.com, ORCID 0000-0001-5216-6641

## MODERN STRUCTURAL STEELS WITH TRIP-EFFECT

**Purpose.** The aim of this work is to analyze the latest literature data on current state of the issue in the development of the chemical composition and heat treatment modes of steels that implement the TRIP effect under loading. Due to the deformation martensitic transformation of retained austenite, these steels have increased mechanical and operational properties with cost-saving alloying. **Methodology.** The information published over a long period of time in scientific literature, including domestic sources and high-rating foreign publications are used in this work. The information is systematized by the main TRIP-steels' types and relates to their chemical composition and heat treatment technology. **Findings.** The article presents a retrospective of the research progress on the development of structural TRIP effect added steels namely: high-alloy single-phase metastable austenitic steels, as well as low-alloy multiphase TRIP-assisted steels, in which the TRIP effect plays an supporting role, as an additional strengthening

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

and providing increased plasticity mechanism. The latter group of steels includes low alloy TRIP-assisted steels,  $\delta$ -TRIP steels and maraging TRIP steels. The typical alloying schemes and applied heat treatment modes that make it possible to achieve the optimal phase-structural components ratio, the volume fraction and stability of retained austenite to deformation martensitic transformation in steels and, as a result, to provide an increased mechanical and operational properties were described. The key role of the carbide-free structure formation is noted, which is achieved by alloying with silicon and/or aluminum in providing high properties of steel. The prospects of using modern structural TRIP steels in the automotive and in the machine-building industry are shown. Recommendations for further research directions in this area are made. **Originality.** The article provides an analysis and systematization of relevant literature data on the development of technologies for the production of multiphase structural steels with retained metastable austenite, realizing the TRIP effect. **Practical value.** The results of the research can be used as reference materials in solving material design problems, as well as for educational purposes in the preparation of specialized professionals in engineering specialties.

**Keywords:** high-strength steels; metastable austenite; TRIP effect; heat treatment

## REFERENCES

1. Bogachev, I. N., & Mints, R. I. (1959). *Kavitatsionnoe razrushenie zhelezouglerodistykh splavov*. Moscow: Mashgiz. (in Russian)
2. Goldshteyn, M. I., Grachev, S. V., & Veksler, Yu. G. (1999). *Spetsialnye stali*. Moscow: MISIS. (in Russian)
3. Kurdyumov, G. V., Utevskiy, L. M., & Entin, R. I. (1977). *Prevrashcheniya v zheleze i stali*. Moscow: Nauka. (in Russian)
4. Malinov, L. S., & Malinov, V. L. Povyshenie iznosostoykosti staley i chugunov za schet polucheniya v ikh strukture metastabilnogo austenita i realizatsii efekta samozakalki pri nagruzhennii. *Metal and casting of Ukraine, 1-2*, 8-12. (in Russian)
5. Malinov, L. S., & Malinov, V. L. (2007). *Ekonomnolegirovannye splavy s martensitnymi prevrashcheniyami i uprochnyayushchie tekhnologii: monografiya*. Kharkiv : NNTs KhFTI. (in Russian)
6. Cheylyakh, A. P. (2009). *Ekonomnolegirovannye metastabilnye splavy i uprochnyayushchie tekhnologii: monografiya*. Mariupol: PGTU PGTU. (in Russian)
7. Bhadeshia, H. D. H., & Edmonds, D. V. (1979). The bainite transformation in a silicon steel. *Metallurgical Transactions A*, 10(7), 895-907. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02658309> (in English)
8. Bhadeshia, H. K. (2002). TRIP-assisted steels? *ISIJ international*, 42(9), 1059-1060. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.42.1059> (in English)
9. Bhattacharyya, T., Singh, S. B., Das, S., Haldar, A., & Bhattacharjee, D. (2011). Development and characterisation of C–Mn–Al–Si–Nb TRIP aided steel. *Materials Science and Engineering: A*, 528(6), 2394-2400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.11.054> (in English)
10. Bleck, W., Guo, X., & Ma, Y. (2017). The TRIP effect and its application in cold formable sheet steels. *Steel Research International*, 88(10), 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.201700218> (in English)
11. Caballero, F. G., Miller, M. K., Babu, S. S., & Garcia-Mateo, C. (2007). Atomic scale observations of bainite transformation in a high carbon high silicon steel. *Acta Materialia*, 55(1), 381-390. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.08.033> (in English)
12. Chatterjee, S., Muruganath, M., & Bhadeshia, H. K. D. H. (2007).  $\delta$ TRIP steel. *Materials Science and Technology*, 23(7), 819-827. DOI: <https://doi.org/10.1179/174328407X179746> (in English)
13. De Cooman, B. C. (2004). Structure–properties relationship in TRIP steels containing carbide-free bainite. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 8(3-4), 285-303. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2004.10.002> (in English)
14. Efremenko, V. G., Zurnadzhi, V. I., Chabak, Y. G., Tsvetkova, O. V., & Dzherenova, A. V. (2017). Application of the QnP-treatment for increasing the wear resistance of low-alloy steel with 0.75% C. *Materials Science*, 53(1), 67-75. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-017-0045-3> (in English)
15. Fonstein, N. (2015). *Advanced high strength sheet steels*. Berlin: Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19165-2> (in English)
16. Garcia-Mateo, C., Caballero, F. G., & Bhadeshia, H. K. D. H. (2003). Acceleration of Low-temperature Bainite. *ISIJ international*, 43(11), 1821-1825. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.43.1821> (in English)
17. Garcia-Mateo, C., Caballero, F. G., Sourmail, T., Kuntz, M., Cornide, J., Smanio, V., & Elvira, R. (2012). Tensile behaviour of a nanocrystalline bainitic steel containing 3wt% silicon. *Materials Science and Engineering: A*, 549, 185-192. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.04.031> (in English)

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

18. Hashimoto, S., Ikeda, S., Sugimoto, K. I., & Miyake, S. (2004). Effects of Nb and Mo Addition to 0.2% C-1.5% Si-1.5% Mn Steel on Mechanical Properties of Hot Rolled TRIP-aided Steel Sheets. *ISIJ International*, 44(9), 1590-1598. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.1590> (in English)
19. Jacques, P., Delannay, F., Cornet, X., Harlet, P., & Ladriere, J. (1998). Enhancement of the mechanical properties of a low-carbon, low-silicon steel by formation of a multiphased microstructure containing retained austenite. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 29(9), 2383-2393. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-998-0114-1> (in English)
20. Jacques, P. J., Girault, E., Mertens, A., Verlinden, B., Humbeeck, J. V., & Delannay, F. (2001). The developments of cold-rolled TRIP-assisted multiphase steels. Al-alloyed TRIP-assisted multiphase steels. *ISIJ international*, 41(9), 1068-1074. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.1068> (in English)
21. Jacques, P. J. (2004). Transformation-induced plasticity for high strength formable steels. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 8(3-4), 259-265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2004.09.006> (in English)
22. Kim, S. J., Lee, C. G., Choi, I., & Lee, S. (2001). Effects of heat treatment and alloying elements on the microstructures and mechanical properties of 0.15 wt pct C transformation-induced plasticity-aided cold-rolled steel sheets. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 32(3), 505-514. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-001-0067-0> (in English)
23. Koval', A. D., Efremenko, V. G., Brykov, M. N., Andrushchenko, M. I., Kulikovskii, R. A., & Efremenko, A. V. (2012). Principles for developing grinding media with increased wear resistance. Part 1. Abrasive wear resistance of iron-based alloys. *Journal of Friction and Wear*, 33(1), 39-46. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068366612010072> (in English)
24. Kučerová, L., Jirkova, H., & Mašek, B. (2014). The effect of alloying on mechanical properties of advanced high strength steels. *Archives of Metallurgy and Materials*, 59(3), 1189-1192. DOI: <https://doi.org/10.2478/amm-2014-0206> (in English)
25. Lee, K. Y. (2008). Tensile properties of different chemical compositions for TRIP-assisted multiphase steel for automobile structures. *International Journal of Automotive Technology*, 9(1), 87-93. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12239-008-0011-z> (in English)
26. Mahieu, J., Claessens, S., & De Cooman, B. C. (2001). Galvanizability of high-strength steels for automotive applications. *Metallurgical and Materials Transactions*, 32(11), 2905-2907. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-001-1042-5> (in English)
27. Mahieu, J., De Cooman, B. C., & Maki, J. (2002). Phase transformation and mechanical properties of Si-free CMnAl transformation-induced plasticity-aided steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 33(8), 2573-2580. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-002-0378-9> (in English)
28. Maki, J., Mahieu, J., De Cooman, B. C., & Claessens, S. (2003). Galvanisability of silicon free CMnAl TRIP steels. *Materials science and technology*, 19(1), 125-131. DOI: <https://doi.org/10.1179/026708303225009300> (in English)
29. Matsumura, O., Sakuma, Y., & Takechi, H. (1987). Trip and its kinetic aspects in austempered 0.4 C-1.5 Si-0.8 Mn steel. *Scripta Metallurgica*, 21(10), 1301-1306. DOI: [https://doi.org/10.1016/0036-9748\(87\)90103-7](https://doi.org/10.1016/0036-9748(87)90103-7) (in English)
30. Mintz, B. (2001). Hot dip galvanising of transformation induced plasticity and other intercritically annealed steels. *International Materials Reviews*, 46(4), 169-197. DOI: <https://doi.org/10.1179/095066001771048754> (in English)
31. Raabe, D., Ponge, D., Dmitrieva, O., & Sander, B. (2009). Designing ultrahigh strength steels with good ductility by combining transformation induced plasticity and martensite aging. *Advanced Engineering Materials*, 11(7), 547-555. DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.200900061> (in English)
32. Raabe, D., Ponge, D., Dmitrieva, O., & Sander, B. (2009). Nanoprecipitate-hardened 1.5 GPa steels with unexpected high ductility. *Scripta Materialia*, 60(12), 1141-1144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2009.02.062> (in English)
33. Sugimoto, K. I., Usui, N., Kobayashi, M., & Hashimoto, S. I. (1992). Effects of volume fraction and stability of retained austenite on ductility of TRIP-aided dual-phase steels. *ISIJ International*, 32(12), 1311-1318. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.32.1311> (in English)
34. Xu, D., Li, J., Meng, Q., Liu, Y., & Li, P. (2014). Effect of heating rate on microstructure and mechanical properties of TRIP-aided multiphase steel. *Journal of Alloys and Compounds*, 614, 94-101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.06.075> (in English)

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

35. Yi, H. L., Chen, P., Hou, Z. Y., Hong, N., Cai, H. L., Xu, Y. B., Wang, G. D. (2013). A novel design: partitioning achieved by quenching and tempering (Q–T & P) in an aluminium-added low-density steel. *Scripta Materialia*, 68(6), 370-374. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.10.018> (in English)
36. Yi, H. L., Ghosh, S. K., Liu, W. J., Lee, K. Y., & Bhadeshia, H. K. D. H. (2010). Non-equilibrium solidification and ferrite in  $\delta$ -TRIP steel. *Materials Science and Technology*, 26(7), 817-823. DOI: <https://doi.org/10.1179/174328409X428918> (in English)
37. Yi, H. L., Lee, K. Y., & Bhadeshia, H. K. D. H. (2011). Extraordinary ductility in Al-bearing  $\delta$ -TRIP steel. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 467(2125), 234-243. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.2010.0127> (in English)
38. Yi, H. L., Lee, K. Y., & Bhadeshia, H. K. D. H. (2011). Stabilisation of ferrite in hot rolled  $\delta$ -TRIP steel. *Materials Science and Technology*, 27(2), 525-529. DOI: <https://doi.org/10.1179/026708309X12506934374001> (in English)
39. Zhang, Z., Manabe, K. I., Li, Y., & Zhu, F. (2012). Effect of Isothermal Bainite Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Low-Carbon TRIP Seamless Steel Tube. *Steel Research International*, 83(7), 645-652. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.201200012> (in English)

Поступила в редколлегию: 01.06.2020

Принята к печати: 30.09.2020

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.793.7:519.87

А. Н. СЕРЕНКО<sup>1</sup>, И. В. ЗАХАРОВА<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Автоматизация и механизация сварочного производства», Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500, тел. +38 (067) 958 20 17, эл. почта zsv-73@i.ua, ORCID 0000-0002-8536-6313

<sup>2\*</sup>Каф. «Автоматизация и механизация сварочного производства», Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500, тел. +38 (067) 845 25 39, эл. почта zakharovaiv75@gmail.com, ORCID 0000-0002-3492-0134

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОКРЫТИЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ДУГОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ С ПУЛЬСИРУЮЩИМ РАСПЫЛЯЮЩИМ ПОТОКОМ

**Цель.** Авторы предусматривают разработать математическую модель расчетного определения остаточных напряжений в произвольном слое газотермического покрытия на основании величины изменения геометрии основы (прогиб образца) и закона изменения производной от толщины слоя, дальнейшего регулирования этих напряжений, изменяя технологические параметры напыления под каждый вид напыляемого покрытия. **Методика.** На основании известных работ по определению напряжений в сварных соединениях, наплавленных стальных слоях выработан подход для определения прогиба образцов после послойного напыления. Данные параметры прогиба положены в разработанную математическую модель влияния на напряженное состояние. Систематизированы сведения по изучению основных видов остаточных (внутренних) напряжений как I рода, которые распределены в объеме всей детали (образца) с покрытием, так и II рода, локализованные в объеме напыляемых частиц. **Результаты.** Представлены исследования остаточных напряжений, возникающих в нанесенном слое, величина и характер распределения которых зависит от типа, основного и напыляемого материалов, способов и параметров напыления, жесткости детали и других факторов. Показана важная роль оценки остаточных напряжений в газотермическом покрытии расчетным методом в связи со сложностью экспериментального определения кинетики развития напряжений в композите покрытие – основа. **Научная новизна.** Авторы этой работы на основании впервые созданной математической модели и программного продукта Mathcad–Prime 6 2020 провели исследование уровня и принципов образования остаточных напряжений в покрытии при газотермическом послойном напылении различными материалами, в том числе с возможностью использования пульсирующего распыляющего воздушного потока. Аналитические исследования показали, что внимание в литературе за последние пять – семь лет было уделено изучению остаточных напряжений и деформаций в сварных соединениях, и только рост интереса к технологии напыления открывает широкие возможности изучения формирования полей напряжений в газотермическом покрытии. **Практическая значимость.** Результаты, полученные в рамках данной работы, подтверждают образование остаточных напряжений в покрытиях и могут быть использованы в качестве расчетных программ при решении конструкторских задач, а также в образовательных целях при подготовке профильных специалистов.

*Ключевые слова:* работоспособность; остаточные напряжения; покрытие; основа; математическая модель

### Введение

Работоспособность газотермического покрытия и его технологические свойства зависят от ряда факторов, которые закладывают в него на различных этапах формирования, начиная от выбора наносимого материала и заканчивая технологиями финальной обработки.

Остаточные напряжения, всегда возникающие при послойном газотермическом нанесении, являются одним из основных факторов,

определяющих прочность сцепления с основой покрытия, нанесенного практически любым способом напыления. Наиболее широко изучена и представлена в литературе проблематика образования напряжений в сварных конструкциях и их влияние на качество сварного узла [2, 3, 9], которые принимают за основу при разработке последующих инженерных методик оценки величины и характера внутренних напряжений, в том числе и в однослойных упрочняющих покрытиях [5, 11].

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Исследования показывают, что с ростом востребованности технологии газотермического нанесения продолжают работы по повышению надежности и прочности сцепления покрытий. Промышленное использование газотермических покрытий нашло применение в качестве подслоев (основа) перед нанесением покрытий со специализированными свойствами, например, лакокрасочными [12], к которым предъявляют особые требования по прочности сцепления и напряженности. Прочность сцепления покрытий с поверхностью рассматривают как основной фактор [1, 3, 4] при разработке сортамента наносимых материалов, для различных условий эксплуатации поверхности в условиях промышленного трения, нанесения защитных покрытий на стальные и бетонные конструкции, а также коррозионной стойкости в морских условиях [6, 7, 8].

## Цель

Учитывая тенденции развития технологий напыления металлов, авторы ставят цель разработать математическую модель расчетного определения остаточных напряжений в произвольном слое газотермического покрытия для оперативного прогнозирования и управления остаточными напряжениями в композите, а как следствие – для дальнейшего регулирования их

значения с учетом различных технологических параметров напыления для различных видов покрытия.

## Методика

На основании работ по определению напряжений в сварных соединениях выработан подход определения прогиба образцов после послойного напыления. Данные параметры прогиба положены в основу разработки математической модели влияния на напряженное состояние. Систематизированы сведения по изучению основных видов остаточных (внутренних) напряжений как I рода, которые распределены в объеме всей детали (образца) с покрытием, так и II рода, локализованных в объеме напыляемых частиц.

Используя общий метод определения напряжений, рассмотренный в [3, 10], авторы поставили задачу получить расчетные зависимости, связывающие величину остаточных напряжений в нанесенном слое  $\sigma_a$  с измеряемыми деформациями ( $\varepsilon$ ) или перемещениями ( $f$ - прогиб) стержня.

Рассмотрим призматический стержень высотой  $h_2$  (рис. 1) с модулем упругости  $E_2$ , на который нанесено покрытие  $a$  с модулем упругости  $E_1$ . Предположим, что осевые остаточные напряжения постоянны по длине стержня  $l$  (за исключением зоны краевого эффекта по концам стержня  $l_1 \approx h_2 + a$ ).

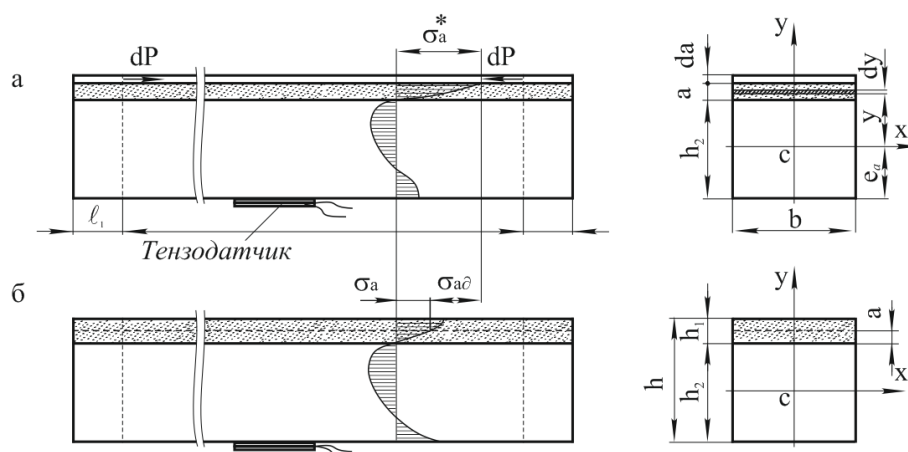


Рис. 1. Остаточные напряжения:

$a$  – в слое;  $b$  – в биметаллическом стержне прямоугольного сечения

Fig 1. Residual stresses:

$a$  – in the layer;  $b$  – in a bimetallic rod of rectangular section

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

После нанесения элементарного слоя толщиной  $da$  возникающие в нем напряжения  $\sigma_a^*$  вызовут сжатие и изгиб стержня элементарной силой  $dP_a = \sigma_a^* b da$ , под действием которой в крайнем нижнем волокне стержня возникнут напряжения сжатия

$$d\sigma_{\text{сж}} = -\frac{E_2 \sigma_a^* b da}{A_a} \quad (1)$$

и напряжения изгиба

$$d\sigma_{\text{из}} = -\frac{E_2 \sigma_a^* b (h_2 + a - e_a) e_a}{B_a}, \quad (2)$$

где  $A_a$ ,  $B_a$  – жесткость биметаллического стержня на сжатие и изгиб соответственно;  $e_a$  – расстояние от нижней грани стержня до приведенного центра тяжести сечения после нанесения слоя толщиной  $a$  (рис. 1,  $a$ ).

Жесткость стержня на сжатие определим из соотношения:

$$A_a = \int F_2 E_2 dF + \int F_1 E_1 dF = \int_{-e_a}^{h_2 - e_a} E_2 b dy + \int_{h_2 - e_a}^{h_2 + a - e_a} E_1 b dy. \quad (3)$$

После интегрирования и некоторых преобразований выражение (3) можно представить в следующем виде:

$$A_a = b E_1 D_a, \quad (4)$$

где  $D_a = \beta h_2 + a$ ;  $\beta = E_2 / E_1$ .

Жесткость сечения стержня на изгиб определим из соотношения:

$$B_a = \int F_2 E_2 y^2 dF + \int F_1 E_1 y^2 dF = E_2 b \int_{-e_a}^{h_2 - e_a} y^2 dy + E_1 b \int_{h_2 - e_a}^{h_2 + a - e_a} y^2 dy. \quad (5)$$

Проинтегрировав (5) и сделав некоторые преобразования, получим:

$$B_a = \frac{1}{3} b E_1 R_a, \quad (6)$$

где  $R_a = (h_2 - e_a + a)^3 + \beta e_a^3 + (\beta - 1)(h_2 - e_a)^3$ .

Расстояние  $e_a$  будем определять из условия:

$$\int F_2 E_2 y dF + \int F_1 E_1 y dF = E_2 b \int_{-e_a}^{h_2 - e_a} y dy + E_1 b \int_{h_2 - e_a}^{h_2 + a - e_a} y dy = 0; \quad (7)$$

по уравнению:

$$e_a = \frac{\frac{1}{2} E_2 b h_2^2 + E_1 b a \left( h_2 + \frac{a}{2} \right)}{E_2 b h_2 + E_1 b a}. \quad (8)$$

Тогда после преобразований получим:

$$e_a = \frac{\beta h_2^2 + 2 a h_2 + a^2}{2(\beta h_2 + a)}. \quad (9)$$

При равенстве модулей упругости стержня и покрытия ( $\beta = 1$ )

$$e_a = \frac{1}{2} (h_2 + a), \quad (10)$$

т. е. совпадает с центром тяжести прямоугольного сечения однородного металла.

Деформация в крайнем нижнем волокне стержня от действия элементарной силы  $dP_a$ :

$$d\varepsilon = \frac{d\sigma_{\text{сж}}}{E_2} + \frac{d\sigma_{\text{из}}}{E_2} = -\frac{\sigma_a^* b da}{A_a} + \frac{\sigma_a^* b (h_2 - e_a + a) da}{B_a} e_a. \quad (11)$$

После подстановки в (11) выражений (4), (6), (9) и преобразований будем иметь:

$$d\varepsilon = \frac{\sigma_a^*}{E_1} S_a da, \quad (12)$$

$$\text{где: } S_a = \left[ \frac{(3h_2 - e_a + a)e_a}{R_a} - \frac{1}{D_a} \right].$$

Из выражения (12)

$$\sigma_a^* = \frac{E_1}{S_a} \frac{d\varepsilon}{da}. \quad (13)$$

Нанесение последующих (после слоя  $a$ ) слоев покрытия до окончательной его толщины  $h_1$  (рис. 1,  $b$ ) приведет к возникновению в слое  $a$  добавочных напряжений  $\sigma_{ad}$ , которые вместе

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

с напряжениями (13) позволят определить полные остаточные напряжения в рассматриваемом слое:

$$\sigma_a = \sigma_a^* - \sigma_{ad}. \quad (14)$$

Для определения величины  $\sigma_{ad}$  нужно рассмотреть, что произойдет, если нанести добавочный слой  $d\xi$  (рис. 2). В этом случае на стерж-

жень начинают действовать усилия  $dN = \sigma_\xi^* b d\xi$  и момент  $dM = \sigma_\xi^* b (h_2 - e_a + \xi) d\xi$ , создающие в слое  $a$  напряжения:

$$d\sigma_{ad} = \frac{dNE_1}{A_\xi} + \frac{dME_1}{B_\xi} (h_2 - e_a + a). \quad (15)$$

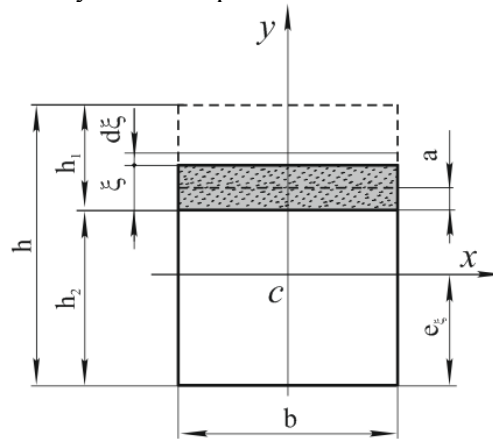


Рис. 2. Дополнительное напряжение при выполнении последующих (после  $a$ ) слоев

Fig. 2. Additional stress when performing subsequent (after  $a$ ) layers

Далее, если учесть, что добавочные напряжения в слое  $\xi$ , возникающие при его нанесении  $\sigma_\xi^*$  определяют по формуле (13), заменив  $a$  на  $\xi$ , получим:

$$d\sigma_{ad} = \frac{E_1}{S_\xi} \times \left[ \frac{1}{D_\xi} + \frac{3(h_2 - e_\xi + \xi)(h_2 - e_\xi + a)}{R_\xi} \right] \frac{d\varepsilon}{d\xi} d\xi. \quad (16)$$

Интегрируя, получим:

$$\sigma_{ad} = E_1 \int_a^{h_1} \frac{1}{S_\xi} \times \left[ \frac{1}{D_\xi} + \frac{3(h_2 - e_\xi + \xi)(h_2 - e_\xi + a)}{R_\xi} \right] \frac{d\varepsilon}{d\xi} d\xi, \quad (17)$$

Величины  $S_\xi$ ,  $D_\xi$ ,  $R_\xi$ ,  $e_\xi$  определяют из формул (4), (6), (9), (12), заменяя  $a$  на  $\xi$ .

Из соотношений (13), (14) и (17) вытекает основная расчетная формула для определения

остаточных напряжений в биметаллических стержнях прямоугольного сечения методом измерения продольной деформации:

$$\sigma_a = \frac{E_1}{S_a} \frac{d\varepsilon}{da} (a) - E_1 \int_0^{h_1} \frac{1}{S_\xi} \times \left[ \frac{1}{D_\xi} + \frac{3(h_2 - e_\xi + \xi)(h_2 - e_\xi + a)}{R_\xi} \right] \frac{d\varepsilon}{d\xi} d\xi. \quad (18)$$

Данная формула удовлетворяет общим условиям равновесия:

$$\int_0^h \sigma_a da = 0; \quad \int_0^h \sigma_a (h_2 - e_a + a) da = 0. \quad (19)$$

Проверка этих условий контролирует только правильность расчета.

После нанесения элементарного слоя толщиной  $da$  (рис. 1,  $a$ ) возникающая в нем элементарная сила  $dP$  вызывает изгиб стержня моментом  $dM = dP(h_2 - e_a + a)$ , приводящим к возрастанию прогиба стержня на величину:

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

$$df = \frac{l^2 dM}{8B_a} = \frac{\sigma_a^* bl^2 (h_2 - e_a + a)}{8B_a} da, \quad (20)$$

Откуда:

$$\sigma_a^* = \frac{8B_a}{bl^2 (h_2 - e_a + a)} \frac{df}{da}, \quad (21)$$

Добавочные напряжения в рассматриваемом слое  $a$  при выполнении последующих слоев будем определять по аналогии с формулами (15) и (16), из которых с учетом зависимости (14) вытекает основная расчетная формула для определения остаточных напряжений в покрытиях методом измерения прогиба стержня:

$$\sigma_a = \frac{8E_1}{l^2} \left\{ \frac{R_a}{3(h_2 - e_a + a)} \frac{df}{da}(a) - \int_a^{h_1} \left[ \frac{R_\xi}{3D_\xi (h_2 - e_\xi + \xi)} + (h_2 - e_a + a) \right] \frac{df}{d\xi} d\xi \right\}. \quad (22)$$

Получив в результате эксперимента зависимость величины деформации крайнего волокна (первый метод) или величины прогиба середины образца (второй метод) от толщины наносимого покрытия, можно по выражениям (18) и (22) рассчитать величину остаточных напряжений в любой точке по толщине напыленного слоя. Необходимые для этих расчетов значения производных  $d\varepsilon/da$  и  $df/da$  можно определить параболической аппроксимацией или любым другим способом.

Приближенное значение интеграла вычисляем любым численным методом.

Прогиб считается положительным, если он направлен в сторону от выполняемого слоя. Если при расчете по выражениям (18) или (22) величина  $\sigma_a$  оказывается положительной, то остаточные напряжения растягивающие.

В некоторых случаях напыления деталей необходимой толщины покрытия достигают за один проход. Поэтому определение величины и характера распределения остаточных напряжений в нем можно определить, используя послойное удаление покрытия путем механической обработки, например, шлифовкой. Такая задача решена в работе [10], и применительно к нашим обозначениям основная расчетная

формула для определения  $\sigma_{ост}$  в биметаллических стержнях прямоугольного сечения методом измерения прогиба будет иметь вид:

$$\sigma_a = \frac{8E_1}{l^2} \left[ R_a C_a \frac{df}{da}(a) - (h-a)f(a) + \int_0^{a_e} R_\xi \frac{df}{d\xi} d\xi - \int_0^a R_\xi \frac{df}{d\xi} d\xi \right]. \quad (23)$$

В этой формуле приняты следующие обозначения:

$$e_a = \frac{(h_1 - a)^2 + 2(h_1 - a)h_2 + \beta h_2^2}{2(h_1 - a + \beta h_2)};$$

$$D_a = (h - a + e_a)^3 + \beta e_a^3 + (1 - \beta)(e_a - h_2)^3;$$

$$C_a = h_1 - a + \beta h_2;$$

$$R_a = \frac{D_a}{3C_a (h - a + e_a)}.$$

Из анализа формул (18), (22), (23) видно, что для расчетного определения остаточных напряжений в произвольном слое  $a$  покрытия необходимо знать не только величину прогиба, но и закон изменения производной от толщины слоя. В связи с этим процедуру расчета остаточных напряжений (при послойном наращивании покрытия) осуществляют следующим образом.

После нанесения очередного слоя на образец производим определение приращения толщины слоя  $\Delta a$  и, соответственно, прогиба  $\Delta f$ . Учитывая, что наносимый слой является шероховатым и может иметь разброс толщины на всей напыляемой поверхности, определение приращения толщины слоя было произведено через приращение массы напыленного слоя путем взвешивания образца после каждого слоя на аналитических весах. Толщину слоя определяли перерасчетом приращения массы на приращение толщины слоя. Экспериментальные данные и результаты последующей обработки заносили в таблицы. Пример для одного образца (напыление проволокой Св08А) показан в табл. 1.

Таблица 1

**Экспериментальные данные зависимости прогиба образца  
от толщины наносимого слоя с применением  
воздушно-распыляющего пульсирующего потока**

Table 1

**Experimental data on the dependence  
of the sample deflection on the thickness  
of applied layer using an air-spraying pulsating flow**

i	Показания индикатора, мм		$\Delta f_i$ , мм	$f_i$ , мм	$\Delta a_i$ , мм	$a_i$ , мм	$h_2 + a_i$ , мм		$G_j$ , г	$\Delta G_j$ , г
	начальн.	послед.					расчет	изме- рение		
0	0,069	0,069	0	0	0	0	10,1	10,1	0	0
1	0,069	0,103	0,034	0,034	0,127	0,127	10,227	10,3	1,7	1,7
2	0,103	0,148	0,045	0,079	0,134	0,261	10,361	10,5	1,8	3,5
3	0,148	0,162	0,014	0,093	0,127	0,388	10,488	10,7	1,7	5,2
4	0,162	0,142	0,020	0,113	0,141	0,529	10,629	10,8	1,9	7,1
5	0,142	0,150	0,008	0,121	0,149	0,678	10,778	10,9	2,0	9,1
6	0,150	0,152	0,002	0,123	0,134	0,812	10,912	11,1	1,8	10,9
7	0,152	0,158	0,006	0,129	0,141	0,953	11,053	11,2	1,9	12,8
8	0,158	0,160	0,002	0,131	0,149	1,102	11,202	11,3	2,0	20,8
9	0,160	0,161	0,001	0,132	0,149	1,251	11,351	11,4	2,0	22,8
10	0,161	0,160	-0,001	0,131	0,149	1,4	11,5	11,5	2,0	24,8

Размер стержня:  $h_2 = 10,1$  мм;  $b = 20,2$  мм.

Режимы напыления:  $I_{св} = 150$  А;  $U_d = 28$  В;  
 $V_n = 66,3$  мм;  $L_n = 120$  мм.

Проволока: Св08А  $\varnothing$  2,0 мм.

Частота пульсаций: 65–75 Гц

Прогиб от наклепа пескоструйной обработкой 0,023 мм.

В таблице приняты следующие обозначения:

$f_i$  – текущее значение прогиба, мм;  $\Delta f_i$  – приращение прогиба, мм;  $a_i$  – текущее значение толщины слоя, мм;  $\Delta a_i$  – приращение толщины слоя, мм;  $h_2 + a_i$  – общая толщина стержня и покрытия, мм;  $G_j$  – приращение массы покрытия, г;  $i$  – номер напыленного слоя.

Перед напылением поверхность каждого образца подвергалась пескоструйной обработке корундовым песком при давлении воздуха 0,6 МПа. Под воздействием пескоструйной об-

работки наблюдается прогиб образцов в сторону обрабатываемой поверхности, что указывает на появление в поверхностном наклепываемом слое напряжений сжатия. Если принять толщину наклепываемого слоя равной 50...60 мкм [13] и считать распределение остаточных напряжений сжатия по толщине равномерным, можно показать, что их величина достигает значений 350...400 МПа. По-видимому, эти напряжения будут сниматься в момент напыления за счет теплового воздействия расплавленных капель на поверхностные слои. Более того, в результате неравномерного нагрева основы при нанесении первого слоя происходит образование в тонком поверхностном слое основы напряжений растяжения. Для подтверждения этого мы провели измерение остаточного прогиба образца после нанесения первого слоя и его самопроизвольного отслаивания за счет

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

предварительной обработки поверхности графитом.

Таким образом, начальный прогиб образца  $f_n$ , вызванный его неравномерным нагревом при нанесении первого слоя, приведет к возникновению начальных напряжений в образце, которые следует затем вычесть из напряжений, рассчитываемых по вышеприведенным формулам (табл. 1).

По результатам исследований строят графики зависимостей прогиба образца от толщины покрытия  $a$ .

В методике определения остаточных напряжений  $\sigma_a$  в покрытиях необходимо знать значение производной  $df/da$ .

Для решения этой задачи вначале ищется интерполяционный полином подходящей степени (уравнение кривой  $f(a)$ ), проходящей через экспериментальные точки (рис. 3).

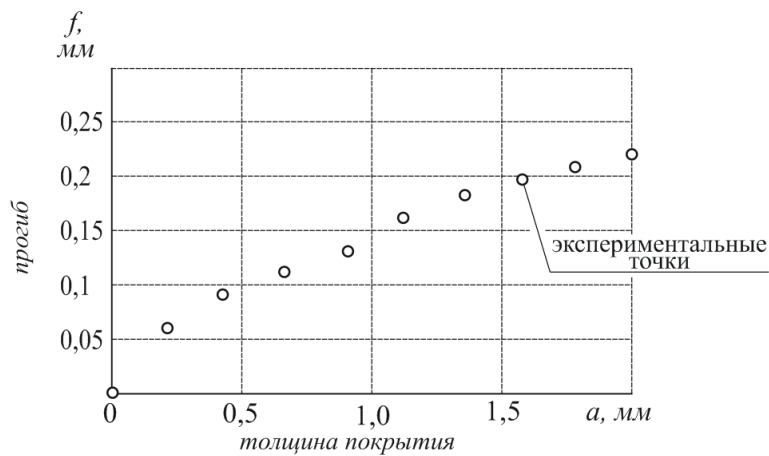


Рис. 3. Нахождение интерполяционного полинома

Fig. 3. Finding the interpolation polynomial

С целью уточнения искомого уравнения  $fd(a)$  целесообразно назначить координаты фиктивных точек – начальной ( $a_{н.ф.}$ , рис. 4), по уравнению параболы  $f_1d(x)$ , проходящей через точки  $(a_1, f_1)$  и  $(a_2, f_2)$ . Это необходимо для получения достаточно гладкой кривой (особенно для полинома высокой степени) в начале координат и конце кривой.

Уравнение параболы в начальных точках будет иметь вид:

$$f_1d(x) = fd_1 \cdot a \frac{x - a_2}{a_1(a_1 - a_2)} + fd_2 \cdot \frac{x - a_1}{a_2(a_2 - a_1)}. \quad (24)$$

Для конечной точки  $a_{к.ф.}$  уравнение параболы  $f_2d(x)$ , проходящей через точки  $(a_{i-1}, fd_{i-1})$ , будет в следующем виде:

$$f_2d(x) = f_{i-1} \frac{(x - a_i)(x - a_{i+1})}{(a_{i-1} - a_i)(a_{i-1} - a_{i+1})} + f_i \frac{(x - a_{i-1})(x - a_{i+1})}{(a_i - a_{i-1})(a_i - a_{i+1})} + f_{i+1} \frac{(x - a_{i-1})(x - a_i)}{(a_{i+1} - a_{i-1})(a_{i+1} - a_i)}. \quad (25)$$

Тогда, задавая принятое значение абсцисс начальной точки  $a_{н.ф.} = 0,1$  мм и конечной фиктивной точки  $a_{к.ф.} = a_n + 0,1$ , находим соответствующие прогибы по формулам (23) и (24).

Таким образом, получаем требуемое уравнение  $f(a)$  в виде полинома, проинтегрировав который, находим и соответствующие величины производных  $df/da$ .

Описанная процедура подбора интерполяционного полинома реализована в специально

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

разработанном алгоритме и составленной Mathcad-программе, позволяющей вычислить и последующие расчеты в диалоговом режиме. В качестве программного продукта используют

пакет Mathcad–Prime6 2020. Результаты расчета могут быть представлены как в виде таблиц, так и в виде графиков.

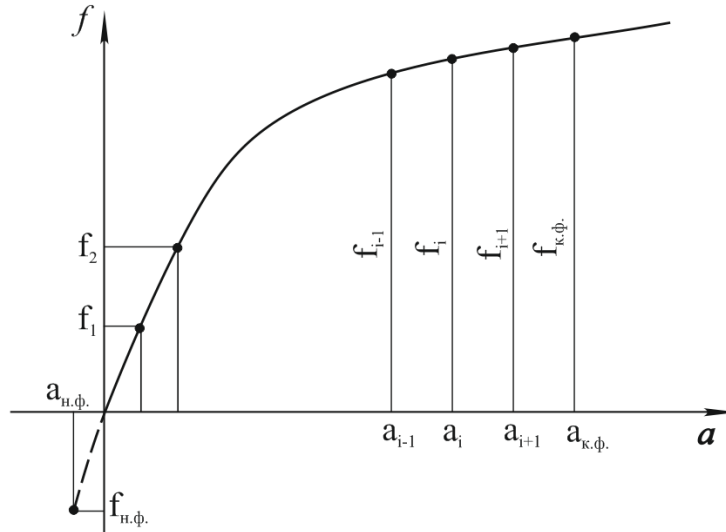


Рис. 4. Координаты фиктивных точек

Fig. 4. Coordinates of fictitious points

## Результаты

На основании рассмотренной методики расчета и практических данных измерения параметров прогиба, изменения толщины и массы нанесенного слоя при послойном напылении различных материалов на стальной образец прямоугольной формы определены величины

остаточных напряжений в покрытии для различных материалов и на различных параметрах напыления. Подтверждено, что они зависят от технологических параметров и типа наносимого материала.

В качестве иллюстрации обработки экспериментальных данных приведен рис. 5.

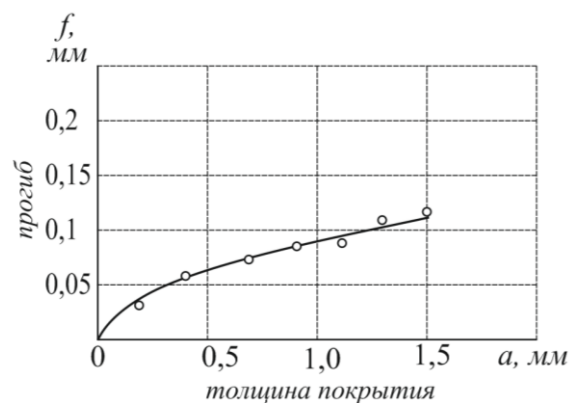


Рис. 5. Зависимость прогиба образцов от толщины покрытия при дистанции напыления  $l_n = 120$  мм и скорости перемещения металлатора  $V_n = 26,4$  мм/с для материалов на следующих режимах горения дуги: Св–08А, диаметр 2,0 мм ( $I_{св} = 150$  А,  $U_d = 28$  В, частота пульсаций 65–75 Гц)

Fig. 5. Dependence of the sample deflection on the coating thickness at a spraying distance  $l_n = 120$  mm and a metallizer movement speed  $V_n = 26.4$  mm/s for materials in the following arc burning modes: Св–08А, diameter 2.0 mm ( $I_{св} = 150$  А,  $U_d = 28$  V, ripple frequency 65–75 Hz)

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

На рис. 6 приведені залежності змінення прогибів образців для деяких фіксованих значень товщини покриття при напыленні проволокою Св–08А. Можна побачити, що

прогиб образців змінюється в достатньо широких діапазонах, що сказується на величині залишкових напружень в покритті і основі.

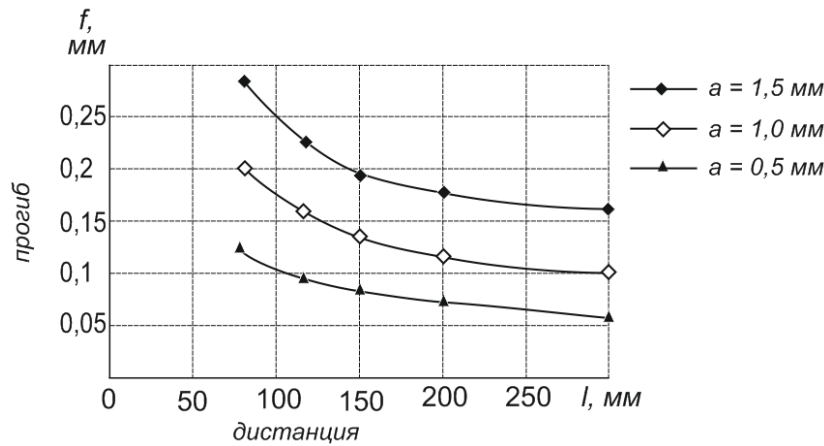


Рис. 6. Залежність прогибу образців від товщини наносимого покриття  $V_n = 26,4$  мм/с для покриття, нанесеного проволокою Св–08А діаметром 2,0 мм ( $I_{св} = 150$  А,  $U_d = 28$  В, частота пульсацій 65–75 Гц)

Fig. 6. Dependence of the sample deflection on the thickness of the applied coating  $V_n = 26.4$  mm/s for the coating applied with wire Св–08А with a diameter of 2.0 mm ( $I_{св} = 150$  А,  $U_d = 28$  V, ripple frequency 65–75 Hz)

Ісходя з аналізу графіків, можна зробити висновок, що залишкові напруження розподіляються дуже нерівномірно по товщині покриття. Зростання величини напружень не прямо пропорційно збільшенню товщини наносимого покриття і мають максимальне значення в перехідній зоні на ділянці неоднорідності покриття – образці.

Найбільш оптимальним вважається послідовне нанесення малих шарів товщиною 0,5 мм на відстані (відстання від зони горіння дуги до поверхні деталі) 150 мм, що може бути застосовано тільки для даного типу наносимого матеріалу. Проведені дослідження п'яти різних типів розпилюваних матеріалів підтверджують, що величина і принцип розподілення залишкових напружень в покритті критично залежать від властивості напылюваного матеріалу, відстані напылення і наносимого за один проход шару. З зменшенням відстані напылення менше 80 мм різко зростає товщина покриття, нанесеного за один проход, і, відповідно, прогиб образця і необхідні залишкові напруження.

### Наукова новизна і практична значимість

В роботі розглянуто вплив залишкових напружень на придатність напылених покриттів, представлена математична модель, що визначає залишкові напруження в покриттях, нанесених різними методами газотермічного напылення, в тому числі з використанням пульсуючого розпилюючого повітряного потоку. Результати, отримані в межах даної роботи, дозволять контролювати напружене стан покриттів, нанесених різними методами газотермічного напылення, їх можна застосовувати при розв'язанні конструкторських завдань, крім цього, вони є актуальними в освітніх цілях при підготовці профільних фахівців по інженерним напрямкам.

### Висновки

1. Розроблена математична модель розподілення залишкових напружень в нанесеному покритті на призматическому стержні, позво-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

ляющая установит величину и характер распределения напряжений в покрытии и стержне, а также факт «скачка» напряжений в переходной зоне.

2. Остаточные напряжения в напыленном газотермическом покрытии распределяются неравномерно по толщине и имеют максималь-

ное значение в переходной зоне. С послойным нарастанием толщины покрытия величина напряжения возрастает непропорционально, замедляя рост, однако суммарная усадочная сила в слое и, соответственно, уровень напряжений в переходной зоне непрерывно возрастают.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Глушкова Д. Б. Повышение долговечности поршневых колец методом двухпроволочной металлизации. *Вестник ХНАДУ*. 2018. Вып. 82. С. 27–34. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2018.82.0.27>
2. Девойно О. Г., Пантелеенко А. Ф. Исследование износостойких покрытий из диффузионно-легированной аустенитной стали, полученных плазменным напылением и последующей лазерной обработкой. *Наука и техника*. 2017. Т. 3, № 16. С. 249–255. DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-3-249-255>
3. Зайцев А. Н., Александрова Ю. П., Ягопольский А. Г. Сравнительный анализ физико-механических свойств газотермических радиационно-стойких электроизоляционных покрытий в зависимости от метода нанесения. *Известия Высших Учебных Заведений. Машиностроение*. 2018. № 6 (699). С. 12–23. DOI: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2018-6-12-23>
4. Захаров Б. М., Ступников В. П., Маркосян Т. С. Об использовании разделительных покрытий в высокотемпературных технологических процессах. *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Машиностроение*. 2016. № 6. С. 136–140. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2016-6-136-140>
5. Кравченко И. Н., Зубрилина Е. М., Чеха Т. А., Добычин М. В. Технология нанесения защитных покрытий на поршневые кольца дизельных двигателей. *Вестник ДГТУ*. 2016. № 3 (86). С. 59–64. DOI: <https://doi.org/10.12737/20221>
6. Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. В., Асташинский В. М. Получение композиционного керамического материала для газотермического напыления. *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 3. С. 181–188. DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-3-181-188>
7. Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А., Пантелеенко А. Ф. Материалы для газотермического напыления, полученные методом диффузионного легирования из порошков на основе сталей аустенитного класса. *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 5. С. 380–385. DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-380-385>
8. Петришин Г. В., Быстренков В. М., Одарченко В. И. Метод обеспечения износостойкости лопаток лопатных смесителей. *Литье и металлургия*. 2019. № 2. С. 32–35. DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-2-32-3512>
9. Роянов В. А., Зусин В. Я., Самогугин С. С. *Дефекты в сварных соединениях и покрытиях*: учебное пособие. Мариуполь: Изд-во ПГТУ, 2000. 184 с.
10. Тимохова О. М., Бурмистрова О. Н., Тимохов Р. С. Исследование интенсивности изнашивания газотермических покрытий деталей лесных машин. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2020. № 8 (98). С. 153–156.
11. Noyce P. A., Crevello G. L. Metallized Coatings for Corrosion Control. *Structural Practices*. 2017. P. 16–21.
12. Preikschat P., Skalsky A. Metal Coating as a Base for Paint. *IST International Surface Technology*. 2018. P. 38–39.

О. М. СЕРЕНКО<sup>1</sup>, И. В. ЗАХАРОВА<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Автоматизация та механізація зварювального виробництва», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87500, тел. +38 (067) 958 20 17, ел. пошта zsv-73@i.ua, ORCID 0000-0002-8536-6313

<sup>2\*</sup>Каф. «Автоматизация та механізація зварювального виробництва», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87500, тел. +38 (067) 845 25 39, ел. пошта zakharovai75@gmail.com, ORCID 0000-0002-3492-0134

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

## ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ПОКРИТТЯХ, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ДУГОВОЇ МЕТАЛІЗАЦІЇ З ПУЛЬСУЮЧИМ РОЗПИЛЮВАЛЬНИМ ПОТОКОМ

**Мета.** Автори передбачають розробити математичну модель розрахункового визначення залишкових напружень у довільному шарі газотермічного покриття на підставі величини зміни геометрії основи (прогин зразка) та закону зміни похідної від товщини шару, для подальшого регулювання цих напружень, змінюючи технологічні параметри нанесення матеріалів під кожен вид напилюваного покриття. **Методика.** На підставі відомих робіт із визначення напружень у зварних з'єднаннях, наплавлених сталевих шарах вироблено підхід для визначення прогину зразків після пошарового напилення. Ці параметри прогину покладено в розроблену математичну модель впливу на напружений стан. Систематизовано відомості з вивчення основних видів залишкових (внутрішніх) напружень, як I роду, які розподілені в об'ємі всієї деталі (зразка) з покриттям, так і II, локалізовані в об'ємі частинок, які напилюють. **Результати.** Представлено дослідження залишкових напружень, що виникають у нанесеному шарі, величина й характер розподілу яких залежить від типу, основного та напилюваного матеріалів, способів і параметрів напилення, жорсткості деталі та інших факторів. Показано важливу роль оцінки залишкових напружень в газотермічному покритті розрахунковим методом у зв'язку зі складністю експериментального визначення кінетики розвитку напружень в композиті покриття – основа. **Наукова новизна.** Автори цієї роботи на підставі вперше створеної математичної моделі та програмного продукту Mathcad–Prime 6 2020 провели дослідження рівня та принципів утворення залишкових напружень у покритті в разі газотермічного пошарового напилення різними матеріалами, у тому числі з можливістю використання пульсуючого розпилювального повітряного потоку. Аналітичні дослідження показали, що увагу в літературі за останні п'ять–сім років було приділено вивченню залишкових напружень і деформацій у зварних з'єднаннях, і тільки зростання інтересу до технології напилення відкриває широкі можливості вивчення формування полів напружень у газотермічному покритті. **Практична значимість.** Результати, отримані в рамках цієї роботи, підтверджують утворення залишкових напружень у покриттях і можуть бути використані як розрахункові програми для вирішення конструкторських завдань, а також в освітніх цілях під час підготовки профільних фахівців з інженерних спеціальностей.

*Ключові слова:* працездатність; залишкові напруження; покриття; основа; математична модель

О. М. SERENKO<sup>1</sup>, І. В. ZAKHAROVA<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Dep. «Automation and Mechanization of Welding Production», State Higher Educational Institution, Priazovskiy State Technical University, Universitetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87500, tel. +38 (067) 958 20 17, e-mail zsv-73@i.ua, ORCID 0000-0002-8536-6313

<sup>2\*</sup>Dep. «Automation and Mechanization of Welding Production», State Higher Educational Institution, Priazovskiy State Technical University, Universitetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87500, tel. +38 (067) 845 25 39, e-mail zakharovai75@gmail.com, ORCID 0000-0002-3492-0134

## DETECTION OF RESIDUAL STRESSES IN COATINGS OBTAINED BY THE METHOD OF ARC METALLIZATION WITH A PULSATING SPRAYING FLOW

**Purpose.** The authors propose to develop a mathematical model for the calculated determination of residual stresses in arbitrary layer of a thermal gas coating based on the change magnitude in the base geometry (sample deflection) and the variation law of the layer thickness derivative, further regulation of these stresses by changing the technological parameters of spraying for each type of sprayed coating. **Methodology.** Based on known works on stress detection of in welded joints, the approach of determination of samples deflection after layer-by-layer spraying was developed. These deflection parameters are the basis for the developed mathematical model of influence on the stress state. The data on the study of the main types of residual (internal) stresses, as I type, distributed in the volume of the whole part (sample) with coating, and II type, localized in the volume of sprayed particles, are systematized. **Findings.** We presented investigations of the residual stresses arising in the applied layer, the magnitude and nature of the distribution of which depend on the type, base and sprayed materials, methods and parameters of spraying, the rigidity of the part, and other factors. The important role of evaluating residual stresses in a thermal gas

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

coating by the calculation method is shown in connection with the complexity of the experimental determination of the kinetics of stress development in the coating-base composite. **Originality.** The authors of this work, on the basis of the first created mathematical model and software product Mathcad-Prime 6 2020, conducted a study of the level and principles of the formation of residual stresses in the coating during gas-thermal layer-by-layer spraying with various material, including the possibility of using a pulsating spraying air flow. Analytical studies have shown that the attention in the literature over the past five to seven years has been paid only to the study of residual stresses and deformations in welded joints, and only the growing interest in spraying technology opens up wide possibilities for studying the formation of stress fields in a thermal gas coating. **Practical relevance.** The results obtained in this paper confirm the formation of residual stresses in coatings and can be used as computational programs to solve design tasks, as well as for educational purposes during experts training in engineering fields.

*Keywords:* operability; residual stresses; coating; base; mathematical model

## REFERENCES

1. Hlushkova, D. B. (2018). Increase of longness of piston rings method of two-wire metalization. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*, 82, 27-34.  
DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2018.82.0.27> (in Russian)
2. Devoino, O. G., & Panteleenko, A. F. (2017). Investigation on wear-resistant coatings from diffusion-alloyed austenitic steel obtained by plasma spraying and subsequent laser processing. *Science & Technique*, 16(3), 249-255. DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-3-249-255> (in Russian)
3. Zaytsev, A. N., Aleksandrova, U. P., & Yagopolskiy, A. G. (2018). A Comparative Analysis of Physical and Mechanical Properties of Gas-Thermal Radiation-Resistant Electrical Insulating Coatings Depending on the Application Method. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 6(699), 12-23.  
DOI: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2018-6-12-23> (in Russian)
4. Zakharov, B. M., Stupnikov, V. P., & Markosyan, T. S. (2016). On the use of Dividing Coatings in High-Temperature Technological Processes. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 6, 136-140. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2016-6-136-140> (in Russian)
5. Kravchenko, I. N., Zubrilina, E. M., Czecha, T. A., & Dobyichin, M. V. (2016). Technique of applying protective coatings on diesel piston rings. *Vestnik of Don State Technical University*, 3(86), 59-64.  
DOI: <https://doi.org/10.12737/20221> (in Russian)
6. Okovity, V. A., Panteleenko, F. I., Okovity, V. V., & Astashinsky, V. M. (2017). Production of composite ceramic material for thermal spraying. *Science & Technique*, 16(3), 181-188.  
DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-3-181-188> (in Russian)
7. Panteleenko, F. I., Okovity, V. A., & Panteleenko, A. F. (2019). Materials for Gas-Thermal Spraying, Obtained by Diffusion Alloying from Powders Based on Austenitic Steels. *Science & Technique*, 18(5), 380-385.  
DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-380-385> (in Russian)
8. Petrishin, G. V., Bystrenkov, V. M., & Odarchenko, V. I. (2019). Method of providing wear-resistance of the blades of paddle mixers. *Litiyo i Metallurgiya*, 2, 32-35.  
DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-2-32-35> (in Russian)
9. Royanov, V. A., Zusin, V. Ya., & Samotugin, S. S. (2000). *Defekty v svarnykh soedineniyakh i pokrytiyakh: uchebnoe posobie*. Mariupol: Izdatelstvo PGU. (in Russian)
10. Timokhova, O. M., Burmistrova, O. N., & Timokhov, R. S. (2020). Investigation of the wear rate of thermal spray coatings of forest machine parts. *International Research Journal*, 8(98), 152-156. (in Russian)
11. Noyce, P. A., & Crevello, G. L. (2017). Metallized Coatings for Corrosion Control. *Structural Practices*, 16-21. (in English)
12. Preikschat, P., & Skalsky, A. (2018). Metal Coating as a Base for Paint. *IST International Surface Technology*, 38-39. (in English)

Поступила в редколлегию: 05.06.2020

Принята к печати: 09.10.2020

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 504.6:[656.2:665.7]

Ю. В. ЗЕЛЕНЬКО<sup>1\*</sup>, Д. М. ЗЕЛЕНЬКО<sup>2\*</sup>, Л. О. НЕДУЖА<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Хімія та інженерна екологія», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 76, ел. пошта j.v.zelenko@gmail.com, ORCID 0000-0001-5551-0305

<sup>2\*</sup>Каф. «Хімія та інженерна екологія», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 664 17 21, ел. пошта snay0801@gmail.com, ORCID 0000-0001-7125-5834

<sup>3\*</sup>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 llorhen@i.ua, ORCID 0000-0002-7038-3006

### ВИВЧЕННЯ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ НАФТОПРОДУКТІВ НА МЕТАЛЕВІ ЕЛЕМЕНТИ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

**Мета.** Основною метою роботи є підвищення безпеки експлуатації залізничного транспорту. Реалізація поставленої мети передбачена шляхом оцінки та попередження негативного впливу нафтопродуктів на конструкційні елементи залізничної інфраструктури. **Методика.** Основним критерієм оцінки залишкового ресурсу технічних елементів пристроїв є їх міцнісні характеристики. Одним із ключових чинників, що впливають на придатність технічних пристроїв у процесі експлуатації, є корозійне пошкодження металу. Тому було вивчено вплив різних співвідношень ступеня мінералізації та концентрації нафтопродуктів на швидкість корозії металів, які найбільш часто використовуються у конструкціях систем охолодження дизелів та інших об'єктів транспорту. Таким чином, для проведення статичних і динамічних лабораторних випробувань було вибрано модельні робочі розчини з різним солевмістом (модель де мінералізації) та різними концентраціями розчинених нафтопродуктів (модель стандартних розчинів з органічними домішками). Динамічні та статичні дослідження корозійних руйнувань проведено гравіметричним методом та методом поляризаційного опору з використанням стандартних зразків та розчинів. **Результати.** На підставі результатів експериментальних досліджень авторів та аналітичної обробки даних отримано узагальнювальні модельні залежності швидкості корозії від ступеня мінералізації робочого розчину фракційного складу нафтопродуктів. Проведено дослідження та встановлено вплив ступеня демінералізації води на швидкість корозії матеріалів систем охолодження дизелів. **Наукова новизна.** На базі широкого спектра авторських експериментальних даних показано та доведено наявність узагальнювальних залежностей швидкості корозії від температури, ступеня мінералізації робочого розчину та фракційного складу нафтопродуктів. Отримані залежності покладено в основу розробленої математичної моделі корозії, яка являє собою сукупність співвідношень, що зв'язують характеристики корозійного процесу з різними факторами, які впливають на його розвиток. **Практична значимість.** Отримані експериментальні та аналітичні дані можуть бути широко використані для процедур неруйнівного контролю, детального прогнозування стану конструкційних елементів і вибору ефективних інгібіторів для зниження корозійної агресивності середовища й захисту конструкцій.

*Ключові слова:* залізнична інфраструктура; залізниця; корозія; нафтопродукти; мінералізація

#### Вступ

Безпечна експлуатація інфраструктури залізничного транспорту залежить від великої кількості технологічних показників – інтенсивності

експлуатаційного процесу, чіткого дотримання технологічних інструкцій, правил і регламентів, надійності технологічних елементів та устаткування і т. д. [1, 2, 6, 12]. Одним з факторів за-

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

безпечення надійності технологічних елементів є корозійна стійкість металевих конструкцій.

Аналіз експертних даних [5, 10, 22, 25] підтверджує, що саме корозійні процеси елементів інфраструктури займають 5 місце серед причин аварійності на транспорті. Проблема корозії на об'єктах підвищеної небезпеки може провокувати аварії та надзвичайні ситуації, які загрожують серйозними екологічними проблемами, а також нещасними випадками із заповіданням шкоди здоров'ю та життю персоналу.

Захист матеріальної частини промислових підприємств від корозійних процесів сьогодні є актуальним питанням у частині забезпечення промислової безпеки. Для цього профільні фахівці повинні володіти інформацією про особливості процесів корозійних змін різних елементів конструкцій за різних умов експлуатації та фізико-хімічні властивості металів і способи захисту від корозії. Заходи щодо запобігання корозійних процесів простіші та дешевші за заходи щодо усунення корозійних змін.

### Мета

Основною метою роботи є підвищення безпеки експлуатації залізничного транспорту. Для реалізації поставленої мети виконано оцінку та попередження негативного впливу нафтопродуктів на конструкційні елементи залізничної інфраструктури.

### Методика

Металевий фонд інфраструктури залізничного транспорту досить значний і становить мільйони тонн. Це рейки й кріплення, різне обладнання, частини будівель та споруд, комунікації, і звичайно, рухомий склад [13, 20, 21, 23].

У досить жорстких корозійних умовах експлуатуються верхні елементи залізничного полотна, екіпірувальне обладнання та рухомий склад. Залізничні магістралі перетинають різні кліматичні зони. Склади, що рухаються по них, зазнають значного агресивного і, що важливо, періодичного впливу різних кліматичних умов. Крім того, більшість вантажів, які перевозять, також чинять негативний вплив, деякі можуть не тільки викликати, але й інтенсифікувати корозійні процеси [8, 24].

Основним критерієм оцінки залишкового ресурсу технічних елементів пристроїв є їх міцнісні характеристики, які визначаються відповідними розрахунками. Розрахунок міцнісних характеристик залежить від марки матеріалу, із якого виготовлені елементи, їх основних геометричних параметрів (наприклад, товщини стінки). Під час проектування технічних пристроїв усі ці параметри оцінюють з урахуванням допусків, проектної швидкості корозії, термінів, умов експлуатації.

Одним із ключових чинників, що впливають на придатність технічних пристроїв у процесі експлуатації, є корозійне пошкодження металу, швидкість якого може відрізнятись від проектною в кілька разів. Визначення прогнозованих термінів експлуатації технологічних елементів виконують шляхом оцінки швидкості корозії в конкретних експлуатаційних умовах із паралельною оцінкою можливості впливу на неї з метою збільшення термінів експлуатації. Для розв'язання подібних виробничо-технологічних задач необхідне розуміння самих процесів протікання корозії, природи й суті процесу.

Розрізняють два типи механізмів корозійного процесу – хімічний та електрохімічний.

Хімічна корозія починає впливати на метал із моменту його утворення, і оскільки це мимовільний процес, енергія Гіббса в ході реакції зменшується ( $\Delta G < 0$ ). Хімічна енергія реакції руйнування металу виділяється у вигляді тепла і розсіюється в навколишньому просторі. Вона не може бути перетворена в корисну роботу.

Взаємодія металу й навколишнього середовища протікає постійно. Хімічні процеси, що проходять під час цієї взаємодії, можна назвати відповідним хімічним опором металу деструкційним змінам, які спрямовані на їх мінімізацію. При цьому важливим показником, що характеризує цей процес, є швидкість корозії.

Таким чином, швидкість корозії може бути виражена через зменшення маси металу:

$$w_k = \frac{\Delta m}{\tau \cdot S}, \quad (1)$$

де  $\Delta m$  – зменшення маси металу в результаті його окислення ( $\tau$ );  $\tau$  – час, протягом якого метал руйнувався (місяць, рік);  $S$  – площа поверхні металу ( $\text{m}^2$ ,  $\text{cm}^2$ ).

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

А може виражатися й через товщину шару зруйнованого металу:

$$w_k = \frac{\delta}{\tau}, \quad (2)$$

де  $\delta$  – товщина шару зруйнованого металу (мм);  $\tau$  – час, протягом якого метал руйнувався (місяць, рік) [10, 18].

Водночас характер руйнування поверхні металу дуже різноманітний. У разі загальної (або рівномірної) корозії метал руйнується рівномірно по всій поверхні на незначну глибину. Такий вид корозії помітний відразу, він менш небезпечний, оскільки не призводить до значного зниження міцності металевих виробів. У разі ж місцевого характеру руйнування розрізняють корозію точкову, плямами, виразкову, вибіркову (коли руйнується один із компонентів сплаву), міжкристалічну (руйнування йде по межах зерен металу на всю товщину металевих виробів) і транскристалічну (відбувається корозійне розтріскування зерен металу). Найбільш небезпечними видами корозії вважають міжкристалічну та транскристалічну, оскільки їх часто не видно на поверхні, але вони значно знижують міцність металевих виробів.

Взаємодія елементів металоконструкцій з агресивним зовнішнім середовищем призводить до зміни в часі фізичних (коефіцієнт об'ємного й термічного розширення, щільність), механічних (границі текучості, міцності, пружні константи), геометричних (розміри, товщини) параметрів конструкції. Найбільш розповсюдженими причинами пошкоджень [10, 22] є: корозія арматури – 44,3 %; корозія сталевих елементів (балок і ферм) – 40,7 %; дефекти виготовлення сталевих конструкцій; механічні пошкодження під час монтажу й експлуатації – 15 %. У цілому корозія опорних частин та їх неправильне розміщення більш ніж у 60 % випадків призводить до руйнувань конструкцій і споруд.

У свою чергу, під час зливання перевезених продуктів із залізничних цистерн і подальшого промивання та пропарювання котлів цистерн їх внутрішня поверхня періодично стикається з різними за ступенем впливу корозійними середовищами. Відбувається чергування контактів поверхні металу котла з концентрованим продуктом, із повітрям і гарячою содою, із вод-

ними розчинами різних продуктів у малих концентраціях, знову з повітрям і потім – із паром та залишками продукту. Такий режим роботи цистерн призводить до корозії внутрішніх поверхонь котлів. Подібна картина спостерігається не залежно від виду перевезених хімічних продуктів.

У сучасних умовах експлуатації демінералізована вода в системах охолодження дизелів може забруднюватися нафтопродуктами. На думку колективу авторів цього дослідження, вивчення впливу нафтопродуктів на корозійну активність знесоленої води становить науковий інтерес.

Для визначення ступеня можливих корозійних змін під час взаємодії нафтопродуктів із різними металевими конструкціями об'єктів було проведено ряд експериментів із вивчення корозійної агресивності як самих нафтопродуктів, так і їх розчинів різного фракційного складу.

Аналіз експертних даних показав, що найбільш важливими з позиції забезпечення безпеки експлуатаційного процесу є такі об'єкти, як тяговий рухомий склад і залізничне полотно [3, 9, 16, 19]. Вони в тій чи іншій мірі взаємодіють із нафтопродуктами та їх розчинами на різних етапах експлуатації [15, 23]. Так, під час експлуатації тепловозного парку в системах охолодження використовують значну кількість води. При цьому вода з підвищеною мінералізацією й додатковими домішками часто є причиною позапланового ремонту тепловозів у зв'язку з яскраво вираженою пітинговою корозією металу. Саме нафтопродукти найчастіше виступають органічними домішками, оскільки стабільно входять до складу вод (як поверхневих, так і підземних водоносних горизонтів), що пов'язано зі зростанням техногенного впливу.

У зв'язку з цим автори вивчили вплив різних співвідношень ступеня мінералізації, рН та концентрації нафтопродуктів на швидкість корозії металів, які найбільш часто використовують у конструкціях систем охолодження дизелів та інших об'єктів транспорту.

Таким чином, для проведення статичних і динамічних лабораторних випробувань було обрано модельні робочі розчини з різним солемістом (модель демінералізації) та з різними

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

концентраціями розчинених нафтопродуктів (модель стандартних розчинів з органічними домішками).

У дослідах було використано індикатор поляризаційних опорів Р–5126, потенціостат П–5827. Як електроди застосовували циліндричні зразки висотою 20 мм із зовнішнім діаметром 6 мм. Перед роботою зразки піддавали ретельному поверхневому шліфуванню, знежиренню спиртом і зважували на аналітичних вагах. Електроди приєднували до двоелектродного електрохімічного перетворювача з використанням гумової прокладки, що запобігає потраплянню середовища на датчики приладу. Поляризаційний опір  $R_p$  і швидкість корозії  $I_p$  вимірювали за температур 20, 50, 70 і 90 °С. Окремими дослідженнями було показано, що відмінності значень  $I_p$ , отримані використаним методом і за ГОСТ 9.912–89, відрізнялися не більше ніж на 5–7 % – це відповідає приблизній точності визначень.

### Результати

На швидкість корозії впливає багато факторів, і в першу чергу такі, як природа самого металу, природа домішок у металі, природа продуктів корозії [10]. По-друге, оскільки корозія – це хімічна реакція, то швидкість її зростає зі збільшенням температури. На швидкість корозії впливає можливість утворення корозійного гальванічного елемента. Під час його утворення швидкість руйнування металу збільшується. Значно впливають на швидкість корозії і кількість кисню, який розчинений в електроліті, концентрація самого електроліту й концентрація іонів водню [4, 10].

Для виявлення математичних залежностей зазначених факторів було проведено вимірювання швидкостей корозії сірого чавуну СЧ25 і сталі Ст20 (ГОСТ 1050–74), які зазвичай використовують у системах охолодження дизелів локомотивів, а також найбільш розповсюджених конструкційних сталей ВСтЗМ5, Ст5 і 09 Г2Д у водних розчинах із різним вмістом солей, температурою і рН.

Більшість металів стійкі до корозії в лужному середовищі [8]. Результатами досліджень підтверджено, що в лужних середовищах (за  $\text{pH} > 7$ ) відбувається пасивація заліза – спосте-

рігалось зміщення його потенціалу в більш позитивну область значень до + 0,2... + 0,3 В завдяки утворенню на його поверхні оксидних і гідроксидних плівок, стійких у цьому середовищі. Отже, швидкість корозії в лужному й нейтральному середовищі незначна.

Швидкість корозії в кислому середовищі зростала, оскільки оксидна плівка на поверхні металу легко розчиняється в кислоті.

Зі зменшенням концентрації іонів  $\text{H}^+$ , тобто з підвищенням рівня рН швидкість корозії досліджуваних зразків зменшувалась (рис. 1).

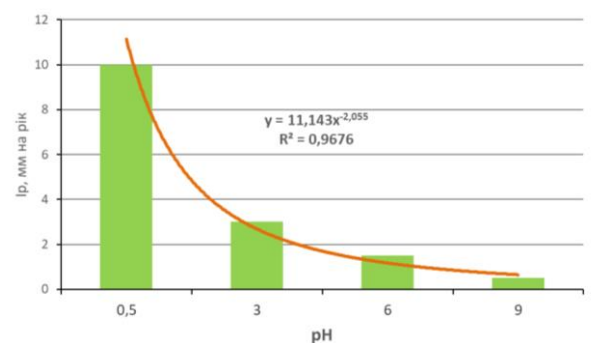


Рис. 1. Узагальнювальна модель залежності швидкості корозії сплавів заліза від кислотності середовища

Fig. 1. Generalized model of the dependence of the corrosion rate of iron alloys on the environment acidity

Корозія металів у нафтопродуктах має свої специфічні особливості і в значній мірі визначається наявністю в них розчиненої та вільної води. У реальних умовах зберігання, транспортування та застосування нафтопродуктів відбувається постійне насичення їх водою та її конденсація на металевих поверхнях. Вміст води в паливах може коливатися в широких межах від 0,001 до 0,01 % (мас.) і залежить від умов експлуатації техніки, кліматичних факторів [7, 11, 25]. Головним джерелом накопичення води в нафтопродуктах є атмосферна волога, яка в разі зміни температури нафтопродуктів і стінок резервуарів (паливних баків та ін.) конденсується на металевих поверхнях.

Результати проведених авторами електрохімічних досліджень і корозійних випробувань свідчать про те, що корозія металів в обводнених нафтопродуктах визначається в основному схильністю вуглеводних і неуглеводних ком-

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

понентів до утворення агресивних водорозчинних продуктів окислення. Тому найбільш об'єктивні відомості про механізм корозії металів в обводнених нафтопродуктах було отримано під час досліджень на модельних системах (водних розчинах різних сполук).

Безводні нафтопродукти неелектропровідні [11, 25], тому електрохімічна корозія в них не відбувається. За наявності в нафтопродуктах сірчистих сполук (меркаптани, сульфіді, полісульфіді, тіофен) починає протікати хімічна корозія. Автори вивчили корозійну активність води, що містить три типи модельних фракцій нафтопродуктів за різних концентрацій.

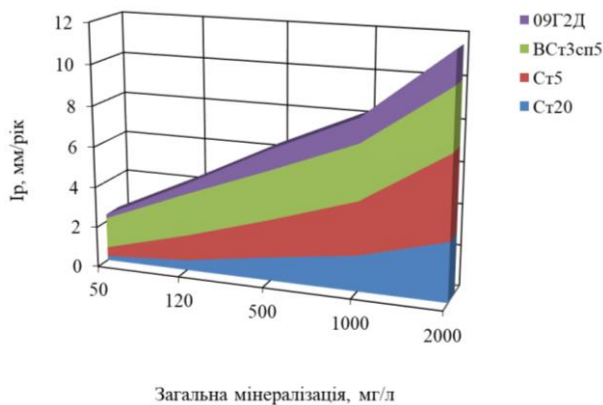


Рис. 2. Залежність швидкості корозії від ступеня мінералізації води, що містить 10 мг/л світлих нафтопродуктів

Fig. 2. Dependence of corrosion rate on the water mineralization degree containing 10 mg/l of light petroleum products

Як видно з даних, які представлені на рис. 2, під час використання водних розчинів, що містять світлі (легкі) нафтопродукти (дизельне паливо марки Л), швидкість корозії маловуглецевих сталей значно зростає порівняно з аналогічними даними для води, яка не містить нафтопродуктів. А у випадках використання важких фракцій нафтопродуктів (вакуумне масло ВМ–6) корозійна агресивність водних розчинів, що містять різні концентрації цього нафтопродукту, зростає досить помірно.

Таким чином, під час експлуатації технологічного обладнання необхідно оцінювати реальний фактичний стан корозійних змін металоконструкцій і прогнозувати перебіг процесу корозії для своєчасного вжиття заходів щодо

запобігання відмов у роботі та визначення запасу технічного ресурсу.

Діагностика корозійного стану технологічного обладнання на базі електронно-обчислювальних систем застосовна тільки за наявності достовірних математичних моделей багатостадійного процесу. Для цього використовують методи фізичного й математичного моделювання [11, 18, 25].

Фізичне моделювання корозії зводиться до відтворення процесу, який протікає в конструкції в умовах експлуатації, на лабораторних дослідних зразках. При цьому основним недоліком такого методу є відсутність надійних методик перенесення результатів із фізичної моделі на реальний об'єкт.

Під час проведення теоретичних досліджень було застосовано вибір прийнятної математичної моделі, яка описує цей фізичний процес і в чисельному розрахунку необхідних функціональних характеристик. Можливості математичного моделювання корозії значно ширші, ніж фізичного, оскільки процес має багато стадій. Стадії можуть протікати як послідовно, так і паралельно за різних варіацій зовнішніх і внутрішніх факторів, що підтверджується наведеними прикладами візуалізації запропонованих математичних моделей (рис. 1–2).

Математичну модель можна вважати адекватною, якщо вона досить точно відображає справжню картину явища. Для цього виконано математичний опис досліджуваних процесів. Математична модель повинна: враховувати явища і складові процесу, значимі для досліджуваних властивостей або показників; описувати властивості або показники процесу; бути досить простою й доступною для користувачів як наукової, так і виробничої спрямованості.

У свою чергу, ці вимоги до моделі можуть бути досягнуті, якщо механізм досліджуваного процесу вже встановлений – виявлені закономірності фізико-хімічних, аерогідродинамічних, тепло- і масообмінних явищ і взаємодій між ними. Тільки на основі чітко виявленого механізму процесу можна побудувати адекватний математичний опис.

Із цією метою автори сформували широкий спектр математичних описів досліджуваних корозійних процесів, для яких було застосовано в тому числі й формалізовані підходи.

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Так, прикладом найпростішої застосованої формалізованої математичної моделі корозії є залежність втрат маси металу під час електрорімічного розчинення від сили струму  $I$  й часу  $t$  (закон Фарадея) [13]:

$$\Delta m = k \cdot I \cdot t. \quad (3)$$

Як основні параметри, що характеризують стан матеріалу під впливом корозії, застосовано такі величини:

- втрату маси металу на одиницю поверхні  $\Delta m$ ;
- глибину корозійного ураження  $\delta$ ;
- зміну площі поперечного перерізу  $\Delta F$  і т. д.

Отже, для розробки математичної моделі кінетики корозії застосовано таку послідовність дослідницьких пошуків:

- 1) формування бази даних із вивчення протікання процесу корозії за різних умов;
- 2) установлення загальних залежностей між факторами, що впливають на процеси корозійних змін;
- 3) уточнення й оптимізація моделей, що характеризують процес корозії.

Відомо, що в загальному випадку корозійний процес має здатність затухати і за  $t \rightarrow \infty$  досягає деякого сталого значення  $y \rightarrow y_k$ , значення  $y$  відповідають поточним корозійним втратам, наприклад, глибині корозійних руйнувань. Нехай швидкість зміни глибини корозійного руйнування  $V = dy / dt$ , тобто вона пропорційна поточному значенню глибини руйнування. Отже,  $V = dy / dt = k_y$ , де  $k$  – коефіцієнт пропорційності. Таку залежність часто використовують під час дослідження кінетики багатьох процесів. Розділивши змінні та проінтегрувавши залежність  $dy / y = k \cdot dt$ , отримаємо:

$$\ln[y] = kt + \ln C \text{ або } y = Ce^{kt}, \quad (4)$$

де  $e$  – основа натуральних логарифмів.

Припустимо, що відомі початкові умови розвитку корозії металу в цьому агресивному середовищі  $y_0 = y(t=0)$ , тобто  $y_0 = Ce^{kt}$ , звідки  $y_0 = Ce^{kt}$ . Остаточне кінетичне рівняння корозії

(можлива математична модель процесу) виглядає як  $y = y_0 e^{-k(t-t_0)}$ .

Із врахування багатofакторності процесів корозії може бути застосований широкий спектр математичних моделей залежно від технологічної задачі. Так, для ґрунтової корозії сталей використовують модель процесу у вигляді функції:

$$y = \frac{y_k t}{(\varphi + t)}, \quad (5)$$

де  $y$  – поточна глибина корозії;  $y_k$  – розрахункова глибина корозії (за  $t \rightarrow \infty$ );  $\varphi$  – константа, що характеризує властивості металу й середовища, виражається в одиницях виміру часу.

Визначити  $y_k$  і  $\varphi$  можна під час аналізу дослідної залежності  $y = f(t)$ .

Таким чином, зазвичай під час побудови моделей корозії виходять із положення, що всі складові параметри моделі мають реальний фізичний зміст. Подібний підхід до опису корозії дозволяє розраховувати її швидкість, проте не дає можливості вивчити механізм процесу.

Розроблена математична модель корозії являє собою сукупність співвідношень, що пов'язують характеристики корозійного процесу з різними факторами, які впливають на його розвиток. До таких факторів належать хімічний і фракційний склад розчину, що діє на метал, хімічний і фазовий склад металу, стан поверхні металу, режим експлуатації машин або металоконструкції, характеристики агресивного середовища, зовнішні впливи.

На підставі результатів експериментальних досліджень авторів та аналітичної обробки даних отримано узагальнювальні модельні залежності швидкості корозії від ступеня мінералізації робочого розчину фракційного складу нафтопродуктів, а також кінетичні залежності бруто-процесу. На рис. 3 наведена узагальнювальна модель подібної залежності корозійних змін для марок сталей конструкційних вуглецевих напівспокійних.

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

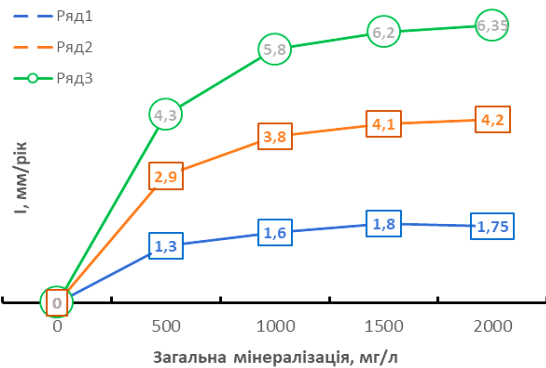


Рис. 3. Залежність швидкості процесів корозії зразка елемента зі сталі конструкційної вуглецевої напівспокоїної від фракційного складу нафтопродуктів: ряд 1 – важкі фракції (оливи); ряд 2 – середні фракції (дизельні); ряд 3 – легкі фракції (бензинові)

Fig. 3. Dependence of the corrosion rate of a sample of an element made of structural carbon semikilled steel steel on the fractional composition of petroleum products: row 1 – heavy fractions (oils); row 2 – middle fractions (diesel); row 3 – light fractions (gasoline)

### Наукова новизна та практична значимість

На базі широкого спектра авторських експериментальних даних показано та доведено наявність узагальнювальних залежностей швидкості корозії від температури, ступеня мінералізації робочого розчину та фракційного складу нафтопродуктів.

Отримані залежності покладено в основу розробленої математичної моделі корозії, яка являє собою сукупність співвідношень, що пов'язують характеристики корозійного процесу з різними факторами, які впливають на його розвиток.

Отримані експериментальні та аналітичні дані можуть бути широко використані для процедур неруйнівного контролю, детального прогнозування стану конструкційних елементів

і вибору ефективних інгібіторів для зниження корозійної агресивності середовища й захисту конструкцій.

### Висновки

Отримані результати доводять залежність швидкості процесу корозії від температури, мінерального складу води, наявності в ній домішок нафтопродуктів, їх фракційного складу та концентрації. У цілому лабораторні дослідження корозійних властивостей різних фракцій нафтопродуктів і самого механізму в системі «нафтопродукт – вода – метал» доводить наявність таких закономірностей:

1. Корозія металів у зазначеній системі розвивається переважно за електрохімічним механізмом, чому сприяє специфічна конденсація води, що призводить до автоматичної диференціації поверхні металу на анодні й катодні ділянки.

2. Інертні властивості нафтопродуктів відносно металів, тобто відсутність корозійних змін металевих поверхонь, що знаходяться в об'ємі або під плівкою нафтопродукту, практично не залежать від якості самих нафтопродуктів і не можуть бути поліпшені технологічними методами.

3. Вуглеводні, що входять до складу палив, та органічні розчинники за відсутності води неактивні щодо металів і не руйнують їх. Корозійними властивостями характеризуються різні домішки, які вступають із металами в хімічну взаємодію.

4. Захисні властивості нафтопродуктів можуть бути поліпшені тільки за допомогою присадок – інгібіторів корозії, що можуть підвищити змочувальну здатність нафтопродуктів щодо металів у системі «нафтопродукт – вода – метал», гальмувати анодний, катодний (або одночасно катодний та анодний) процеси електрохімічної корозії та утворювати на поверхні металу (що звільнена від адсорбованої плівки води) міцні адсорбційно-хімосорбційні захисні плівки.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

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. Банников Д. О., Гуслистая А. Э. Оценка сходимости напряжений в сложных металлоконструкциях методом конечных элементов. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2011. № 4. С. 93–96.
3. Басов Г. Г., Нестеренко В. І. *Теоретичні й експериментальні дослідження екіпажної частини тепловозів* : навч. посіб. Луганськ : Ноулідж, 2011. 247 с.
4. Белевский В. С., Куделин Ю. И., Лисов С. Ф., Тимонин В. А. О коррозионно-электрохимическом поведении металлов в растворах слабых кислот и солей. *Физико-химическая механика материалов*. 1990. № 6. С. 16–20.
5. Зеленько Ю. *Наукові основи екологічної безпеки технологій транспортування та використання нафтопродуктів на залізничному транспорті* : монографія. Днепропетровск : Издательство Маковецкий, 2010. 242 с.
6. Зеленько Ю. В., Недужа Л. О., Швець А. О. Вплив віброакустичних параметрів рухомого складу на вибір раціональних значень ходової частини локомотива. *Наука та прогрес транспорту*. 2016. № 3 (63). С. 60–75. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/74717>
7. Зеленько Ю. В., Тарасова Л. Д., Безовська М. С. *Підвищення рівня екологічної безпеки при поводженні з відпрацьованими моторними оливами залізничної інфраструктури* : монографія. Дніпропетровськ : Вид-во Літограф, 2016. 150 с.
8. Козаченко Д. М., Очкасов О. Б., Шепотенко А. П., Санницький Н. М. Перспективи використання приватних локомотивів для перевезення вантажів у напрямку морських портів. *Наука та прогрес транспорту*. 2017. № 6 (72). С. 7–19. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/118196>
9. Костиця С. А., Соболевська Ю. Г., Кузишин А. Я., Батіг А. В. Математична модель вагона дизель-поїзда ДПКР-2. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 1 (73). С. 56–65. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/123079>
10. Мамулова Н. С., Сухотин А. М., Сухотина Л. П., Флорианович Г. М., Яковлев А. Д. *Все о коррозии* : справочник. Санкт-Петербург : Химиздат, 2000. 517 с.
11. Моисеева Л. С., Куксина О. Д. Прогнозирование коррозионной агрессивности сред нефтяных и газовых скважин, содержащих CO<sub>2</sub>. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2000. № 5. С. 42–45.
12. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю. К вопросу о планах испытаний надежности механических систем. *Зб. наук. пр. Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 2015. Вип. 157. С. 119–128.
13. Мямлин С. В., Лунис О., Недужая Л. А. Особенности конструкции ходовых частей тягового подвижного состава. *Наука та прогрес транспорту*. 2017. № 3 (69). С. 130–146. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/104824>
14. Ehl R. G., Ihde A. Faraday's Electrochemical Laws and the Determination of Equivalent Weights. *Journal of Chemical Education*. 1954. Vol. 31. Iss. 5. P. 226–232. DOI: <https://doi.org/10.1021/ed031p226>
15. Blochinas E., Dailyka S., Lingaitis L., Ursuliak L. *Nestacionarijeji ir kvazistatiniai geležinkelio traukinių judėjimo režimai* : monografija. Vilnius : Technika, 2015. 167 p. DOI: <https://doi.org/10.3846/2321-m>
16. 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. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 4 (82). P. 61–73. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/176661>
17. Cheng F. Y. *Stress Corrosion Cracking of Pipelines*. John Wiley & Sons, 2013. 288 p.
18. De Waard C., Lotz U., Milliams D. E. Predictive Model for CO<sub>2</sub> Corrosion Engineering in Wet Natural Gas Pipelines. *Corrosion*. 1991. Vol. 47. Iss. 12. P. 976–985. DOI: <https://doi.org/10.5006/1.3585212>
19. Gorbunov M., Fomin O., Kovalenko V., Domin R. *Theoretical foundations for conceptually new rolling stock modules* : monograph. Sievierodonetsk : Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2018. 100 p.
20. Kalivoda J., Neduzha L. O. Enhancing the scientific level of engineering training of railway transport professionals. *Наука та прогрес транспорту*. 2017. № 6 (72). P. 128–137. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/119050>
21. 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](https://doi.org/10.1007/978-3-030-38666-5_56)

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

22. Miamlin S., Zelenko Yu., Sandovsky M. The principles of managing the risks of the accidental emissions while transporting the dangerous freights by railway. *Technosphere and environmental transport safety : Proceedings of International Scientific and Practical Conference*. 2012. P. 130–135.
23. Tatarinova V. A., Kalivoda J., Neduzha L. O. Research of Locomotive Mechanics Behavior. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 5 (77). P. 104–114. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/148026>
24. Zelenko Y., Bezovska M. Development of an environmentally friendly scheme for the recovery of used engine oils. *New stages of development of modern science in Ukraine and EU countries : monograph*. 3rd ed. Riga, Latvia: «Baltija Publishing», 2019. P. 143–164. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-15-0>
25. Zelenko Yu., Myamlin S., Sandovskiy M. *Scientific foundation of management of the environmental safety of oil product turnover in railway transport : monograf*. Dnepropetrovsk : Litograf, 2014. 332 p.

Ю. В. ЗЕЛЕНЬКО<sup>1\*</sup>, Д. Н. ЗЕЛЕНЬКО<sup>2\*</sup>, Л. А. НЕДУЖАЯ<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Химия и инженерная экология», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 77, эл. почта [j.v.zelenko@gmail.com](mailto:j.v.zelenko@gmail.com), ORCID 0000-0001-5551-0305,

<sup>2\*</sup>Каф. «Химия и инженерная экология», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (067) 664 17 21, эл. почта [snay0801@gmail.com](mailto:snay0801@gmail.com), ORCID 0000-0001-7125-5834

<sup>3\*</sup>Каф. «Теоретическая и строительная механика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (067) 810 51 65, эл. почта [nlorhen@i.ua](mailto:nlorhen@i.ua), ORCID 0000-0002-7038-3006

## ИЗУЧЕНИЕ НЕГАТИВНОГО ВЛИЯНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

**Цель.** Основной целью работы является повышение безопасности эксплуатации железнодорожного транспорта. Реализация поставленной цели предусмотрена путем оценки и предупреждения негативного воздействия нефтепродуктов на конструкционные элементы железнодорожной инфраструктуры. **Методика.** Основным критерием оценки остаточного ресурса технических элементов устройств являются их прочностные характеристики. Одним из ключевых факторов, влияющих на пригодность технических устройств в процессе эксплуатации, является коррозионное повреждение металла. Поэтому было изучено влияние различных сочетаний степени минерализации и концентрации нефтепродуктов на скорость коррозии металлов, наиболее часто используемых в конструкциях систем охлаждения дизелей и других объектов транспорта. Таким образом, для проведения статических и динамических лабораторных испытаний были избраны модельные рабочие растворы с различным содержанием (модель деминерализации) и различными концентрациями растворенных нефтепродуктов (модель стандартных растворов с органическими примесями). Динамические и статические исследования коррозионных разрушений проведены гравиметрическим методом и методом поляризационного сопротивления с использованием стандартных образцов и растворов. **Результаты.** На основании результатов экспериментальных исследований авторов и аналитической обработки данных получены обобщающие модельные зависимости скорости коррозии от степени минерализации рабочего раствора фракционного состава нефтепродуктов. Проведено исследование и установлено влияние степени деминерализации воды на скорость коррозии материалов систем охлаждения дизелей. **Научная новизна.** На базе широкого спектра авторских экспериментальных данных показано и доказано наличие обобщающих зависимостей скорости коррозии от температуры, степени минерализации рабочего раствора и фракции состава нефтепродуктов. Полученные зависимости положены в основу разработанной математической модели коррозии, которая представляет собой совокупность соотношений, связывающих характеристики коррозионного процесса с разными факторами, влияющими на его развитие. **Практическая значимость.** Полученные экспериментальные и аналитические данные могут быть широко использованы для процедур неразрушающего контроля, детального прогнозирования состояния конструкционных элементов и выбора эффективных ингибиторов для снижения коррозионной агрессивности среды и защиты конструкций.

**Ключевые слова:** железнодорожная инфраструктура; железная дорога; коррозия; нефтепродукты; минерализация

Y. V. ZELENKO<sup>1\*</sup>, D. M. ZELENKO<sup>2\*</sup>, L. O. NEDUZHA<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Chemistry and Environmental Engineering», Dnipro National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 77, e-mail j.v.zelenko@gmail.com, ORCID 0000-0001-6484-3777

<sup>2\*</sup>Dep. «Chemistry and Environmental Engineering», Dnipro National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 664 17 21, e-mail snay0801@gmail.com, ORCID 0000-0001-7125-5834

<sup>3\*</sup>Dep. «Theoretical and Structural Mechanics», Dnipro National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 810 51 65, e-mail nlorhen@i.ua, ORCID 0000-0002-7038-3006

## STUDY OF NEGATIVE INFLUENCE OF PETROLEUM PRODUCTS ON METAL ELEMENTS OF RAILWAY INFRASTRUCTURE

**Purpose.** The main purpose of the work is to improve the safety of railway transport operation. The implementation of this purpose is provided by assessing and preventing the negative influence of petroleum products on the structural elements of the railway infrastructure. **Methodology.** The main criterion for assessing the residual life of technical elements of equipment is their strength characteristics. One of the key factors affecting the suitability of technical devices during operation is corrosion damage to the metal. Therefore, the influence of various combinations of the mineralization degree and concentration of petroleum products on the corrosion rate of metals most often used in the design of cooling systems for diesel engines and other transport objects was studied. Thus, for carrying out static and dynamic laboratory tests, model working solutions with different salinity (demineralization model) and different concentrations of dissolved petroleum products (model of standard solutions with organic impurities) were selected. Dynamic and static studies of corrosion damage were carried out by the gravimetric method and the method of polarization resistance using standard samples and solutions. **Findings.** Based on the results of experimental studies of the authors and analytical data processing, generalizing model dependences of the corrosion rate on the mineralization degree of the working solution of the fractional composition of petroleum products were obtained. A study was carried out and the influence of the water demineralization degree on the corrosion rate of materials of diesel cooling systems was established. **Originality.** Based on a wide range of author's experimental data, the presence of generalizing dependences of the corrosion rate on temperature, the mineralization degree of the working solution and the fraction of the petroleum products composition has been shown and proven. The obtained dependences form the basis of the developed mathematical model of corrosion, which is a set of relationships linking the characteristics of the corrosion process with various factors influencing its development. **Practical value.** The obtained experimental and analytical data can be widely used for non-destructive testing procedures, detailed prediction of the state of structural elements and the selection of effective inhibitors to reduce the corrosive aggressiveness of the environment and protect structures.

*Keywords:* railway infrastructure; railway; corrosion; petroleum products; mineralization

### REFERENCES

1. Babyak, M. Operation of Resource-Saving Contact Elements of Urban Electric Transport. (2019). *Visnik of V. Dahl East Ukrainian National University*, 3(251), 33-38. (in Ukrainian)
2. Bannikov, D. O., & Huslista, G. E. (2011). Otsenka skhodimosti napryazheniy v slozhnykh metallokonstruktsiyakh metodom konechnykh elementov. *Metallurgical and Mining Industry*, 4, 93-96. (in Russian)
3. Basov, H. H., & Nesterenko, V. I. (2011). *Teoretychni y eksperymentalni doslidzhennia ekipazhnoi chastyny teplovoziv: Navchalnyi posibnyk*. Lughansk: Noulidzh. (in Ukrainian)
4. Belevskiy, B. C., Kudelin, Yu. I., Lisov, S. F., & Timonin, V. A. (1990). O korrozionno-elektrokhimicheskom povedenii metallov v rastvorakh slabykh kislot i soley. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov*, 6, 16-20. (in Russian)
5. Zelenko, Yu. (2010). *Naukovi osnovy ekologichnoyi bezpeky tehnologij transportuvannya ta vykorystannya nafto-produktiv na zaliznychnomu transporti: monografiya*. Dnipropetrovsk: Izdatelstvo Makovetskiy. (in Ukrainian)
6. Zelenko, Y. V., Neduzha, L. O., & Shvets, A. O. (2016). Influence of rolling stock vibroacoustical parameters on the choice of rational values of locomotive running gear. *Science and Transport Progress*, 3(63), 60-75. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/74717> (in Ukrainian)

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

7. Zelenko, Y. V., Tarasova, L. D., & Bezovska, M. S. (2016). *Pidvy`shhennya rivnya ekologichnoyi bezpeky pry povodzhenni z vidprac`ovany`my motornymy olyvamy zaliznych-noyi infrastruktury: monografiya*. Dnepropetrovsk: Litograf. (in Ukrainian)
8. Kozachenko, D. M., Ochkasov, O. B., Shepotenko, A. P., & Sannytsky, N. M. (2017). Prospects of the private locomotives usage for goods traffic in the direction of sea ports. *Science and Transport Progress*, 6(72), 7-19. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/118196> (in Ukrainian)
9. Kostritsa, S. A., Sobolevska, Y. H., Kuzyshyn, A. Y., & Batih, A. V. (2018). Mathematical model of DPKR-2 dyzel train car. *Science and Transport Progress*, 1(73), 56-65. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/123079> (in Ukrainian)
10. Mamulova, N. S., Sukhotin, A. M., Sukhotina, L. P., Florianovich, G. M., & Yakovlev, A. D. (2000). *Vse o korrozii: spravochnik*. St. Petersburg: Khimizdat. (in Russian)
11. Moiseeva, L. S., & Kuksina, O. D. (2000). Prognozirovanie korrozionnoy agresivnosti sred neftyanykh i gazovykh skvazhin, sodержashchikh SO<sub>2</sub>. *Khimicheskoe i Neftegazovoe Mashinostroenie*, 5, 42-45. (in Russian)
12. Muradyan, L. A., & Shaposhnik, V. Y. (2015). K voprosu o planakh ispytaniy nadezhnosti mekhanicheskikh sistem. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu*, 157, 119-128. (in Russian)
13. Myamlin, S. V., Lunys, O., & Neduzha, L. O. (2017). Peculiarities of running gear construction of rolling stock. *Science and Transport Progress*, 3(69), 130-146. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/104824> (in Russian)
14. Ehl, R. G., & Ihde, A. (1954). Faraday's Electrochemical Laws and the Determination of Equivalent Weights. *Journal of Chemical Education*, 31(5), 226-232. DOI: <https://doi.org/10.1021/ed031p226> (in English)
15. Blochinas, E., Dailydka, S., Lingaitis, L. P., & Ursuliak, L. (2015). *Nestacionarieji ir kvazistatiniai geležinkelio traukinių judėjimo režimai: monografija*. Vilnius: Technika. DOI: <https://doi.org/10.3846/2321-m> (in Lithuanian)
16. 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)
17. Cheng, F. Y. (2013). *Stress Corrosion Cracking of Pipelines*. John Wiley & Sons. (in English)
18. De Waard, C., Lotz, U., & Milliams, D. E. (1991). Predictive Model for CO<sub>2</sub> Corrosion Engineering in Wet Natural Gas Pipelines. *Corrosion*, 47(12), 976-985. DOI: <https://doi.org/10.5006/1.3585212> (in English)
19. Gorbunov, M. I., Fomin, O. V., Kovalenko, V. V., & Domin, R. Y. (2018). *Theoretical foundations for conceptually new rolling stock modules: monograph*. Sievierodonetsk: Volodymyr Dahl East Ukrainian National University. (in English)
20. Kalivoda, J., & Neduzha, L. O. (2017). Enhancing the scientific level of engineering training of railway transport professionals. *Science and Transport Progress*, 6(72), 128-137. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/119050> (in English)
21. Klimenko, I., Kalivoda, J., & Neduzha, L. (2020). *Influence of Parameters of Electric Locomotive on its Critical Speed*. TRANSBALTICA XI: Transportation Science and Technology (pp. 531-540). DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-38666-5\\_56](https://doi.org/10.1007/978-3-030-38666-5_56) (in English)
22. Miamlin, S., Zelenko, Yu., & Sandovsky, M. (2012). The principles of managing the risks of the accidental emissions while transporting the dangerous freights by railway. *Technosphere and environmental transport safety: Proceedings of International Scientific and Practical Conference*, 130-135. (in English)
23. 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)
24. Zelenko, Y., & Bezovska, M. (2019). Development of an environmentally friendly scheme for the recovery of used engine oils (pp. 143-164). *New stages of development of modern science in Ukraine and EU countries: monograph*. Riga, Latvia. (in Ukrainian)
25. Zelenko, Yu., Myamlin, S., & Sandovskiy M. (2014). *Scientific foundation of management of the environmental safety of oil product turnover in railway transport: monograf*. Dnipropetrovsk: Litograf. (in English)

Надійшла до редколегії: 28.05.2020

Прийнята до друку: 29.09.2020

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

## УДК 629.463-592.11

В. Г. РАВЛЮК<sup>1</sup>, М. Г. РАВЛЮК<sup>2</sup>, І. К. КИРИЧЕНКО<sup>3</sup>, Н. Ю. ЛАМНАУЕР<sup>4</sup>,  
А. К. МЕЛЬНИЧУК<sup>5</sup><sup>1</sup>Каф. «Вагони», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейербаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта ravvg@ukr.net, ORCID 0000-0003-4818-9482<sup>2</sup>Каф. «Вагони», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейербаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта ravmg@ukr.net, ORCID0000-0002-6021-660X<sup>3</sup>Каф. «Фізико-математичні дисципліни», Національний університет цивільного захисту України, вул. Чернишевська, 94, Харків, Україна, 61023, тел. +38 (095) 487 02 38, ел. пошта ikir238@gmail.com, ORCID 0000-0001-7375-8275<sup>4</sup>Каф. «Охорона праці, стандартизація та сертифікація», Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, Харків, Україна, 61003, тел.+38 (093) 149 39 17, ел. пошта lamnaouernatali@gmail.com, ORCID 0000-0002-6779-8761<sup>5</sup>Каф. «Вагони», Український державний університет залізничного транспорту, пл.Фейербаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта melnichuknastya417@gmail.com, ORCID 0000-0003-3815-5617

## ІМОВІРНОСНО-СТАТИСТИЧНА МОДЕЛЬ ЗНОСУ ГАЛЬМОВИХ КОЛОДОК ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ

**Мета.** Це дослідження спрямоване на застосування лінійних моделей для визначення зносу гальмових колодок вантажних вагонів у верхній і нижній частині з метою подальшого їх використання під час розв'язування подібних практичних задач. **Методика.** Як робочу методику використано відомий підхід контролювання лінійних змін зносу параметрів колодок залежно від пробігу вантажних вагонів по мережі АТ «Укрзалізниця» з модернізованими гальмовими важільними передачами в реальних умовах експлуатації. На основі отриманих статистичних даних в умовах експлуатації послідовно знайдено значення відповідних показників регресійного аналізу зносу колодок у конкретних точках, рекомендованих нормативними документами під час виконання технічного обслуговування в експлуатаційних підрозділах вагонного господарства для гальмових систем вантажних вагонів. **Результати.** Побудовано ймовірносно-статистичну модель зносу гальмових колодок на підставі експериментальних даних, зібраних у відповідних парках сортувальної станції в процесі експлуатації вантажних вагонів. Запропоновано функцію розподілу зносу для верхньої та нижньої частини колодки, за допомогою якої можна розв'язати практичні задачі. Також для різних частин гальмової колодки знайдено її  $\gamma$ -відсотковий і середній залишковий знос. **Наукова новизна.** Уперше для колодок гальмових систем вантажних вагонів із модернізованими пристроями визначено функціональну залежність їх зносу від пробігу вагонів по мережі АТ «Укрзалізниця». На підставі отриманої залежності розроблено статистичну модель зносу колодок з урахуванням можливостей їх використання до повного вичерпання ресурсу. Також визначено функцію розподілу пробігу вантажних вагонів з урахуванням зносу колодки, за допомогою якої знаходять відсоток зносу за заданого пробігу. **Практична значимість.** Результати, отримані в роботі, можна враховувати для розв'язання технічних проблем щодо ненормативного зносу колодок у гальмових системах візків і збільшення міжремонтних періодів експлуатації вантажних вагонів.

**Ключові слова:** гальмова колодка; знос; гальмова важільна передача (ГВП); вантажний вагон; аналіз; модель; статистичні дослідження; параметр

## Вступ

За останні роки на залізничному транспорті України спостерігається істотне погіршення технічного стану гальмових систем вантажних вагонів, від яких у першу чергу залежить безпека руху поїздів. Однією з найбільш поширених відмов є клинодуальний знос гальмових колодок вантажних вагонів, спричинений недосконалою конструкцією важільної передачі візка, яку не модернізували багато десятиліть.

У результаті виконаних розширених експлуатаційних обстежень гальмових систем візків вантажних вагонів як інвентарного парку АТ «Укрзалізниця» так і промислових підприємств було встановлено, що більшість пристроїв для рівномірного відведення колодок перебувають у незадовільному стані, наслідком чого є клинодуальний знос гальмових колодок вантажних вагонів. Значна частина пристроїв має пошкоджений замок і скобу для рівномір-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ного зносу колодок, що призводить до непрацездатного стану, а іншою основною причиною є конструктивний недолік триангеля.

Відомо, що типовий триангель, який застосовують у візках вантажних вагонів, має врівноважену конструкцію відносно свого підвішування [13]. Але після приєднання до розпірки триангеля деталей гальмової важільної передачі (ГВП) умова його врівноваженості порушується. Під дією сили, яка створюється вагою приєднаних до нього деталей, він схиляється до упору, а це спричиняє притискування верхніх кінців гальмових колодок до поверхонь кочення коліс. Відбувається інтенсивне тертя верхніх кінців колодок по поверхні кочення коліс під час руху без гальмування. Унаслідок цього на верхніх частинах робочої площі колодок інтенсивно зростає місцева стертість, яка спричиняє їх клинодуальний знос.

Тому заporукою успішного вирішення такої проблеми під час технічного утримання вагонів є, по-перше, модернізація типової ГВП, а по-друге, створення підстав для збільшення міжремонтних періодів експлуатації вантажних вагонів шляхом прогнозування залишкового ресурсу колодок у гальмових системах модернізованих пристроїв візків.

Проблема клинодуального зносу гальмових колодок, спричинена конструкційними особливостями ГВП візка, виникла давно. Вона пов'язана зі зниженням ефективності гальмувань рухомого складу через зменшення площі контакту триботехнічних пар, що призводить до збільшення вимушених ремонтних робіт, витрат енергоресурсів на тягу поїздів і зменшення загальних економічних показників вантажних перевезень [1]. Вивчення причин і наслідків такого явища відображено в праці [13], де зосереджено увагу на тому, що занадто велика кількість елементів і зайвих зв'язків у ГВП візка (мод. 18–100) перешкоджає самовстановленню поверхонь тертя гальмових колодок відносно площин кочення коліс пристроїв М 1180.000 рівномірного відведення [6]. Ці пристрої після нетривалої експлуатації не забезпечують надійну роботу гальм через те, що динамічні навантаження, які діють на їх елементи, спричиняють значну кількість відмов в умовах експлуатації. У закордонних дослідженнях [23, 25] працездатність гальмових систем рухомого складу ви-

значають за стендовими випробовуваннями зносу й температурних показників, а деякі дослідження зосереджені на перевагах використання чавунних гальмових колодок [24].

У праці [18] розглянуто методику визначення геометричних параметрів корисної площі контакту колодок у разі утвореного верхнього шкідливого зносу залежно від зазору між колесом і гальмовою колодкою, із використання координатного та графічного методів, за умови справних пристроїв рівномірного відведення колодок від коліс вагонів.

У роботі [5] було запропоновано один із підходів до подібних статистичних досліджень. Автори оцінювали такі параметри, як сила натискання гальмових колодок на колеса, твердість матеріалу колодок тощо під час встановлення величини гальмового шляху залежно від швидкості руху, ухилу рейкової колії й радіуса кривої в разі гальмування рухомого складу. Статистично встановлено «критичні» ухили величини гальмового шляху в разі повного службового гальмування рухомого складу. Проте в роботі не розглянуто умови, коли зменшується гальмова площа контакту колодки з колесом за дуального їх зносу, тому оцінювати гальмову ефективність поїзда позитивно не можна.

У дослідженні описаному в праці [7], було розроблено регресійну модель тертя колодок і коліс локомотивів промислового транспорту в умовах структурної невизначеності за великої кількості складних вхідних змінних у моделях параметрів, тобто з урахуванням значення коефіцієнта тертя. Виключити нестійкі рішення в такій багатопараметричній моделі складно, хоча автор запропонував для цього своє бачення проблеми. Однак головний параметр – знос колодок за товщиною, який у системі планово-попереджувальних ремонтів (ППР) обмежує застосування всіх типів гальмових колодок (із точки зору безпеки їх використання), під час ідентифікації моделі включено не було.

У дослідженні [14] було встановлено причину шкідливого дуального зносу колодок і визначено можливості ліквідації вказаного недоліку, що призводить до передчасної заміни гальмових колодок, які не використали свій ресурс робочої маси в межах планових міжремонтних пробігів. У цій роботі використано статистичний підхід планування експери-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ментів за дослідної експлуатації вантажних вагонів із типовими й модернізованими ГВП, які були включені в один склад. Але завдання щодо прогнозування термінів їх експлуатації не ставилося.

Інший підхід було запропоновано колективом авторів у роботі [8]. На прикладі ненормативного зносу гальмових колодок у статті розглянуто питання про нерівномірний знос пар тертя колодок із колесами одного вагона, їх динамічні процеси, які описано досить складною моделлю. Але тут мова йшла про ситуації, коли випадкові значення величини досліджуваних параметрів підпорядковуються нормальному закону розподілу.

У роботах [9, 16, 17, 20] йдеться про аналогічні дослідження, але специфіку планово-попереджувальних ремонтних робіт під час регулювання вузлів гальмових систем рейкового рухомого складу в них не відображено.

На підставі попередніх спостережень, проведених в умовах експлуатації вантажних вагонів, було встановлено, що на утворення й розвиток клинодуального зносу колодок впливає конструкція та стан гальмової системи вагонних візків. У разі досягнення пробігу вантажного вагона близько 80 тис. км необхідно виконувати заміну ненормативно зношеної колодки (її ресурс розрахований на пробіг 160 тис. км), у якій залишається в середньому 39 % робочої маси, а це зайві експлуатаційні витрати, яких можна уникнути шляхом модернізації ГВП вантажних вагонів, експлуатованих на залізничному й промислового транспорту, що дозволить збільшити їх міжремонтні періоди. За умов застосування модернізованих ГВП можна збільшити на порядок пробіг вантажних вагонів на магістральних коліях і ресурс гальмових колодок, але відсутність прогностичних моделей не дає змогу цього зробити.

У дослідженнях [11, 21], присвячених конструктивним змінам ГВП, залишаються невирішеними проблеми клинодуального зносу колодок через те, що їх розробники пропонували створювати різноманітні допоміжні пристрої протидії силам, які нахиляють колодки до впирання в колеса, тільки на підставі кінетостатичного аналізу механізму ГВП [15]. Однак, як показує практика, такий підхід пов'язаний з ускладненням конструкції ГВП, збільшенням

її собівартості та трудомісткості виготовлення й ремонту. Проаналізовані дослідження дають змогу зазначити, що наявним проблемам клинодуального зносу гальмових колодок, які застосовують у гальмових системах сучасних вантажних вагонів, – достатньо уваги приділено не було.

### Мета

Це дослідження спрямоване на застосування лінійних моделей для визначення зносу гальмових колодок вантажних вагонів у верхній і нижній частині з метою подальшого їх використання під час розв'язування подібних практичних задач.

Для дослідження зносу гальмових колодок необхідно вирішити такі завдання:

- виконати конструктивний аналіз елементів типової ГВП візка, що спричиняють утворення клинодуального зносу гальмових колодок вантажних вагонів, і напрацювати передумови для її модернізації;
- розробити ймовірно-статистичну модель зносу гальмових колодок вантажних вагонів і виконати дослідження їх зносу у верхній і нижній частині, починаючи з номінальної товщини колодок для оцінки параметрів запропонованої моделі;
- сформулювати функцію розподілу зносу верхньої й нижньої частини колодки, яка дасть змогу розв'язувати практичні статистичні задачі щодо контрольних точок (місць) гальмової колодки вантажного вагона;
- визначити апроксимуючу залежність зносу й величини пробігу вантажних вагонів із модернізованими пристроями, на підставі яких отримати залежності та знайти модель величини пробігу вагонів з урахуванням повного зносу колодки для збільшення міжремонтних періодів.

### Методика

У сучасних умовах експлуатації гальмові системи візків вантажних вагонів, у яких використовують типову ГВП, не забезпечує нормативного зносу колодок. Це пояснюється як конструктивними особливостями ГВП, так і виходом із ладу через нетривалий час експлу-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

атації пристроїв М 1180.000 для рівномірного відведення гальмових колодок [6].

Для знаходження раціональних конструктивних рішень щодо зменшення зносу гальмових колодок від шкідливих явищ, які обумовлені конструктивними особливостями візка з ГВП, були проведені дослідження його структури, за результатами яких встановлено, що він має зайві зв'язки. Тому визначити кінематику й провести аналіз неможливо, так само нереально знайти інерційні силові фактори, які діють на ГВП зі сторони його елементів [13]. Через це для проведення силового аналізу цього складного механізму потрібно накладати відповідні

обмеження або розглядати його динаміку саме в межах рівнянь Лагранжа системи з гнучкими зв'язками. Для того, щоб визначити зусилля в ланці, потрібно враховувати його піддатливість у межах взаємодії пружних та інерційних сил.

У зв'язку з тим, що конструкція ГВП візка симетрична, умовно поділимо її на дві частини, які віднесемо до першої (правої) і другої (лівої) колісної пари, та побудуємо об'єднану схему розподілу силових факторів, що діють на відповідні елементи ГВП під час гальмування (рис. 1).

*a – a*

*б – б*

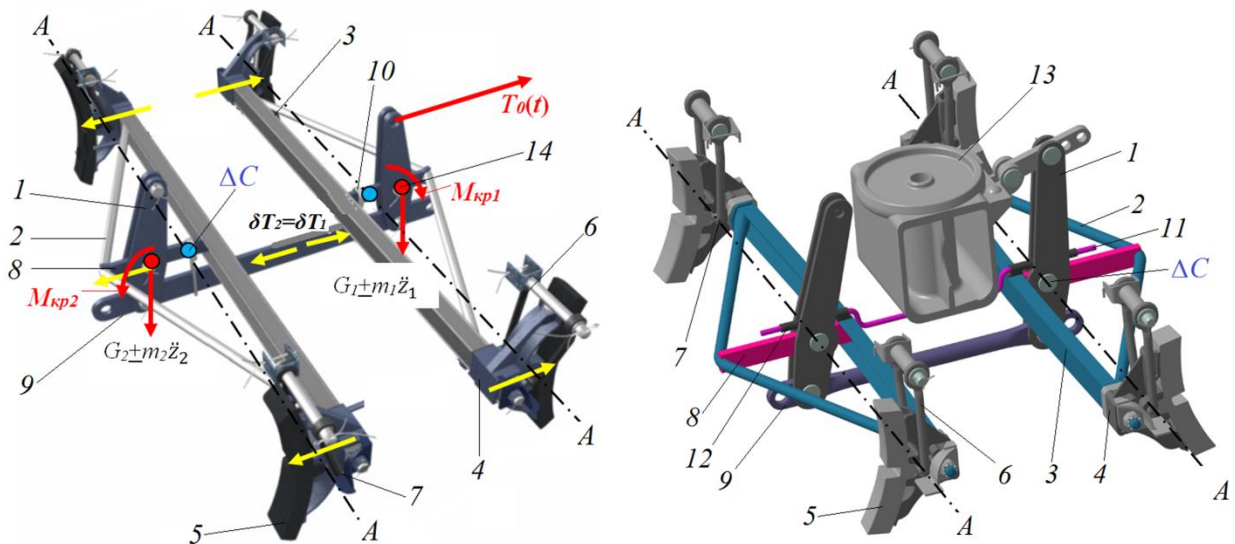


Рис. 1. Загальний вигляд моделі ГВП вантажного вагона:

*a* – типової конструкції; *б* – модернізованої конструкції; 1 – вертикальні двоплечі важелі; 2 – триангелі; 3 – балка триангеля; 4 – гальмові башмаки; 5 – гальмові колодки; 6 – маятникові підвіски; 7 – нижні шарніри; 8 – розпірки триангеля; 9 – затяжка вертикальних важелів; 10 – скоба із замком; 11 – напрямний криволінійний стрижень; 12 – циліндричні ковзуни; 13 – надресорна балка візка; 14 – з'єднувальний валик (шарнір);  $T_0(t)$  – гальмова зовнішня сила;  $\delta T_2 = \delta T_1$  – розпірні внутрішні «віртуальні» сили;  $G_1 \pm m_1 \ddot{z}_1 = G_2 \pm m_2 \ddot{z}_2$  – статичні й динамічні сили;  $L$  – відстань, на яку потрібно перенести отвір у розпірці триангеля

Fig. 1. General view of the model freight car brake rigging:

*a* – typical design; *b* – upgraded structure; 1 – vertical two-shoulder levers; 2 – triangles; 3 – triangle beam; 4 – brake shoes; 5 – brake pads; 6 – pendulum suspensions; 7 – lower hinges; 8 – brake struts; 9 – tightening of vertical levers; 10 – clip with lock; 11 – guide curve rod; 12 – cylindrical slides; 13 – bogie bolster; 14 – connecting roller (hinge);  $T_0(t)$  – braking external force;  $\delta T_2 = \delta T_1$  – spreading internal «virtual» forces;  $G_1 \pm m_1 \ddot{z}_1 = G_2 \pm m_2 \ddot{z}_2$  – static and dynamic forces;  $L$  – is the distance to which you want to move the hole in the strut of the triangle

Виконаний аналіз дозволив виділити специфічний знос гальмових колодок, через який тільки на їх верхніх частинах починає

з'являтися місцева фрикційна стертість не під час гальмувань, а коли відбувається рух вагонів у режимах тяги та вибігу. Установлено, що таке

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

негативне явище відбувається через низьку надійність пристрою рівномірного відведення колодок від коліс і недосконалу конструкцію триангеля. Через це за власною вагою деталей гальмової системи на триангель діє статична й динамічна сила  $G_1 \pm m_1 \ddot{z}_1 = G_2 \pm m_2 \ddot{z}_2$  (рис. 2, *a*). Під дією цієї сили на плече  $L$  виникає крутний момент  $M_{кр}$ , при цьому триангель повертається навколо нижніх шарнірів 7 маятникових підвісок  $b$  (рис. 1) до впирання верхньою частиною обох колодок у поверхню кочення колісної пари і врівноважується реакцією  $(N_1/2)tg\gamma$ , що починає діяти в зоні зіткнення колодок із колесами (рис. 2). Деталі ГВП, вагою яких створюється динамічна сила  $G_1 \pm m_1 \ddot{z}_1$  і момент  $M_{кр}$ , з'єднані між собою шарнірами зі значними зазорами, які розташовані в невідресореній частині візка. Тому під час руху вагона створюються вимушені коливання цих деталей, що

приводить до знакозмінних переміщень ударного характеру в зазорах шарнірів від дії значної за величиною статичної й динамічної складової  $G_1 \pm m_1 \ddot{z}_1$ . У зв'язку з тим, що у відомих конструкціях пристроїв, призначених для усунення ненормативного зносу гальмових колодок, створюється протидія вказаним силам, в експлуатації такі пристрої швидко руйнуються й мають незначний ресурс [18].

Щоб вирішити проблему дуального зносу гальмових колодок, у триангельній системі ГВП необхідно ліквідувати крутний момент  $M_{кр}$ . Для цього шарнір з'єднання вертикального важеля з розпіркою в типовому триангелі потрібно розташувати на вісі  $A-A$  в точці  $\Delta C$  (рис. 1, *a*), яка умовно об'єднує обидва шарніри гальмових башмаків із колодками, та зменшити до мінімуму відстань  $L$  від наявного отвору (рис. 2, *b*) (червоне коло 4) до нового (блакитне коло 4').

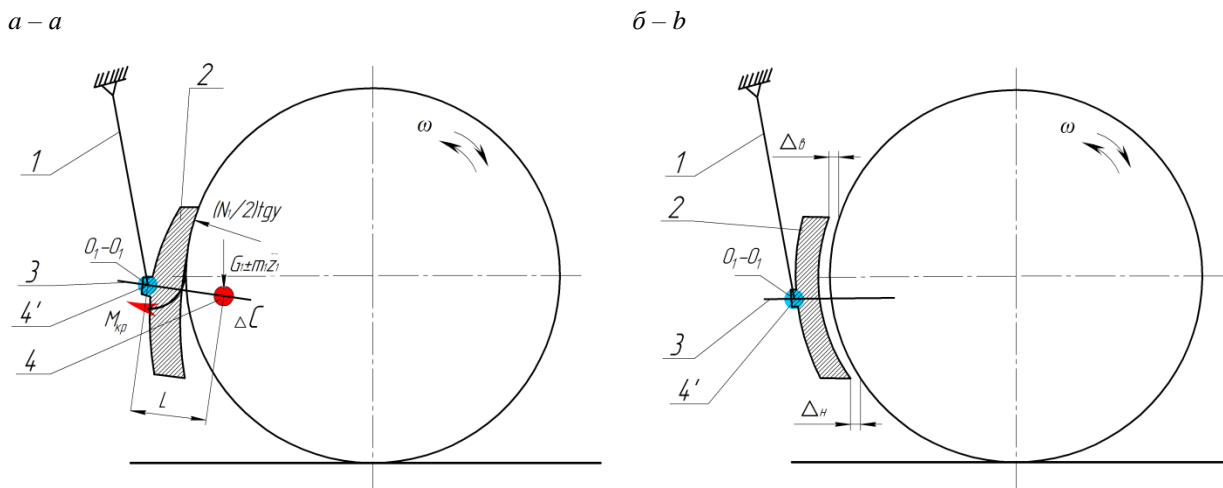


Рис. 2. Схема підвішування колодок у триангельній гальмовій системі:

*a* – дія сил, за яких утворюється дуальний знос колодки під час руху без гальмувань; *b* – рівномірний знос зверху і знизу колодки; 1 – маятникова підвіска; 2 – гальмова колодка; 3 – триангель; 4 – шарнір з'єднання вертикального важеля з триангелем; 4' – шарнір з'єднання вертикального важеля з триангелем, що умовно перенесений на відстань  $L$ ;  $\Delta_b, \Delta_n$  – зазор відповідно зверху та знизу колодки;  $\gamma$  – кут відхилення від горизонтального напрямку дії реакції  $N_1$  дотичної до точки, якою колодка притискається до колеса

Fig. 2. Scheme of pads suspension in the triangle brake system:

*a* – action of forces under which the dual pad wear during movement without braking is being formed; *b* – uniform wear on top and bottom of the pad; 1 – pendulum suspension; 2 – brake shoe; 3 – triangle; 4 – connecting hinge of the vertical lever and triangle; 4' – connecting hinge of the vertical lever and triangle, which is conditionally transferred to the distance  $L$ ;  $\Delta_b, \Delta_n$  – gap at the top and bottom of the pad, respectively;  $\gamma$  – deviation angle from the horizontal direction of action of the reaction  $N_1$  tangent to the point at which the pad is pressed against the wheel

Методику розрахунків типової ГВП з пристроєм М 1180.000 рівномірного відведення [6] було перевірено на наявній схемі-моделі

(рис. 1, *a*) без жодних конструктивних змін в її елементах. За результатами кінестатичних розрахунків елементів ГВП, зменшення дії

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

шкідливого зносу зверху гальмових колодок не спостерігалось, поки конструкцію триангеля не було модернізовано.

Для модернізації пристрою (рис. 1, б) було поставлено завдання: по-перше, центр мас конструкції триангеля потрібно якомога ближче наблизити до балки триангеля 3, щоб вісь загального центра ваги триангельної ГВП збігалася з нижніми шарнірами 7 маятникового підвішування 6 гальмових башмаків 4 з колодками 5. Цього можна досягти за рахунок перенесення отвору з'єднання вузла (шарніра) 14 вертикального двоплечого важеля 1 із розпіркою 8 триангеля 2 на відповідну відстань. Для цього необхідно з конструкції ГВП (рис. 1, а) прибрати скоби для рівномірного зносу із замками 10, які не виконують свою функцію. А по-друге, замість скоб із замками встановити в циліндричні ковзуни 12 напрямний криволінійний стрижень 11, який забезпечить рівномірну відстань між гальмовою колодкою 5 і колесом за попущених гальм у режимах тяги та вибігу поїзда незалежно від навантаження надресорної балки вагона 13. Також у процесі обслуговування модернізованої гальмової системи візків вантажних вагонів не виявлено випадків пошкодження напрямного криволінійного стрижня 11.

Таким чином, за рахунок конструктивних змін у ГВП було вирішено проблему виникнення клинодуального зносу гальмових колодок у візках вантажних вагонів на увесь міжремонтний період їх експлуатації, унаслідок зменши-

лася кількість показників інтенсивності їх зносу порівняно з типовими пристроями, і ГВП стали працювати безвідмовно.

*Методика статистичних оцінок.* Явище зносу гальмових колодок вантажних вагонів залежно від пробігу для модернізованих пристроїв рівномірного відведення колодок та утримування їх на нормативній відстані досліджено в [12, 14].

Для отримання статистичних оцінок зносу гальмових колодок потрібно зібрати об'єм вибірки  $n$ . Далі шляхом використання емпіричних функцій і їх залежностей потрібно розподілити області на кількість інтервалів  $l$ , які можна знайти з виразу  $l = 5lg n$  залежно від об'єму вибірки  $n$ .

В умовах експлуатації вантажних вагонів було виконано вимірювання зносу гальмових колодок у верхній і нижній частині для пробігів вагонів від 0 до 197,8 тис. км, результати кількості випробувань склали об'єм із вибіркою  $n = 106$ .

Для визначення зносу верхньої  $X_1$  і нижньої  $X_2$  частини гальмової колодки були знайдені числові характеристики: середнє значення  $\bar{x}$ , виправлена дисперсія  $s^2$ , квадрат коефіцієнта асиметрії  $As^2$  і коефіцієнт ексцесу  $Es$  – для значень випадкових величин  $X_1$  і  $X_2$ . Результати розрахунку наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Числові характеристики вимірюного зносу на гальмовій колодці  $X_1$  і  $X_2$ 

Table 1

Numerical characteristics of the measured wear on the brake pad  $X_1$  and  $X_2$ 

Вимірний знос колодки	Числові характеристики			
	$\bar{x}$	$s^2$	$As^2$	$Es$
Зверху $X_1$	31,693898	238,377769	0,001895	2,0117
Знизу $X_2$	31,856568	237,513916	0,001228	2,01451

Модель лінійних розмірів пристрою для рівномірного відведення й оцінка його параметрів за результатами зносу гальмових колодок. Застосуємо модель зносу лінійних розмірів колодок вантажних вагонів у вигляді

статистичної функції. У цьому випадку функцію щільності  $f(x)$  для випадкових величин зносу  $X$  колодок пропонують визначати у вигляді [4, 10, 19, 22]:

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x \notin (b, c), \\ \frac{1+k}{c-b} \left[ 1 - \left( \frac{x-a}{b-a} \right)^{\frac{1}{k}} \right], & x \in [b, a], \\ \frac{1+k}{c-b} \left[ 1 - \left( \frac{x-a}{c-a} \right)^{\frac{1}{k}} \right], & x \in (a, c], \end{cases} \quad (1)$$

де  $a$  – модальне значення;  $b$ ,  $c$  – нижня і верхня границя зносу гальмової колодки відповідно;  $k$  – параметр форми зносу гальмової колодки вантажного вагона.

Модель (1) визначена за  $k > 0$  і  $k < -1$ , де  $b < a < c$  і  $b \geq 0$ . Для моделі (1) функція розподілу має вигляд [2]:

$$F(x) = \begin{cases} 0, & x \leq b \\ \left\{ x - b + k(x - a) \left[ 1 - \left( \frac{x-a}{b-a} \right)^{\frac{1}{k}} \right] \right\} / (c-b), & b < x \leq a \\ \left\{ x - b + k(x - a) \left[ 1 - \left( \frac{x-a}{c-a} \right)^{\frac{1}{k}} \right] \right\} / (c-b), & a < x \leq c \\ 1, & x > c \end{cases} \quad (2)$$

У нашому випадку нижня границя зносу становить  $b = 0$ , а верхня границя  $c = 65$  мм.

За таких параметрів математичне очікування має вигляд:

$$M(X) = (55 + 55k + 165kq + 55q) / 2(2k + 1)(1 + q), \quad (3)$$

де  $a = 65q / (1 + q)$ .

Дисперсію визначаємо за формулою [3]:

$$D(X) = \frac{(c-b)^2 (k+1) (2k^2q + 7k^2 + 7k^2q^2 + (4k+1)(q+1)^2)}{12(2k+1)^2 (1+q)^2 (3k+1)}. \quad (4)$$

Для цієї моделі квадрат асиметрії є функцією двох змінних та має такий вигляд [4, 5]:

$\beta_1^2 = \mu_3^2 / \mu_2^3$ , де  $\mu_k$  – центральний момент  $k$ -го порядку,

$$\beta_1^2 = 108 \left( 4k^2q^2 - 4k^2 + 4k^2q^3 - 4k^2q + 3kq^3 + 7kq^2 - 3k - 7kq - \right. \\ \left. - 1 - q + q^2 + q^3 \right)^2 k^4 (3k+1) / \left( (k+1) (2k^2q + 7k^2 + 7k^2q^2 + \right. \\ \left. + 4k + 8kq + 4kq^2 + 1 + 2q + q^2 \right)^3 (4k+1)^2 \right). \quad (5)$$

Ексцес визначаємо за виразом

$\beta_2 = \mu_4 / \mu_2^2$  [3–5], він дорівнює:

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

$$\beta_2 = 9(3k+1) \left( 1 + 90kq^2 + 60kq + 1184k^3q^3 + 368k^2q + 1011k^5 + 572k^6 + \right. \\ \left. + 813k^4 + 4q^3 + 366k^3 + 6q^2 + 102k^2 + q^4 + 532k^2q^2 + 1184k^3q + \right. \\ \left. + 1636k^3q^2 + 1932k^4q + 1932k^4q^3 + 2958k^4q^2 + 102k^2q^4 + 1684k^5q + \right. \\ \left. + 1011k^5q^4 + 366k^3q^4 + 572k^6q^4 + 528k^6q^3 + 528k^6q + 813k^4q^4 + 60kq^3 + \right. \\ \left. + 368k^2q^3 + 1684k^5q^3 + 2546k^5q^2 + 872k^6q^2 + 4q + 15k + 15kq^4 \right) / \left( 5(2k^2q + \right. \\ \left. + 7k^2 + 7k^2q^2 + 4k + 8kq + 4kq^2 + 1 + 2q + q^2) \right)^5 (4k+1)(5k+1)(k+1). \quad (6)$$

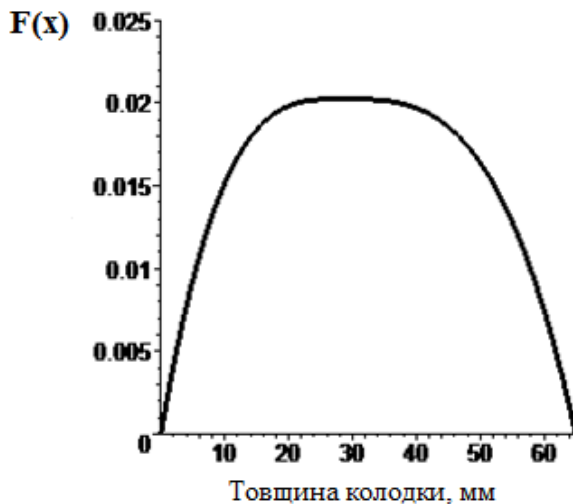
Для оцінки безрозмірних параметрів  $k$  і  $q$  застосовуємо метод моментів [3], прирівнюючи для цього теоретичні (5)–(6) та емпіричні числові характеристики (табл. 1), коефіцієнт квадрата асиметрії й коефіцієнт ексцесу.

Розв'язуючи цю систему рівнянь, отримаємо такі значення параметрів моделі (1) для: а) верху гальмових колодок  $k=0,315555$ ,

$q=0,772721$ ,  $a=28,333204$ ; б) низу гальмових колодок  $k=0,319359$ ,  $q=0,815560$ ,  $a=29,198376$ .

За отриманими значеннями параметрів побудовано графіки щільності розподілу випадкової величини зносу колодок (рис. 3 й 4) і функції розподілу зносу колодок (рис. 5 і 6).

а – а



б – б

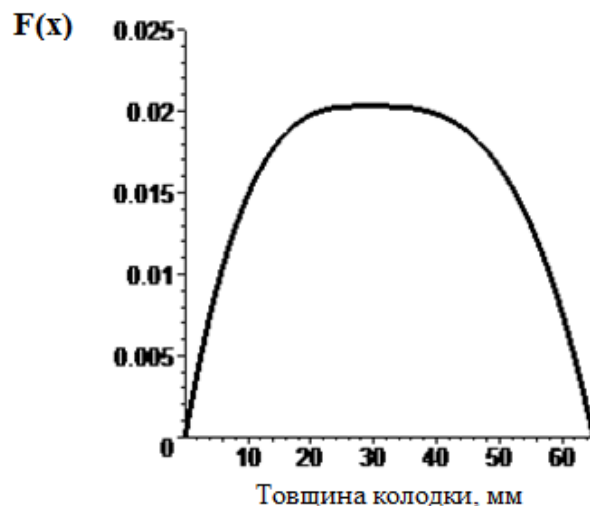
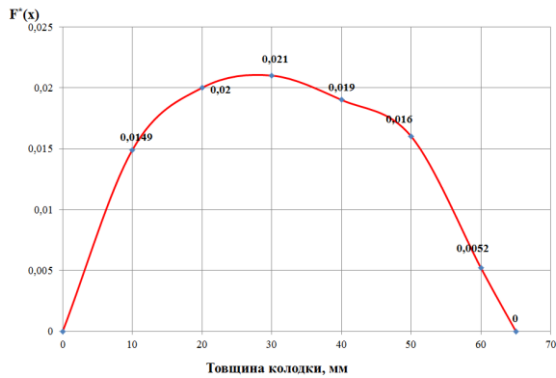


Рис. 3. Теоретична крива щільності розподілу зносу зверху (а) і знизу (б) колодок з оцінками параметрів, отриманих методом моментів

Fig. 3. Theoretical curve of the wear distribution density at the top (a) and bottom (b) of the pads with estimates of the parameters obtained by the method of moments

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

*a – a*



*б – б*

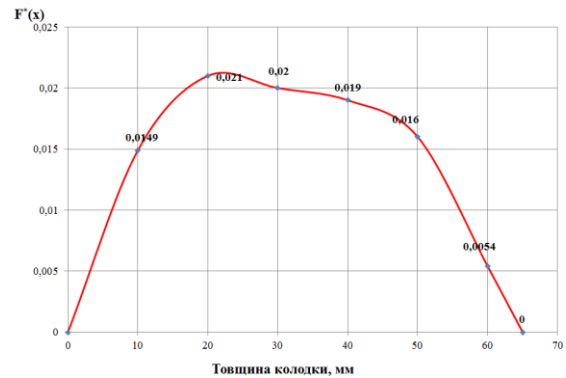
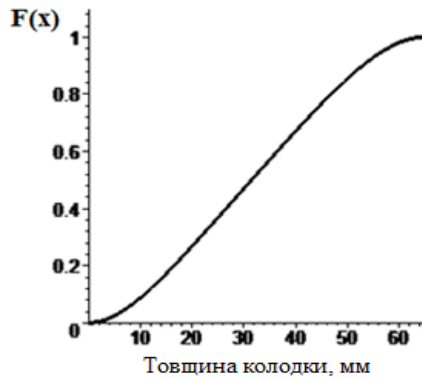


Рис. 4. Крива щільності розподілу зносу зверху (*a*) і знизу (*б*) експлуатаційних колодок

Fig. 4. Wear distribution density curve of the top (*a*) and bottom (*b*) of the operating pads

*a – a*



*б – б*

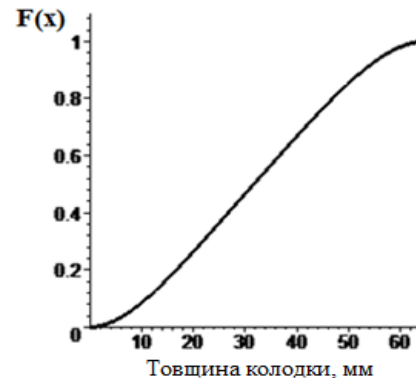
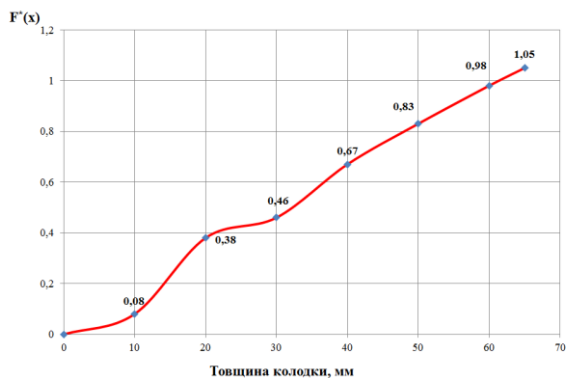


Рис. 5. Теоретична крива функції розподілу зносу зверху (*a*) і знизу (*б*) колодок з оцінками параметрів, отриманих методом моментів

Fig. 5. Theoretical curve of the wear distribution function of the top (*a*) and bottom (*b*) pads with estimates of the parameters obtained by the method of moments

*a – a*



*б – б*

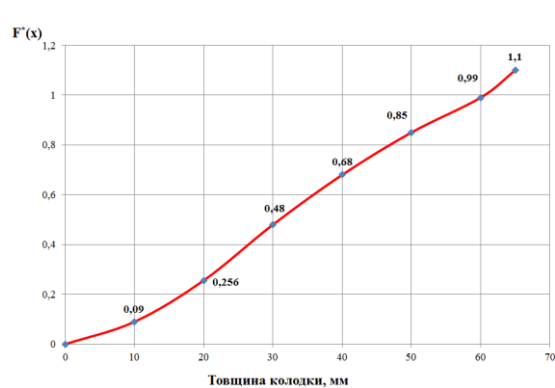


Рис. 6. Крива функції розподілу зносу зверху (*a*) і знизу (*б*) експлуатаційних колодок

Fig. 6. Curve of the wear distribution function at the top (*a*) and bottom (*b*) of the operating pads

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Чутливі характеристики закону розподілу випадкової величини та їх експлуатаційні оцінки зносу гальмових колодок. Оскільки узгодження не є адекватністю ймовірної моделі, розглянемо функціональні характеристики чутливих до моделей розподілу випадкових величин. Форма їх установа за дослідними даними, є однією з істотних підстав близькості адекватності запропонованої моделі. Однією з таких характеристик у теорії надійності є інтенсивність відмов, яку в загальному випадку надалі будемо називати  $\lambda$ -характеристикою. Теоретичну  $\lambda$ -характеристику широко використовують на практиці і за значеннями визначається за формулою:

$$\lambda(x) = \frac{f(x)}{1 - F(x)}. \quad (7)$$

Одна з них має вигляд:

$$\lambda(x_{(i)}) = \frac{n(x_{(j)})}{\left[ n - \sum_{j=1}^{i-1} n(x_{(j)}) \right] (x_{(i)} - x_{(i-1)})}, \quad (8)$$

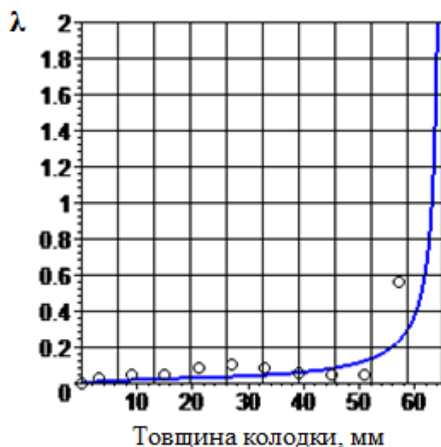
де  $n(x_{(j)})$  – частота розміру з середньою величиною розміру  $x_{(i)}$ .

За виконаними в умовах експлуатації 106 вимірюваннями величини зносу гальмових колодок вантажних вагонів із модернізованими пристроями побудовано емпіричну та теоретичну

$\lambda$ -характеристику зі знайденими параметрами розподілу (1), що зображено на рис. 7. Точки емпіричної  $\lambda$ -характеристики практично збіглися з точками теоретичної  $\lambda$ -характеристики, що вказує на можливість застосування моделі (1) для випадкової величини розміру верхнього та нижнього зносу гальмових колодок вантажних вагонів.

На рис. 7, а і б наведено  $\lambda$ -характеристику та її емпіричні оцінки верхнього й нижнього зносу гальмових колодок вантажних вагонів.

а – а



б – б

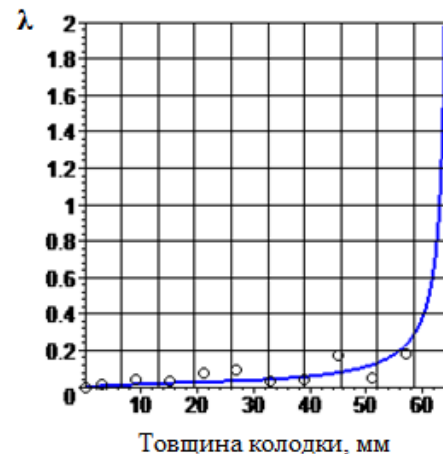


Рис. 7. Графіки  $\lambda$ -характеристики зносу зверху (а) і знизу (б) гальмових колодок і їх емпіричні оцінки

Fig. 7. Graphs of  $\lambda$ -characteristics of wear on top (a) and bottom (b) of brake pads and her empirical estimates

Із рис. 7, а і б видно, що ця характеристика в межах від 0 до 45 мм має практично лінійну зростаючу залежність. Оскільки емпіричні оцінки  $\lambda$ -характеристики достатньо близькі до теоретичної кривої  $\lambda$ -характеристики, то модель

зносу колодок (1) можна використовувати на практиці досліджень цієї спрямованості.

Оцінка  $\mu$ -характеристики середнього залишкового ресурсу [3, 14] має суттєво менші випадкові флуктуації, ніж розрахована за тими ж да-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ними оцінка  $\mu$ -характеристики. Це можна пояснити кращими статистичними якостями оцінок суми порівняно з оцінками часток. Більш того, оцінка  $\mu$ -характеристики достатньо чутлива до правої частини розподілу, що є необхідним для дослідження обмежених моделей праворуч.

Далі будемо розглядати саме цю характеристику. Нехай проведено  $n$  випробувань, тоді за значень  $x$  залишається приблизно  $n \cdot P(X \geq x)$  значень, які приймуть свої значення більші, ніж  $x$ , а до значення  $x + \tau$ :  $n \cdot P(X \geq x + \tau)$ .

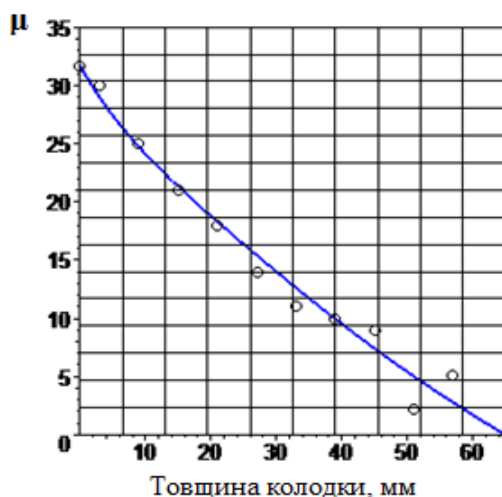
Відношення цих кількостей дає умовну ймовірність значення, що перевищує значення  $\tau$ , якщо всі ці значення  $x$  уже були. При цьому розглядають упорядковані значення:

$$P(X \geq \tau / x) = \frac{P(X \geq x + \tau)}{P(X \geq x)}. \quad (9)$$

Інтегруючи вираз (9), знаходимо  $\mu(x)$ :

$$\begin{aligned} \mu(x) &= \int_0^{\infty} \frac{1 - F(x + \tau)}{1 - F(x)} d\tau = \\ &= \frac{1}{1 - F(x)} \int_x^{\infty} (1 - F(z)) dz. \quad (10) \end{aligned}$$

*a – a*



Для знаходження емпіричної оцінки  $\tilde{\mu}(x)$  достатньо всі значення, за якими спостерігали, розташувати в порядку зростання, тобто з них скласти порядкові статистики  $x_{(1)}, \dots, x_{(n)}$ . Тоді підраховуємо величини за виразом  $\tau_0^{(j)}(x_i) = \tau_j - x_i$  для тих значень  $\tau_j$ , які не менші, ніж  $x_i$ .

Якщо таких величин  $l$ , тоді (з невеликим зміщенням)

$$\mu(x) \approx \bar{\tau}(x_i) = \frac{1}{l} \sum_{j=1}^l \tau_0^{(j)}(x_i). \quad (11)$$

Оцінка  $\mu(x)$  може бути знайдена з використанням емпіричних оцінок функції розподілу  $\tilde{F}(x)$ , де  $\tilde{F}(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^l f_i$ , а

$$\mu(\tilde{x}) = \frac{1}{\tilde{F}(x)} \sum_{j=1}^l \left( 1 - \frac{\tilde{F}(x_{i+1}) + \tilde{F}(x_i)}{2} \right) \Delta x_i \quad (12)$$

тут  $x_{i+1} - x_i = \Delta x_i$ .

Використовуючи формулу (10), знайдемо  $\mu$ -характеристику для зносу колодки зверху і знизу за вирахованими значеннями параметрів моделі (1) (рис. 8, *a* і *b*) та її емпіричні оцінки.

*b – b*

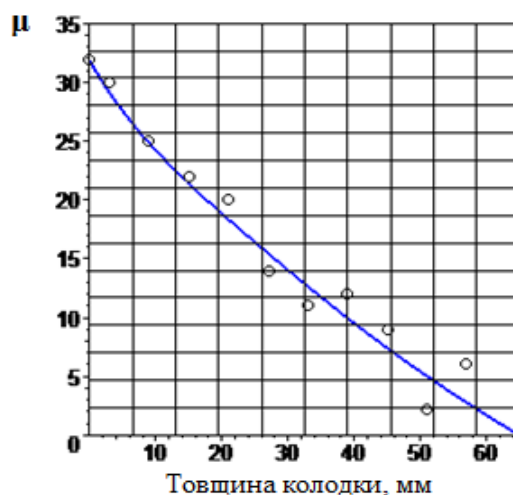


Рис. 8. Графік  $\mu$ -характеристики зносу зверху (*a*) і знизу (*b*) гальмових колодок і їх емпіричні оцінки

Fig. 8. Graphs of  $\mu$ -characteristics of wear on top (*a*) and bottom (*b*) of brake pads and her empirical estimates

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Із рис. 8 видно, що для значень зносу гальмових колодок вантажних вагонів в області визначення емпіричні та теоретичні  $\mu$ -характеристики практично збігаються і мають однаковий характер зміни, що вказує про наближеність цієї моделі до істинної.

*Ресурсні оцінки зносу колодок.* Для встановлення ресурсних характеристик у точках перевірки зносу був визначений пробіг вантажного вагона з модернізованими пристроями. Дослідження показали, що залежність між зносом і пробігом вагона близька до лінійної. У пер-

шому наближенні прийемо цю залежність у вигляді  $y = \eta x$ , оскільки за  $x = 0$   $y$  має дорівнювати нулю. Використовуючи метод найменших квадратів, знайдено кутовий коефіцієнт  $\eta$ . Для зносу зверху колодки він дорівнює  $\eta_1 = 5,105861$ , а для зносу знизу –  $\eta_2 = 5,277592$ . Знаючи залежність і розподіл зносу (1), визначаємо щільність розподілу випадкової величини пробігу  $y$ :

$$f(y) = \begin{cases} 0, & y \notin (\eta b, \eta c), \\ \frac{1+k}{(c-b)\eta} \left[ 1 - \left( \frac{y/\eta - a}{b-a} \right)^{\frac{1}{k}} \right], & y \in [\eta b, \eta a], \\ \frac{1+k}{(c-b)\eta} \left[ 1 - \left( \frac{y/\eta - a}{c-a} \right)^{\frac{1}{k}} \right], & y \in (\eta a, \eta c]. \end{cases} \quad (13)$$

Для цієї моделі функція розподілу має вигляд:

$$F(y) = \begin{cases} \frac{-\eta(b+ka) + y(1+k) + \eta k(a-b) \left( \frac{y-a\eta}{\eta(a-b)} \right)^{\frac{1+k}{k}}}{\eta(c-b)}, & y \in [\eta b, \eta a], \\ \frac{-\eta(b+ka) + y(1+k) + \eta k(c-a) \left( \frac{y-a\eta}{\eta(c-a)} \right)^{\frac{1+k}{k}}}{\eta(c-b)}, & y \in [\eta a, \eta c]. \end{cases} \quad (14)$$

Знайдемо емпіричні та теоретичні оцінки інтенсивності й середнього залишкового ресурсу гальмової колодки вантажного вагона з урахуванням її зносу.

На рис. 9,  $a$  і  $b$  наведено графіки емпіричної та теоретичної оцінки інтенсивності пробігу вантажного вагона з модернізованими пристроями, а на рис. 10,  $a$  і  $b$  – графіки емпіричної та теоретичної оцінки середнього залишкового пробігу вагона залежно від зносу гальмових колодок.

Аналізуючи рис. 9 і 10, можна зробити висновки, що запропоновану модель (1) зносу колодок та отриману модель (13), з огляду на показники їх адекватності для пробігів вантажних вагонів із модернізованими пристроями з урахуванням зносу гальмової колодки, можна використовувати для розв'язання основних задач, пов'язаних як зі зносом будь-яких типів гальмових колодок вантажних вагонів, так і рухомого складу в цілому.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

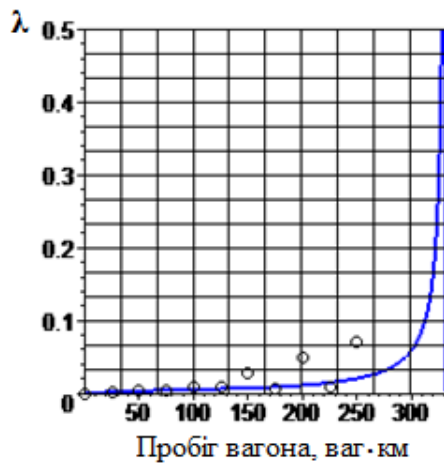
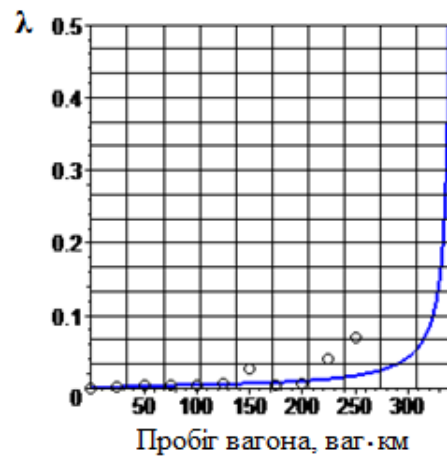
*a – a**б – б*

Рис. 9. Графіки емпіричної та теоретичної оцінки інтенсивності пробігу вагона з урахуванням зносу гальмової колодки зверху (*a*) і знизу (*б*)

Fig. 9. Graphs of empirical and theoretical assessment of the intensity of the car run, taking into account the wear of the brake pad at the top (*a*) and bottom (*b*)

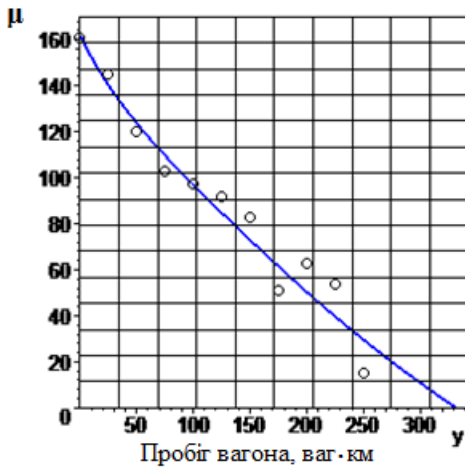
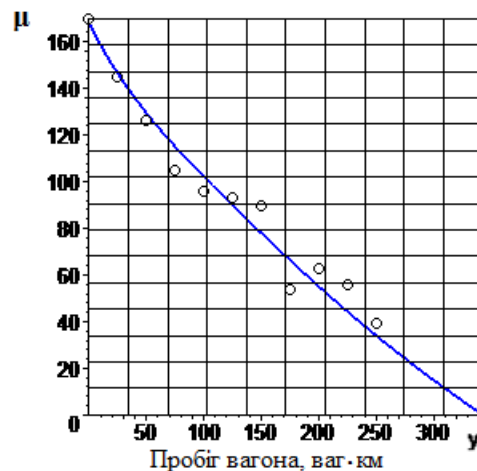
*a – a**б – б*

Рис. 10. Графіки емпіричної та теоретичної оцінки середнього залишкового пробігу вагона з урахуванням зносу гальмової колодки зверху (*a*) і знизу (*б*)

Fig. 10. Graphs of empirical and theoretical estimation of average residual run of the car taking into account wear of a brake pad at the top (*a*) and bottom (*b*)

### Результати

Запропонована модель (1) зносу колодок вагонів та отримані результати дозволяють розв'язувати необхідні практичні задачі. Використання ресурсних характеристик дає можливість прогнозувати основні показники експлуатації вагонів. Наведемо деякі приклади.

Виконані розрахунки показали, що верхній поріг пробігу вагона до повного зносу гальмової колодки зверху дорівнює 331,88 тис. км, а знизу – 343,04 тис. км.

За пробігу вагона 225 тис. км знос колодки зверху склав 74,91 %, а за пробігу вагона 250 тис. км знос гальмової колодки знизу склав 80,74 %.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Значення інтенсивності пробігу вагона для величини 250 тис. км за верхнього зносу гальмової колодки складе  $\lambda = 0,02042$ , а для нижнього зносу гальмової колодки –  $\lambda = 0,01758$ .

Маючи функцію розподілу  $F(x) = P(X < x)$  та оцінки її параметрів, можна визначити таку характеристику, як імовірність зносу колодки в точці  $x_0 - F(x_0)$  і ймовірність, коли колодка не зношується в цій точці  $Q(x_0) = 1 - F(x_0)$ . Так, наприклад, імовірність зносу зверху гальмових колодок складе  $F(20) = 0,2681$ ;  $F(30) = 0,4696$  і  $F(40) = 0,6705$ , а знизу колодок  $F(20) = 0,2637$ ;  $F(30) = 0,4655$  і  $F(40) = 0,6672$ .

Іншою істотною характеристикою може бути  $\gamma$ -відсотковий знос, який визначають за формулою  $F(x_\gamma) = \gamma / 100$  %. Так, наприклад, для верхнього зносу гальмової колодки маємо, що за  $\gamma = 95$  %  $x_\gamma = 56,7926$ , а за  $\gamma = 90$  %  $x_\gamma = 52,9284$ . Для нижнього зносу гальмової колодки за  $\gamma = 95$  %  $x_\gamma = 56,8531$ , а за  $\gamma = 90$  %  $x_\gamma = 53,0165$ .

### Наукова новизна та практична значимість

Уперше для колодок гальмових систем вантажних вагонів із модернізованими пристроями визначено функціональну залежність їх зносу від пробігу вагонів по мережі АТ «Укрзалізниця». На підставі отриманої залежності розроблено статистичну модель зносу колодок з урахуванням можливостей їх використання до повного вичерпання ресурсу. Також знайдено функцію розподілу пробігу вантажних вагонів з урахуванням зносу колодки, за рахунок якої визначають відсоток зносу за заданого пробігу.

Результати, отримані в роботі, можна враховувати для розв'язання технічних проблем ненормативного зносу колодок у гальмових системах візків і збільшення міжремонтних періодів експлуатації вантажних вагонів.

### Висновки

1. Проведено комплексні експериментальні дослідження в експлуатаційному вантажному вагонному депо Основа під час технічного об-

слуговування (ТО) вагонів у парках сортувальної станції. Упродовж кожного обігу дослідних вантажних вагонів із модернізованою ГВП було виконано вимірювання гальмових колодок за ТО в контрольних точках, починаючи з 2,1 до 197,8 тис. пробігу ваг.км. Під час обстежень гальмових колодок особливу увагу звертали на технічну справність модернізованих пристроїв рівномірного відведення колодок – стан криволінійного напрямного стрижня й зазори за всією довжиною колодки. Усі результати вимірювань занесли до задалегідь розробленої відомості, після чого вони були перенесені в комп'ютерну базу даних для досліджень можливості збільшення міжремонтних періодів експлуатації вантажних вагонів шляхом прогнозування залишкового ресурсу колодок у гальмових системах візків із модернізованими пристроями.

2. Виконано конструктивний аналіз елементів типової ГВП візка, що віддзеркалює утворення ненормативного зносу гальмових колодок вантажних вагонів. Напрацьовано передумови для її модернізації.

3. Запропоновано ймовірнісно-статистичну модель зносу гальмових колодок вагонів, проведено дослідження зносу для верху й низу гальмових колодок вантажних вагонів із модернізованими пристроями за показником товщини колодки для оцінки параметрів моделі.

4. Отримано функцію розподілу зносу верхньої та нижньої частини колодки, за допомогою якої можливе розв'язування практичних задач для різних частин гальмової колодки (імовірність зносу колодок за заданого зносу;  $\gamma$ -відсотковий знос колодки;  $\lambda$ -характеристика зносу та середній залишковий знос для відповідного значення зносу).

5. Визначено апроксимуючу залежність зносу й величини пробігів вантажних вагонів із модернізованими пристроями, також знайдено залежності величин пробігів вагонів з урахуванням повного зносу колодки.

6. Установлено, що середній залишковий знос за наявним зносом верху колодки 40 мм дорівнює 9,5118 мм, а для низу колодки – 9,5262 мм. Середній залишковий пробіг вагона за умови, що він пройшов відстань 200 тис. км до отриманого зносу у верхній частині гальмової колодки, склав  $\mu = 50,39876$  тис. км,

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

а в нижній частині гальмової колодки  $\mu = 55,12564$  тис. км.

7. Результати, отримані в роботі, можна брати до уваги під час розв'язання складних проблем-

них задач, які пов'язані з ненормативним зносом гальмових колодок і збільшенням міжремонтних періодів рухомого складу залізниць.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Аналіз стану безпеки руху в структурі АТ «Укрзалізниця» у 2019 році.* Акціонерне товариство «Українська залізниця» Департамент безпеки руху. Київ, 2019. 198 с.
2. Бакарджиев Р. О., Комаров А. О. Попередня оцінка і обробка даних при регресійному аналізі. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація.* 2015. № 28. С. 255–260.
3. Гмурман В. Е. *Теория вероятностей и математическая статистика* : учебное пособие для вузов. Москва : Высшая школа, 2003. 479 с.
4. Гребенникова И. В. *Методы математической обработки экспериментальных данных*: учебно-метод. пособие. Екатеринбург : Уральский университет. 2015. 124 с.
5. Жаров И. А., Макас А. А. Методы статистической обработки результатов измерения тормозных путей при оценке эффективности тормозных средств подвижного состава. *Вестник ВНИИЖТ.* 2009. № 5. С. 29–33.
6. *Інструкція з експлуатації гальм рухомого складу на залізницях України: ЦТ-ЦВ-ЦЛ-0015.* [Чинний від 1997-10-28 № 264-Ц]. Київ : ТОВ НВП «Поліграфсервіс», 2004. 146 с.
7. Коптовец А. Н. Идентификация состояния тормоза шахтных локомотивов в условиях структурной неопределенности. *Геотехническая механика.* 2014. № 119. С. 241–246.
8. Коропець П. А., Черніков В. Д., Костюкевич А. І. Про нерівномірний знос рухомих фрикційних пар. *Вісник СНУ ім. Даля.* 2010. № 5 (147). С. 41–45.
9. Ламнауэр Н. Ю. Метод сборки деталей машин, обеспечивающий точность соединения. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* 2014. Вып. 6, № 7 (72). С. 45–49. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.29321>
10. Ловська А. О. Особливості комп'ютерного моделювання навантаженості контейнера з пружно-в'язкими зв'язками у фітінгах при експлуатаційних режимах. *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій* : Серія «Транспортні системи і технології». 2019. Вип. 33. Т. 2. С. 28–37. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-33-2-3>
11. Павлюков А. Э., Черепов О. В., Шалупина И. П. Тормозные колодки грузовых вагонов: анализ повреждаемости и факторов, влияющих на создание тормозной силы. *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения.* 2017. № 4 (36). DOI: <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2017-4-4-11>
12. *Підсилюючий пристрій до паралельного відведення колодок від коліс у гальмівній системі візків вантажних вагонів*: пат. 121889 Україна: МПК51 В60Т 1/02 (2006.01), В61Н 15/00, В61Н 13/00; заявл. 24.04.17; опубл. 26.12.17, Бюл. № 24. 12 с.
13. Равлюк В. Г. Дослідження особливостей дуального зносу колодок у гальмовій системі вантажних вагонів. *Наука та прогрес транспорту.* 2019. № 2 (80). С. 111–126. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/166114>
14. Равлюк В. Г., Равлюк М. Г., Кириченко І. К. Статистичне опрацювання параметрів зносу гальмових колодок вантажних вагонів. *Наука та прогрес транспорту.* 2020. № 2 (86). С. 74–91. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/203103>
15. Тулузин С. В., Горский Д. В. Оценка работоспособности тормозной рычажной передачи тележки грузового вагона на различных стадиях износа колодок и колес. *Вестник ВНИИЖТ.* 2015. № 2. С. 38–44.
16. Gorobchenko O., Tkachenko V. Statistical analysis of locomotiv extraction motors performance. *MATEC Web of Conferences.* 2019. Vol. 287. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928704002>
17. Leng L., Zhu W. Compound Regression and Constrained Regression : Nonparametric Regression Frameworks for EIV Models. *The American Statistician.* 2019. Vol. 74. Iss. 3. P. 226–232. DOI: <https://doi.org/10.1080/00031305.2018.1556734>
18. Ravlyuk V., Elyazov I., Afanasenko I., Ravliuk M. Determination of forces in the elements of the brake rigging of bogies of freight cars. *E3S Web of Conferences.* 2020. Vol. 166. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016607003>

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

19. Sarma K. V. S., Vardhan R. V. *Multivariate Statistics Made Simple. A Practical Approach*. New York, 2018. 258 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429465185>
20. Sharma B. Processing of data and analysis. *Biostatistics and Epidemiology International Journal*. 2018. Vol. 1. Iss. 1. P. 3–5. DOI: <https://doi.org/10.30881/beij.00003>
21. Sinitsyn V. V., Kobishchanov V. V. Braking system for bogie successive braking of freight cars. *Bulletin of the Bryansk State Technical University*. 2020. Vol. 2020. Iss. 3. P. 21–28. DOI: <https://doi.org/10.30987/1999-8775-2020-3-21-28>
22. Thrane C. *Applied Regression Analysis. Doing, Interpreting and Reporting*. London, 2019. 202 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780429443756>
23. Vakkalagadda M. R. K., Srivastava D. K., Mishra A., Racherla V. Performance analyses of brake blocks used by Indian Railways. *Wear*. 2015. Vol. 328–329. P. 64–76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.044>
24. Vineesh K. P., Vakkalagadda M. R. K., Tripathi A. K., Mishra A., Racherla V. Non-uniformity in braking in coaching and freight stock in Indian Railways and associated causes. *Engineering Failure Analysis*. 2016. Vol. 59. P. 493–508. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.11.023>
25. Zhang Y., Zhang M. The application status of unit brakes on metro vehicles in China. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*. 2018. Vol. 3 (15). P. 17–23.

В. Г. РАВЛЮК<sup>1</sup>, М. Г. РАВЛЮК<sup>2</sup>, І. К. КИРИЧЕНКО<sup>3</sup>, Н. Ю. ЛАМНАУЕР<sup>4</sup>,  
А. К. МЕЛЬНИЧУК<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Вагоны», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61500, тел. +38 (057) 730 10 35, эл. почта ravvg@ukr.net, ORCID 0000-0003-4818-9482

<sup>2</sup>Каф. «Вагоны», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61500, тел. +38 (057) 730 10 35, эл. почта ravmg@ukr.net, ORCID0000-0002-6021-660X

<sup>3</sup>Каф. «Физико-математические дисциплины», Национальный университет гражданской защиты Украины, ул. Чернышевская, 94, Харьков, Украина, 61023, тел. +38 (095) 487 02 38, эл. почта ikir238@gmail.com, ORCID 0000-0001-7375-8275

<sup>4</sup>Каф. «Охрана труда, стандартизация и сертификация», Украинская инженерно-педагогическая академия, ул. Университетская, 16, Харьков, Украина, 61003, тел. + 38 (093) 149 39 17, эл. почта lamnaouernatali@gmail.com, ORCID 0000-0002-6779-8761

<sup>5</sup>Каф. «Вагоны», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61500, тел. +38 (057) 730 10 35, эл. почта melnichuknastyia417@gmail.com, ORCID 0000-0003-3815-5617

## ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗНОСА ТОРМОЗНЫХ КОЛОДОК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

**Цель.** Это исследование направлено на применение линейных моделей для определения износа тормозных колодок грузовых вагонов в верхней и нижней части с целью дальнейшего их использования при решении подобных практических задач. **Методика.** В качестве рабочей методики использован известный подход контролирования линейных изменений износа параметров колодок в зависимости от пробега грузовых вагонов по сети АО «Укрзалізниця» с модернизированными тормозными рычажными передачами в реальных условиях эксплуатации. На основании полученных статистических данных в условиях эксплуатации последовательно определены значения соответствующих показателей регрессионного анализа износа колодок в конкретных точках, рекомендованных нормативными документами при выполнении технического обслуживания в эксплуатационных подразделениях вагонного хозяйства для тормозных систем грузовых вагонов. **Результаты.** Построена вероятностно-статистическая модель износа тормозных колодок на основании экспериментальных данных, собранных в соответствующих парках сортировочной станции в процессе эксплуатации грузовых вагонов. Предложена функция распределения износа для верхней и нижней части колодки, с помощью которой можно решать практические задачи. Также для различных частей тормозной колодки найдено ее  $\gamma$ -процентный и средний остаточный износ. **Научная новизна.** Впервые для колодок тормозных систем грузовых вагонов с модернизированными устройствами определены функциональные зависимости их износа в зависимости от пробега вагонов по сети АО «Укрзалізниця». На основании полученных зависимостей разработана статистическая модель износа колодок с учетом возможностей их использования до полного исчерпания ресурса. Также определена функция распределения пробега грузовых вагонов с учетом износа колодки, с помощью которой устанавливают процент износа при заданном пробеге.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

**Практическая значимость.** Результаты, полученные в работе, можно учитывать для решения технических проблем ненормативного износа колодок в тормозных системах тележек и увеличения межремонтных периодов эксплуатации грузовых вагонов.

*Ключевые слова:* тормозная колодка; износ; тормозная рычажная передача (ТРП); грузовой вагон; анализ; модель; статистические исследования; параметр

V. H. RAVLIUK<sup>1</sup>, M. H. RAVLIUK<sup>2</sup>, I. K. KYRYCHENKO<sup>3</sup>, N. Y. LAMNAUER<sup>4</sup>,  
A. K. MELNYCHUK<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Dep. «Cars», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61500, tel. +38 (057) 730 10 35, e-mail ravvg@ukr.net, ORCID 0000-0003-4818-9482

<sup>2</sup>Dep. «Cars», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61500, tel. +38 (057) 730 10 35, e-mail ravmg@ukr.net, ORCID0000-0002-6021-660X

<sup>3</sup>Dep. «Physical and Mathematical Sciences», National University of Civil Defence of Ukraine, Chernyshevskaya St., 94, Kharkiv, Ukraine, 61023, tel. +38 (095) 4870238, e-mail ikir238@gmail.com, ORCID 0000-0001-7375-8275

<sup>4</sup>Dep. «Occupational Safety, Standardization and Certification», Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy, Universitetska St., 16, Kharkiv, Ukraine, 61003, tel. + 38 (093) 1493917, e-mail lamnaouernatali@gmail.com, ORCID 0000-0002-6779-8761

<sup>5</sup>Dep. «Cars», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61500, tel. +38 (057) 730 10 35, e-mail melnichuknastya417@gmail.com, ORCID 0000-0003-3815-5617

## PROBABILITY AND STATISTICAL MODEL OF WEARING OF BRAKE PADS OF FREIGHT CARS

**Purpose.** This study aims to use linear models to determine the wear of brake pads of freight cars at the top and bottom for further use in solving similar practical problems. **Methodology.** As a working technique the known approach for controlling linear wear changes of pad parameters depending on freight cars run on a network of Ukrzaliznytsia JSC with the modernized brake levers in real operating conditions is used. Based on the obtained statistical data in the operating conditions, we the consistently found values of the corresponding regression analysis indicators for pad wear at specific points, which are recommended by regulatory documents when performing maintenance in operational units of car facilities for brake systems of freight cars. **Findings.** A probabilistic-statistical model of brake pad wear is constructed on the basis of experimental data collected in the respective parks of the sorting station during the operation of freight cars. The function of wear distribution for the top and bottom part of a pad by means of which the decision of practical problems is possible is offered. Also for different parts of the brake pad found its  $\gamma$ -percentage and average residual wear. **Originality.** For the first time for the brake pads of freight cars with modernized devices, the functional dependence of their wear depending on the run of cars on the network of Ukrzaliznytsia JSC was determined. Based on the received dependence the statistical model of pad wear taking into account possibilities of their use before full resource exhaustion is developed. The function of distribution of run of freight cars taking into account pad wear due to which the wear percent at the set run is also defined. **Practical value.** The results obtained in the work will be taken into account in the future to solve technical problems related to non-standard wear of pads in the brake systems of bogies and increase the service life of freight cars.

*Keywords:* brake pad; wear; brake rigging; freight car; analysis; model; statistical research; parameter

### REFERENCES

1. *Analiz stanu bezpeki rukhu v strukturi AT «Ukrzaliznytsya» u 2019 rotsi.* Aktsionerne tovaristvo «Ukrainska zaliznytsya» Departament bezpeki rukhu. (2019). Kyiv. (in Ukrainian)
2. Bakardzhyiev, R. O., & Komarov, A. O. (2015). Preliminary assessment and data processing in regression analysis. Collected Works of Kirovohrad National Technical University. *Machinery in agricultural production, industry machine building, automation*, 28, 255-260. (in Ukrainian)
3. Gmurman, V. Ye. (2003). *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika: uchebnoe posobie dlya vuzov.* Moscow: Vysshaya shkola. (in Russian)
4. Grebennikova, I. V. (2015). *Metody matematiches koyobra botkieksper imentalny khdannyykh: uchebno-metodicheskoe posobie.* Yekaterinburg: Uralski yuniversitet. (in Russian)

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

5. Zharov, A., & Makas, A. (2009). Methods of statistical processing results of brake distance measurement when evaluating efficiency of rolling stock brake systems. *Vestnik VNIIZHT*, 5, 29-33. (in Russian)
6. *Instruktsiia z ekspluatatsii ihalmruk homohos kladun azaliznytsiakh Ukrainy: TsT-TsV-TsL-0015, No. 264-Ts.* (2004). Kyiv. (in Ukrainian)
7. Koptovec, A. N. (2014). Identification of mine locomotive brake state in terms of structural uncertainty. *Geo-Technical Mechanics*, 119, 241-246. (in Russian)
8. Koropets, P. A., Chernikov, V. D., & Kostiukevych, A. I. (2010). Pro neriv nomirnyi znosruk homy khfryktsiinykh par. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian national university*, 5(147), 41-45. (in Ukrainian)
9. Lamnauer, N. Y. (2014). Machine parts assembly method, which provides connection accuracy. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(7(72)), 45-49.  
DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.29321> (in Russian)
10. Lovska, A. O. (2019). Features of the computer modeling of loading of container with elastic-related connections in the fittings in operating modes. *Transport Systems and Technologies: Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technologies*, 33(2), 28-37.  
DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-33-2-3> (in Ukrainian)
11. Pavlyukov, A. E., Cherepov, O. V., & Shalupina, I. P. (2017). Brake shoe of freight wagon: analysis of damage and factors affecting the brake power. *Herald of the Ural State University of Railway Transport*, 4(36), 4-11. DOI: <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2017-4-4-11> (in Russian)
12. Ravlyuk, V. G., & Nechvoloda, S. I. (2017). *UA Patent № 121889 Ukrainyskyi instytut intelektual noivlasnosti* (Ukrpatent). (in Ukrainian)
13. Ravlyuk, V. G. (2019). Investigation of features of dual wear of pads in brake system of freight cars. *Science and Transport Progress*, 2(80), 111-126. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/166114> (in Ukrainian)
14. Ravlyuk, V. G., Ravlyuk, M. G., & Kirichenko, I. K. (2020). Statistical processing of brake pads wear parameters of freight cars. *Science and Transport Progress*, 2(86), 74-91.  
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/203103> (in Ukrainian)
15. Tuluzin, S. V., & Gorskiy, D. V. (2015). Performance evaluation of bogie brake rigging in a freight car at various stages of brake blocks and wheels wear. *Vestnik VNIIZhTa*, 2, 38-44. (in Russian)
16. Gorobchenko, O., & Tkachenko, V. (2019). Statistical analysis of locomotives traction motors performance. *MATEC Web of Conferences*, 287, 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928704002> (in English)
17. Leng, L., & Zhu, W. (2019). Compound Regression and Constrained Regression: Nonparametric Regression Frameworks for EIV Models. *The American Statistician*, 74(3), 226-232.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/00031305.2018.1556734> (in English)
18. Ravlyuk, V., Elyazov, I., Afanasenko, I., & Ravliuk, M. (2020). Determination of parameters of abnormal wear of brake pads of freight cars. *E3S Web of Conferences*, 166, 1-7.  
DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016607003> (in English)
19. Sarma, K. V. S., & Vardhan, R. V. (2018). *Multivariate Statistics Made Simple. A Practical Approach*. New York. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429465185> (in English)
20. Sharma, B. (2018). Processing of data and analysis. *Biostatistics and Epidemiology International Journal*, 1(1), 3-5. DOI: <https://doi.org/10.30881/beij.00003> (in English)
21. Sinitsyn, V. V., Kobishchanov, V. V. (2020). Braking system for bogie successive braking of freight cars. *Bulletin of the Bryansk State Technical University*, 2020(3), 21-28.  
DOI: <https://doi.org/10.30987/1999-8775-2020-3-21-28> (in Russian)
22. Thrane, C. (2019). *Applied Regression Analysis. Doing, Interpreting and Reporting*. London.  
DOI: <https://doi.org/10.4324/9780429443756> (in English)
23. Vakkalagadda, M. R. K., Srivastava, D. K., Mishra, A., & Racherla, V. (2015). Performance analyses of brake blocks used by Indian Railways. *Wear*, 328-329, 64-76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.044> (in English)
24. Vineesh, K. P., Vakkalagadda, M. R. K., Tripathi, A. K., Mishra, A., & Racherla, V. (2016). Non-uniformity in braking in coaching and freight stock in Indian Railways and associated causes. *Engineering Failure Analysis*, 59, 493-508. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.11.023> (in English)
25. Zhang, Y., & Zhang, M. (2018). The application status of unit brakes on metro vehicles in China. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 3(15), 17-23. (in English)

Надійшла до редколегії: 22.05.2020

Прийнята до друку: 25.09.2020

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.488.27:629.4.027.4

С. В. РАКША<sup>1</sup>, П. Г. АНОФРІЄВ<sup>2</sup>, О. С. КУРОП'ЯТНИК<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Прикладна механіка та матеріалознавство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 18, ел. пошта raksha@ukr.net, ORCID 0000-0002-4118-1341

<sup>2</sup>Каф. «Прикладна механіка та матеріалознавство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 18, ел. пошта anofrievp@ukr.net, ORCID 0000-0001-7997-3523

<sup>3\*</sup>Каф. «Прикладна механіка та матеріалознавство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 18, ел. пошта kuropatnick@gmail.com, ORCID 0000-0001-5581-3883

## ВИЗНАЧЕННЯ ТА АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СТЕНДА ДЛЯ КОМПЛЕКСНИХ ВИПРОБУВАНЬ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС

**Мета.** Основною метою роботи є визначення та аналіз технічних параметрів стенда для комплексних випробувань залізничних коліс, у якому передбачено сумістити випробування на втомну та контактну міцність, їх одночасне виконання на одному стенді. **Методика.** Визначення технічних параметрів стенда для проведення комплексних випробувань виконано на основі зіставлення характеристик випробувань на втомну та контактну міцність залізничних коліс. Вимоги до випробувань на втомну міцність та до відповідного обладнання встановлено на основі аналізу чинної нормативної бази та огляду патентів. За базову модель для розробки стенда для комплексних випробувань було взято модель стенда для випробувань на контактну міцність із внесенням необхідних змін з метою забезпечення циклічності прикладання робочого навантаження. Як критерій можливості комплексних випробувань, які передбачають одночасне проведення випробувань залізничних коліс на втомну та контактну міцність, було взято залежність діаметра ролика стенда від параметрів випробовуваного колеса, осевого навантаження колісної пари, до складу якої входить випробовуване колесо, та межі витривалості матеріалу колеса. **Результати.** Аналіз отриманої залежності показав, що діаметр ролика як функція навантаження в зоні контакту пари «колесо – ролик» має розрив другого роду на ділянці зміни цього навантаження від мінімального до максимального значення. Аналітичну залежність було представлено та проаналізовано також у графічному вигляді. Узагальнення отриманих результатів дозволило зробити висновок про те, що проведення комплексних випробувань залізничних коліс, які передбачають суміщення випробувань на втомну міцність із випробуваннями на контактну міцність за умови їх одночасності на одному стенді, є неможливим. **Наукова новизна.** У запропонованій схемі стенда для комплексних випробувань залізничних коліс уперше отримано залежність, яка пов'язує параметри випробовуваного колеса, параметри стенда, осьове навантаження колісної пари та межі витривалості матеріалу колеса. **Практична значимість.** Отримані результати можуть бути використані як підґрунтя для розробки нових схем стендів для випробувань залізничних коліс.

*Ключові слова:* залізничне колесо; випробування; випробувальний стенд; втомна міцність; контактна міцність; комплексні випробування

### Вступ

Одним з основних параметрів залізничного колеса є його ресурс, який визначає допустиму міжремонтну тривалість використання як самого колеса, так і колісної пари в цілому. Тому розробка стендового обладнання, що дозволяє в лабораторних умовах відтворювати або імітувати реальні умови навантаження колісної пари з метою проведення ресурсних випробувань, є актуальною науково-практичною задачею.

Серед видів стендових випробувань, які регламентовано до проведення чинною нормативною базою [2–5], до ресурсних можна віднести випробування на втомну міцність залізничних коліс та осей колісних пар. Такі випробування передбачають дослідження роботи деталей колісних пар (КП) в умовах циклічного навантаження за режимами, що визначені чинними стандартами та окремо розробленими методиками.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Існує багато напрацювань щодо випробувань на втомну міцність осей, як вітчизняних, так і закордонних дослідників [13, 16, 17].

Питанням міцності та взаємодії елементів пари «колесо – рейка» присвячено ряд публікацій [6, 11, 12, 14].

Додатковими факторами, які визначають ресурс залізничних коліс, є напрацювання за контактною міцністю та зношенням окремих поверхонь колеса (поверхня кочення, реборда). Стендових випробувань з врахуванням впливу цих факторів чинними нормативними документами не передбачено. Однак існують дослідження [1], які вказують на доцільність проведення таких випробувань.

Для зменшення тривалості загальної процедури з визначення ресурсу коліс доцільним є максимально можливе суміщення різних видів випробувань, їх одночасне виконання з використанням одного тестового зразка (залізничного колеса).

### Мета

Основною метою роботи є визначення та аналіз технічних параметрів стенда для комплексних випробувань залізничних коліс, у якому передбачено сумістити випробування на втомну та контактну міцність, їх одночасне виконання на одному стенді.

### Методика

Із розробки стендів для випробувань залізничних коліс на втомну міцність автори цієї роботи мають певний досвід [7]. Аналогічні розробки проводили й інші співробітники Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (ДНУЗТ), а також члени міжнародної наукової спільноти [8, 9]. У цих стендах реалізовано прикладання циклічного навантаження до різних поверхонь залізничного колеса (поверхня кочення, реборда), а тривалість випробувань визначає кількість циклів навантаження.

Випробування на контактну міцність передбачають створення в зоні контакту зусилля, що є еквівалентним до контактного зусилля, яке виникає в реальних умовах експлуатації коліс. Роботи в цьому напрямі пропонують замінювати одну з деталей пари контакту «колесо – рей-

ка» (рейку [15]) або й обидві деталі [1] на ролики та встановлювати умови навантаження, наближені до реальних.

*Аналіз вимог до випробувань та стендового обладнання.* Розглянемо нормативні документи, які визначають вимоги до проведення стендових випробувань на втомну міцність.

Міждержавним стандартом [2] встановлено вимоги та характеристики до випробувань коліс, які використовують у колісних парах вантажних та пасажирських вагонів локомотивної тяги, пасажирських, вантажних та маневрових локомотивів, моторних і немоторних колісних парах електро- та дизель-поїздів, спеціального залізничного рухомого складу:

- межа витривалості ( $F_r$ ) – максимальне зусилля в зоні контакту, яке здатне сприймати колесо впродовж встановленого терміну, залежить від осьового навантаження колісної пари (наприклад, для КП з осьовим навантаженням до 230,5 кН межа витривалості  $F_r = 400$  кН);
- база випробувань – 5 млн циклів;
- навантаження асиметричне з коефіцієнтом асиметрії 0,1;
- навантаження прикладають до обох коліс.

Методика випробувань [10] дублює стандарт [2] щодо межі витривалості, бази випробувань та характеру навантаження, однак вказує на необхідність його прикладання до реборди. Крім цього, встановлено значення частоти зміни циклічного навантаження – 300...600 циклів за хвилину (5...10 Гц).

Оскільки міждержавний стандарт має вищу нормативну силу, ніж методика, вважаємо, що навантаження слід прикладати до обох коліс; це також відповідає реальним умовам експлуатації колісної пари.

Міждержавний стандарт [5] стосується вагонів магістральних залізниць. Він встановлює необхідність проведення випробувань коліс на втомну міцність шляхом реалізації знакозмінного згинання під дією кругового згинального моменту на базі 20 млн циклів.

Щодо коліс у складі колісних пар локомотивів і моторвагонного рухомого складу, у міждержавному стандарті [4] визначено проведення випробувань на втомну міцність у вигляді кругового згинання під дією асиметричного навантаження (його знакозмінність та коефіцієнт асиметрії не

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

нормована), а межа витривалості вказана на рівні 125 МПа (залежить від конструкції коліс).

Узагальнюючи ці вимоги, доходимо таких висновків:

– стенд для комплексних випробувань залізничних коліс має забезпечувати навантаження на колесо, яке змінюється в діапазоні від  $0,1F_{\max}$  до  $F_{\max}$ , де  $F_{\max} = F_r$  – межа витривалості колеса за [2], яка залежить від осьового навантаження колісної пари;

– база випробувань – 5 млн циклів;

– частота зміни циклічного навантаження – 300...600 циклів за хвилину (5...10 Гц);

– циклічне навантаження прикладають до обода колеса.

Як базу розробки стенда для комплексних випробувань залізничних коліс візьмемо стенд для ресурсних випробувань залізничних колісних пар [15], схему якого наведено на рис. 1.

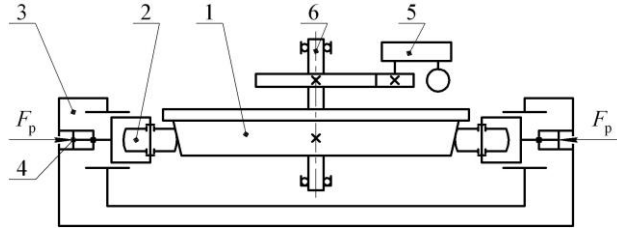


Рис. 1. Схема стенда для випробувань на контактну міцність:

1 – випробовуване колесо; 2 – ролик; 3 – рама;  
4 – навантажувальний пристрій; 5 – привід стенда;  
6 – вісь колеса ( $F_p$  – робоче зусилля стенда)

Fig. 1. The scheme of the stand for tests for contact strength:

1 – tested wheel; 2 – roller; 3 – frame;  
4 – loading device;  
5 – stand drive; 6 – wheel axle  
( $F_p$  – working effort of the stand)

У цьому стенді ролик 2 імітує рейку, а навантажувальний пристрій 4 з робочим зусиллям  $F_p$  створює силу в зоні контакту пари «колесо – ролик», еквівалентну до сили в зоні контакту пари «колесо – рейка» за реальних умов експлуатації колісної пари. При цьому колесо 1 контактує одночасно з кількома роликами (щонайменше – трьома); це забезпечує можливість проведення прискорених випробувань. Для забезпечення відповідності умов стендових випробувань реальним умовам експлуатації колісної пари параметри стенда за рис. 1 було визначено таким чином, щоб максимальний контактний тиск у парі «колесо – ролик»

дорівнював максимальному контактному тиску в парі «колесо – рейка».

*Встановлення можливості проведення комплексних випробувань.* Оскільки стенд для комплексних випробувань залізничних коліс має здійснювати одночасно випробування на втомну та контактну міцність, формуємо вимоги до величини робочого зусилля стенда ( $F_p$ ) у такому вигляді:

– зусилля  $F_p$  повинно мати пульсуючий характер і забезпечувати зміну навантаження на колесо в діапазоні від  $0,1F_{\max}$  до  $F_{\max}$  (випробування на втомну міцність);

– частота зміни зусилля  $F_p$  – від 300 до 600 циклів за хвилину (випробування на втомну міцність);

– величина  $F_{\max}$  має відповідати осьовому навантаженню колісної пари, колесо якої випробовують (випробування на втомну міцність);

– зусилля  $F_p$  має забезпечувати адекватність умов проведення стендових випробувань (відповідність реальним умовам навантаження).

Остання вимога до величини робочого зусилля може бути забезпечена в разі дотримання рівності

$$F_p = 0,5F \left( 1 + \frac{D_k}{d_p} \right)^{-1}, \quad (1)$$

де  $F$  – осьове навантаження колісної пари;  
 $D_k$  – діаметр колеса по колу кочення;  $d_p$  – діаметр ролика.

Залежність величини  $F_{\max}$  від осьового навантаження  $F$  вказана у стандарті [2] (табл. 1).

Таблиця 1

**Залежність межі витривалості колеса від осьового навантаження колісної пари**

Table 1

**Dependence of the endurance limit of the wheel on the axial load of the wheel pair**

F, кН	Fmax, кН
230,5	400
245,3	450
264,9	510
294,3	600

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Зважаючи на те, що сила  $F_{\max}$  діє уздовж спільної нормалі до контактуючих поверхонь пари «колесо – ролик» (рис. 2), беремо

$$F_p = \frac{F_{\max}}{\cos\beta}, \quad (2)$$

де  $\beta$  – ухил поверхні кочення ( $\beta = 2,86^\circ$  відповідає конусності 1:10, вказаній у стандарті [2]).

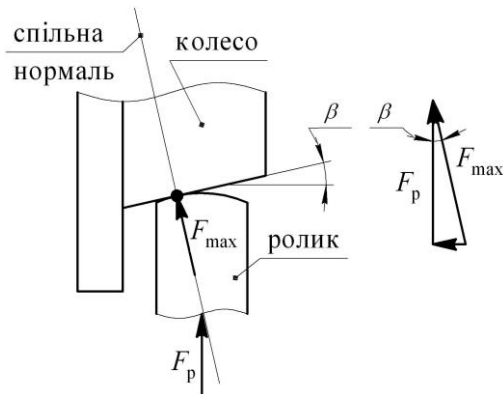


Рис. 2. Схема дії сил у парі «колесо – ролик»

Fig. 2. Scheme of force action in the «wheel – roller» pair

Поєднуючи умови (1) і (2), маємо:

$$\frac{F_{\max}}{\cos\beta} = 0,5F \left( 1 + \frac{D_k}{d_p} \right)^{-1}. \quad (3)$$

Таким чином, отримано залежність, яка пов'язує параметри випробовуваного колеса ( $D_k$ ,  $\beta$ ), параметри стенда ( $d_p$ ), осьове навантаження колісної пари ( $F$ ) та межу витривалості матеріалу колеса ( $F_{\max}$ ).

Із виразу (3) випливає, що діаметр ролика може бути визначено за формулою

$$d_p = D_k \left( \frac{0,5F \cos\beta}{F_{\max}} - 1 \right)^{-1}. \quad (4)$$

### Результати

Попередній аналіз залежності (4) вказує на те, що функція  $d_p(F_{\max})$  має розрив другого роду. Визначимо, чи припадає він на ділянку зміни аргументу від  $0,1F_{\max}$  до  $F_{\max}$ .

Аналіз даних, наведених у стандарті [2], показав, що діаметр колеса ( $D_k$ ) не залежить від осьового навантаження колісної пари ( $F$ ).

Для виконання розрахунків візьмемо такі значення параметрів колеса [2]:  $D_k = 957$  мм;  $\beta = 2,86^\circ$ . Сполучення осьового навантаження колісної пари ( $F$ ) та межі витривалості ( $F_{\max}$ ) беремо за табл. 1.

Залежність  $d_p(F_{\max})$  для кожного зі сполучень розрахункових даних наведена на рис. 3 як сполучення кривих.

Із графіка на рис. 3 видно, що розрив другого роду функції  $d_p(F_{\max})$  припадає на інтервал зміни зусилля в зоні контакту пари «колесо – рейка» від  $0,1F_{\max}$  до  $F_{\max}$  (на осі абсцис показано інтервал 40...400 кН для першого сполучення сил за табл. 1).

### Наукова новизна та практична значимість

У запропонованій схемі стенда для комплексних випробувань залізничних коліс уперше отримано залежність, яка пов'язує параметри випробовуваного колеса, параметри стенда, осьове навантаження колісної пари та межу витривалості матеріалу колеса.

Отримані результати можуть бути використані як підґрунтя для розробки нових схем стендів для випробувань залізничних коліс.

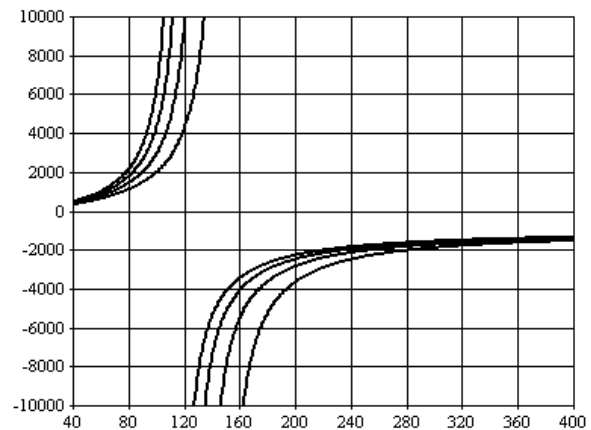


Рис. 3. Графік залежності  $d_p(F_{\max})$

Fig. 3. Graph of  $d_p(F_{\max})$  dependence

### Висновки

У ході виконання досліджень було визначено параметри стенда (діаметр ролика та робоче зусилля стенда), установлено залежність, яка пов'язує параметри випробовуваного колеса,

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

параметри станда, осьове навантаження колісної пари та межу витривалості матеріалу колеса.

Зважаючи на отримані результати, доходимо висновку, що проведення комплексних випробувань залізничних коліс, які передбачають

суміщення випробувань на втомну міцність із випробуваннями на контактну міцність, та одночасність їх проведення на одному стенді є неможливим.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Воробьев А. А. *Прогнозирование ресурса и совершенствование технологии ремонта колес железнодорожного подвижного состава* : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург, 2018. 32 с.
2. *ГОСТ 10791-2011. Колеса цельнокатаные. Технические условия*. [Действующий от 2012-01-01]. Москва, 2011. 27 с.
3. *ГОСТ 11018-2011. Колесные пары тягового подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия*. [Действующий от 2013-01-01]. Москва, 2012. 26 с.
4. *ГОСТ 31373-2008. Колесные пары локомотивов и моторвагонного подвижного состава. Расчеты и испытания на прочность*. [Действующий от 2009-09-01]. Москва, 2008. 11 с.
5. *ГОСТ 4835-2013. Колесные пары железнодорожных вагонов. Технические условия*. [Действующий от 2014-07-01]. Москва, 2014. 31 с.
6. Дегтярева Л. Н., Осенин Ю. И., Мямлин С. В. Математическое описание силового взаимодействия колес и рельсов. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2009. № 28. С. 21–24.
7. Ракша С. В., Куроп'ятник О. С. *Стенові випробування колісних пар рейкового транспорту*. Scientific and technical progress in european countries and the contribution of higher education institutions. 2020. С. 192–213. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-65-5.11>
8. *Стенд для випробувань залізничних коліс на втомну міцність*: пат. 136718 Україна; G01M 17/10 (2006.01); заяв. 29.03.2019; опубл. 27.08.2019, Бюл. № 16. 5 с.
9. *Стенд для испытания колес и осей колесных пар на сопротивление усталости*: пат. 2650327 Российская Федерация; G01M 17/10 (2006.01); заяв. 17.03.2017; опубл. 11.04.2018, Бюл. № 11. 11 с.
10. *Стенд для испытания колес и осей колесных пар на сопротивление усталости и способ проведения испытаний*: пат. 2651629 Российская Федерация; G01M 17/10 (2006.01); G01N 3/32 (2006.01); заяв. 06.06.2017; опубл. 23.04.2018, Бюл. № 12. 16 с.
11. *СТ ССФЖТ ТМ 151-2003. Колеса цельнокатаные. Определение предела выносливости диска. Типовая методика испытаний*. [Действующий от 2003-06-27]. Москва, 2003. 7 с.
12. Якунин Д. И., Макаренко Ю. В., Маслиев В. Г. Влияние наклона кузова вагона при движении по кривым участкам пути на взаимодействие колес с рельсами. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2009. № 30. С. 248–251.
13. Bureika G., Subačius R. Mathematical model of dynamic interaction between wheel-set and rail track. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2005. № 8. Р. 39–44.
14. Filippini M., Luke M., Varfolomeev I., Regazzi D., Beretta S. Fatigue strength assessment of railway axles considering small-scale tests and damage calculations. *Procedia Structural Integrity*. 2017. Vol. 4. P. 11–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.07.013>
15. Manashkin L. A., Myamlin S. V. To the question of modeling of wheels and rails wear processes. *Наука та прогрес транспорту*. 2013. № 3(45). Р. 119–124. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2013/14791>
16. Raksha S. V., Anofriev P. G., Kuropiatnyk O. S. Justification of the parameters of the life-test bench for railway wheelsets. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering* (препринт).
17. Raksha S., Anofriev P., Kuropiatnyk O. Simulation modelling of the rolling stock axle test-bench. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 123. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301032>

С. В. РАКША<sup>1</sup>, П. Г. АНОФРИЄВ<sup>2</sup>, А. С. КУРОП'ЯТНИК<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Прикладна механіка і матеріалознавство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 18, ел. пошта raksha@ukr.net, ORCID 0000-0002-4118-1341

<sup>2</sup>Каф. «Прикладна механіка і матеріалознавство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 18, ел. пошта anofrievp@ukr.net, ORCID 0000-0001-7997-3523

<sup>3\*</sup>Каф. «Прикладна механіка і матеріалознавство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 18, ел. пошта kuropyatnick@gmail.com, ORCID 0000-0001-5581-3883

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ И АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТЕНДА ДЛЯ КОМПЛЕКСНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС

**Цель.** Основной целью работы является определение и анализ технических параметров стенда для проведения комплексных испытаний железнодорожных колес, предусматривающих совмещение испытаний на усталостную и контактную прочность, их одновременное выполнение на одном стенде. **Методика.** Определение технических параметров стенда для проведения комплексных испытаний выполнено на основании сопоставления характеристик испытаний на усталостную и контактную прочность железнодорожных колес. Требования к испытаниям на усталостную прочность и к соответствующему оборудованию определены на основании анализа действующей нормативной базы и обзора патентов. В качестве базовой модели для разработки стенда для комплексных испытаний была принята модель стенда для испытаний на контактную прочность с внесением необходимых изменений в части обеспечения цикличности приложения рабочего усилия. Критерием возможности комплексных испытаний, предусматривающих одновременное проведение испытаний железнодорожных колес на усталостную и контактную прочность, была принята зависимость диаметра ролика стенда от параметров испытываемого колеса, осевой нагрузки колесной пары, в состав которой входит испытываемое колесо, и предела выносливости материала колеса. **Результаты.** Анализ полученной зависимости показал, что диаметр ролика как функция нагрузки в зоне контакта пары «колесо – ролик» имеет разрыв второго рода на участке изменения этой нагрузки от минимального до максимального значения. Аналитическая зависимость представлена и проанализирована также в графическом виде. Обобщение полученных результатов позволило сделать вывод о том, что проведение комплексных испытаний железнодорожных колес, предусматривающих совмещение испытаний на усталостную прочность с испытаниями на контактную прочность при условии их одновременности на одном стенде, невозможно. **Научная новизна.** В предложенной схеме стенда для комплексных испытаний железнодорожных колес впервые получена зависимость, связывающая параметры испытываемого колеса, параметры стенда, осевую нагрузку колесной пары и предел выносливости материала колеса. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть использованы в качестве основания для разработки новых схем стендов для испытаний железнодорожных колес.

**Ключевые слова:** железнодорожное колесо; испытания; испытательный стенд; усталостная прочность; контактная прочность; комплексные испытания

S. V. RAKSHA<sup>1</sup>, P. H. ANOFRIIEV<sup>2</sup>, O. S. KUROP'YATNYK<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Dep. «Applied Mechanics and Materials Science», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 18, e-mail raksha@ukr.net, ORCID 0000-0002-4118-1341.

<sup>2</sup>Dep. «Applied Mechanics and Materials Science», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 18, e-mail anofrievp@ukr.net, ORCID 0000-0001-7997-3523.

<sup>3\*</sup>Dep. «Applied Mechanics and Materials Science», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 18, e-mail kuropyatnick@gmail.com, ORCID 0000-0001-5581-3883.

## DETERMINATION AND ANALYSIS OF TECHNICAL PARAMETERS OF THE BENCH FOR RAILWAY WHEELS COMPLEX TESTS

**Purpose.** The purpose of the work is to determine and analyze the technical parameters of the bench for railway wheels complex tests, providing for the combination of fatigue and contact strength tests, their simultaneous performing on same test-bench. **Methodology.** Determination of the technical parameters of the test-bench was carried out based on comparing the characteristics of fatigue and contact strength tests of railway wheels. Requirements for fatigue tests and related equipment are determined based on an analysis of the current regulations and patent review. A model of the contact strength test-bench with the introduction of necessary changes in terms of ensuring the cyclicity of the working effort application was adopted as the basic model for the development of a complex test-bench. The criterion for the possibility of complex tests, involving the simultaneous testing of railway wheels for fatigue and contact strength, was the dependence of the test-bench roller diameter on the parameters of the tested wheel, the wheelset axle load, which includes the tested wheel and the wheel material endurance limit. **Findings.** The analysis of the obtained dependence showed that the roller diameter as a function of the load in the contact zone of the “wheel – roller” pair has second order discontinuity in the section where this load changes from the minimum to the maximum value. Analytical dependence is also presented and analyzed in graphical form. The generalization of the results obtained made it possible to conclude that it is impossible to carry out complex tests of railway wheels, which provide for the combination of fatigue strength tests with contact strength tests, subject to their simultaneous holding at the same test-bench. **Originality.** For the proposed scheme of the bench for complex tests of railway wheels, for the first time, we obtained the dependence linking the parameters of the test wheel, the parameters of the bench, the wheel pair axle load and the wheel material endurance limit. **Practical value.** The results obtained can be used as a basis for the development of new test-benches for railway wheels.

*Keywords:* railway wheel; tests; test-bench; fatigue strength; contact strength; complex tests

### REFERENCES

1. Vorobev, A. A. (2018). *Prognozirovanie resursa i sovershenstvovanie tekhnologii remonta koles zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* (Extended abstract of PhD dissertation). St. Petersburg, Russia. (in Russian)
2. *Kolesa tselnokatanye. Tekhnicheskie usloviya, 27 GOST 10791-2011* (2011). (in Russian)
3. *Traction railway stock wheelsets of 1520 mm gauge railways. General specifications, 26 GOST 11018-2011* (2012). (in Russian)
4. *Wheelsets of locomotives and motor-powered units. Strength calculations and tests, 11 GOST 31373-2008* (2008). (in Russian)
5. *Wheelsets for freight and passenger car. Technical specifications, 11 GOST 4835-2013* (2014). (in Russian)
6. Dehtiarova, L. N., Osenin, Yu. I., & Myamlin, S. V. (2009). Mathematical description of force interaction of wheels and rails. *Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 28, 21-24. (in Russian)
7. Raksha, S. V., & Kuropiatnyk, O. S. (2020). *Stendovi vyprovuvannja kolisnykh par rejkovogho transportu*. Scientific and technical progress in European countries and the contribution of higher education institutions: Collective monograph (pp. 192–213). DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-65-5.11> (in Ukrainian)
8. Keбал, I. Yu., Zgrebna, S. M., Tiokotev, O. M., Tarasiuk, M. Yu., Raksha, S. V., & Kuropiatnyk, O. S. (2019). *UA Patent 136718*. (in Ukrainian)
9. Kochetkov, Ye. V., Knyazev, D. A., & Trepacheva, T. V. (2018). *RU Patent 2650327*. (in Russian)
10. Bidulya, A. L., Volokhov, G. M., Kochetkov, Ye. V., Knyazev, D. A., Timakov, M. V., & Shcherbakov, V. V. (2018). *RU Patent 2651629*. (in Russian)
11. *Kolesa tselnokatanye. Opredelenie predela vynoslivosti diska. Tipovaya metodika ispytaniy, 7 ST SSFZhT TM 151-2003* (2003). (in Russian)
12. Yakunin, D. I., Makarenko, Yu. V., & Masliev, V. H. (2009). Influence of the inclination of the car body when driving along curved track sections on the interaction of wheels with rails. *Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 30, 248-251. (in Russian)
13. Bureika, G., & Subačius, R. (2005). Mathematical model of dynamic interaction between wheel-set and rail track. *Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 8, 39-44. (in English)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

---

14. Filippini, M., Luke, M., Varfolomeev, I., Regazzi, D., & Beretta S. (2017). Fatigue strength assessment of railway axles considering small-scale tests and damage calculations. *Procedia Structural Integrity*, 4, 11-18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.07.013> (in English)
15. Manashkin, L. A., & Myamlin, S. V. (2013). To the question of modeling of wheels and rails wear processes. *Science and Transport Progress*, 3(45), 119-124. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2013/14791> (in English)
16. Raksha, S. V., Anofriev, P. G., & Kuropiatnyk, O. S. (2020). Justification of the parameters of the life-test bench for railway wheelsets. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (preprint). (in English)
17. Raksha, S., Anofriev, P., & Kuropiatnyk, O. (2019). Simulation modelling of the rolling stock axle test-bench. *E3S Web of Conferences*, 123, 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301032> (in English)

Надійшла до редколегії: 19.05.2020

Прийнята до друку: 18.09.2020

## УДК 629.463.6/.66.015:625.1.032

А. А. ШВЕЦ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Теоретическая и строительная механика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (050) 214 14 19, эл. почта angela\_Shvets@ua.fm, ORCID 0000-0002-8469-3902

## ДИНАМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ С ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ КОЛЕЕЙ

**Цель.** Неотъемлемой и существенной особенностью современного вагонного парка является его массовость. Для всего парка подвижного состава даже самые незначительные конструкционные изменения приобретают огромные масштабы. Основной целью работы является теоретическое исследование влияния инерционных характеристик кузовов различных типов грузового подвижного состава, с учетом режима загрузки и скорости движения, на их основные динамические показатели и показатели взаимодействия с путевой структурой. **Методика.** Теоретические исследования проведены методом математического и компьютерного моделирования динамической нагруженности при движении некоторых типов грузовых вагонов: полувагонов модели 12–532, вагонов-хопперов для перевозки угля модели 12–4034 и платформ модели 13–401 на типовых тележках 18–100 со скоростями в диапазоне от 50 до 90 км/ч по кривым малого и среднего радиуса. **Результаты.** Представлен анализ теоретических исследований динамических качеств и показателей взаимодействия с железнодорожным путем грузового подвижного состава. В ходе выполнения теоретических исследований и после моделирования с учетом процессов колебания грузовых вагонов при различных режимах загрузки получены зависимости основных динамических показателей от скорости движения. **Научная новизна.** Впервые исследовано влияние инерционных характеристик кузовов различных типов грузового подвижного состава и режимов загрузки на динамическую нагруженность вагона с целью решения задачи прогнозирования динамики подвижного состава и показателей его взаимодействия с колеей. Получены результаты теоретических исследований с учетом скорости движения по кривым участкам пути малого и среднего радиуса. **Практическая значимость.** Представленные результаты расчетов: позволяют определить оптимальные значения таких параметров, как тара, высота центра масс и длина базы вагона, при решении вопросов модернизации эксплуатируемого парка вагонов и определении резервов повышения их грузоподъемности; дают возможность решать задачи поиска оптимальных направлений модернизации рельсового экипажа; способствуют созданию технических условий на изготовление новых и модернизацию эксплуатируемых грузовых вагонов; направлены на повышение уровня надежности и безопасности процесса перевозок в современных условиях на железнодорожном транспорте.

**Ключевые слова:** груз; вагон-платформа; вагон-хоппер; полувагон; динамические показатели; криволинейные участки пути; показатели взаимодействия подвижного состава с колеей; скорость движения

### Введение

Подразделения вагонного хозяйства являются одними из наиболее важных и сложных отраслей железнодорожного транспорта, основу которого составляет подвижной состав. Успешное выполнение перевозочного процесса существенно зависит от количества грузовых вагонов и эффективности их эксплуатации. Поэтому важнейшее значение приобретает рациональность конструкции вагонов, от которой зависит провозная способность железных дорог и себестоимость перевозок, возможности меха-

низации и автоматизации при изготовлении, ремонте вагонов, в процессе формирования поездов и при проведении погрузочно-разгрузочных операций [7, 11, 18].

Необходимость обеспечения сохранности скоропортящейся категории грузов, предупреждения повреждений хрупких грузов, защиты некоторой номенклатуры грузов от неблагоприятных погодных условий, движения с повышенными скоростями, минимизации затрат на постройку, ремонт и эксплуатацию вагонов диктует наличие существенного многообразия типов и конструкций в современном парке гру-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

зовых вагонов. В то же время грузовой подвижной состав должен обеспечивать безопасность движения поездов [1, 21, 24].

Массовость вагонного парка является его неотъемлемой и существенной особенностью. Даже самые незначительные конструкционные изменения приобретают для всего парка подвижного состава большие масштабы. Проведение предварительной оценки динамических качеств вагона на стадии его проектирования, которую возможно осуществить с помощью математического и компьютерного моделирования, представляет практический интерес [12, 25].

Уменьшение тары подвижного состава – одна из основных и весьма сложных проблем транспортной науки и техники. При ее решении необходимо учитывать все многообразие условий, характеризующих строительство и эксплуатацию вагонов. Возможности конструктивного совершенствования вагонов с целью их облегчения весьма значительны. Снижение веса подвижного состава имеет особенно важное значение для вагоностроения, являющегося одним из основных потребителей металла. Вагоны требуют постоянных затрат, связанных с их передвижением в эксплуатации, поэтому снижение расхода металла в вагоностроении приводит не только к уменьшению строительной стоимости продукции, но к еще более существенному эффекту – снижению эксплуатационных расходов железнодорожной отрасли. Однако при решении этих задач проектировщикам приходится учитывать все многообразие требований, предъявляемых к вагонам, рассматривать различные варианты решений [11, 19, 20].

Снижение тары грузовых вагонов обычно сопровождается увеличением их грузоподъемности, вследствие чего возрастает провозная способность железных дорог за счет увеличения веса поездов. При постоянных размерах перевозок обеспечивается возможность сокращения парка вагонов и локомотивов, потребности в развитии пропускной способности железных дорог, а также локомотивных и поездных бригад. Если снижение тары вагонов происходит без увеличения их грузоподъемности, уменьшаются осевые нагрузки, вследствие чего увеличивается срок службы рельсов, колес,

тормозных колодок, облегчается работа букс. Уменьшение нагрузок на колесные пары, и особенно от необрессоренных частей вагонов, снижает динамические усилия, что в свою очередь позволяет уменьшить тару вагонов. Поскольку снижение веса вагонов сопровождается уменьшением их сопротивления движению, при данной силе тяги локомотивов появляется возможность увеличения пропускной способности железных дорог за счет увеличения скорости движения поездов [14, 17, 28].

Следовательно, снижение тары вагонов обеспечивает увеличение провозной способности железных дорог, экономию металла, сокращение расхода топлива и электроэнергии, ускорение перевозок, уменьшение капиталовложений в вагонный и локомотивный парки, развитие пропускной способности железных дорог и снижение себестоимости железнодорожных перевозок. Поскольку вагоны являются массовой продукцией, даже небольшое снижение их тары приводит к значительному экономическому эффекту. В то же время снижение тары вагонов не должно вызывать ухудшения безопасности движения поездов, эксплуатационной надежности вагонов и других показателей, характеризующих целесообразность конструкции. Необходимо также совершенствовать методы расчета и испытаний прочности вагонов и их отдельных узлов [22, 27].

Для уменьшения усилий, передающихся на части вагона при движении по кривой, и сил, обусловленных изменениями скорости и колебаниями кузова, необходимо снижение центра масс вагона и уменьшение его смещения от вертикальной оси симметрии. Снижение центра масс целесообразно и для грузовых вагонов, имеющих сравнительно малую базу [24]. Продольные усилия в поездах иногда достигают величин, превосходящей прочность рам вагонов некоторых конструкций. Исследования показали, что большие значения ударно-тяговых усилий обусловлены главным образом резким троганием поезда с места; подтягиванием частично сжатого состава, особенно при полностью растянутой хвостовой части, имеющей вагоны с неотпущенными тормозами; торможением стоп-краном в хвостовой части состава при малой скорости движения и сжатом составе в начале торможения [16, 23]. Величина уси-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

лий, передаючихся ударно-тяговими приборами на раму и другие части вагона, зависит от эффективности и жесткости поглощающих аппаратов автосцепки, а также от несоостности осей автосцепок соседних вагонов. В случае, когда энергия удара не превышает эффективности поглощающего аппарата, она воспринимается упруго. Если же энергия удара превышает эффективность поглощающего аппарата, он полностью сожмется, и избыток энергии будет без смягчения восприниматься конструкцией (рамой и другими частями) вагона. Поскольку жесткость конструкции вагона значительно превосходит жесткость поглощающих аппаратов, ударные усилия в этом случае резко возрастают. Большое значение имеет правильное расположение автосцепного устройства на раме вагона (предупреждение перекосов поглощаю-

*a – a*

щего аппарата и обеспечение центрального нагружения хребтовой балки) [13, 29].

В режиме торможения вагоны могут занимать положение максимального перекоса в пределах зазора в рельсовом пути (рис. 1, *a*). В отличие от движения по кривой в тяговом режиме (рис. 1, *б*) это приводит к возникновению поперечных горизонтальных составляющих продольных сил, а при разнице высот их автосцепок – вертикальных составляющих. Это, в свою очередь, влияет на величины боковых и вертикальных сил взаимодействия, определяющие необходимые условия вкатывания колес на головку рельса [13]. Для более точного определения устойчивости подвижного состава при определении составляющих продольных сил необходимо учитывать действие соседних вагонов друг на друга [4].

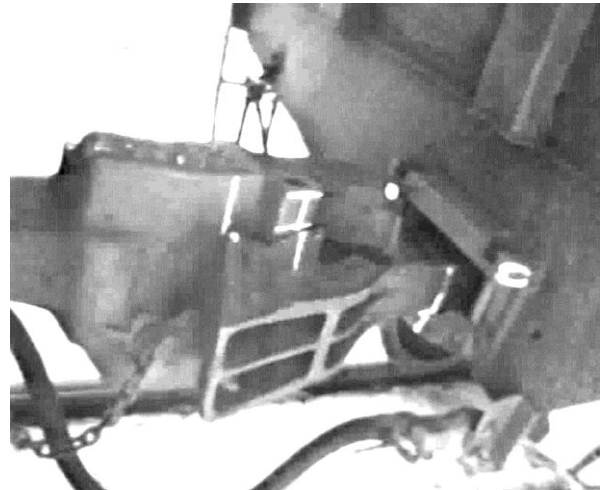
*б – б*

Рис. 1. Взаимное расположение автосцепных устройств вагонов в поезде:

*a* – соединение соседних вагонов в тяговом режиме; *б* – положение автосцепок в режиме торможения

Fig. 1. Mutual arrangement of car automatic couplers in a train:

*a* – connection of adjacent cars in traction mode; *b* – position of automatic couplers in braking mode

Наличие эксцентриситетов также вызывает дополнительные напряжения в узлах, в ряде случаев превосходящие основные напряжения в конструкции (рис. 2). Уменьшение эксцентриситетов снижает дополнительные напряжения, что позволяет облегчить конструкцию при

неизменной внешней нагрузке или увеличить внешнюю нагрузку без повышения веса конструкции. На величине продольных усилий весьма существенно сказываются размеры зазоров в автосцепном оборудовании вагонов, поэтому целесообразно их сокращение [1, 10].

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ



Рис. 2. Передача автосцепками продольного усилия в соединении двух вагонов с эксцентриситетом

Fig. 2. Transmission of longitudinal force by automatic couplers in the connection of two cars with eccentricity

В работе [9] приведены теоретические исследования влияния инерционных характеристик вагонов-хопперов моделей 20–4015, 20–4076 и 25–4001 на их динамические показатели. Сравнение результатов расчета коэффициентов устойчивости колеса от схода с рельсов вагона-хоппера для перевозки окатышей 20–4015, вагона-хоппера для перевозки бокситов 20–4076 и вагона-хоппера для перевозки техуглерода 25–4001 показывают, что в порожнем состоянии худшие показатели у модели 25–4001 с большей массой тары и более высоким центром масс. В грузном состоянии более стабильные показатели у модели 20–4015 с меньшей высотой центра масс.

Современное вагоностроение характеризуется переходом от конструкций с несущими рамами к цельнонесущим кузовам, т. е. к таким конструкциям, у которых основные нагрузки, действующие на вагон, воспринимаются не только рамой, но и полом, стенами, крышей. Важное значение для облегчения конструкции имеет также правильный выбор формы элементов. В вагоностроении должны широко применяться новые экономичные профили проката, отличающиеся от обычных профилей более выгодными характеристиками прочности и жесткости [11, 26].

Итак, совершенствование вагонного парка за счет создания инновационных конструкций или модернизации отдельных составляющих является приоритетным направлением улучшения технико-экономических параметров грузовых вагонов. При этом совершенствование подвижного состава предусматривает улучшен-

ные технические характеристики, которые обеспечат выполнение главных требований – надежности и экономической эффективности. Оценку динамических качеств и параметров воздействия на путь спроектированной конструкции производить после ее изготовления и проведения динамических ходовых испытаний. Результаты динамического взаимодействия различных типов подвижного состава, как правило, не анализируют с точки зрения сопоставления основных параметров конструкции и минимального воздействия на путевую структуру.

### Цель

Основной целью работы является теоретическое исследование влияния инерционных характеристик кузовов различных типов грузового подвижного состава, с учетом режима загрузки и скорости движения, на их основные динамические показатели и показатели взаимодействия с путевой структурой.

### Методика

Математическая модель, описывающая пространственные колебания сцепа вагонов в составе поезда (рис. 3), предложена в работах, в которых один рельсовый экипаж рассматривают по полной расчетной схеме («нулевой») [3, 4, 15], а расчетные схемы соседних вагонов, в зависимости от постановки задачи, упрощают по мере удаления от «нулевого» экипажа в обе стороны [15, 24, 25].

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

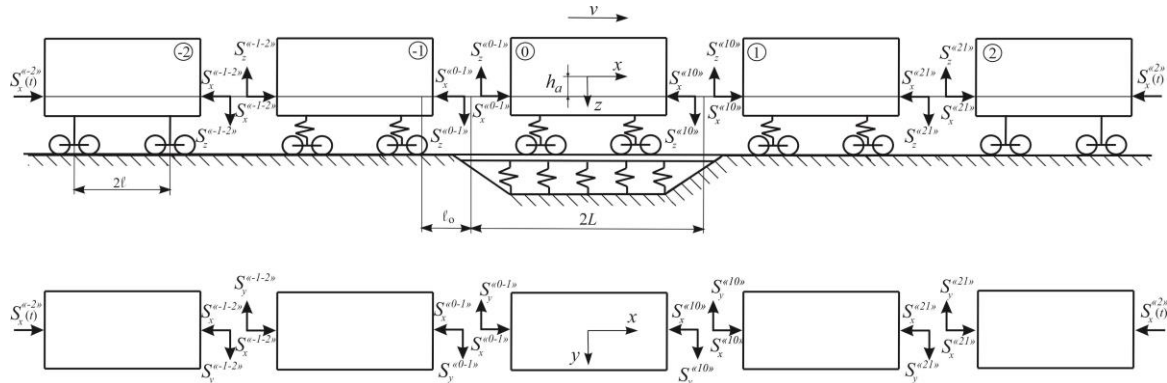


Рис. 3. Схема сцепки грузовых вагонов в составе поезда

Fig. 3. Scheme of the coupling of freight cars in a train

В качестве расчетной схемы «нулевого» экипажа принята математическая модель пространственных колебаний грузового вагона в виде многомассовой (кузов, две наддрессорные балки, четыре боковые рамы, четыре колесные пары) нелинейной механической системы с 58 степенями свободы, которая движется по инерционному, упруго-диссипативному пути [3]. Вагоны, соседние с «нулевым», представ-

лены системой с 12 степенями свободы. Последние вагоны сцепки рассматривают по еще более упрощенной схеме – эти вагоны являются системами с шестью степенями свободы.

Расчетная схема «нулевого» грузового вагона и положительные направления для всех перемещений и углов поворота приведены на рис. 4.

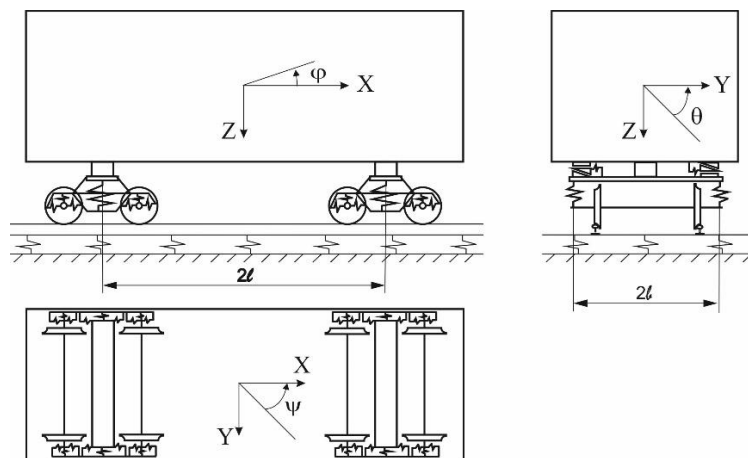


Рис. 4. Расчетная схема 4-осного грузового вагона

Fig. 4. Design scheme of a 4-axle freight car

В данной работе исследовано влияние режима загрузки на основные динамические показатели и показатели взаимодействия подвижного состава с рельсами грузовых вагонов в криволинейных участках железнодорожного пути. Исследование проведено с использованием модели пространственных колебаний сцепки пяти вагонов в составе поезда. Исходные данные для исследования: движение полувагона

модели 12–532, хоппера для перевозки угля модели 12–4034 и вагона-платформы модели 13–401 с типовыми тележками 18–100 со скоростями в интервале 50 ÷ 90 км/ч в кривых с радиусами 350 и 600 м, с повышениями наружного рельса 130 и 120 мм соответственно. Был изучен стационарный режим движения с целью установления влияния режимов загрузки на динамическую нагруженность грузового

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

подвижного состава. Ходовые части вагонов, поверхность катания колес и профиль головки рельса предусмотрены в нормальном техническом состоянии.

При различных режимах загрузки изменяются: вес вагонов, моменты инерции кузова  $I_x$ ,

$I_y$ ,  $I_z$  и высота центра масс кузова над уровнем головок рельса  $h$ . Подготовительные расчеты выполнены с помощью «Программного комплекса для определения моментов инерции кузовов вагонов» и приведены в табл. 1 [13].

Таблица 1

## Инерционные и геометрические характеристики вагонов при различных режимах загрузки

Table 1

## Inertial and geometric characteristics of cars under various loading conditions

Параметры	Обозначение	Типы подвижного состава		
		полувагон модели 12–532	хоппер для угля 12–4034	платформа модели 13–401
База вагонов	$2L$ , м	8,66	7,84	9,72
Масса вагонов	$M_o$ , т	76,5 (13,3)*	88,34 (18,72)	63,6 (13,6)
Моменты инерции	$I_x$ , т·м <sup>2</sup>	75 (20)	160 (33,6)	22 (13,5)
	$I_y$ , т·м <sup>2</sup>	1 050 (300)	1 190 (300)	1 194 (240)
	$I_z$ , т·м <sup>2</sup>	1 100 (300)	1 245 (307)	1 223 (260)
Высота центра масс над УГР	$h$ , м	1,843 (1,6)	2,7 (1,77)	2,1 (1,1)

\* в скобках указаны величины параметров вагонов в порожнем режиме

Представленные в табл. 1 модели грузовых вагонов охватывают далеко не весь типоразмер эксплуатируемых на железной дороге кузовов. Выбор приведенных моделей вагонного парка нацелен на определение оптимальных параметров кузовов с точки зрения минимального динамического взаимодействия с путевой структурой, а не на сравнение специализированного подвижного состава между собой. Определение показателей динамических качеств подвижного состава выполнено в соответствии с нормативным документом [6], а показателей взаимодействия подвижного состава с рельсовой колеей – в соответствии с документом [5]. Уровни оценки и допустимые значения показателей динамических качеств грузового подвижного состава в соответствии с нормативной документацией [6] приведены в табл. 2.

## Результаты

Теоретические исследования проведены при движении некоторых типов грузовых вагонов: полувагона модели 12–532, хоппера для перевозки угля модели 12–4034 и платформы модели 13–401 на типовых тележках 18–100 со скоростями в диапазоне от 50 до 90 км/ч по кривым с радиусами 350 и 600 м, с возвышениями наружного рельса 130 и 120 мм соответственно. Рельсы – Р65, шпалы – деревянные, балласт – щебеночный [2, 5, 6].

Основные изучаемые динамические показатели – максимальный коэффициент динамической добавки обрессоренных частей (коэффициент вертикальной динамики центральной ступени подвешивания), максимальное отношение рамной силы к статической осевой нагрузке (коэффициент горизонтальной динамики), коэффициент устойчивости колеса от

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

схода с рельсов, коэффициенты вертикальной и горизонтальной динамики пути по силам взаимодействия колес с рельсами, коэффициент устойчивости рельсошпальной решетки от угла (сдвига) от действия поперечных сил, боковой силы, действующей от пути на колесо,

кромочного напряжения в подошве рельса, фактора износа боковой грани бандажа колеса, направляющей силы, действующей со стороны пути на колесо, влияние колесной пары. Результаты расчетов исследуемых показателей приведены на рис. 5–8.

Таблица 2

## Уровни оценки и допустимые значения показателей динамических качеств

Table 2

## Assessment levels and admissible values of dynamic quality indicators

Показатель	Уровень оценки	Допустимые значения	
		порожний	груженный
Максимальный коэффициент динамической добавки обрессоренных частей (коэффициент вертикальной динамики центральной ступени подвешивания) $K_{дв}$	отлично	0,5	0,2
	хорошо	0,6	0,35
	удовлетворительно	0,7	0,4
	допустимый	0,75	0,65
Максимальное отношение рамной силы к статической осевой нагрузке (коэффициент горизонтальной динамики) $K_{дг}$	отлично	0,25	0,2
	хорошо	0,3	0,25
	удовлетворительно	0,38	0,3
	допустимый	0,4	0,38
Коэффициент устойчивости от схода колеса с рельсов $K_{ст}$	допустимый	1,3	

Как видно из рис. 5 (а, б), в целом коэффициенты вертикальной динамики центральной ступени подвешивания увеличиваются с повышением скорости движения. Так, во всем диапазоне исследуемых скоростей показатели  $K_{дв}$  в обоих режимах загрузки не превышают допустимую нормативную величину как в кривой  $R = 600$  м, так и в кривой  $R = 350$  м. Оценка  $K_{дв}$  в обеих кривых соответствует уровню «отлично» (табл. 2). Только порожний полувагон в кривой  $R = 350$  м при скорости 60 км/ч (рис. 5, а) имеет значительно лучшую вертикальную динамику [6].

В кривой  $R = 350$  м все три типа подвижного состава в загруженном режиме имеют практически одинаковые  $K_{дв}$ , зато в кривой  $R = 600$  м лучшие показатели вертикальной динамики у полувагона и платформы (рис. 5, б), за исключением скорости в 70 км/ч в груженом режиме. Эти модели обладают меньшей массой

тары и более низкой высотой центра масс, чем у хоппера для перевозки угля модели 12–4034.

На рис. 5 (в, г) приведены максимальные отношения рамной силы к статической осевой нагрузке (коэффициенты горизонтальной динамики)  $K_{дг}$ . Из них видно, что с увеличением скорости движения и изменением режима загрузки коэффициенты горизонтальной динамики  $K_{дг}$  увеличиваются и остаются в кривой  $R = 600$  м и в кривой  $R = 350$  м на уровне оценки «отлично» (табл. 2). Загруженный хоппер-вагон имеет лучшие коэффициенты горизонтальной динамики в обеих кривых [6].

Из полученных результатов можно сделать вывод, что меньшая масса тары и более низкая высота центра масс вагона в случае увеличения скорости движения улучшают показатели вертикальной динамики, однако горизонтальная динамика лучше у вагонов с большей массой тары и более высоким центром масс.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Коефіцієнти запаса устойчивости от схода колес с рельсов в кривой  $R=350$  м (рис. 5, *д*) зависят от режима загрузки не так сильно, как в кривой  $R=600$  м (рис. 5, *е*), и в обоих случаях превышают минимально допустимое значение, определенное нормативной документацией [6]. Из полученных результатов следует, что вагон-хоппер в случае увеличения скорости движения имеет большие показатели

коэффициентов  $K_{ст}$ , что можно объяснить повышенной массой тары вагона. В кривой  $R=350$  м коэффициент запаса устойчивости от схода колес с рельсов для хопера модели 12–4034 при скорости 50 км/ч наибольший. Наименьшие показатели  $K_{ст}$  имеет платформа, что объясняется большой базой вагона, которая ухудшает вписывания в кривые [6].

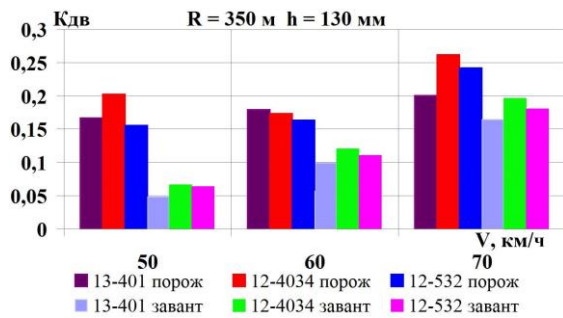
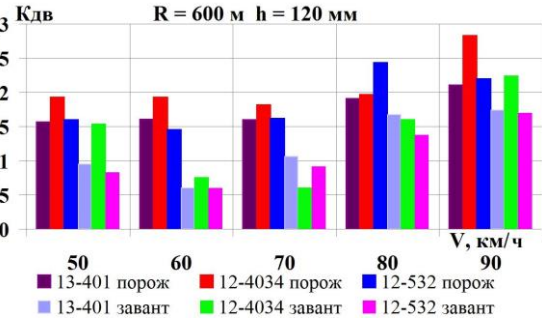
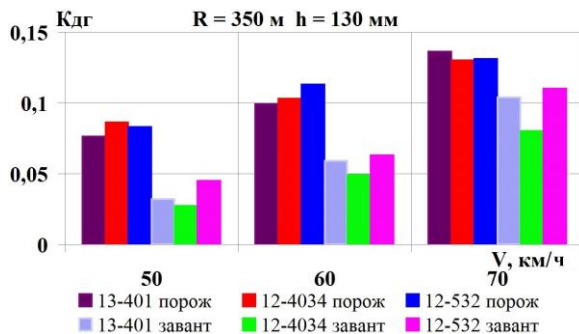
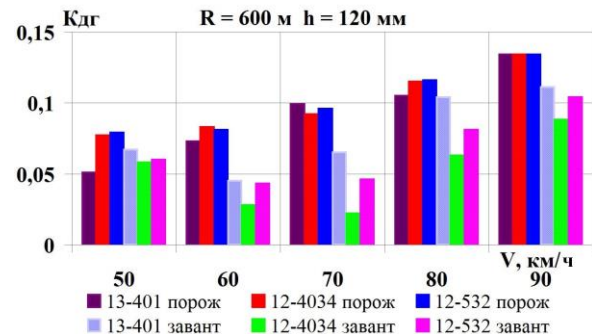
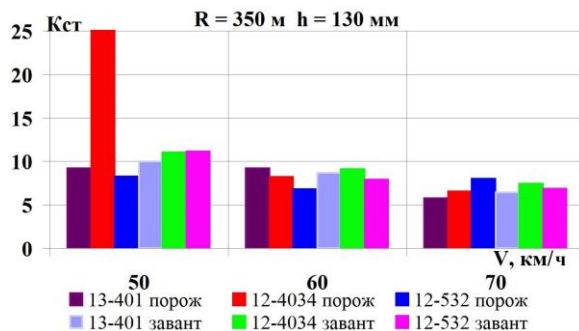
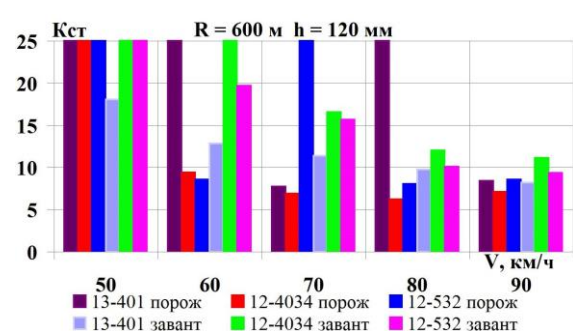
*a – a**б – b**в – c**г – d**д – e**е – f*

Рис. 5. Графики зависимости от режима загрузки при движении по соответствующей кривой:

*a, б* – максимальные коэффициенты динамической добавки обрессоренных частей; *в, г* – максимальные отношения рамной силы к статической осевой нагрузке; *д, е* – коэффициенты устойчивости колеса от схода с рельсов

Fig. 5. Dependence graphs on the loading mode when moving along the corresponding curve:

*a, b* – maximum coefficients of dynamic additive of sprung parts;

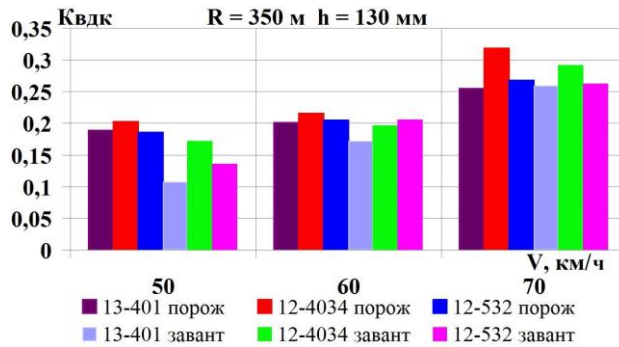
*c, d* – maximum ratios of frame force to static axial load; *e, f* – derailment stability coefficients

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

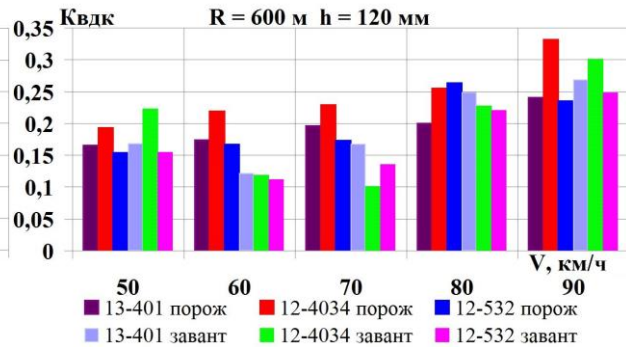
На рис. 6 приведені коефіцієнти вертикальної  $K_{вдк}$  і горизонтальної динаміки  $K_{гдк}$  пути по силам взаємодії колес з рельсами, а також коефіцієнт устойчивості рель-

сошпальной решетки от угона (сдвига) при действии поперечных сил  $\varepsilon$  во время движения в соответствующих кривых участках пути.

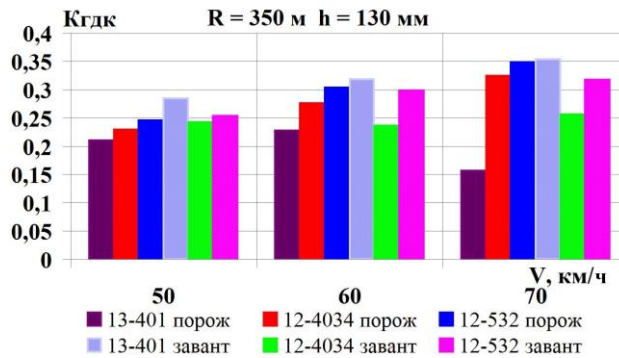
$a - a$



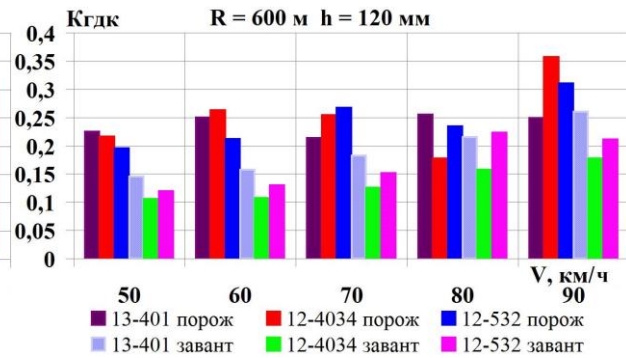
$\bar{b} - b$



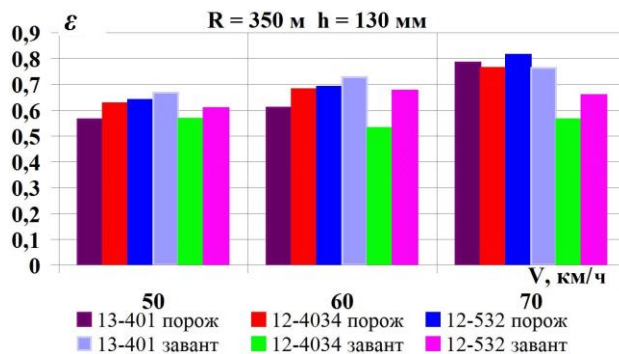
$\bar{c} - c$



$\bar{z} - d$



$\bar{\partial} - e$



$\bar{\varepsilon} - f$

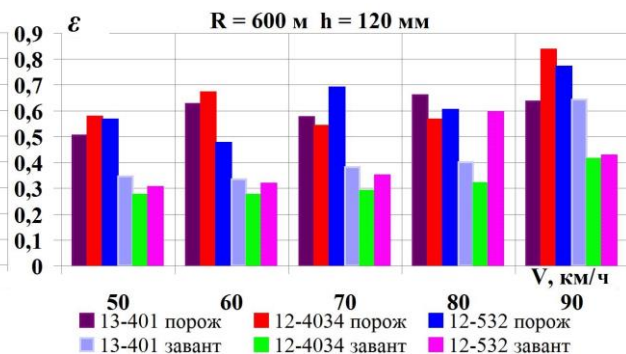


Рис. 6. Графики зависимости от режима загрузки при движении по соответствующей кривой:

- $a, \bar{b}$  – коэффициенты вертикальной динамики пути по силам взаимодействия колес с рельсами;
- $\bar{c}, \bar{z}$  – коэффициенты горизонтальной динамики пути по силам взаимодействия колес с рельсами;
- $\bar{\partial}, \bar{\varepsilon}$  – коэффициенты устойчивости рельсошпальной решетки от угона (сдвига)

Fig. 6. Dependence graphs on the loading mode when moving along the corresponding curve:

- $a, \bar{b}$  – vertical dynamics coefficients of track according to the interaction forces of wheels and rails;
- $\bar{c}, \bar{z}$  – horizontal dynamics coefficients of track according to the interaction forces of wheels and rails;
- $\bar{\partial}, \bar{\varepsilon}$  – stability coefficients of track panel against creeping (displacement)

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Допустимое значение коэффициента вертикальной динамики пути  $K_{\text{вдк}}$  рассчитывают в соответствии с допустимой динамической погонной нагрузкой на железнодорожный путь от группы осей тележки 168 кН/м, для всех типов исследуемого подвижного состава оно составляет  $[K_{\text{вдк}}] = 0,45$ . Коэффициент вертикальной динамики пути  $K_{\text{вдк}}$  (рис. 6, а, б) не превышает допустимого нормативного значения в кривых радиусом как 350, так и 600 м [5].

В кривой  $R = 350$  м все три типа подвижного состава как в порожнем, так и в загруженном режиме имеют практически одинаковые  $K_{\text{вдк}}$ , зато в кривой  $R = 600$  м лучшие показатели вертикальной динамики у полувагона и платформы (рис. 7, б), за исключением скорости в 70 км/ч в грузе. Как и в случае с вертикальной динамикой подвижного состава, лучшими коэффициентами вертикальной динамики пути обладают модели с меньшей массой тары и более низкой высотой центра масс.

Коэффициент горизонтальной динамики пути  $K_{\text{гдк}}$ , рис. 6 (в, г), который считается критерием безопасности от угона (сдвига) рельсошпальной решетки, не превышает допустимого значения  $[K_{\text{гдк}}] = 0,4$  в кривых радиусом 350 и 600 м [5].

Анализ полученных результатов для коэффициента горизонтальной динамики пути  $K_{\text{гдк}}$  показывает, что горизонтальная динамика по силам взаимодействия колес с рельсами лучше у вагонов с большей массой тары и более высоким центром масс.

На рис. 6 (д, е) приведены коэффициенты устойчивости рельсошпальной решетки от угона (сдвига)  $\varepsilon$ . Допустимое значение коэффициента устойчивости рельсошпальной решетки от действия поперечных сил составляет  $[\varepsilon] = 0,85$ . По результатам расчета значение коэффициента устойчивости рельсошпальной решетки от действия поперечных сил  $\varepsilon$  в пути со щебеночным балластом составило меньше допустимой величины. Однако порожний хоппер-вагон в кривой  $R = 600$  м при скорости движения

в 90 км/ч будет оказывать на рельсошпальную решетку воздействие, близкое к допустимому нормативной документацией значению [2, 5].

На коэффициент устойчивости рельсошпальной решетки от угона (сдвига)  $\varepsilon$  в порожнем режиме намного большее влияние оказывает вес единицы подвижного состава, чем высота его центра масс. В грузе состояние худшие показатели у платформы с большей величиной базы вагона.

На рис. 7 показано влияние скорости на показатели взаимодействия с колеей подвижного состава в кривых  $R = 350$  и  $R = 600$  м соответственно – боковой силы, действующей со стороны пути на колесо, кромочных напряжений в подошве рельса, фактора износа боковой грани бандажа колеса.

Боковые силы, действующие со стороны пути на колесо (горизонтальные силы)  $Y_6$  (рис. 7, а, б), для обеспечения условия устойчивости против наползания гребней колес на рельсы не превышают допустимое значение  $[Y_6] = 90$  кН [5]. В порожнем режиме боковые силы  $Y_6$  имеют большие значения у вагонохоппера в обеих кривых. В грузе все исследуемые типы подвижного состава имеют практически одинаковые значения горизонтальных сил, действующих со стороны пути на колесо, за исключением скорости 80 км/ч в кривой  $R = 600$  м для полувагона.

В качестве критерия для установления допустимых скоростей используют максимальные напряжения, возникающие в кромках подошвы рельса. Кромочные напряжения в подошве рельса  $\sigma_r$  не должны превышать 200 МПа. По результатам вычислений, кромочные напряжения (рис. 7, в, г) возрастают при повышении скорости движения и не превышают допустимых значений для обоих режимов загрузки в кривых радиусом 350 и 600 м. Наибольшие кромочные напряжения возникают при движении вагонохоппера как порожнего, так и загруженного. Однако полученные результаты не превышают допустимых значений для обоих типов рельсов – до пропуска и после пропуска нормативного тоннажа для колеи с нетермообработанными рельсами Р65 [2, 5].

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

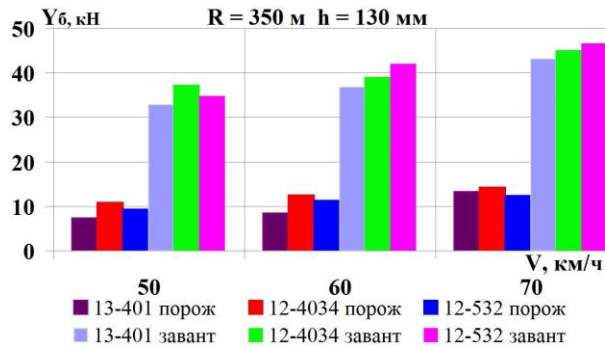
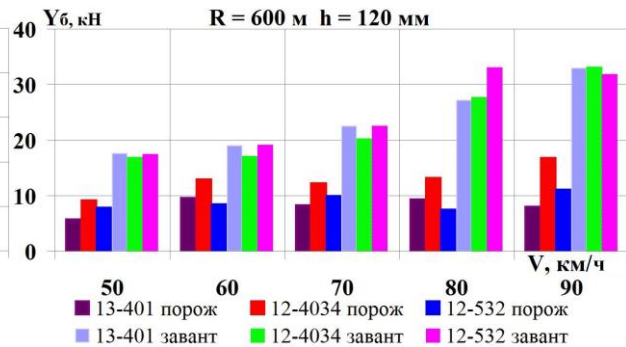
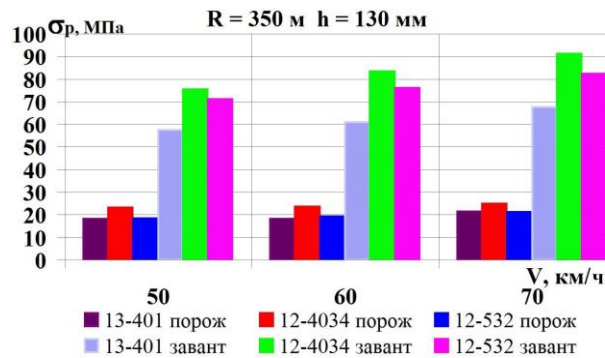
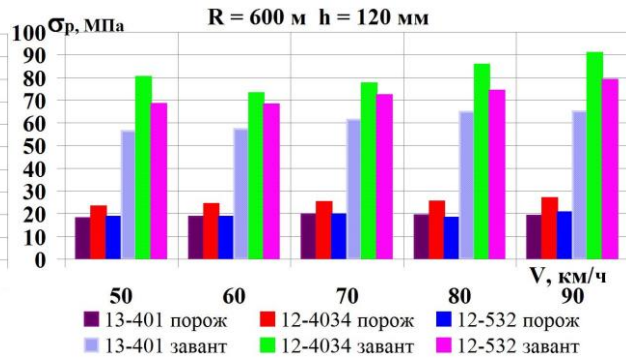
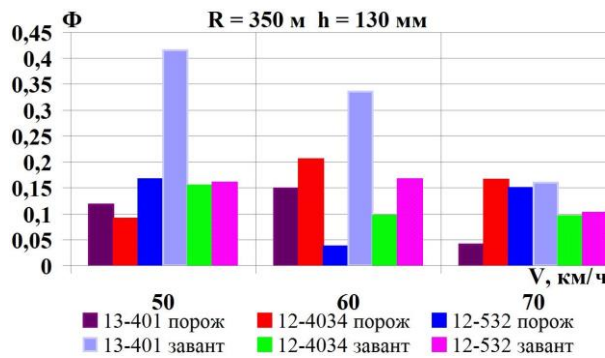
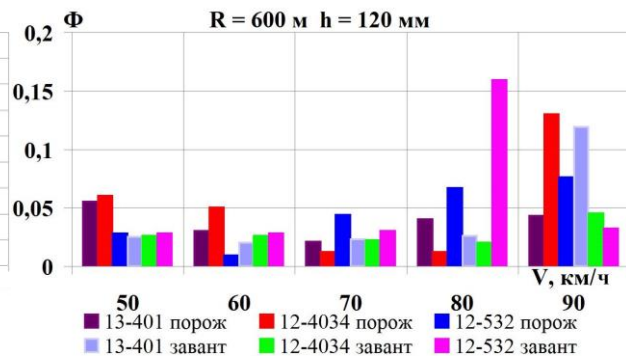
*a – a**b – b**в – в**г – г**д – д**е – е*

Рис. 7. Графики зависимости от режима загрузки при движении по соответствующей кривой:

*a, b* – боковые силы, действующее со стороны пути на колесо;*в, г* – кромочные напряжения в подошве рельса;*д, е* – фактор износа боковой грани бандажа колеса

Fig. 7. Dependence graphs on the loading mode when moving along the corresponding curve:

*a, b* – lateral forces acting from the side of the track on the wheel;*c, d* – edge stresses in the rail base;*e, f* – wear factor of the side edge of the wheel rim

Фактор износа  $\Phi$  (рис. 7, *д, е*) – условный показатель, отражающий физические явления, происходящие при скольжении гребня колеса по боковой грани рельса. Этот показатель удобен для сравнения подвижного состава при

оценке интенсивности износов колес и рельсов в случае движения их в кривых различных радиусов. Износ гребня бандажа и рельсов влияет на безопасность движения в кривой, поскольку меняются очертания профилей колеса и рельса.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

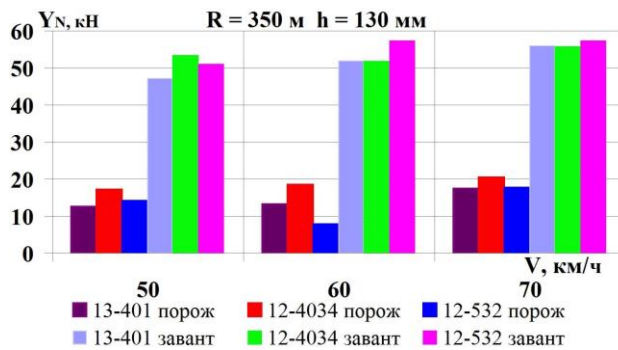
Кроме того, сильное трение гребня колеса о боковую поверхность головки рельса повышает сопротивление движению поезда [25].

В кривой  $R = 350$  м при скорости движения 50–60 км/ч значительно возрастает фактор износа боковой грани бандажа колеса нагруженного вагона-платформы. При скорости 80 км/ч фактор износа боковой грани бандажа колеса  $\Phi$  значительно возрастает для полувагона в кривой  $R = 600$  м. В свою очередь, имеет место существенное увеличение  $\Phi$  при скорости

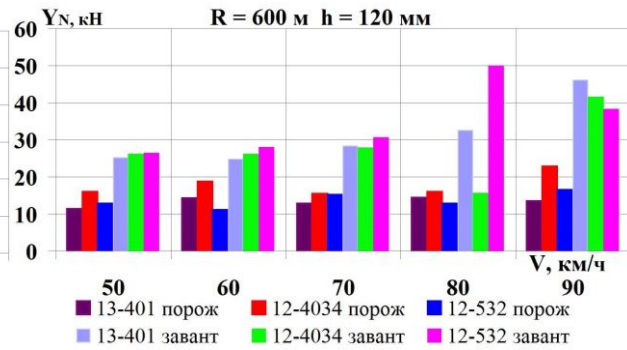
90 км/ч в кривой  $R = 600$  м для порожнего хоппера и нагруженной платформы.

Фактор износа боковой грани бандажа колеса  $\Phi$  определяют как характеристику, равную произведению направляющей силы  $Y_N$  на угол влияния (набегания)  $\psi_{\text{кп}}$  колеса на рельс. Рассмотрим вклад каждого из этих параметров на величину фактора износа. На рис. 8 (а, б) показано влияние скорости в кривых  $R = 350$  и  $R = 600$  м на направляющие силы, действующие со стороны пути на колесо.

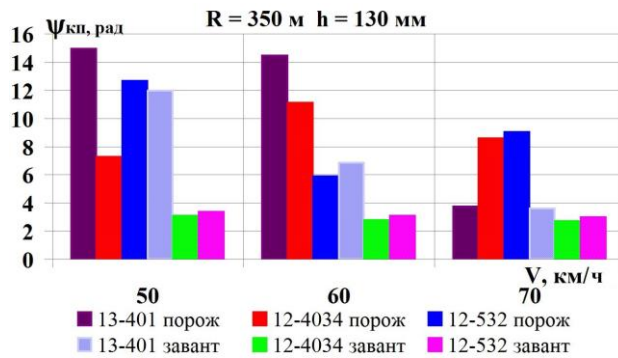
а – а



б – б



в – в



г – г

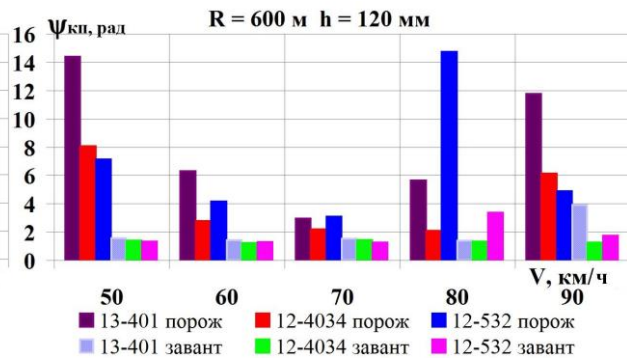


Рис. 8. Графики зависимости от режима загрузки при движении по соответствующей кривой:

а, б – направляющие силы, действующей со стороны пути на колесо; в, г – влияния колесной пары

Fig. 8. Dependence graphs on the loading mode when moving along the corresponding curve:

а, б – guiding forces acting from the side of the track on the wheel; в, г – wheelset hunting

Направляющие силы, действующие со стороны пути на колесо,  $Y_N$  с повышением скорости движения значительно возрастают в кривой  $R = 350$  м и имеют в среднем одинаковые значения для всех типов подвижного состава. Значения  $Y_N$  в кривой  $R = 600$  м при скорости 80–90 км/ч значительно изменяются для всех типов изучаемого подвижного состава. Зависи-

мости на рис. 8, б позволяют сделать вывод о том, что в кривых среднего радиуса инерционные параметры кузовов грузового подвижного состава оказывают существенное влияние на величину направляющих сил.

На рис. 8 (в, г) приведено влияние колесной пары  $\psi_{\text{кп}}$ . Результаты расчетов показывают, что в кривых  $R = 350$  и  $R = 600$  м в порожнем

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

режиме при скоростях 50–60 км/ч найбільший угол виліяння колесної пари  $\psi_{\text{кп}}$  має вагон-платформа. В грузеному режимі в кривих малого радіуса (рис. 8, а) на устійність колесної пари оказує вплив база вагона, так як по результатам моделювання полувагон і вагон-хоппер мають менші і практично однакові значення  $\psi_{\text{кп}}$ .

В кривих  $R = 600$  м (рис. 8, г) в порожньому режимі менші значення виліяння колесної пари у хоппер-вагона, а найбільші величини  $\psi_{\text{кп}}$  при швидкості руху 50 і 90 км/ч у вагона-платформи. При швидкості 80 км/ч в кривих середнього радіуса значення  $\psi_{\text{кп}}$  зростають також для порожнього полувагона і значно відрізняються від іншого діапазону досліджуваних швидкостей. Для полувагонів на тележках моделі 18–100 швидкість 80 км/ч вважається критичною і пов'язана з втратою устійності руху, коли динамічні поперечні коливання виліяння частин вагона перестають затухати, набуваючи устійний характер (автоколивання) [8]. Набегальна колесна пара полувагона в обох режимах завантаження має найбільші значення виліяння, за винятком швидкості 90 км/ч для грузеної платформи. Найменші значення кутів набегання колесної пари на рейс по результатам моделювання у грузеного хоппер-вагона. Це дає можливість висунути припущення, що колесні пари тележок моделі 18–100 будуть мати найменші  $\psi_{\text{кп}}$  у вагонів з підвищеною масою тару і базою вагона, як у хоппера для перевезення вугля моделі 12–4034 (табл. 1).

Безумовно, розглянутого типорозміру грузового подвижного складу недостатньо для повноцінної статистики, однак виконане теоретичне моделювання і отримані результати розрахунків демонструють цілісність подальших досліджень в цьому напрямку.

### Наукова новизна і практична значимість

Наукова новизна роботи заключається в дослідженні впливу інерційних характеристик кузовів різних типів грузового подвижного складу на їх динамічну нагру-

женність і показники взаємодії з коліями подвижного складу, з метою розв'язання задачі прогнозування динаміки грузових вагонів, і включає результати теоретичних досліджень з урахуванням швидкості руху по криволинійним ділянкам залізничного шляху малого і середнього радіуса.

Практичне значення теоретичних досліджень впливу деяких типів грузового подвижного складу, при різних режимах завантаження, на динамічне взаємодія з шляховою структурою заключається в тому, що отримані результати розрахунків:

- дозволяють визначити оптимальні значення таких параметрів, як тара, висота центру мас і довжина бази вагона, при розв'язанні питань модернізації експлуатованого парку вагонів і визначенні резервів підвищення їх грузопідйомності;
- дають можливість розв'язувати задачі пошуку оптимальних напрямків модернізації рейсового екіпажу;
- сприяють створенню технічних умов на виготовлення нових і модернізацію експлуатованих грузових вагонів;
- спрямовані на підвищення рівня надійності і безпеки процесу перевезення в сучасних умовах на залізничному транспорті.

### Висновки

В статті представлено аналіз основних динамічних показників і показників взаємодії подвижного складу з рейсами на прикладі деяких типів грузових вагонів. На основі виконаного теоретичного дослідження можливо зробити наступні висновки:

- во всьому діапазоні швидкостей показники  $K'_{\text{дв}}$  і  $K_{\text{дг}}$  в обох режимах завантаження збільшуються і не перевищують допустимі норми як в кривій  $R = 600$ , так і в кривій  $R = 350$  м. Полувагон в кривій  $R = 350$  м при швидкості 60 км/ч має значно кращу вертикальну динаміку, а завантажений хоппер-вагон має кращі коефіцієнти горизонтальної динаміки в кривих обох досліджуваних радіусів;
- коефіцієнти запасу устійності від сходження колес з рейсів в кривій  $R = 350$  м мало

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

зависят от режима загрузки, в отличие от кривой  $R=600$  м, но в обоих случаях не превышают минимально допустимое значение, определенное нормами. Загруженный вагон-хоппер в случае увеличения скорости движения имеет большие показатели коэффициентов  $K_{ст}$ , что можно объяснить повышенной массой тары вагона. В кривой  $R=350$  м коэффициент запаса устойчивости от схода колес с рельсов для хоппера при скорости 50 км/ч наибольший. Наименьшие показатели  $K_{ст}$  имеет платформа, что объясняется большой базой вагона, которая ухудшает вписывания в кривые;

– коэффициенты вертикальной  $K_{вдк}$  и горизонтальной  $K_{гдк}$  динамики пути не превышают допустимого значения в кривых радиусом 350 и 600 м. Наименьшие значения коэффициента устойчивости рельсошпальной решетки  $\varepsilon$  в пути с щебеночным балластом у загруженно-го вагона-платформы;

– боковые силы  $Y_6$  растут линейно и не имеют превышений, а значение  $Y_6$  для полувагона в обеих кривых в среднем больше соответствующих значений платформы и хоппера;

– кромочные напряжения  $\sigma$ , возрастают при повышении скорости движения и не превышают допустимых значений для обоих режимов загрузки в кривых радиусом 350 и 600 м. Наибольшие кромочные напряжения

возникают при движении вагона-хоппера как порожнего, так и загруженного;

– в кривой  $R=350$  м при скорости движения 50–60 км/ч значительно возрастает фактор износа боковой грани бандажа колеса загруженного вагона-платформы. При скорости 80 км/ч фактор износа боковой грани бандажа колеса  $\Phi$  значительно возрастает для полувагона в кривой  $R=600$  м. В свою очередь имеет место существенное увеличение  $\Phi$  при скорости 90 км/ч в кривой  $R=600$  м для порожнего хоппера и загруженной платформы;

– направляющие силы  $Y_N$ , действующие со стороны пути на колесо, с повышением скорости движения значительно возрастают в кривой  $R=350$  м и имеют в среднем одинаковые значения для всех типов подвижного состава. Значения  $Y_N$  в кривой  $R=600$  м при скорости 80–90 км/ч значительно изменяются для всех типов изучаемого подвижного состава;

– на кривых  $R=350$  и  $R=600$  м в порожнем режиме при скоростях до 90 км/ч наибольшие углы виляния колесной пары  $\psi_{кп}$  имеет вагон-платформа. При скорости 80 км/ч в кривых среднего радиуса 600 м значения  $\psi_{кп}$  растут для полувагона и значительно отличаются от другого диапазона исследуемых скоростей.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Блохин Е. П., Манашкин Л. А. Динамика поезда (нестационарные продольные колебания). Москва : Транспорт, 1982. 222 с.
2. Даніленко Е. І. Залізнична колія : підруч. для вищ. навч. закл. Київ : Інпрес, 2010. Т. 2. 456 с.
3. 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.
4. 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., 1998. С. 62–69.
5. *ДСТУ 7571:2014. Рухомий склад залізниць. Норми допустимого впливу на залізничну колію 1520 мм.* [Чинний від 2014-02-12]. Київ : УкрНДНЦ, 2014. 33 с.
6. *ДСТУ ГОСТ 33211:2017. Вагони вантажні. Вимоги до міцності та динамічних якостей (ГОСТ 33211-2014).* [Чинний від 2017-07-01]. Київ : УкрНДНЦ, 2017. 58 с.
7. Козаченко Д. Н., Папахов А. Ю., Германюк Ю. Н. Развитие методов организации вагонопотоков в Российской Империи и СССР. *Наука та прогрес транспорту*, 2020, № 3 (87). С. 37–61. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/208934>
8. Лазарян В. А., Длугач Л. А., Коротенко М. Л. Устойчивость движения рельсовых экипажей. Киев : Наукова думка, 1972. 197 с.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

9. Литвин В. А., Мямлин С. В., Малышева А. А., Недужая Л. А. Динамические показатели некоторых типов вагонов. *Механика транспорта : вес поезда, скорость, безопасность движения* : сб. науч. тр. Днепропетр. гос. техн. ун-т ж.-д. трансп. Днепропетровск, 1994. С. 95–104.
10. 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.
11. Третьяков А. В. *Управление индивидуальным ресурсом вагонов в эксплуатации* : монография. Санкт-Петербург : ОМ-Пресс, 2004. 348 с.
12. Швець А. О. Особливості визначення моментів інерції кузовів вантажних вагонів. *Вісник сертифікації залізничного транспорту*. 2018. № 5 (51). С. 20–34.
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. Aceituno J. F., Wang P., Wang L., Shabana A. A. Influence of rail flexibility in a wheel/rail wear prediction model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F : Journal of Rail and Rapid Transit*, 2017. Vol. 231. Iss. 1. P. 57–74. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409715618426>
15. Blokhin E. P., Pshinko O. M., Danovich V. D., Korotenko M. L. Effect of the state of car running gears and railway track on wheel and rail wear. *Proceedings of the 4th International Conference on Railway Bogies and Running Gears* (Budapest, 21-23 sept. 1998). Technical University of Budapest. Budapest, 1998. P. 313–323.
16. 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>
17. Gong C., Iwnicki S., Bezin Y. The effect of railway vehicle dynamics on the lateral alignment of track. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F : Journal of Rail and Rapid Transit*. 2016. Vol. 230. Iss. 1. P. 258–270. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409714536548>
18. Ingvardson J. B., Nielsen O. A. Effects of new bus and rail rapid transit systems – an international review. *Transport Reviews*. 2018. Vol. 38. Iss. 1. P. 96–116. DOI: <https://doi.org/10.1080/01441647.2017.1301594>
19. Ishiguri K., Kazato A., Miyahara K., Niiyama M., Sasaki K. Improvement of the lateral ride comfort on railway vehicles by application of pneumatic actuators for centering. *Quarterly Report of RTRI (Railway Technical Research Institute)*. 2017. Vol. 58. Iss. 1. P. 14–20. DOI: [https://doi.org/10.2219/rtriqr.58.1\\_14](https://doi.org/10.2219/rtriqr.58.1_14)
20. Johnsson C., De Ceunynck T. In search of surrogate safety indicators for vulnerable road users: a review of surrogate safety indicators. *Transport Reviews*. 2018. Vol. 38. Iss. 6. P. 765–785. DOI: <https://doi.org/10.1080/01441647.2018.1442888>
21. Kurhan M. B., Kurhan D. M. 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>
22. McKinnon A. C. Freight Transport Deceleration: Its Possible Contribution to the Decarbonisation of Logistics. *Transport Reviews*. 2016. Vol. 36. Iss. 4. P. 418–436. DOI: <https://doi.org/10.1080/01441647.2015.1137992>
23. Razinkin N. E., Voronova N. I., Podlesnikov Y. D., Danilov S. N. The influence of additional discharge of the brake line on the longitudinal dynamics of the train during braking. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*. 2019. Vol. 42. Iss. 3. P. 6–9. DOI: <https://doi.org/10.26480/jmrd.03.2019.06.09>
24. Shatunov O. V., Shvets A. O. Study of dynamic indicators of flat wagon with load centre shift. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 2 (80). P. 127–143. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/165160>
25. Shvets A. O., Bolotov O. O. Influence of loads from the axis of a gondola car on its dynamic indicators and railroad tracks. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 1 (79). P. 151–166. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/158127>
26. Uyulan Ç., Gokasan M., Bogosyan S. Stability and bifurcation analysis of the non-linear railway bogie dynamics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C : Journal of Mechanical Engineering Science*. 2018. Vol. 232. Iss. 16. P. 2787–2802. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954406217727304>
27. 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>
28. Zakeri J. A., Mosayebi S. A., Esmaeili M. Numerical and field investigations of track dynamic behavior caused by light and heavy railway vehicles. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics (Poland)*. 2016. Vol. 54. Iss. 3. P. 871–879. DOI: <https://doi.org/10.15632/jtam-pl.54.3.871>
29. 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>

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

А. О. ШВЕЦЬ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>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

## ДИНАМІКА ВЗАЄМОДІЇ ДЕЯКИХ ТИПІВ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ З ЗАЛІЗНИЧНОЮ КОЛІЄЮ

**Мета.** Невід’ємною і суттєвою особливістю сучасного вагонного парку є його масовість. Для всього парку рухомого складу навіть найнезначніші конструкційні зміни набувають величезних масштабів. Основною метою роботи є теоретичне дослідження впливу інерційних характеристик кузовів різних типів вантажного рухомого складу, з урахуванням режиму завантаження і швидкості руху, на їх основні динамічні показники та показники взаємодії з колійною структурою. **Методика.** Теоретичні дослідження проведено методом математичного та комп’ютерного моделювання динамічної навантаженості під час руху деяких типів вантажних вагонів: піввагонів моделі 12–532, вагонів-хоперів для перевезення вугілля моделі 12–4034 і платформ моделі 13–401 на типових візках 18–100 зі швидкостями в діапазоні від 50 до 90 км/год по кривих малого й середнього радіуса. **Результати.** Представлено аналіз теоретичних досліджень динамічних якостей і показників взаємодії із залізничною колією вантажного рухомого складу. У ході виконання теоретичних досліджень і після моделювання з урахуванням процесів коливання вантажних вагонів за різних режимів завантаження отримано залежності основних динамічних показників від швидкості руху. **Наукова новизна.** Уперше досліджено вплив інерційних характеристик кузовів різних типів вантажного рухомого складу та режимів завантаження на динамічну завантаженість вагона з метою вирішення завдання прогнозування динаміки рухомого складу і показників його взаємодії з колією. Отримано результати теоретичних досліджень з урахуванням швидкості руху по кривих ділянках колії малого й середнього радіуса. **Практична значимість.** Представлені результати розрахунків: дозволяють визначити оптимальні значення таких параметрів, як тара, висота центра мас і довжина бази вагона, під час вирішення питань модернізації експлуатованого парку вагонів та визначення резервів підвищення їх вантажопідйомності; дають можливість вирішувати завдання пошуку оптимальних напрямів модернізації рейкового екіпажу; сприяють створенню технічних умов на виготовлення нових і модернізацію експлуатованих вантажних вагонів; спрямовані на підвищення рівня надійності та безпеки процесу перевезень у сучасних умовах на залізничному транспорті.

*Ключові слова:* вантаж; вагон-платформа; вагон-хопер; піввагон; динамічні показники; криволінійні ділянки колії; показники взаємодії рухомого складу з колією; швидкість руху

А. О. SHVETS<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>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

## INTERACTION DYNAMICS OF SOME TYPES OF FREIGHT CARS WITH A RAILWAY TRACK

**Purpose.** An integral and essential feature of the modern wagon fleet is its large scale. For the entire fleet of rolling stock, even the smallest structural changes take on enormous proportions. The aim of the work is a theoretical study of the influence of the inertial characteristics of bodies of various types of freight rolling stock, taking into account the loading mode and the movement speed, on their main dynamic and interaction indicators with the track structure. **Methodology.** Theoretical studies were carried out by the method of mathematical and computer modeling of the dynamic load during the movement of some types of freight cars: gondola cars model 12-532, hopper cars for transporting coal model 12-4034 and flat wagons model 13-401 on standard bogies 18-100 at speeds in the range from 50 to 90 km/h on curves of small and medium radii. **Findings.** The analysis of theoretical studies of the dynamic qualities and interaction indicators of freight rolling stock and the railway track is presented. In the course of

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

theoretical studies and after modeling taking into account the oscillation processes of freight cars at different loading modes the dependences of the main dynamic indicators on the movement speed were obtained. **Originality.** The influence of inertial characteristics of bodies of various types of freight rolling stock and loading modes on the dynamic load of a car was first explored in order to solve the problem of predicting the rolling stock dynamics and indicators of its interaction with the track. The results of theoretical studies taking into account the movement speed along curved track sections of small and medium radius were obtained. **Practical value.** The presented calculation results make it possible to determine the optimal values of such parameters as dead weight, height of the mass center and car base length when solving the problems of modernizing the operated car fleet and determining the reserves for increasing their carrying capacity. They make it possible to solve the problems of finding the optimal directions for modernizing the rail vehicle; contribute to the creation of technical conditions for the manufacture of new and modernization of the operated freight cars and are aimed at increasing the level of reliability and safety of the transportation process in modern conditions on the railway transport.

*Keywords:* cargo; flat wagon; hopper car; gondola car; dynamic indicators; curved track sections; track and rolling stock interaction indicators; movement speed

## REFERENCES

1. Blokhin, Ye. P., & Manashkin, L. A. (1982). *Dinamika poezda (nestatsionarnye prodolnye kolebaniya)*. Moscow: Transport. (in Russian)
2. Danilenko, E. I. (2010). *Zaliznychna koliia: pidruchnyk dlia vyshchykh navchalnykh zakladiv*. (Vol. 2). Kyiv: Inpres. (in Ukrainian)
3. Danovich, V. D. (1982). *Spatial Cars Oscillations in Inertia Track*. (Dysertatsiia doktora tekhnichnykh nauk). Dnepropetrovsk Institute of Railway Transport Engineering, Dnepropetrovsk. (in Russian)
4. 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. *Transport. Stress loading and durability of a rolling stock*, 62-69. Dnepropetrovsk. (in Russian)
5. *Rukhomyj sklad zaliznycj. Normy dopustymogho vplyvu na zaliznychnu koliju 1520 mm. 33 DSTU 7571:2014* (2014). (in Ukrainian)
6. *Vahony vantazhni. Vymohy do mitsnosti ta dynamichnykh yakosti, 58 DSTU 33211:2017 (2017)* (in Ukrainian)
7. Kozachenko, D. M., Papakhov, O. Y., & Hermaniuk, Y. N. (2020). Development of car traffic volumes organization methods in the Russian Empire and in the USSR. *Science and Transport Progress*, 3(87), 37-61. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/208934> (in Russian)
8. Lazaryan, V. A., Dlugach, L. A., & Korotenko, M. L. (1972). *Ustoychivost dvizheniya relsovykh ekipazhey*. Kiev: Naukova dumka. (in Russian)
9. Litvin, V., Myamlin, S., Malysheva, A., & Neduzhaja, L. (1994). Dinamicheskie pokazateli nekotorykh tipov vagonov. *Mechanics of transport: train weight, speed, safety of movement*. Interuniversity collect. of sc. papers. Dnepropetrovsk, DIIT, 95-104. (in Russian)
10. Lysyuk, V. S. (2002). *Prichiny i mekhanizmy skhoda koleasa s relsa. Problema iznosa koleas i relsov*. Moscow: Transport. (in Russian)
11. Tretyakov, A. V. (2004). *Upravlenie individualnym resursom vagonov v ekspluatatsii: monografiya*. St. Petersburg: OM-Press. (in Russian)
12. Shvets, A. O. (2018). Specifics of determining the moments of inertia a freight wagons bodies. *Bulletin of Certification of Railway Transport*, 5(51), 20-34. (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)
14. Aceituno, J. F., Wang, P., Wang, L., & Shabana, A. A. (2017). Influence of rail flexibility in a wheel/rail wear prediction model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 231(1), 57-74. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409715618426> (in English)
15. Blokhin, E. P., Pshinko, O. M., Danovich, V. D., & Korotenko, M. L. (1998). Effect of the state of car running gears and railway track on wheel and rail wear. *Proceedings of the 4th International Conference on Railway Bogies and Running Gears* (pp. 313-323), Technical University of Budapest. Budapest. (in English)

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

16. Cao, T. N. T., Reddy, J. N., Ang, K. K., Luong, V. H., Tran, M. T., & Dai, J. (2018). 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)
17. Gong, C., Iwnicki, S., & Bezin, Y. (2016). The effect of railway vehicle dynamics on the lateral alignment of track. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 230(1), 258-270. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409714536548> (in English)
18. Ingvardson, J. B., & Nielsen, O. A. (2018). Effects of new bus and rail rapid transit systems-an international review. *Transport Reviews*, 38(1), 96-116. DOI: <https://doi.org/10.1080/01441647.2017.1301594> (in English)
19. Ishiguri, K., Kazato, A., Miyahara, K., Niiyama, M., & Sasaki, K. (2017). Improvement of the lateral ride comfort on railway vehicles by application of pneumatic actuators for centering. *Quarterly Report of RTRI (Railway Technical Research Institute)*, 58(1), 14-20. DOI: [https://doi.org/10.2219/trtriqr.58.1\\_14](https://doi.org/10.2219/trtriqr.58.1_14) (in English)
20. Johnsson, C., Laureshyn, A., & De Ceunynck, T. (2018). In search of surrogate safety indicators for vulnerable road users: a review of surrogate safety indicators. *Transport Reviews*, 38(6), 765-785. DOI: <https://doi.org/10.1080/01441647.2018.1442888> (in English)
21. 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)
22. McKinnon, A. C. (2016). Freight Transport Deceleration: Its Possible Contribution to the Decarbonisation of Logistics. *Transport Reviews*, 36(4), 418-436. DOI: <https://doi.org/10.1080/01441647.2015.1137992> (in English)
23. Razinkin, N. E., Voronova, N. I., Podlesnikov, Y. D., & Danilov, S. N. (2019). The influence of additional discharge of the brake line on the longitudinal dynamics of the train during braking. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 42(3), 6-9. DOI: <https://doi.org/10.26480/jmerd.03.2019.06.09> (in English)
24. Shatunov, O. V., & Shvets, A. O. (2019). Study of dynamic indicators of flat wagon with load centre shift. *Science and Transport Progress*, 2(80), 127-143. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/165160> (in English)
25. Shvets, A. O., & Bolotov, O. O. (2019). Influence of loads from the axis of a gondola car on its dynamic indicators and railroad tracks. *Science and Transport Progress*, 1(79), 151-166. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/158127> (in English)
26. Uyulan, Ç., Gokasan, M., & Bogosyan, S. (2018). Stability and bifurcation analysis of the non-linear railway bogie dynamics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 232(16), 2787-2802. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1177/0954406217727304> (in English)
27. 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)
28. Zakeri, J. A., Mosayebi, S. A., & Esmaeili, M. (2016). Numerical and field investigations of track dynamic behavior caused by light and heavy railway vehicles. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics (Poland)*, 54(3), 871-879. DOI: <https://doi.org/10.15632/jtam-pl.54.3.871> (in English)
29. Zhu, T., Yang, B., Yang, C., Xiao, S., Yang, G., & Yang, B. (2018). 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: 01.06.2020

Прийнята до друку: 02.10.2020

## ЗМІСТ

### **ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА**

**М. М. БІЛЯЄВ, М. В. ЛЕМЕШ, В. В. БІЛЯЄВА,  
П. Б. МАШИХІНА, З. М. ЯКУБОВСЬКА**  
КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ  
БІОЛОГІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД  
В АЕРОТЕНКАХ ІЗ ПЛАСТИНАМИ ..... 5

**В. А. КОЗАЧИНА, О. В. ГРОМОВА, О. Ю. ГУНЬКО,  
Л. Г. ТАТАРКО**  
МОДЕЛЮВАННЯ ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД НА  
БАЗІ CFD-МОДЕЛІ: ЕКСПРЕС-РОЗРАХУНОК ..... 15

### **ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ**

**Я. В. ЛІТВИНОВА, О. Д. БАРАНОВСЬКИЙ**  
ПОШУК ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ШЛЯХІВ  
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕВЕЗЕНЬ  
ТАРНО-ШТУЧНИХ ВАНТАЖІВ ..... 22

### **ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ**

**Б. Є. БОДНАР, О. Б. ОЧКАСОВ, Є. Б. БОДНАР,  
Д. В. БОБИР, М. В. ОЧЕРЕТНЮК**  
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СИСТЕМИ  
ОБСЛУГОВУВАННЯ ТЕПЛОВОЗІВ НА ОРГАНІЗАЦІЮ  
РОБОТИ ЛОКОМОТИВНОГО ДЕПО ..... 32

### **ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ**

**А. О. СУЛИМ, П. О. ХОЗЯ**  
УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДОЛОГІЇ ВИЗНАЧЕННЯ  
РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ЄМНІСНОГО  
НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ПОЇЗДА  
МЕТРОПОЛІТЕНУ ..... 45

### **ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ**

**І. В. ЖУКОВИЦЬКИЙ, В. М. ПАХОМОВА,  
Д. О. ОСТАПЕЦЬ, О. І. ЦИГАНКО**  
ВИЯВЛЕННЯ АТАК НА КОМП'ЮТЕРНУ МЕРЕЖУ НА  
ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ КОМПЛЕКСУ  
НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ..... 68

### **МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО**

**В. І. ЗУРНАДЖИ, В. С. ВОЛОШИН, Р. О. КУССА,  
В. Г. ЄФРЕМЕНКО, А. В. ДЖЕРЕНОВА,  
О. В. ЦВЕТКОВА**  
СУЧАСНІ КОНСТРУКЦІЙНІ СТАЛІ ІЗ  
TRIP-ЕФЕКТОМ ..... 80

**О. М. СЕРЕНКО, І. В. ЗАХАРОВА**  
ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ  
У ПОКРИТТЯХ, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ДУГОВОЇ  
МЕТАЛІЗАЦІЇ З ПУЛЬСУЮЧИМ РОЗПИЛЮВАЛЬНИМ  
ПОТОКОМ ..... 93

### **РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ**

**Ю. В. ЗЕЛЕНЬКО, Д. М. ЗЕЛЕНЬКО,  
Л. О. НЕДУЖА**  
ВИВЧЕННЯ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ  
НАФТОПРОДУКТІВ НА МЕТАЛЕВІ ЕЛЕМЕНТИ  
ЗАЛІЗНИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ..... 105

**В. Г. РАВЛЮК, М. Г. РАВЛЮК, І. К. КИРИЧЕНКО,  
Н. Ю. ЛАМНАУЕР, А. К. МЕЛЬНИЧУК**  
ІМОВІРНОСНО-СТАТИСТИЧНА МОДЕЛЬ ЗНОСУ  
ГАЛЬМОВИХ КОЛОДОК ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ... 116

**С. В. РАКША, П. Г. АНОФРІЄВ,  
О. С. КУРОП'ЯТНИК**  
ВИЗНАЧЕННЯ ТА АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ  
СТЕНДА ДЛЯ КОМПЛЕКСНИХ ВИПРОБУВАНЬ  
ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС ..... 134

**А. А. ШВЕЦ**  
ДИНАМІКА ВЗАЄМОДІЇ ДЕЯКИХ ТИПІВ  
ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ З ЗАЛІЗНИЧНОЮ  
КОЛІСЮ ..... 142

# CONTENTS

## ***ECOLOGY AND INDUSTRIAL SAFETY***

**M. M. BILIAIEV, M. V. LEMESH, V. V. BILIAEVA,  
P. B. MASHYKHINA, Z. M. YAKUBOVSKA**  
COMPUTER SIMULATION OF BIOLOGICAL  
WASTEWATER TREATMENT PROCESSES IN  
AEROTANKS WITH PLATES ..... 5

**V. A. KOZACHYNA, O. V. HROMOVA, O. Y. HUNKO,  
L. H. TATARKO**  
SIMULATION OF WASTE WATER TREATMENT BASED  
ON CFD MODEL: EXPRESS CALCULATION ..... 15

## ***ECONOMICS AND MANAGEMENT***

**Y. V. LITVINOVA, O. D. BARANOVSKY**  
SEARCH AND JUSTIFICATION OF WAYS TO  
INCREASE THE UNITIZED CARGO TRANSPORTATION  
EFFICIENCY ..... 22

## ***OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS***

**B. Y. BODNAR, O. B. OCHKASOV, Y. B. BODNAR,  
D. V. BOBYR, M. V. OCHERETNIUK**  
RESEARCH OF INFLUENCE OF LOCOMOTIVE  
SERVICE SYSTEM ON THE OPERATION  
ORGANIZATION OF LOCOMOTIVE DEPOT ..... 32

## ***ELECTRIC TRANSPORT, POWER SYSTEMS AND COMPLEXES***

**A. O. SULYM, P. O. KHOZIA**  
IMPROVEMENT OF THE METHODOLOGY FOR  
RATIONAL PARAMETERS DETERMINATION OF THE  
CAPACITIVE ENERGY STORAGE FOR THE METRO  
TRAIN ..... 45

## ***INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL MODELLING***

**I. V. ZHUKOVYTS'KYY, V. M. PAKHOMOVA,  
D. O. OSTAPETS, O. I. TSYHANOK**  
DETECTION OF ATTACKS ON A COMPUTER  
NETWORK BASED ON THE USE OF NEURAL  
NETWORKS COMPLEX ..... 68

## ***MATERIAL SCIENCE***

**V. I. ZURNADZHY, V. S. VOLOSHYN, R. A. KUSSA,  
V. G. EFREMENKO, A. V. DZHERENOVA,  
O. V. TSVETKOVA**  
MODERN STRUCTURAL STEELS  
WITH TRIP-EFFECT ..... 80

**O. M. SERENKO, I. V. ZAKHAROVA**  
DETECTION OF RESIDUAL STRESSES IN COATINGS  
OBTAINED BY THE METHOD OF ARC  
METALLIZATION WITH A PULSATING SPRAYING  
FLOW ..... 93

## ***ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION***

**Y. V. ZELENKO, D. M. ZELENKO, L. O. NEDUZHA**  
STUDY OF NEGATIVE INFLUENCE OF PETROLEUM  
PRODUCTS  
ON METAL ELEMENTS OF RAILWAY  
INFRASTRUCTURE ..... 105

**V. H. RAVLIUK, M. H. RAVLIUK,  
I. K. KYRYCHENKO, N. Y. LAMNAUER,  
A. K. MELNYCHUK**  
PROBABILITY AND STATISTICAL MODEL OF  
WEARING OF BRAKE PADS OF FREIGHT CARS ..... 116

**S. V. RAKSHA, P. H. ANOFRIIEV,  
O. S. KUROIPIATNYK**  
DETERMINATION AND ANALYSIS OF TECHNICAL  
PARAMETERS OF THE BENCH FOR RAILWAY  
WHEELS COMPLEX TESTS ..... 134

**A. O. SHVETS**  
INTERACTION DYNAMICS OF SOME TYPES OF  
FREIGHT CARS WITH A RAILWAY TRACK ..... 142

## 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 статтю та друкований примірник рукопису з підписами всіх співавторів на останньому аркуші роботи;

2) оригінал Ліцензійного договору з підписами всіх співавторів;

3) файл з відомостями про кожного з авторів – прізвище, ім'я, по-батькові повністю, посада, місце роботи, наукове звання, науковий ступінь, контактна інформація (телефон, адреса електронної пошти), код ORCID. Відомості про авторів подаються 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**

№ 5 (89) 2020

(українською, російською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – О. В. Помінова  
Комп'ютерне верстання – О. В. Помінова  
Літературна обробка – С. П. Лагдан

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ум. друк. арк. 19,07. Тираж 100 пр. Зам. №02/05

**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. 5 (89) 2020

(in Ukrainian, Russian and English languages)

Responsible for issue – O. V. Pominova  
Desktop publishing – O. V. Pominova  
Redaction – S. P. Lahdan

Format 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Conventional printed sheet 19,07. Circulation 100. Order no. 02/05

**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

