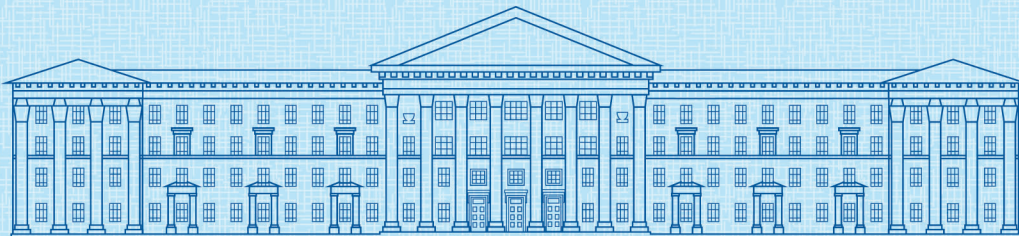




ISSN 2307-3489 (Print)
ISSN 2307-6666 (Online)



НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

№ 1 (85)

• 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

№ 1 (85) 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
Пічуров 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); Бобровський В. І., ДНУЗТ (Україна); Богдєвичус 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 державний технічний університет (Україна); Жуковичський 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); 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 Переліку наукових фахових видань України наказом Міністерства освіти і науки України 29.12.2014 р. № 1528 (технічні науки).
Журнал зареєстровано: в міжнародних каталогах періодичних видань Ulrichsweb™, Global Serials Directory, OCLC WorldCat; наукометричних системах Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus та ін.
Друкується за рішенням вченої ради університету від 02.03.2020 р., протокол № 7

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 та редакції вул. Лазаряна, 2, кім. 267, Дніпро, Україна, 49010
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. – «Труды 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»

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Научный журнал

№ 1 (85) 2020

Выходит 6 раз в год ♦ ♦ ♦ ♦ ♦ Основан в августе 2003 г.

Автоматизированные и телематические системы на транспорте
Экология и промышленная безопасность
Экономика и управление
Эксплуатация и ремонт средств транспорта
Электрический транспорт, энергетические системы и комплексы
Железнодорожный путь и автомобильные дороги
Информационно-коммуникационные технологии и математическое моделирование
Материаловедение
Машиностроение
Подвижной состав и тяга поездов
Транспортное строительство

Днепро

2020

Учредитель:
ДНИПРОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ИМЕНИ АКАДЕМИКА В. ЛАЗАРЯНА

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОГО
СОВЕТА УНИВЕРСИТЕТА

Пшинько А. Н., доктор технических наук

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛА

Пичугов С. А., доктор физико-математических наук

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Козаченко Д. Н., доктор технических наук

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Колесникова Т. А., кандидат наук
по социальным коммуникациям

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

Аврамовис З. З., Белградский университет (Сербия); Бела И., Институт логистики (Венгрия); Беляев Н. Н., ДНУЖТ (Украина); Бобровский В. И., ДНУЖТ (Украина); Богдывичус М., Вильнюсский технический университет имени Гедиминаса (Литва); Боднар Б. Е., ДНУЖТ (Украина); Бондаренко И. А., ДНУЖТ (Украина); Вакуленко И. А., ДНУЖТ (Украина); Воронин С. В., УкрГУЖТ (Украина); Головкова Л. С., ДНУЖТ (Украина); Ефременко В. Г., Приазовский государственный технический университет (Украина); Жуковицкий И. В., ДНУЖТ (Украина); Каливода Я., Чешский технический университет в Праге (Чехия); Капица М. И., ДНУЖТ (Украина); Капустян В. Е., Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» (Украина); Кершис Р., Каунасский технологический университет (Литва); Кузнецов В. Г., Научно-исследовательский институт железных дорог, (Польша); Манашкин Л., Независимый ученый, (США); Марущак П. А., Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя (Украина); Питтман Р., Антимонопольный отдел Департамента юстиции (США); Ракша С. В., ДНУЖТ (Украина); Сладковски А., Силезский технологический университет, (Польша); Суглер Дж., Варшавская школа экономики (Польша); Тюткин А. Л., ДНУЖТ (Украина); Шинкаренко В. И., ДНУЖТ (Украина)

Журнал
зарегистрирован

Государственной регистрационной службой Министерства юстиции Украины.
Свидетельство о регистрации КВ № 19609-9409ПР от 29.12.2012 г.
Издание внесено в Перечень научных специализированных изданий Украины приказом Министерства образования и науки Украины 29.12.2014 г. № 1528 (технические науки).
Журнал зарегистрирован: в международных каталогах периодических изданий Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; наукометрических системах Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus и др.
Печатается по решению ученого совета университета от 02.03.2020 г., протокол № 7

Издатель

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна (г. Днепро)
Свидетельство субъекта издательского дела ДК № 1315 от 31.03.2003 г.

Адрес
учредителя

ул. Лазаряна, 2, ком. 267, Днепро, Украина, 49010, тел.: +38 (056) 371-51-05;
e-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua; сайт журнала: <http://stp.diit.edu.ua/>

Издание публикуется с 1936 г.:

- 1936–1993 гг. – «Труды Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта»;
- 1993–2002 гг. – «Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту» (за серіями);
- 2003–2012 гг. – «Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна», (ISSN 1993-9175);
- с 2013 г. – «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 NACÌONAL'NOGO UNÌVERSITETU
ZALÌZNIČNOGO TRANSPORTU
=
SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

Scientific journal

No. 1 (85) 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
Editor-in-Chief
Deputy Chief Editor
Executive Secretary

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

EDITORIAL BOARD MEMBERS:

Avramovic Z. Ž., Faculty of Transport and Traffic Engineering (Serbia); Béla I., Logistics Institute (Hungary); Biliaiev M. M., DNURT (Ukraine); Bobrovskiy, V. I., 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); Pittman R., Antitrust Division of the USA. Department of Justice (USA); Raksha S. V., DNURT (Ukraine); Shinkarenko V. I., DNURT (Ukraine); Śladkowski 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 the list of scientific professional publications of Ukraine by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine 29.12.2014 r. no. 1528 (technical sciences).

Journal is registered: in the International Catalogue of periodicals Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; research and metric systems Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, etc.

Published according to the Academic Council decision of the University from 02.03.2020, Protocol no. 7

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

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

Edition is being published since 1936:

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

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

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

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

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

UDC 614.84.027.1

M. M. BILIAIEV^{1*}, O. V. BERLOV^{2*}, V. A. KOZACHYNA^{3*}, I. V. KALASHNIKOV^{4*},
O. V. SHEVCHENKO^{5*}

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

^{2*}Dep. «Life Safety», Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskoho St., 24a, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail berlov@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

^{3*}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 0000-0002-6894-5532

^{4*}Kharkiv Branch Office «Design and Research Institute of Railway Transport» of the Public Joint Stock Company «Ukrainian Railway», Kotliara St., 7, Kharkiv, 61052, tel. +38 (057) 724 41 25, e-mail uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

^{5*}Main Department of State Service for Emergency Situations of Ukraine in Dnipropetrovsk region, Korolenka St., 4, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (056) 744 25 87, e-mail dnipro@fireman.dp.ua, ORCID 0000-0001-9907-3610

RISK ASSESSMENT OF THERMAL DAMAGE TO PEOPLE AT INDUSTRIAL SITES IN CASE OF EMERGENCY BURNING SOLID PROPELLANT

Purpose. This work involves the development of a numerical model for the calculation of areas of thermal damage to people in the event of solid propellant burning at the industrial site. **Methodology.** An equation expressing the law of energy conservation was used to solve the problem of determining the areas of thermal shock of people at the industrial site. A potential flow model was used to calculate the airflow velocity field in the presence of buildings at the industrial site where an emergency occurs. The numerical solution of the two-dimensional equation for the velocity potential is derived using the Liebmann method. This numerical model takes into account the uneven velocity field of the wind flow that is formed near industrial buildings. An implicit difference splitting scheme was used to numerically solve the energy equation. The physical splitting of a two-dimensional energy equation into a system of one-dimensional equations describing the temperature transfer in one coordinate direction has been carried out previously. At each splitting step, the unknown temperature value is determined by an explicit point-to-point computation scheme. Based on the numerical model built, the code using the FORTRAN algorithm language is created. **Findings.** Based on the developed numerical model, a computational experiment was conducted to evaluate the risk of thermal damage to people at the industrial site where solid propellants are produced. The dangerous areas for personnel are identified. **Originality.** An efficient numerical model has been developed to calculate the zones of thermal pollution in case of solid propellant burning. **Practical value.** Based on the developed mathematical model, a computer program was created, which allows performing serial calculations for determining the zones of thermal damage during emergencies at the chemically hazardous objects. The mathematical model developed can be used to design an emergency response plan for chemically hazardous objects.

Keywords: risk of thermal damage; emergency burning of solid propellant; mathematical modelling

Introduction

Different types of emergencies are possible at chemically hazardous sites, where not only the emission of chemically hazardous substances takes place [2, 5–7], but also their accidental ignition. Such an emergency can occur at the Pavlohrad Chemical Plant, where solid propellant is manufactured and stored (Fig. 1). In case of emergencies, it is very important to assess the risk of damage to people [1, 8–13].

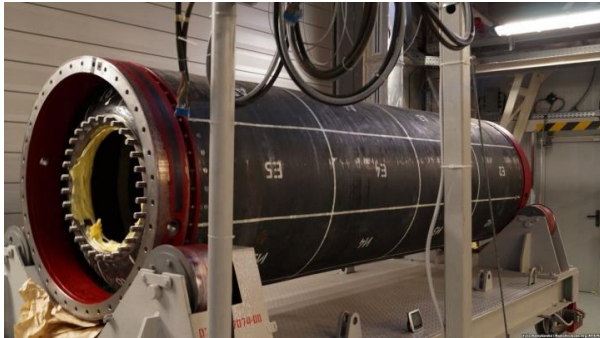


Fig. 1. Grimm-2 rocket engine:

(https://zik.ua/ru/news/2018/03/07/raketniy_kompleks_grom_yspitayut_v_kontse_2019_goda_1280605)

While burning solid propellant, apart from the concentration of chemically hazardous substances, another affecting factor emerges – the air temperature near the accident scene. In case of skin contact with the heated air burns of varying severity and inhalation burns appear, which may result in thermal damage with fatal consequences. Our study examines the methodology for solving the problem associated with identifying the potential territorial risk of thermal damage to personnel while burning solid propellant at an industrial site.

It is known that the temperature of solid propellant combustion products can be very high and depends on the propellant type. Because of the powerful emission of combustion products and under the influence of wind, the thermal contamination zone spreads from the accident scene; there is a risk of thermal damage to personnel in work areas located at some length at the industrial site. Therefore, to adequately assess the risk of human damage at industrial sites, the impact of this hazardous factor on people should be taken into account. To solve this problem, it is necessary to predict the air temperature change over time in the work area, since this task belongs to the class of non-

stationary tasks. It should be noted that the formation of temperature fields at the industrial site will be affected by different weather situations, such as during the formation of concentration fields. Therefore, to evaluate the risk of thermal damage to personnel at the industrial site, this should be taken into account in mathematical models. In addition, the complexity of solving this problem lies in the need to take into account the influence of various obstacles on the formation of thermal fields.

Purpose

Our primary goal is to develop a computer model for rapid assessment of the risk of thermal damage to people at an industrial site in the event of emergency combustion of solid propellants.

Methodology

In practice, it is important to have fast mathematical calculation models to assess the risk of thermal damage to personnel, which allow one to take into account important physical factors that influence the formation of hazardous zones. It should be noted that solving this class of tasks has several ambiguities. For example, the air temperature at the place of propellant combustion may have a wide enough range – from 1000 to 1500°C and above. The exact value is almost unknown. Therefore, when constructing a model for predicting the risk of thermal damage to people, we will make some assumptions: first – that $c_p = c_v$; second – we will consider only the processes of thermal conductivity and convective heat transfer. Then for the express estimation of the risk of thermal damage to people at industrial sites in case of accidents caused by the burning of solid propellants, we will use the following equation of convective heat transfer (two-dimensional, planned model, Boussinesq approximation) [3, 4]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} = \text{div}(a \text{grad} T), \quad (1)$$

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

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

The formulation of boundary conditions for the energy equation (1) is as follows:

1. At the input of the calculation area:

$$T = T_{in},$$

where T_{in} – is the known ambient air temperature (eg., $T_{in} = 20^\circ\text{C}$).

2. At the boundary of the flow exit from the calculated area:

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

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

3. On the solid boundaries $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$.

For the moment of time $t=0$, that is, at the moment of the beginning of the calculation, we set the condition $T = T_0$, where T_0 – is the known air temperature in the calculation area, for example $T_0 = T_{in}$. At the place where the solid propellant combustion products are released, the temperature of these products is set. This approach can be used when conducting «pilot», serial calculations to quickly identify the most dangerous areas of thermal damage to personnel. Another approach is to set the heat emission power at the accident scene, but one needs to know this emission for a specific type of propellant. In this case, we add a summand to the energy equation (1), similar to the simulation of a point source of the emission of a chemically dangerous substance in the mass transfer equation.

Solving the energy equation allows obtaining a temperature distribution over time in work areas near the place where an accident at the enterprise occurred. The risk of thermal damage is determined from the following condition: if the air temperature in the work area is more than the set damage temperature (for example, the temperature is more than 100°C , at which there is complete protein denaturation), then at this point of the work area we assume that the risk of damage is equal 100%.

To numerically solve the energy equation, we use the implicit difference splitting scheme. At the first stage, we split the energy equation at the differential level into a sequence of the following equations:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right); \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial vT}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(a_y \frac{\partial T}{\partial y} \right). \quad (3)$$

Then for the numerical integration of one-dimensional energy equations, we use the implicit difference scheme [4]:

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

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

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

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

We approximate the derivatives for the equations from system (2)–(3):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) &\approx a_x \frac{T_{i+1,j}^{n+1} - T_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} - \\ &- a_x \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- T^{n+1} + M_{xx}^+ T^{n+1}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y} \left(a_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) &\approx a_y \frac{T_{i,j+1}^{n+1} - T_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} - \\ &- a_y \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^- T^{n+1} + M_{yy}^+ T^{n+1}; \end{aligned}$$

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

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

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

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

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

The splitting scheme for equation (2) is written as follows:

– at the first step, the difference equation has the following form:

$$\frac{T_{i,j}^k - T_{i,j}^n}{\Delta t} + L_x^+ T^k = M_{xx}^+ T^k + M_{xx}^- T^n; \quad (4)$$

– at the second step of the splitting, the difference equation takes the form:

$$\frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^k}{\Delta t} + L_x^- T^{n+1} = M_{xx}^+ T^n + M_{xx}^- T^{n+1}. \quad (5)$$

The splitting scheme for numerical integration equation (3) is as follows:

– at the first step, the difference equation has the form:

$$\frac{T_{i,j}^k - T_{i,j}^n}{\Delta t} + L_y^+ T^k = M_{yy}^+ T^k + M_{yy}^- T^n; \quad (6)$$

– at the second step of the splitting, the difference equation will be as follows:

$$\frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^k}{\Delta t} + L_y^- T^{n+1} = M_{yy}^+ T^n + M_{yy}^- T^{n+1}. \quad (7)$$

The unknown value of temperature T at each step of splitting (4)–(7) is calculated by the formula of point-to-point computation.

The air velocity field u, v , in the presence of obstacles at the industrial site, is determined based on the model of potential movement:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} &= 0; \\ u &= \frac{\partial P}{\partial x}; \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}. \end{aligned} \quad (8)$$

The boundary conditions for equation (8) are as follows:

- 1) $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$ – at solid impermeable boundaries;
- 2) $\frac{\partial P}{\partial n} = V_n$ – at the boundary where the flow enters the calculation area, V_n – known air velocity;
- 3) $P = \text{const}$ – at the boundary of the flow exit from the calculation area.

We will use the Liebmann method to numerically solve this equation. In this case, the difference equation will look like:

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

We define the value of the velocity potential in the centers of the difference cells as follows:

$$P_{i,j} = \left[\frac{P_{i+1,j} + P_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1} + P_{i,j-1}}{\Delta y^2} \right] / Z, \quad (9)$$

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

The calculation of dependence (9) is completed when

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

where $P_{i,j}^{n+1}$ – is the value of the velocity potential at the new iteration; $P_{i,j}^n$ – the value of the velocity potential at the previous iteration; ε – small number.

To calculate by the formula (9) it is necessary to set the initial value of the velocity potential in the calculation region, we take the following value: $P_{i,j}^0 = 0$.

The components of the air velocity vector on the sides of the computational cells are calculated as follows:

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

It is necessary to know this air velocity field to solve an energy equation that uses the parameters $u = f(x, y)$, $v = f(x, y)$.

The methodology for assessing the potential territorial risk of thermal damage to personnel at an industrial site is analogous to the methodology for assessing the potential territorial risk of toxic human damage. That is, based on numerical integration of basic equations (energy equation and equation for velocity potential), we predict the

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

formation of temperature fields for different weather conditions, etc. whose probability is known. Then we determine the subzones where the air temperature value is greater than the damage temperature (this damage temperature is defined by the model's user), and print the results of the prediction of thermal damage risk for a specific point in time, in order to further analyze the size and speed of the damage zone formation. The probability of propellant ignition point may also be considered for risk assessment.

FORTRAN was used to create the code. The TH2 program package, which is a software implementation of the methodology for assessing the territorial risk of thermal damage to personnel at an open space, includes the following subprograms of the SUBROUTINE program:

1. TEN1 – calculation of the air velocity field at the industrial site (TEN1A – calculation of the air velocity field in the working room).
2. TEN2 – calculation of the velocity potential.
3. TEN3 – calculation of temperature fields and their changes over time at the industrial site.
4. TEN5 – print of the calculation results.
5. TEN6 – risk calculation of the thermal damage to personnel at the industrial site.

For calculations to determine the magnitude of the territorial risk of thermal damage to people at the industrial site, one must specify the following parameters:

1. Dimensions of the calculation area.
2. Dimensions of buildings.
3. Geometric shape of buildings.
4. Weather situation parameters.
5. Air temperature at the accident scene.
6. The location of the accident.
7. Receptor coordinates (work area).
8. Probability of realization of certain weather situation.
9. Location of buildings at an industrial site.

The result of the simulation is a matrix of the territorial risk of thermal damage to people at the site for a specific moment after the accident or the distribution of temperature fields at the site and their change over time.

Findings

The constructed numerical model was used to estimate the potential risk of thermal damage to people at the industrial site of Pavlohrad Chemical Plant (Fig. 2) in the case of solid propellant of the Grim-2 rocket.



Fig. 2. To calculation of the risk of thermal damage to personnel at the industrial site of Pavlohrad Chemical Plant (Googleimage):
1 – the place of probable emergency burning of solid propellant; 2 – work area no. 1; 3 – industrial building;
4 – work area no. 2

During calculations, it is taken that at the industrial site the probability of wind velocity of 3 m/s is equal to 25%, and the reliability of the wind velocity of 7 m/s is equal to 75%. The wind direction is shown in the figure by an arrow. It is taken that the temperature of combustion products at the accident scene is 1000°C. Initial air temperature in the calculation area $T_0 = 20^\circ\text{C}$. The dimensions of the calculation area are 290x268 m. We estimate the risk of thermal damage to workers based on the two-dimensional energy equation discussed above. It is taken the following: if the air temperature at the industrial site is more than 100°C, then the receptor enters the damage area.

Below Fig. 3–5 shows the change dynamics in the air temperature near the industrial building at different intervals after the accident. Data are given for a wind velocity of 3 m/s.

The limit of thermal pollution, in Fig. 3–5, marked by no. 1, shows the boundary of the zone of thermal damage to workers; since this isoline corresponds to the temperature value of

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

$T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$. As we can see, the thermal pollution zone at the industrial site is constantly expanding over time and extending along the industrial building. It is clearly seen that subzones with high temperature gradients are created near the building walls.

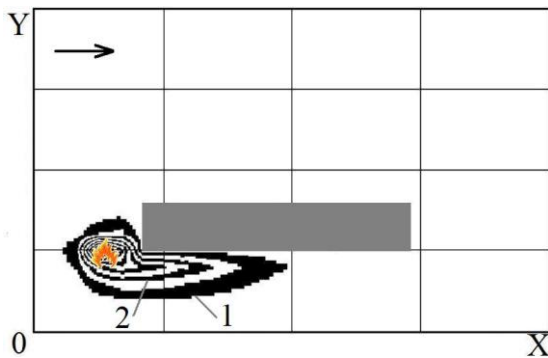


Fig. 3. Zone of thermal pollution (isotherm) near industrial building, $t = 10\text{ sec}$:
1 – $T = 100^{\circ}\text{C}$; 2 – $T = 230^{\circ}\text{C}$

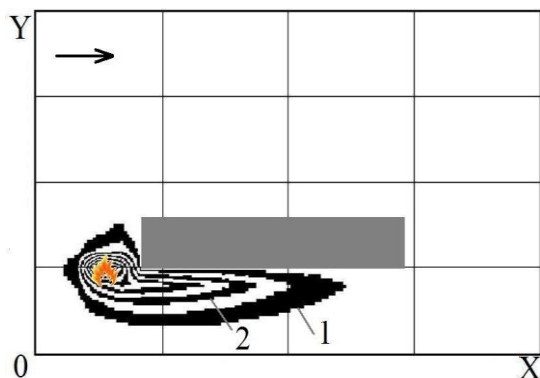


Fig. 4. Zone of thermal pollution (isotherm) near industrial building, $t = 25\text{ sec}$:
1 – $T = 102^{\circ}\text{C}$; 2 – $T = 239^{\circ}\text{C}$



Fig. 5. Zone of thermal pollution (isotherm) near industrial building, $t = 32\text{ sec}$:
1 – $T = 103^{\circ}\text{C}$; 2 – $T = 240^{\circ}\text{C}$; 3 – industrial building

In order to obtain clearer assessment of the potential risk of thermal damage to people at the industrial site, it is necessary to analyze the data below in Fig. 6–9. They show the change in air temperature in two work areas (these work areas are shown in Fig. 2), which are located near the wall of the industrial building. The first zone is located at a length of about 55 m from the accident scene, the second – at a length of about 33 m from the accident scene.

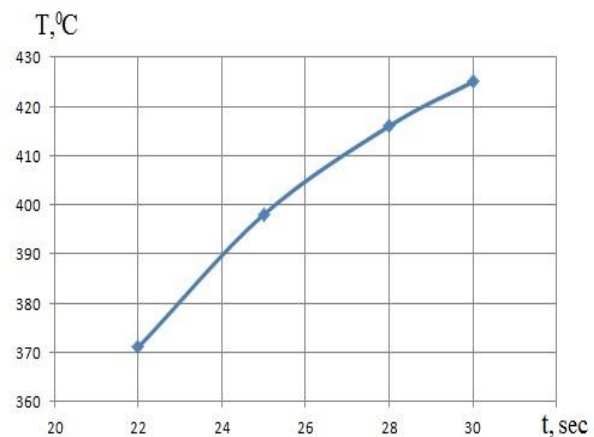


Fig. 6. Air temperature change over time in work area no. 2

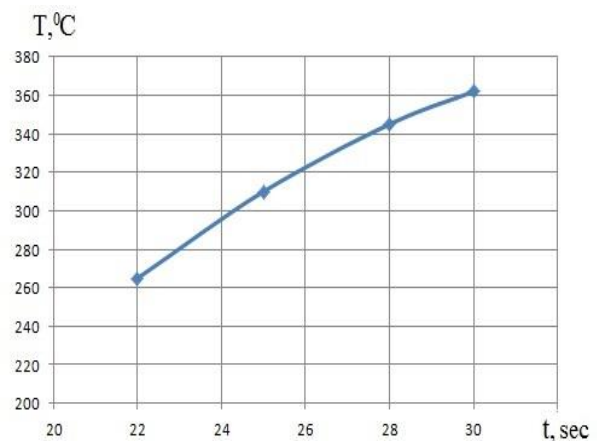


Fig. 7. Air temperature change over time in work area no. 1

As we can see from Fig. 6 and 7, the air temperature rises very rapidly in both work areas and already in 20 sec. after the start of emergency emission it exceeds the threshold value of damage temperature by more than twice. Such air temperature will cause burns of both human skin and respiratory tract.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Fig. 8 and 9 show the matrices of potential territorial risk of thermal damage to people at industrial site for different time points in case of realization of these probable weather conditions.

From Fig. 8 and 9, we see that the area of territorial risk zone of thermal damage to personnel is constantly changing over time. It is increasing in size, so we are talking about the spatial-temporal change of the territorial risk of thermal damage to personnel at industrial site. For the considered meteorological situations, the risk of thermal damage to personnel is extremely high, as thermal damage is formed very quickly. However, we see that behind the building there is no risk of thermal damage to people for the considered moments of time. It should be noted that the calculation time was 4 sec.

Conclusions

1. A numerical model is proposed for predicting the areas of thermal damage to personnel at industrial sites in case of the emergency ignition of solid propellants.

2. Risk of thermal damage to people at an industrial site in case of solid propellant ignition was assessed.

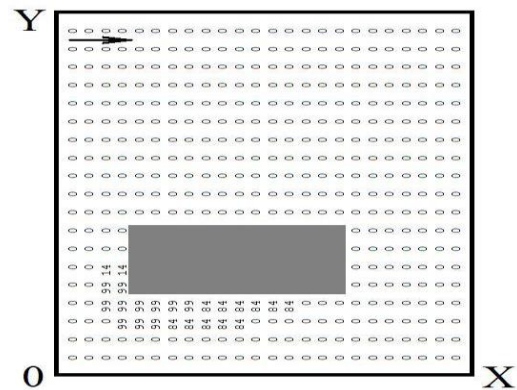


Fig. 8. Probability of thermal damage to personnel at industrial site at the time moment $t = 12$ sec.

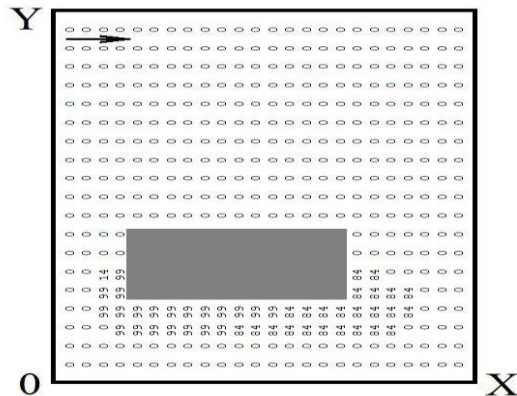


Fig. 9. Probability of thermal damage to personnel at the industrial site at the time moment $t = 24$ sec.

LIST OF REFERENCE LIST

1. Алымов В. Т., Тарасова Н. П. *Техногенный риск. Анализ и оценка* : учеб. пособие для вузов. Москва : Академкнига, 2004. 118 с.
2. Беляев Н. Н., Гулько Е. Ю., Росточило Н. В. *Защита зданий от проникновения в них опасных веществ* : монография. Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. 136 с.
3. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. *Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде*. Киев : Наук. думка, 1997. 368 с.
4. Марчук Г. И. *Математическое моделирование в проблеме окружающей среды*. Москва : Наука, 1982. 320 с.
5. Anjana N. S., Amarnath A., Harindranathan Nair M. V. Toxic hazards of ammonia release and population vulnerability assessment using geographical information system. *Journal of Environmental Management*. 2018. Vol. 210. P. 201–209. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.01.021>
6. Berlov O. V. Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo. *Наука та прогрес транспорту*. 2016. № 1 (61). С. 48–54. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60953>
7. Biliaiev M. M., Kharytonov M. M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security*. Dordrecht, 2012. P. 87–91. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15
8. Cao C., Li C., Yang Q., Zhang F. Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Allocation for Sustainable Disaster Supply Chain. *Sustainability*. 2017. Vol. 9. Iss. 11. DOI: <https://doi.org/10.3390/su9112103>

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

9. Ilić P., Ilić S., Stojanović Bjelić L. Hazard modelling of accidental release chlorine gas using modern tool-aloha software. *Quality of life*. 2018. Vol. 9 (1–2). P. 38–45. DOI: <https://doi.org/10.7251/QOL1801038I>
10. Komatina D. I., Galjak J., Belošević S. Simulation of chemical accidents with acetylene in in «messer tehnogas» kraljevo plant by «aloha» software program. *Publication in Natural Sciences*. 2018. Vol. 8. Iss. 2. P. 19–26. DOI: <https://doi.org/10.5937/univtho8-18014>
11. Lee H., Sohn J.-R., Byeon S.-H., Yoon S., Moon K. Alternative Risk Assessment for Dangerous Chemicals in South Korea Regulation: Comparing Three Modeling Programs. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2018. Vol. 15. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph15081600>
12. Protective Action Criteria. A Review of Their Derivation, Use, Advantages and Limitations. Environmental Public Health Science Unit, Health Protection Branch, Public Health and Compliance Division, Alberta Health. Edmonton, Alberta, 2017. URL: <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> (дата звернення: 15.10.2019).
13. Tumanov A., Gumenyuk V., Tumanov V. Development of advanced mathematical predictive models for assessing damage avoided accidents on potentially-dangerous sea-based energy facility. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 90. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/90/1/012027>

Н. Н. БЕЛЯЕВ^{1*}, А. В. БЕРЛОВ^{2*}, В. А. КОЗАЧИНА^{3*}, И. В. КАЛАШНИКОВ^{4*},
А. В. ШЕВЧЕНКО^{5*}

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

^{2*}Каф. «Безопасность жизнедеятельности», ГБУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24а, Днепро, Украина, 49600, тел. +38 (056) 756 34 57, эл. почта berlov@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

^{3*}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 0000-0002-6894-5532

^{4*}Харьковское отделение филиала «Проектно-изыскательный институт железнодорожного транспорта» АО «Українська залізниця», ул. Котляра, 7, Харьков, Украина, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, эл. почта uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

^{5*}Главное управление ГСЧС Украины в Днепропетровской области, ул. Короленко, 4, Днепро, Украина, 49600, тел. +38 (056) 744 25 87, эл. почта dnipro@fireman.dp.ua, ORCID 0000-0001-9907-3610

ОЦЕНКА РИСКА ТЕРМИЧЕСКОГО ПОРАЖЕНИЯ ЛЮДЕЙ НА ПРОМЫШЛЕННОМ ОБЪЕКТЕ В СЛУЧАЕ АВАРИЙНОГО ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА

Цель. Данная работа предусматривает разработку численной модели для расчета зон термического поражения людей при аварийном горении твердого ракетного топлива на территории промышленного объекта. **Методика.** Для решения поставленной задачи – определения зон термического поражения людей на территории промышленного объекта – использовано уравнение, выражающее закон сохранения энергии. Для расчета поля скорости воздушного потока при наличии зданий на территории промышленного объекта, где имеет место аварийная ситуация, использована модель потенциального течения. Численное решение двумерного уравнения для потенциала скорости проведено с помощью метода Либмана. При использовании этой численной модели учтено неравномерное поле скорости ветрового потока, формируемого у промышленных зданий. Для численного решения уравнения энергии использовано неявную разностную схему расщепления. Предварительно осуществлено физическое расщепление двумерного уравнения энергии на систему одномерных уравнений, описывающих перенос температуры в одном координатном направлении. На каждом шагу расщепления неизвестное значение температуры определено по явной схеме бегущего счета. На базе построенной численной модели создан код на алгоритмическом языке FORTRAN. **Результаты.** На основе разработанной численной модели проведен вычислительный эксперимент для оценки риска термического поражения людей на территории промышленного объекта, где изготавливают твердое ракетное топли-

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

во. Определены зоны, опасные для нахождения персонала. **Научная новизна.** Разработана эффективная численная модель, позволяющая рассчитывать зоны термического загрязнения в случае аварийного горения твердого ракетного топлива. **Практическая значимость.** На базе разработанной математической модели создана компьютерная программа, которая дает возможность проводить серийные расчеты для определения зон термического поражения при чрезвычайных ситуациях на территории химически опасных объектов. Данная математическая модель может быть использована при разработке плана ликвидации аварийной ситуации (ПЛАС) для химически опасных объектов.

Ключевые слова: риск термического поражения; аварийное горение твердого ракетного топлива; математическое моделирование

М. М. БІЛЯЄВ^{1*}, О. В. БЕРЛОВ^{2*}, А. В. КОЗАЧИНА^{3*}, І. В. КАЛАШНІКОВ^{4*},
О. В. ШЕВЧЕНКО^{5*}

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

^{2*}Каф. «Безпека життєдіяльності», ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 756 34 57, ел. пошта berlov@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

^{3*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

^{4*}Харківське відділення філії «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту» АТ «Українська залізниця», вул. Котляра, 7, Харків, Україна, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, ел. пошта uzpr38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

^{5*}Головне управління ДСНС України у Дніпропетровській області, вул. Короленка, 4, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 744 25 87, ел. пошта dnipro@fireman.dp.ua, ORCID 0000-0001-9907-3610

ОЦІНКА РИЗИКУ ТЕРМІЧНОГО УРАЖЕННЯ ЛЮДЕЙ НА ПРОМИСЛОВОМУ ОБ'ЄКТІ В РАЗІ АВАРІЙНОГО ГОРІННЯ ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ПАЛИВА

Мета. Ця робота передбачає розробку чисельної моделі для розрахунку зон термічного ураження людей у разі аварійного горіння твердого ракетного палива на території промислового об'єкта. **Методика.** Для розв'язання поставленої задачі – визначення зон термічного ураження людей на території промислового об'єкта – використано рівняння, що виражає закон збереження енергії. Для розрахунку поля швидкості повітряного потоку за наявності будівель на території промислового об'єкта, де має місце аварійна ситуація, використано модель потенціальної течії. Чисельне розв'язання двовимірного рівняння для потенціалу швидкості проведено за допомогою методу Лібмана. Під час використання цієї чисельної моделі враховано нерівномірне поле швидкості вітрового потоку, що формується біля промислових будівель. Для чисельного розв'язання рівняння енергії використано неявну різницеву схему розщеплення. Попередньо здійснено фізичне розщеплення двовимірного рівняння енергії на систему одновимірних рівнянь, що описують перенос температури в одному координатному напрямку. На кожному кроці розщеплення невідоме значення температури визначено за явною схемою біжучого рахунку. На базі побудованої чисельної моделі створено код за допомогою алгоритмічної мови FORTRAN. **Результати.** На основі розробленої чисельної моделі проведено обчислювальний експеримент для оцінки ризику термічного ураження людей на території промислового об'єкта, де виготовляють тверде ракетне паливо. Визначено зони, які є небезпечними для перебування персоналу. **Наукова новизна.** Розроблено ефективну чисельну модель, що дозволяє розраховувати зони термічного забруднення в разі аварійного горіння твердого ракетного палива. **Практична значимість.** На базі розробленої математичної моделі створено комп'ютерну програму, що дає можливість проводити серійні розрахунки для визначення зон термічного ураження під час надзвичайних ситуацій на території хімічно небезпечних об'єктів. Ця модель може бути використана під час розробки плану ліквідації аварійної ситуації (ПЛАС) для хімічно небезпечних об'єктів.

Ключові слова: ризик термічного ураження; аварійне горіння твердого ракетного палива; математичне моделювання

REFERENCES

1. Alymov, V. T., & Tarasova, N. P. (2004). *Tekhnogennyy risk. Analiz i otsenka: uchebnoye posobie dlya vuzov*. Moscow: Akademkniga. (in Russian)
2. Biliaiev, N. N., Gunko, E. Y., & Rostochilo, N. V. (2014). *Zashchita zdaniy ot proniknoveniya v nikh opasnykh veshchestv: Monografiya*. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (in Russian)
3. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Belyaev, N. N. (1997). *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
4. Marchuk, G. I. (1982). *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy*. Moscow: Nauka. (in Russian)
5. Anjana, N. S., Amarnath, A., & Harindranathan Nair, M. V. (2018). Toxic hazards of ammonia release and population vulnerability assessment using geographical information system. *Journal of Environmental Management*, 210, 201-209. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.01.021> (in English)
6. Berlov, O. V. (2016). Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo. *Science and Transport Progress*, 1(61), 48-54. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60953> (in English)
7. Biliaiev, M. M., & Kharytonov, M. M. (2012). Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security*, 87-91. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15 (in English)
8. Cao, C., Li, C., Yang, Q., & Zhang, F. (2017). Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Allocation for Sustainable Disaster Supply Chain. *Sustainability*, 9(11). DOI: <https://doi.org/10.3390/su9112103> (in English)
9. Ilić, P., Ilić, S., & Stojanović Bjelić, L. (2018). Hazard Modelling of Accidental Release Chlorine Gas Using Modern Tool-Aloha Software. *Quality of Life*, 9(1-2). DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.7251/QOL1801038I> (in English)
10. Komatina, D. I., Galjak, J., & Belošević, S. (2018). Simulation of chemical accidents with acetylene in «messer tehnogas» kraljevo plant by «aloha» software program. *Publication in Natural Sciences*, 8(2), 19-26. DOI: <https://doi.org/10.5937/univtho8-18014> (in English)
11. Lee, H., Sohn, J.-R., Byeon, S.-H., Yoon, S., & Moon, K. (2018). Alternative Risk Assessment for Dangerous Chemicals in South Korea Regulation: Comparing Three Modeling Programs. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(8), 1-12. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph15081600> (in English)
12. Government of Alberta. (2017). *Protective Action Criteria: A Review of Their Derivation, Use, Advantages and Limitations*. Environmental Public Health Science Unit, Health Protection Branch, Public Health and Compliance Division, Alberta Health. Edmonton, Alberta. Retrieved from <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> (in English)
13. Tumanov, A., Gumenyuk, V., & Tumanov, V. (2017). Development of advanced mathematical predictive models for assessing damage avoided accidents on potentially-dangerous sea-based energy facility. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 90, 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/90/1/012027> (in English)

Received: September 30, 2019

Accepted: January 31, 2020

УДК 628.16.067.1:519.87

В. Д. ПЕТРЕНКО¹, М. І. НЕТЕСА², О. Л. ТЮТЬКІН³, О. В. ГРОМОВА⁴,
В. А. КОЗАЧИНА^{5*}¹Каф. «Мости та тунелі», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, ел. пошта petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593²Каф. «Будівельне виробництво та геодезія», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 195 50 27, ел. пошта andreynetesa@meta.ua, ORCID 0000-0003-1730-7642³Каф. «Мости та тунелі», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, ел. пошта alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758⁴Каф. «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_diit@i.ua, ORCID 0000-0002-5149-4165^{5*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ У ФІЛЬТРИ

Мета. Для аналізу ефективності очищення води в системах водопідготовки важливим завданням є розробка математичних моделей, що дозволяють визначати ступінь очищення води на етапі проведення проектних робіт. Основною метою роботи є побудова чисельних моделей для розрахунку процесу фільтрації та масопереносу у фільтрі. **Методика.** Розрахунок процесу фільтрації забрудненої води у фільтрі проведено у два етапи. На першому етапі розраховано поле швидкості потоку у фільтрі. Для розв'язання цієї задачі використано класичне рівняння фільтрації. На другому етапі розрахунок змодельовано течію забрудненої води у фільтрі. Для розв'язання цієї задачі використано рівняння масопереносу, що виражає закон збереження маси. Це рівняння враховує перенос домішки фільтраційним потоком, перенос домішки за рахунок дисперсії та сорбцію домішки в завантаженні фільтра. Розв'язання рівняння фільтрації проведено за допомогою поперемінно-трикутного методу О. А. Самарського. Визначення невідомого значення напору на базі цього методу проведено за явною формулою біжучого розрахунку. Для чисельного інтегрування моделювального рівняння масопереносу у фільтрі використано різницеву схему розщеплення. **Результати.** Сучасною тенденцією в галузі водопостачання та водовідведення є створення багатовимірних та багатофакторних математичних моделей. Таки моделі дозволяють замінити фізичний експеримент на обчислювальний. До комплексу споруд водопідготовки обов'язково належать фільтри очищення води. Ефективність роботи фільтрів впливає на ефективність роботи інших очисних споруд технологічної схеми очищення. Розроблено математичну модель, що дозволяє аналізувати процес очищення води у фільтрі. На базі цієї чисельної моделі розроблено пакет прикладних програм для проведення комп'ютерного експерименту з моделювання процесу очищення води у фільтрі. Наведено результати обчислювального експерименту з моделювання процесу фільтрації забрудненої води у фільтрі. **Наукова новизна.** У роботі запропоновано чисельну двовимірну модель фільтра, що базується на рівнянні фільтрації та рівнянні масопереносу. Особливістю цієї моделі є можливість моделювання поля швидкості та процесу переносу домішки з урахуванням геометричної форми фільтрів. **Практична значимість.** Час розрахунку одного варіанта завдання на базі побудованої чисельної моделі складає декілька секунд, що є важливим для проведення серійних розрахунків на практиці. Моделі можна використовувати як альтернативу проведення лабораторних експериментів.

Ключові слова: очищення води; математичне моделювання; фільтр; чисельна модель

Вступ

Актуальною проблемою в галузі водопостачання та водовідведення є розробка математичних моделей для визначення ефективності роботи різних систем та споруд очищення води [1, 2, 3, 5–13]. Важливість цього завдання пов'язана з тим, що використання методу фізичного моделювання є дуже коштовним та потребує значного часу на отримання результатів. Тому постає необхідність у створенні математичних моделей, що дозволяють б оперативно визначати ефективність роботи очисного обладнання для різних умов експлуатації.

У наш час значну увагу приділяють завданням підвищення ефективності роботи очисних споруд на станціях водопідготовки та підприємствах. На цих станціях широко використовують різного роду очисні споруди: відстійники, змішувачі та ін. Слід підкреслити, що практично на кожній станції водопідготовки є фільтри. Ефективність роботи фільтрів залежать від різних факторів. У випадку побудови нових станцій водо підготовки або реконструкції наявних виникає проблема визначення ефективності роботи фільтрів для нових умов експлуатації.

Для вирішення цього завдання широко використовуються емпіричні [4] та аналітичні моделі [6, 7]. Вони дозволяють досить швидко розрахувати необхідні параметри фільтра, але не враховують просторові процеси фільтрації. Тому для практичних цілей важливо розробляти моделі, що дають можливість розв'язувати задачі фільтрації у дво- або тривимірній постановці.

Мета

Як основну мету роботи ми передбачаємо розробку двовимірної чисельної моделі процесу масопереносу у фільтрі. Чисельна модель має бути застосовною для розрахунку як безнапірних, так і напірних фільтрів. Крім цього, має бути реалізована можливість моделювання процесу фільтрації для різного завантаження та різних розмірів, форми фільтра, витрати забрудненої води. Також розроблена чисельна модель повинна дозволити проведення серійних розрахунків із невеликою витратою комп'ютерного часу.

Методика

Ставимо завдання розробки математичної моделі, що дозволяє розраховувати процес фільтрації забрудненої води у фільтрі.

Процес розрахунку масопереносу у фільтрі складається з двох етапів. На першому етапі розраховуємо поле швидкості фільтрації у фільтрі. Моделювальне рівняння на цьому етапі має вигляд:

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

де H – п'єзометричний напір.

Постановку граничних умов для рівняння фільтрації (1) наведено в роботі [3].

Після визначення поля п'єзометричного напору розраховуємо компоненти вектора швидкості фільтраційного потоку у фільтрі так:

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

де k – коефіцієнт фільтрації.

Чисельний розв'язок рівняння фільтрації (1) знаходимо за допомогою поперемінно-трикутного методу О. А. Самарського. На кожному кроці розщеплення різниці рівняння для чисельного інтегрування (1) записуємо так:

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

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

де η – фіктивний час.

Ця різницева схема є неявною, але розрахункові значення потенціалу швидкості $P_{i,j}$ на кожному кроці розщеплення здійснюємо також за явною формулою – методом біжучого рахунку.

Процес розрахунку закінчується в разі виконання умови:

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

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

де $H_{i,j}^{n+1}$ – нове наближення величини напору;
 $H_{i,j}^n$ – попереднє значення величини напору;
 ε – мале число.

Після розрахунку у фільтрі поля напору визначаємо компоненти вектора швидкості фільтраційного потоку на гранях різницевих комірок:

$$u_{ij} = -k \frac{H_{i,j} - H_{i-1,j}}{\Delta x};$$

$$v_{ij} = -k \frac{H_{i,j} - H_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

На другому етапі моделювання розраховуємо процес масопереносу домішки у фільтрі. Для розрахунку цього процесу використовуємо наступне рівняння [2, 3]:

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

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right), \quad (2)$$

де C – концентрація домішки у фільтраційному потоці; u, v – компоненти вектора швидкості фільтраційного потоку; μ_x, μ_y – коефіцієнти дисперсії; x, y – декартові координати; σ – коефіцієнт, що враховує процес сорбції.

Граничні умови для рівняння (2) розглянуто у [2, 3].

Для чисельного інтегрування рівняння (2) використовуємо неявну схему розщеплення [2, 3].

Результати

Для кодування розробленої чисельної моделі використано FORTRAN. До складу побудованого пакета програм «FILTR-UN» входять підпрограми розрахунку процесу фільтрації та масопереносу. Основні модулі цього пакета такі:

1) підпрограма FUNX – розрахунок поля напору у фільтрі на базі методу О. А. Самарського;

2) підпрограма FUNYY – розрахунок поля швидкості фільтраційного потоку у фільтрі;

3) підпрограма FUNDOM – розрахунок поля концентрації домішки у фільтрі;

4) підпрограма FUNPR – друк поля напору, фільтраційної швидкості та концентрації домішки у фільтрі.

На рис. 1–3 наведено результати обчислювального експерименту щодо моделювання фільтрації забрудненої води у фільтрі, зокрема дані щодо розподілу концентрації домішки у воді, яку фільтрують. Концентрація домішки у воді подана в безрозмірному вигляді (на вході дорівнює 1).

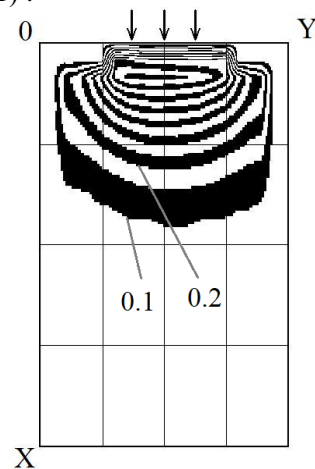


Рис. 1. Ізолінії концентрації домішки в фільтрі $t = 1,8$ (час безрозмірний)

Fig. 1. Isolines of impurity concentration in the filter $t = 1.8$ (time is dimensionless)

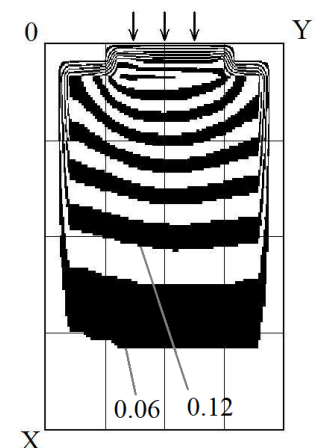


Рис. 2. Ізолінії концентрації домішки в фільтрі $t = 3,1$ (час безрозмірний)

Fig. 2. Isolines of impurity concentration in the filter $t = 3.1$ (time is dimensionless)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

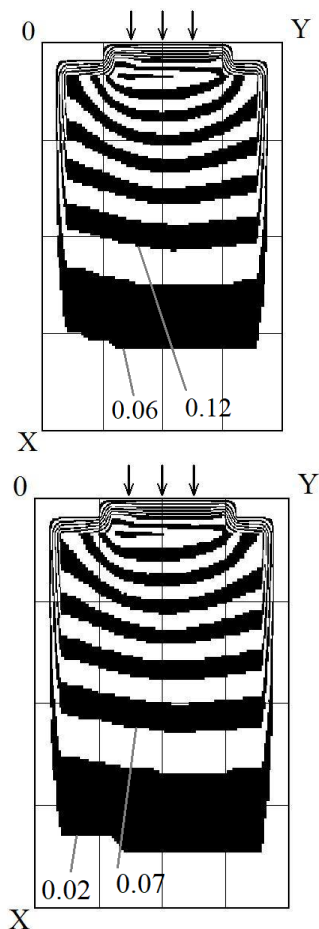


Рис. 3. Ізолінії концентрації домішки в фільтрі
 $t = 3,4$ (час безрозмірний)

Fig. 3. Isolines of impurity concentration in the filter
 $t = 3.4$ (time is dimensionless)

Як видно з наведених рисунків, концентрація домішки у воді, яку фільтрують, зменшується з часом, що обумовлено роботою завантаження фільтра. Ми бачимо, що концентрація домішки для моменту часу 3,4 значно менша, ніж концентрація домішки на початку фільтрування (рис. 1). Тобто вода з фільтра буде вихо-

дити зі значно меншою концентрацією домішки, ніж на вході у фільтр.

Відзначимо, що час розрахунку склав близько 5 сек.

Наукова новизна та практична значимість

У роботі запропонована чисельна 2D-модель фільтра, що базується на рівнянні фільтрації та рівнянні масопереносу. Розроблена модель дозволяє розраховувати нерівномірне поле концентрації домішки у фільтрі.

Представлена чисельна модель може бути використана для розрахунку як безнапірних, так і напірних фільтрів, для різного типу та крупності завантаження, різної кількості шарів завантаження. Перевагою розробленої моделі є те, що можна задавати різні розміри, форму фільтра, різну витрату забрудненої води. Також за допомогою цієї чисельної моделі можна проводити серійні розрахунки з невеликою витратою комп'ютерного часу.

Модель може бути застосована на етапах проєктування, реконструкції очисних споруд систем водопостачання.

Висновки

У статті розглянуто ефективну чисельну модель, що дозволяє оперативно розраховувати процес фільтрації забрудненої води у фільтрі. Модель базується на використанні фундаментального рівняння фільтрації та рівнянні збереження маси забруднювача у фільтраційному потоці.

Подальший розвиток цього наукового напрямку слід проводити в області створення 3D-моделі фільтрації та масопереносу у фільтрі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Айрапетян Т. С., Карагяур А. С. Теоретические исследования биологической очистки в комбинированных аэротенках с прикрепленным биоценозом. *Науковий Вісник Будівництва*. 2018. Т. 91. № 1. С. 200–205. DOI: <https://doi.org/10.29295/2311-7257-2018-91-1-200-205.1>
2. Беляев Н. Н., Козачина В. А. *Математическое моделирование массопереноса в горизонтальных отстойниках*: монография. Днипро : Акцент ПП, 2015. 115 с.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

3. Беляев Н. Н., Нагорная Е. К. *Математическое моделирование массопереноса в отстойниках систем водоотведения*: монография. Днепро: Новая идеология, 2012. 112 с.
4. ДБН В.2.5-75:2013. *Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування*. [Чинний від 2014-01-01]. Київ : Мінрегіон України, 2013. 128 с.
5. Козачина В. А., Шинкаренко В. І., Бондаренко І. О., Габрінець В. О., Горячкін В. М. Моделювання очищення води у горизонтальному відстійнику. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 5 (83). Р. 36–42. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/184467>
6. Олійник О. Я., Айрапетян Т. С. Моделювання очисних стічних вод від органічних забруднень в біо-реакторах-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>
7. Поляков В. Л. О моделировании удаления фильтрованием растворенного железа из подземных вод. *Доповідь НАН України*. 2018. № 12. С. 37–45. DOI: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.12.037>
8. Поляков В. Л., Мартынов С. Ю. Расчет обезжелезивания подземных вод на скором фильтре. *Доповідь НАН України*. 2019. № 3. С. 35–45. DOI: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2019.03.035>
9. He, Y., Uehara S., Takana H., Hideya Nishiyama. Numerical Modelling and Simulation of Chemical Reactions in a Nano-Pulse Discharged Bubble for Water Treatment. *Plasma Science and Technology*. 2016. Vol. 18. No 9. P. 924–932. DOI: <https://doi.org/10.1088/1009-0630/18/9/09>
10. Nadezhdin I., Papasidero D., Goryunov A., Manenti F. Optimisation of EDM process for water purification. *Chemical Engineering Transactions*. 2016. Vol 52. P. 325–330. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.3303/CET1652055>
11. Oleynik O., Airapetian T., Kurganska S. Evaluation of the performance of aerotanks due to add-on attached biocenosis. *Science and Transport Progress*. 2019. № 4 (82). P. 37–46. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/175883>
12. Rezakazemi M., Ghafarinazari A., Shirazian S., Khoshshima A. Numerical Modeling and Optimization of Wastewater Treatment Using Porous Polymeric Membranes. *Polymer Engineering and Science*. 2013. Vol. 53. Iss. 6. P. 1272–1278. DOI: <https://doi.org/10.1002/pen.23375>
13. Viccione G., Evangelista S. Experimental and numerical analysis of the hydraulic performance of filtering cartridges for water treatment. *EPiC Series in Engineering*. 2018. Vol. 3. P. 2187–2195. DOI: <https://doi.org/10.29007/b26c>

В. Д. ПЕТРЕНКО¹, Н. И. НЕТЕСА², А. Л. ТЮТЬКИН³, Е. В. ГРОМОВА⁴,
В. А. КОЗАЧИНА^{5*}

¹Каф. «Мосты и туннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, эл. почта petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

²Каф. «Строительное производство и геодезия», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (067) 195 50 27, эл. почта andreynetes@meta.ua, ORCID 0000-0003-1730-7642

³Каф. «Мосты и туннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, эл. почта alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

⁴Каф. «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-diit@i.ua, ORCID 0000-0002-5149-4165

^{5*}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 v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЧИСТКИ ВОДЫ В ФИЛЬТРЕ

Цель. Для анализа эффективности очистки воды в системах водоподготовки важной задачей является разработка математических моделей, которые позволяют определять степень очистки воды на этапе проведения проектных работ. Основной целью работы является построение численных моделей для расчета процесса фильтрации и массопереноса в фильтре. **Методика.** Расчет процесса фильтрации загрязненной воды в фильтре проведен в два этапа. На первом этапе рассчитано поле скорости потока в фильтре. Для решения этой задачи использовано классическое уравнение фильтрации. На втором этапе расчета смоделировано течение загрязненной воды в фильтре. Для решения этой задачи использовано уравнение массопереноса, которое выражает закон сохранения массы. Это уравнение учитывает перенос примеси фильтрационным потоком, перенос примеси за счет дисперсии и сорбцию примеси в загрузке фильтра. Решение уравнения фильтрации проведено с помощью попеременно-треугольного метода А. А. Самарского. Определение неизвестного значения напора на базе этого метода проведено по явной формуле бегущего счета. Для численного интегрирования моделирующего уравнения массопереноса в фильтре использована разностная схема расщепления. **Результаты.** Современной тенденцией в области водоснабжения и водоотведения является создание многомерных и многофакторных математических моделей. Такие модели позволяют заменить физический эксперимент на вычислительный. В комплекс сооружений водоподготовки обязательно входят фильтры очистки воды. Эффективность работы фильтров влияет на эффективность работы других очистных сооружений технологической схемы очистки. Разработана математическая модель, которая позволяет анализировать процесс очистки воды в фильтре. На базе этой модели разработан пакет прикладных программ для проведения компьютерного эксперимента по моделированию процесса очистки воды в фильтре. Приведены результаты вычислительного эксперимента по моделированию процесса фильтрации загрязненной воды в фильтре. **Научная новизна.** В работе предложена численная двумерная модель фильтра, базирующаяся на уравнении фильтрации и уравнении массопереноса. Особенностью этой модели является возможность моделирования поля скорости и процесса переноса примеси с учетом геометрической формы фильтров. **Практическая значимость.** Время расчета одного варианта задания на базе построенной численной модели составляет несколько секунд, что является важным для проведения серийных расчетов на практике. Модели можно использовать в качестве альтернативы проведения лабораторных экспериментов.

Ключевые слова: очистка воды; математическое моделирование; фильтр; численная модель

V. D. PETRENKO¹, M. I. NETESA², O. L. TIUTKIN³, O. V. GROMOVA⁴,
V. A. KOZACHYNA^{5*}

¹Dep. «Bridges and Tunnels», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 53, e-mail petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

²Dep. «Build Production and Geodesy», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 195 50 27, e-mail andreynetesa@meta.ua, ORCID 0000-0003-1730-7642

³Dep. «Bridges and Tunnels», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 53, e-mail alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

⁴Dep. «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_diit@i.ua, ORCID 0000-0002-5149-4165

^{5*}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 v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

MATHEMATICAL MODELING OF WATER PURIFICATION WITH FILTER

Purpose. To analyze the effectiveness of water purification in water treatment systems, an important task is the development of mathematical models that allow determining the degree of water purification at the design stage. The main purpose of the work is to construct numerical models for calculating the filtration process and mass transfer in the filter. **Methodology.** The calculation of the filtering process of contaminated water in the filter is carried out in two stages. At the first stage, the flow rate field in the filter is calculated. To solve this problem, the classical filtration equations are used. At the second stage of the calculation, the flow of contaminated water in the filter is simulated. To solve this problem, the mass transfer equation is used, which expresses the law of mass conservation. This equation takes into account the transfer of impurities by the filtration flow, the transfer of impurities due to dispersion and the sorption of impurities in the filter material. The solution of the filtration equation is carried out using the alternating triangular method of A. A. Samarskyi. The unknown pressure value based on this method is determined by the explicit formula of point-to-point computation. For numerical integration of the mass transfer equation in the filter, a difference splitting scheme is used. **Findings.** The current trend in the field of water supply and sanitation is the creation of multidimensional and multifactor mathematical models. Such models make it possible to replace a physical experiment with a computational one. The complex of water treatment facilities necessarily includes water purification filters. The filter efficiency affects the efficiency of other treatment facilities of the technological treatment scheme. A mathematical model has been developed that allows analyzing the water purification process in the filter. Based on the developed numerical model, a package of application programs has been developed for computer simulation of the filter water purification process. The results of a computational experiment on modeling the filtering process of contaminated water in a filter are presented. **Originality.** The paper proposes a numerical two-dimensional filter model based on the filtration equation and the mass transfer equation. A feature of the developed mathematical models is the possibility of modeling the velocity field and the process of impurity transfer taking into account the geometric shape of the filter. **Practical value.** The calculation time for one variant of the task based on the developed numerical model is several seconds, which is important for conducting serial calculations in practice. Models can be used as an alternative to laboratory experiments.

Keywords: water purification; mathematical modeling; filter; numerical model

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Airapetian, T. S., & Karahiaur, A. S. (2018). Theoretical studies of biological purification in combined aerotanks with fixed biocenosis. *Scientific Bulletin of Civil Engineering*, 91(1), 200-205. DOI: <https://doi.org/10.29295/2311-7257-2018-91-1-200-205> (in Russian).
2. Biliaiev, N. N., & Kozachina, V. A. (2015). *Modelirovaniye massoperenosa v gorizontalnykh otstoynikakh: monografiya*. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (in Russian)
3. Biliaiev, N. N., & Nagornaya, E. K. (2012). *Matematicheskoye modelirovaniye massoperenosa v otstoynikakh sistem vodootvedeniya: monografiya*. Dnepropetrovsk: Novaya ideologiya. (in Russian)
4. *Kanalizatsiia. Zovnishni merezhi ta sporudy. Osnovni polozhennia proektuvannia, 128 DBN V.2.5-75-2013* (2013). (in Ukrainian)
5. Kozachyna, V. A., Shynkarenko, V. I., Bondarenko, I. O., Gabrinets, V. A., & Horiachkin, V. M. (2019). Water Cleaning Modeling in a Horizontal Settler. *Science and Transport Progress*, 5(83), 36-42. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/184467> (in Ukrainian)
6. Oleynik, A. Y., & Airapetyan, T. S. (2015). The modeling of the clearance of waste waters from organic pollutions in bioreactors-aerotanks with suspended (free flow) and fixed biocenoses. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 5, 55-60. DOI: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2015.05.055> (in Ukrainian)
7. Polyakov, V. L. (2018). On the modeling of a dissolved iron removal from underground water by filtration. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 12, 37-45. DOI: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.12.037> (in Russian)
8. Polyakov, V. L., & Martynov, S. Yu. (2019). Calculation of the removal of iron from groundwater in a fast filter. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 3, 35-45. DOI: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2019.03.035> (in Russian)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

9. He, Y., Uehara, S., Takana, H., & Nishiyama, H. (2016). Numerical Modelling and Simulation of Chemical Reactions in a Nano-Pulse Discharged Bubble for Water Treatment. *Plasma Science and Technology*, 18(9), 924-932. DOI: <https://doi.org/10.1088/1009-0630/18/9/09> (in English)
10. Nadezhdin, I., Papasidero, D., Goryunov, A., & Manenti, F. (2016). Optimisation of EDM process for water purification. *Chemical Engineering Transactions*, 52, 325-330. DOI: <https://doi.org/10.3303/CET1652055> (in English)
11. Oleynik, O., Airapetian, T., & Kurganska, S. (2019). Evaluation of the performance of aerotanks due to add-on attached biocenosis. *Science and Transport Progress*, 4(82), 37-46. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/175883> (in English)
12. Rezakazemi, M., Ghafarinazari, A., Shirazian, S., & Khoshshima, A. (2012). Numerical modeling and optimization of wastewater treatment using porous polymeric membranes. *Polymer Engineering & Science*, 53(6), 1272-1278. DOI: <https://doi.org/10.1002/pen.23375> (in English)
13. Giacomo, V., & Evangelista, S. (2018). Experimental and numerical analysis of the hydraulic performance of filtering cartridges for water treatment. *EPiC Series in Engineering*, 3, 2187-2195. DOI: <https://doi.org/10.29007/b26c> (in English)

Поступила в редколлегию: 01.10.2019

Принята к печати: 03.02.2020

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

УДК 338.47

О. А. ХОДОСКИНА^{1*}, С. А. КИРПИЧЕВА^{2*}, А. А. САМСОНОВА³, Е. А. ШВЕЦОВА^{4*}

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

^{2*}Каф. «Экономика транспорта», Белорусский государственный университет транспорта, ул. Кирова, 34, Гомель, Республика Беларусь, 246653, тел. +37 (544) 790 82 77, эл. почта iskirpichova@gmail.com, ORCID 0000-0001-5296-0263

³Каф. «Экономика транспорта», Белорусский государственный университет транспорта, ул. Кирова, 34, Гомель, Республика Беларусь, 246653, тел. +37 (544) 777 45 15, эл. почта alina.samsonova.2018@gmail.com, ORCID 0000-0002-4202-2086

^{4*}Каф. «Экономика транспорта», Белорусский государственный университет транспорта, ул. Кирова, 34, Гомель, Республика Беларусь, 246653, тел. +37 (544) 792 79 40, эл. почта eugeniashv@yandex.ru, ORCID 0000-0002-0824-808

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Цель. На современном этапе для нормального функционирования экономики необходимо соблюдение баланса экономических интересов потребителей услуг транспорта и самого транспорта. Поэтому целью настоящей работы является подробное изучение и анализ существующего уровня развития транспортно-логистических систем, а также перспективы их дальнейшего развития. **Методика.** Для анализа работы современных транспортно-логистических систем использован комплекс методов экономико-математического моделирования, включающих поэлементное рассмотрение транспортно-логистической системы, определение востребованности каждого ее элемента у потребителей, уровня соответствующих затрат, дифференциации транспортного обслуживания и т.д. На основании полученных аналитических данных моделируется поведение транспортно-логистической системы в зависимости от конкретных условий ее функционирования и возможных особенностей, его сопровождающих. Это позволяет рассмотреть различные варианты использования современных технологий в работе транспортно-логистической системы и оценить потенциальные преимущества. **Результаты.** Применение принципов логистики направлено на улучшение транспортного обслуживания на основе новейших транспортных технологий, что позволяет использовать различные виды транспорта, совершенствовать информационное взаимодействие между участниками перевозочного процесса и др. Также в работе определены пути развития транспортно-логистических систем в Республике Беларусь на основе Республиканского экспедиционного унитарного предприятия «Белинтертранс – транспортно-логистический центр» Белорусской железной дороги. Раскрыто понятие транспортно-логистических систем. На основе изучения работы предприятия «Белинтертранс» рассмотрена эффективность внедрения на нем таких технологий, как FLEXE и система контроля расхода топлива ГЛОНАСС для развития транспортно-логистических систем. **Научная новизна.** На основании изучения методических источников и научных разработок в области развития транспортно-логистических систем предложено несколько вариантов внедрения новых и более совершенствованных информационных технологий в деятельность транспортно-логистических центров. **Практическая значимость.** Результатом применения данных технологий является прежде всего сокращение издержек в логистической системе, а также повышение конкурентоспособности предприятия, увеличение его прибыли и максимальное удовлетворение требований клиента. Так как в транспортно-логистической системе для удовлетворения потребности клиента (оказания услуг потребителям и производителям товаров) реализуются функции транспортировки, хранения, распределения и др., то в любой из них использование информационных технологий позволит повысить устойчивость и эффективность системы.

Ключевые слова: транспортно-логистическая система; FLEXE; ГЛОНАСС; максимальный годовой доход; горюче-смазочные материалы (ГСМ); склад временного хранения (СВХ)

Введение

Эффективное функционирование рынка транспортных услуг во многом определяется оптимальным развитием инфраструктуры транспортно-логистической системы. Цель транспортно-логистической системы – доставка материальных ресурсов и товаров в заданное место, в нужном количестве и ассортименте, в максимально возможной степени подготовленных к производству.

Логистическая система должна обеспечить системный подход и анализ. Системный подход рассматривает все элементы системы как взаимосвязанные и взаимодействующие для достижения единой цели управления. С позиции системного подхода логистическая система – относительно устойчивая совокупность звеньев, взаимосвязанных и объединенных единым управлением в логистическом процессе для реализации корпоративной стратегии организации производственно-коммерческой деятельности.

Транспортно-логистическая система движения ресурсов включает в свой состав транспортную систему, комплекс терминалов, транспортно-логистических центров и др.

Система доставки груза – адаптивная система с обратной связью, обеспечивающая управление логистическими потоками при их перемещении в пределах логистической схемы доставки. В результате формирования логистической схемы доставки грузов связано с выбором видов транспорта, участвующих в транспортировании грузов.

Традиционно на основе анализа спроса на элементы сложных логистических производственно-транспортных и транспортно-сбытовых систем делают выводы о транспортных потребностях, объемах грузовых перевозок в целом и по видам грузов, дальности перевозок, сроках доставки и размерах отправок, специализации подвижного состава, дифференциации спроса по видам транспорта и перевозок, влиянии на окружающую среду [1, 3, 5, 7, 9].

В рыночной экономике четко отслеживают следующие актуальные параметры при доставке продукции: сроки оформления грузов; продолжительность нахождения грузов в пути;

партионность отгрузок; количественные и качественные потери грузов в процессе транспортирования, при перегрузках, хранении; наличие перегрузочных операций; провозные платежи при доставке; потери и компенсации при нарушении договорных обязательств и др.

Вышеперечисленные параметры связаны с транспортно-логистическими издержками, которые характеризуют логистическую схему доставки груза с экономической точки зрения [2, 4, 6, 8, 10].

Цель

Рынок транспортных услуг как объект изучения является сложной производственно-экономической и социальной системой, встроенной в международное пространство обращения товаров и перемещения людей. На современном этапе для нормального функционирования экономики необходимо соблюдение баланса экономических интересов: потребителей услуг транспорта и самого транспорта. Поэтому целью настоящей работы является подробное изучение и анализ существующего уровня развития транспортно-логистических систем, а также перспективы их дальнейшего развития.

Методика

Для анализа работы современных транспортно-логистических систем использован комплекс методов экономико-математического моделирования, включающих поэтапное рассмотрение транспортно-логистической системы, определение востребованности каждого ее элемента у потребителей, уровня соответствующих затрат, дифференциации транспортного обслуживания и т.д. На основании полученных аналитических данных моделируется поведение транспортно-логистической системы в зависимости от конкретных условий ее функционирования и возможных особенностей, его сопровождающих. Это позволяет рассмотреть различные варианты использования современных технологий в работе транспортно-логистической системы и оценить потенциальные преимущества.

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

Результаты

Большую значимость в транспортной логистике имеют складирование, хранение и транспортировка грузов.

Складирование определяют как хранение товаров: сырья, полуфабрикатов или готовой продукции. При этом оно включает в себя широкий спектр объектов и мест, которые обеспечивают складирование. Поскольку складирование выступает в качестве точки в логистической системе, где товары хранятся в течение различного периода времени, поток прерывается или останавливается, что создает дополнительные затраты для товара.

В макроэкономическом смысле складирование создает временную полезность для сырья, промышленных товаров и готовой продукции. Это также увеличивает полезность товаров за счет расширения их доступности для потенциальных клиентов.

Что касается транспортировки, то она включает в себя физическое движение или поток товаров. Транспортная система – это физическое звено, связывающее клиентов, поставщиков сырья, заводы, склады и участников канала. Это фиксированные точки в логистической цепочке поставок.

Существующие тенденции в развитии транспортно-логистического комплекса страны целесообразнее рассматривать на примере отдельных транспортно-логистических систем. Рассмотрим одну из них подробнее.

Республиканское транспортно-экспедиционное унитарное предприятие «Белинтертранс – транспортно-логистический центр» Белорусской железной дороги основано на праве хозяйственного ведения. Предприятие входит в состав государственного объединения «Белорусская железная дорога», которое является его учредителем. К основным направлениям деятельности относятся следующие:

– разработка логистических схем доставки грузов как наиболее рациональных транспортно-технологических схем перемещения транзитных и экспортно-импортных грузов от грузоотправителя к грузополучателю с использованием одного или нескольких видов транспорта;

– выполнение международной перевозки грузов железнодорожным и автомобильным транспортом, оказание транспортно-экспедиционных услуг при международных перевозках грузов одним или несколькими видами транспорта грузоотправителям, грузополучателям и экспедиторам;

– содержание в исправном состоянии зданий, сооружений, грузоподъемных машин, механизмов, устройств, другой техники и транспортных средств, полное и эффективное их использование, комплексное развитие материально-технической базы и социальной сферы предприятия.

Главными целями его деятельности являются следующие: своевременное и качественное удовлетворение потребностей грузоотправителей, грузополучателей и экспедиторов по организации и (или) обеспечению перевозки грузов одним или несколькими видами транспорта; хозяйственная деятельность, направленная на получение прибыли для удовлетворения социальных и экономических интересов собственника имущества предприятия и его работников; повышение эффективности хозяйственной деятельности; своевременное и качественное удовлетворение потребностей государства, организаций и населения республики в перевозках; обеспечение безопасности движения поездов, повышение качества и культуры обслуживания клиентуры; комплексное развитие материально-технической базы и социальной сферы предприятия; содержание в исправном состоянии зданий, сооружений, грузоподъемных машин, механизмов, устройств, другой техники и транспортных средств, полное и эффективное их использование; охрана окружающей среды от загрязнения и других вредных воздействий.

В рамках осуществления транспортно-логистической деятельности рассматриваемое предприятие как транспортно-логистическая система нуждается в постоянном совершенствовании материально-технической базы, технологической и методологической составляющих при выполнении работ и оказании услуг. С этой позиции целесообразно рассмотреть современную технологию FLEXE – новый «ры-

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

нок складських помещений», который представляет собой удобную и доступную систему поиска вакантных площадей. После регистрации на сайте проекта появляется доступ к предложениям, операторы же могут размещать объявления о продаже и аренде свободных помещений для тех, кому они срочно нужны.

Решения, предлагаемые данным сервисом:

- электронная коммерция,
- розничная торговля,
- управление запасами.

В настоящее время на местах общего пользования, эксплуатируемых транспортно-экспедиционными предприятиями Белорусской железной дороги, вследствие снижения объемов погрузки простаивают неиспользуемые площади складов и площадок. Рассмотрим данную проблему на примере городской товарной станции (ГПС) Колядичи.

Что касается хранения товаров на складе, ГПС Колядичи предлагает услуги ответственного хранения и хранение на склад временного хранения (СВХ).

Для оценки работы ГПС Колядичи произведем анализ следующих показателей:

1) суточная перерабатывающая способность – это количество тонн, которое может быть переработано за сутки;

2) средний срок хранения грузов – показывает, спустя какой период времени запас грузов на складе будет исчерпан;

3) коэффициент использования емкости склада – показывает эффективность использования емкости склада.

Динамика суточной перерабатывающей способности, среднего срока хранения грузов и коэффициента использования емкости склада по грузовым районам приведена на рисунках 1 и 2 соответственно.

Значения расчетной суточной перерабатывающей способности прямо пропорциональны значениям объемов грузопереработки. Так как прослеживается тенденция увеличения объемов грузопереработки на контейнерной и тяжеловесной площадке в период с 2013 по 2017 год (рис. 1), то увеличивается и расчетная суточная перерабатывающая способность этих площадок. Перерабатывающая способность на прирельсовом и арочном складе снизилась, как и объемы переработки грузов на этих складах.



Рис. 1. Динамика расчетной суточной перерабатывающей способности ГТС Колядичи за 2013–2017 гг.

Fig. 1. Dynamics of the estimated daily processing capacity of the Koliadychi city goods station for 2013–2017.

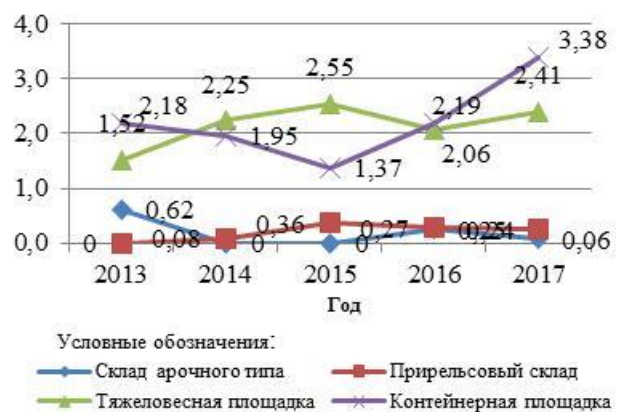


Рис. 2. Динамика коэффициента использования емкости склада, площадки ГТС Колядичи за 2013–2017 гг.

Fig. 2. Dynamics of the utilization coefficient of the storage capacity of the site of the Koliadychi city goods station for 2013–2017.

Как видно из рис. 2, коэффициент использования емкости склада на складе арочного типа и прирельсовом складе меньше 1, следовательно, заполнение площади склада грузом происходит не в полной мере, при этом в 2017 году арочный и прирельсовый склад использует в среднем 6 и 24 % от общей емкости соответственно.

Далее приведен расчет для склада арочного типа. На 2018 год расчетная суточная перерабатывающая способность арочного склада составила 2,5 т, а прирельсового склада – 148,1 т,

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

коэффициенты ёмкости – 0,1 и 0,3 соответственно.

На основе этих данных и коэффициентов емкости для этих складов рассчитаем максимальную суточную перерабатывающую способность складов:

$$\text{МПС}_1 = \frac{2,5}{0,1} \cdot 100 = 2\,500 \text{ т/сут}; \quad (1)$$

$$\text{МПС}_2 = \frac{148,1}{0,3} \cdot 100 = 4\,936,7 \text{ т/сут}. \quad (2)$$

Далее рассчитаем максимальный годовой дополнительный доход для терминала Колядичи на основе текущей ставки хранения 1 т груза в сутки на каждом складе:

$$\text{МГД} = (2\,500 \cdot 0,42 + 4\,936,7 \cdot 0,42) \times \\ \times 212 = 4\,618\,238. \quad (3)$$

Для реализации технологии рынка складских помещений на Белорусской железной дороге можно выбрать два варианта:

1. Подключение к существующим системам.
2. Разработка и внедрение собственной системы, позволяющей искать свободные площади по всем станциям Белорусской железной дороги, которые предоставляют данные услуги.

Ожидаемыми результатами применения данной технологии на Белорусской железной дороге будут следующими:

- комплексный подход к складированию и создание единой сети с развитой структурой позволит объединить владельцев складов и их потенциальных клиентов;
- получение дохода от внедрения новой, современной и перспективной технологии на БелЖД;
- увеличение использования производственных мощностей станций железной дороги;
- возможность укрепления позиций на рынке транспортных услуг благодаря данной технологии.

Другим перспективным направлением развития транспортно-логистических систем в Беларуси является применение системы контроля расхода топлива ГЛОНАСС на автомобильном и железнодорожном транспорте. Контроль расхода топлива позволяет не только предотвратить его несанкционированное использование,

но и оптимизировать расход этого ресурса при перемещении. Возможность снижения расхода топлива позволяет достичь его значительной экономии. Для повышения эффективности управления перевозками транспортные компании все чаще применяют комплексную систему контроля расхода топлива от системы ГЛОНАСС или системы NAVSTAR GPS. Рассмотрим их применение и эффективность на автомобильном и железнодорожном транспорте.

Эти системы контроля применяют на автотранспортных предприятиях, где существует проблема неэффективного расхода топлива. Расход топлива может быть превышен по следующим причинам: несанкционированный слив топлива, пробег в индивидуальных целях, неправильно подобранный скоростной режим и т. д.

Установка системы спутникового мониторинга транспорта совместно с датчиком уровня топлива позволяет контролировать не только местоположение транспортного средства (ТС), но и вести точный учет расхода топлива: где и когда было заправлено ТС, какой объем был заправлен, какой объем на начало и в конце смены, простаивала ли техника. Если речь идет о топливозаправщике, система покажет, какой был объем прихода в цистерну и сколько топлива, где и в какое время было слито через раздаточный пистолет.

Принцип работы системы учета топлива:

1. На автомобили устанавливают оборудование для мониторинга транспорта. Для контроля топлива устанавливают модуль спутникового мониторинга и датчик уровня топлива (ДУТ). Информация с ДУТ поступает на модуль мониторинга, который обрабатывает, фильтрует и отправляет данные по топливу на сервер.

2. Информация от модулей поступает на сервер в ПО «СКАУТ–Платформа», где обрабатывается и хранится. Срок хранения не ограничен, все данные резервируются и находятся в полной безопасности.

3. Диспетчер, клиент, бухгалтер с помощью удобного ПО пользуются системой, анализируют, обрабатывают данные системы мониторинга с помощью удобных отчетов «Заправки и сливы топлива», «Движение и стоянки с топливом», «Заправки и сливы топлива. Групповой».

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

Индивидуальный отчет «Заправки и сливы топлива» предназначен для контроля за расходом топлива конкретного транспортного средства. Он содержит подробные данные о заправках и сливах, объеме и месте, удобный график уровня топлива в баках для анализа расхода.

Универсальный отчет «Движение и стоянки с топливом» позволяет контролировать маршрут, соблюдение графиков, содержит информацию о топливе автомобиля на определенных участках, информацию о заправках автомобиля, реальном расходе топлива, пробеге.

«Групповой отчет о заправках и сливах автопарка» – отчет для просмотра итоговых данных по нескольким автомобилям. Он содержит в себе все данные, нужные для анализа и контроля топлива на ТС: объем топлива на начало и конец периода, расход топлива, пробег, количество и объем заливок и слива, расход топлива на холостом ходу, в движении и т. д., и все это в сравнении с нормами расхода.

Результат установки ГЛОНАСС с контролем топлива следующий:

- уменьшение топливных расходов на 10–50 % за счет исключения слива/недолива топлива, в зависимости от вида техники и масштабов воровства топлива до внедрения системы мониторинга;

- снижение пробега автомобилей на 10–40 % за счет взятия под контроль местоположения автомобилей и исключения левых рейсов;

- уменьшение расходов на содержание автопарка до 30 % за счет снижения амортизации, сокращения расходов на горюче-смазочные материалы (ГСМ) и увеличения дисциплины водителей после внедрения ГЛОНАСС.

С помощью примера обоснуем эти цифры.

Возьмём парк из 25 самосвалов, работающих в карьере, с топливным баком в 300 л. Допустим, что в день водителю удастся «сэкономить» и слить 15 л топлива. Полученная экономия представлена в табл. 1.

Рассмотрим, как снижение расхода топлива зависит от пробега, если транспортное средство находится под постоянным контролем и не делает «левых» рейсов. Возьмём также парк из 25 автомобилей со среднесуточным пробегом 500 км и 5-дневной рабочей неделей.

По статистике компаний, внедривших систему ГЛОНАСС для GPS-мониторинга,

уменьшение среднего пробега в автопарках (при сохранении загруженности) достигается от 5 до 12 %. Для примера возьмём среднюю величину 8 %. Результаты представлены в табл. 2.

Таким образом, экономия топлива от использования системы контроля значительно выше, чем стоимость внедрения самой системы, окупаемость может достигать 1–8 месяцев.

Таблица 1

Снижение расхода ГСМ

Table 1

Fuel consumption reduction

Показатель	Данные
В день водитель сливает для собственных нужд, л.	15
Средняя стоимость 1 л топлива, у. е.	0.59
Выгода для водителя, соответственно потери компании составят в месяц (21 сут.), у. е.	185,85
Месячная экономия на 25 ед. техники для компании после внедрения системы составит, у. е.	4 646,25
Годовая экономия, у. е.	55 755,00

Таблица 2

Снижение расхода топлива при уменьшении пробега ТС

Table 2

Reduced fuel consumption while reducing vehicle mileage

Показатель	Данные
Фактический пробег в месяц на одно транспортное средство, км	10 000
Плановый пробег в месяц на одно транспортное средство после внедрения системы, км	9 200
Среднее потребление топлива, л/100 км	20
Средняя стоимость 1 л топлива, у. е.	0,59
Месячная экономия на 25 ед. техники для компании, у. е.	2 360,00
Годовая экономия, у. е.	28 320,00

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

Для наглядного сравнения экономии топлива со стоимостью внедрения такой системы представим следующие данные в таб. 3.

Таблица 3

Стоимость внедрения системы мониторинга

Table 3

Cost of implementing a monitoring system

Показатель	Данные
Приобретение и установка 25 комплектов оборудования (от 130 до 305 у. е.), у. е.	7 625
Абонентская плата (средняя величина 7 у. е./месяц) на 25 автомобилей, у. е. в год	2 100
Программное обеспечение, у. е.	0
Итого затраты на установку и обеспечение работы, у. е.	9 725

Ожидается, что применение на маневровых тепловозах разработанной автоматизированной системы только за счет выполнения функции учета и контроля расхода топлива позволит уменьшить расход топлива (за счет изъятия из работы локомотивов с систематическим пережигом топлива и выявления несанкционированного слива топлива) и снизить трудозатраты инженерно-технических работников локомотивного депо (за счет автоматизации расчетов расхода топлива). Годовой экономический эффект составит от 1 736 до 3 876 у. е. на один тепловоз. Срок окупаемости капитальных затрат равен 2 месяцам.

Научная новизна и практическая значимость

Следует отметить, что для рассматриваемого предприятия существующий и применяемый подход к использованию технологий складиро-

вания не является оптимальным. Аналогичным образом можно охарактеризовать и ситуацию с расходом топливных ресурсов в рамках используемых видов транспорта (автомобильные и железнодорожные перевозки). В связи с этим применение современных методических разработок и подходов является для него особенно важным. На основании изучения современных научных разработок в области транспортно-логистических систем предложены пути, позволяющие сократить общие расходы при функционировании транспортно-логистической системы. Причем в каждом конкретном случае (применительно к определенной транспортно-логистической системе) варьирование комбинаций методов может дать наилучший результат. Наибольшее применение данная автоматизированная система может найти в локомотивных депо железных дорог для учета, контроля и анализа расхода топлива маневровыми тепловозами.

Выводы

Из вышесказанного можно сделать вывод, что с учетом применения систем контроля расхода топлива на автотранспорте и железной дороге появляется возможность значительно повысить эффективность функционирования транспортно-логистических центров республики. При этом срок окупаемости указанных мероприятий небольшой, а выгода от их применения ощутимая: система контроля позволяет оптимизировать расход топлива и достичь его значительной экономии, а использование технологии рынка складских помещений позволит более рационально распределить производственные мощности транспортно-логистического предприятия и будет способствовать укреплению его позиций на рынке транспортных услуг.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Семенцова О. В., Рибка А. О., Смець В. О. Засоби удосконалення системи національної безпеки залізничної галузі для забезпечення стратегічного розвитку транспортної логістики. *Публічне управління і адміністрування в Україні*. 2019. Вип. 13. С. 131–134. DOI: <https://doi.org/10.32843/2663-5240-2019-13-25>
2. Akhavan M., Ghiara H., Mariotti I., Sillig C. Logistics global network connectivity and its determinants. A European City network analysis. *Journal of Transport Geography*. 2020. Vol. 82. P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2019.102624>

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

3. Antonowicz M., Zielaskiewicz H., Kornaszewski M. Development of logistic services in rail transport. *Transportation Overview – Przegląd Komunikacyjny*. 2019. Vol. 3. P. 12–20. DOI: https://doi.org/10.35117/A_ENG_19_03_03
4. Behdani B., Wiegmanns B., Roso V., Haralambides H. Port-hinterland transport and logistics: emerging trends and frontier research. *Maritime Economics & Logistics*. 2020. Vol. 22. Iss. 1. P. 1–25. DOI: <https://doi.org/10.1057/s41278-019-00137-3>
5. Centobelli P., Cerchione R., Esposito E. Evaluating environmental sustainability strategies in freight transport and logistics industry. *Business Strategy and the Environment*. 2020. Vol. 29. Iss. 3. P. 1563–1574. DOI: <https://doi.org/10.1002/bse.2453>
6. Cheshmberah M. Developing an Integrated Framework for Supplier Evaluation based on Relevant Attributes and Performance Measures. *Logistics & Sustainable Transport*. 2020. Vol. 11. P. 101–113. DOI: <https://doi.org/10.2478/jlst-2020-0007>
7. Ding S., Kaminsky P. M. *Centralized and Decentralized Warehouse Logistics Collaboration*. Manufacturing & Service Operations Management. 2019. 143 p. DOI: <https://doi.org/10.1287/msom.2019.0774>
8. Janić M. Multicriteria Evaluation of Intermodal (Rail/Road) Freight Transport Corridors. *Logistics & Sustainable Transport*. 2020. Vol. 11. Iss.1. P. 1–23. DOI: <https://doi.org/10.2478/jlst-2020-0001>
9. Moriya T., Kimura N., Ara K., Watanabe T. Warehouse Automation towards Innovation in Logistics. *Journal of the Robotics Society of Japan*. 2019. Vol. 37. Iss. 8. P. 699–702. DOI: <https://doi.org/10.7210/jrsj.37.699>
10. Tavasszy L. A. Predicting the effects of logistics innovations on freight systems: Directions for research. *Transport Policy*. 2020. Vol. 86. P. A1–A6. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2019.11.004>

О. А. ХОДОСКИНА^{1*}, С. О. КІРПІЧЕВА^{2*}, А. О. САМСОНОВА³, Є. О. ШВЕЦОВА^{4*}

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

^{2*}Каф. «Економіка транспорту», Білоруський державний університет транспорту, вул. Кірова, 34, Гомель, Республіка Білорусь, 246653, тел. +37 (544) 790 82 77, ел. пошта iskirpichova@gmail.com, ORCID 0000-0001-5296-0263

³Каф. «Економіка транспорту», Білоруський державний університет транспорту, вул. Кірова, 34, Гомель, Республіка Білорусь, 246653, тел. +37 (544) 777 45 15, ел. пошта alina.samsonova.2018@gmail.com, ORCID 0000-0002-4202-2086

^{4*}Каф. «Економіка транспорту», Білоруський державний університет транспорту, вул. Кірова, 34, Гомель, Республіка Білорусь, 246653, тел. +37 (544) 792 79 40, ел. пошта eugeniashev@yandex.ru, ORCID 0000-0002-0824-8081

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ В РОЗВИТКУ ТРАНСПОРТНО-ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМ

Мета. На сучасному етапі для нормального функціонування економіки необхідно дотримуватися балансу економічних інтересів споживачів послуг транспорту і самого транспорту. Тому метою цієї роботи є докладне вивчення й аналіз наявного рівня розвитку транспортно-логістичних систем, а також перспективи їх подальшого розвитку. **Методика.** Для аналізу роботи сучасних транспортно-логістичних систем використано комплекс методів економіко-математичного моделювання, що включають поелементний розгляд транспортно-логістичної системи, визначення затребуваності кожного її елемента у споживачів, рівня відповідних витрат, диференціації транспортного обслуговування і т.д. На підставі отриманих аналітичних даних моделюється поведінка транспортно-логістичної системи в залежності від конкретних умов її функціонування і можливих особливостей, що її супроводжують. Це дозволяє розглянути різні варіанти використання сучасних технологій в роботі транспортно-логістичної системи та оцінити потенційні переваги. **Результати.** Застосування принципів логістики спрямовано на поліпшення транспортного обслуговування на основі новітніх транспортних технологій, що дозволяє використовувати різні види транспорту, удосконалювати інформаційну взаємодію між учасниками перевізного процесу та ін. Також у роботі визначено шляхи розвитку транспортно-логістичних систем у Республіці Білорусь на основі Республіканського експедиційного унітарного підприємства «Белінтертранс – транспортно-логістичний центр» Білоруської залізниці. Розкрито поняття транспортно-логістичних систем. На основі вивчення роботи підприємства «Белінтертранс» розглянуто ефективність упровадження на ньому таких технологій, як FLEXE і система контролю витрат палива ГЛОНАСС для розвитку транспортно-логістичних систем. **Наукова новизна.** На підставі вивчення методичних джерел і наукових розробок у галузі розвитку транспортно-логістичних систем запропоновано кіль-

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

ка варіантів впровадження нових і більш удосконалених інформаційних технологій у діяльність транспортно-логістичних центрів. **Практична значимість.** Результатом застосування таких технологій є перш за все скорочення витрат у логістичній системі, а також підвищення конкурентоспроможності підприємства, збільшення його прибутку й максимальне задоволення вимог клієнта. Оскільки в транспортно-логістичній системі для задоволення потреб клієнта (надання послуг споживачам і виробникам товарів) реалізуються функції транспортування, зберігання, розподілу та ін., то в будь-якій із них використання інформаційних технологій дозволить підвищити стійкість та ефективність системи.

Ключові слова: транспортно-логістична система; FLEXE; ГЛОНАСС; максимальний річний дохід; паливо-мастильні матеріали (ПММ); склад тимчасового зберігання (СТЗ)

О. А. HODOSKINA^{1*}, S. A. KIRPICHEVA^{2*}, A. A. SAMSONOVA³, E. A. SHVETSOVA^{4*}

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

^{2*}Dep. «Economy of Transport», Belarusian State University of Transport, Kirova St., 34, Republic of Belarus, Gomel, 246653, tel. +37 (544) 790 82 77, e-mail iskirpichova@gmail.com. ORCID 0000-0001-5296-0263

³Dep. «Economy of Transport», Belarusian State University of Transport, Kirova St., 34, Republic of Belarus, Gomel, 246653, tel. +37 (544) 777 45 15, e-mail alina.samsonova.2018@gmail.com. ORCID 0000-0002-4202-2086

^{4*}Dep. «Economy of Transport», Belarusian State University of Transport, Kirova St., 34, Republic of Belarus, Gomel, 246653, tel. +37 (544) 792 79 40, e-mail eugeniashv@yandex.ru. ORCID 0000-0002-0824-8081

MODERN TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF TRANSPORT AND LOGISTICS SYSTEMS

Purpose. At the present stage, for the normal functioning of the economy, it is necessary to maintain a balance of economic interests for consumers of transport services and transport itself. Therefore, the aim of this work is a detailed study and analysis of the current development level of transport and logistics systems, as well as the prospects for their further development. **Methodology** For analyze the work of modern transport and logistics systems, a set of methods of economic and mathematical modeling was used, including an element-by-element examination of the transport and logistics system, determining the demand for each of its elements among consumers, the level of corresponding costs, differentiating transport services, etc. Based on the obtained analytical data, the behavior of the transport and logistics system is modeled depending on the specific conditions of its functioning and possible features that accompany it. This allows you to consider various options for using modern technologies in the operation of the transport and logistics system and evaluate the potential benefits. **Findings.** The application of the logistics principles is aimed at improving the transport services based on the latest transport technologies, which allows using different types of transport, improving information interaction between participants in the transportation process, etc. The development of transport and logistics systems in the Republic of Belarus is also determined based on the Republican expeditionary unitary enterprise BELINTERTRANS – Transport and Logistics Center of the Belarusian Railway. The concept of transport and logistics systems is disclosed. Based on a study of the Belintertrans enterprise, the effectiveness of introducing such technologies as FLEXE technology and the GLONASS fuel consumption control system for the development of transport and logistics systems is examined. **Originality.** Based on the study of methodological sources and scientific developments in the field of development of transport and logistics systems, several options are proposed for introducing new and more advanced information technologies into the activities of transport and logistics centers. **Practical value.** The result of applying these technologies is, first of all, cost reduction in the logistics system, as well as increasing the competitiveness of the enterprise, increasing its profits and maximizing customer satisfaction. Since in the transport and logistics system, to satisfy the needs of the client (providing services to consumers and producers of goods), the functions of transportation, storage, distribution, etc. are implemented, the use of information technologies in any of them will increase the stability and efficiency of the system.

Keywords: transport and logistics system; FLEXE; GLONASS; maximum annual income; combustible-lubricating materials; temporary storage

REFERENCES

1. Sementsova, O. V., Rybka, A. O., & Yemets, V. O. (2019). Zasoby udoskonalennia systemy natsionalnoi bezpeky zaliznychnoi haluzi dlia zabezpechennia stratehichnoho rozvytku transportnoi lohistyky. *Publichne upravlinnia i administruvannia v Ukraini*, 13, 131-134. DOI: <https://doi.org/10.32843/2663-5240-2019-13-25> (in Ukrainian)
2. Akhavan, M., Ghiara, H., Mariotti, I., & Sillig, C. (2020). Logistics global network connectivity and its determinants. A European City network analysis. *Journal of Transport Geography*, 82, 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2019.102624> (in English)
3. Antonowicz, M., Zielaskiewicz, H., & Kornaszewski, M. (2019). Development of logistic services in rail transport. *Transportation Overview – Przegląd Komunikacyjny*, 3, 12-20. DOI: https://doi.org/10.35117/A_ENG_19_03_03 (in English)
4. Behdani, B., Wiegman, B., Roso, V., & Haralambides, H. (2020). Port-hinterland transport and logistics: emerging trends and frontier research. *Maritime Economics & Logistics*, 22(1), 1-25. DOI: <https://doi.org/10.1057/s41278-019-00137-3> (in English)
5. Centobelli, P., Cerchione, R., & Esposito, E. (2020). Evaluating environmental sustainability strategies in freight transport and logistics industry. *Business Strategy and the Environment*, 29(3), 1563-1574. DOI: <https://doi.org/10.1002/bse.2453> (in English)
6. Cheshmberah, M. (2020). Developing an Integrated Framework for Supplier Evaluation based on Relevant Attributes and Performance Measures. *Logistics & Sustainable Transport*, 11, 101-113. DOI: <https://doi.org/10.2478/jlst-2020-0007> (in English)
7. Ding S., & Kaminsky, P. M. (2019). *Centralized and Decentralized Warehouse Logistics Collaboration*. Manufacturing & Service Operations Management. DOI: <https://doi.org/10.1287/msom.2019.0774> (in English)
8. Janić, M. (2020). Multicriteria Evaluation of Intermodal (Rail/Road) Freight Transport Corridors. *Logistics & Sustainable Transport*, 11(1), 1-23. DOI: <https://doi.org/10.2478/jlst-2020-0001> (in English)
9. Moriya, T., Kimura, N., Ara, K., & Watanabe, T. (2019). Warehouse Automation towards Innovation in Logistics. *Journal of the Robotics Society of Japan*, 37(8), 699-702. DOI: <https://doi.org/10.7210/jrsj.37.699> (in Japanese)
10. Tavasszy, L. A. (2020). Predicting the effects of logistics innovations on freight systems: Directions for research. *Transport Policy*, 86, A1-A6. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2019.11.004> (in English)

Поступила в редколлегию: 25.09.2019

Принята в печать: 27.01.2020

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

УДК 656.212.5:681.5

В. В. БУРЧЕНКОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Вагоны», Белорусский государственный университет транспорта, ул. Кирова, 34, Гомель, Республика Беларусь, 246653, тел. +37 (529) 53 03 784, эл. почта lenadva@tut.by, ORCID 0000-0002-3664-4655

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАБОТЫ СОРТИРОВОЧНЫХ СТАНЦИЙ НА ОСНОВЕ ДИСТАНЦИОННОГО АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Цель. Основной целью этой работы является анализ действующих систем автоматического управления роспуском составов на сортировочных станциях, с определением их недостатков и обоснованием необходимости цифровой конкретизации координат положения вагонов и локомотивов на путях надвига и в сортировочном парке с учетом инвентарных номеров подвижных единиц. **Методика.** Исследованы принципы влияния низкочастотных физических воздействий на длину отраженной волны в волоконно-оптическом кабеле, уложенном вдоль рельсов. Обоснована принципиальная пригодность оптоволоконных технологий для распределенного акустического зондирования DAS (Distributed Acoustic Sensing). Дана оценка эффективности применения системы DAS для непрерывного слежения за перемещением вагонов и локомотивов, мониторинга свободности и занятости путей на сортировочных станциях. Использована методика моделирования и технологии настройки рефлектограмм для проведения измерений в волоконно-оптическом кабеле. Проанализировано использование координатно-временной информации для контроля местоположения горочного локомотива, обеспечивающей автоматическое позиционирование подвижных единиц. **Результаты.** Определение координат «окон» в сортировочном парке имеет важное значение для сокращения непроизводительных потерь времени по осаживанию или подтягиванию вагонов, а также излишнего перепробега горочных локомотивов. Полученную информацию от напольных датчиков системы DAS о количестве и типах вагонов в движущемся отцепе можно использовать для выявления «чужаков» на путях сортировочного парка. В этом случае непрерывное слежение за отцепом повысит достоверность информации в подсистеме управления прицельным торможением на спускной части сортировочной горки. Для автоматического определения инвентарных номеров вагонов с помощью специальной компьютерной программы обработки видеоизображений можно использовать автоматизированную систему контроля инвентарных номеров (АСКИН). Для этого программный аппаратный комплекс необходимо дополнить драйвером чтения и записи потоков информации с видеорекамера при контроле поездов на входе в парк прибытия сортировочных станций. **Научная новизна.** Оснащение путей сортировочных станций волоконно-оптическими кабелями и аппаратурой системы DAS позволит повысить оперативность управления расформированием и формированием составов в режиме реального времени за счет точного определения координат нахождения локомотивов и вагонов на станционных путях. **Практическая значимость.** Комплексная система автоматического управления сортировочным процессом (КСАУ СП), дополненная системами DAS и идентификации инвентарных номеров вагонов, обеспечит ведение полноценной цифровой поездной и вагонной модели сортировочного процесса на надвигной и спускной частях горки и в сортировочном парке.

Ключевые слова: сортировочные станции; распределенное акустическое зондирование; оптоволоконные датчики; счетчики осей; волоконная брэгговская решетка; подвижной состав; маневровая работа

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Введение

Для решения задач по выполнению требований к повышению безопасности работы сортировочных станций, с одновременным сокращением эксплуатационных затрат, необходимо применение эффективных цифровых систем управления горочными локомотивами с высокоточным определением местоположения подвижного состава на путях надвига и в сортировочных парках.

На многих сортировочных станциях внедрены различные устройства и системы автоматизации и централизации контроля и управления, например, комплексная система автоматического управления сортировочным процессом (КСАУ СП), горочная автоматическая локомотивная сигнализация с использованием радиосвязи (ГАЛС Р), горочная микропроцессорная централизация (ГМЦ–ГТСС), автоматизированная система управления сортировочной станцией (АСУ СС), а также ряд других систем контроля и диагностики [4, 7]. Однако к значительному росту производительности труда и перерабатывающей способности сортировочных станций это не привело из-за концентрации усилий большинства разработчиков на создании узкофункциональных систем управления, не интегрированных со смежными устройствами. Ни одна из указанных систем не формирует полноценную адекватную вагонную и поездную модель сортировочного процесса на станции в реальном масштабе времени. Это связано с крайне недостаточным количеством наземных датчиков, фиксирующих координаты размещения подвижных единиц на путях надвига и в сортировочном парке. Эффективная реализация концепции объединения систем в единый поточный комплекс переработки вагонов зависит также от возможности использования идентификаторов вагонов, в качестве которых применяют инвентарные номера подвижного состава [8, 9]. На это указывает опыт эксплуатации систем автоматизированного расформирования – формирования составов в Западной Европе и США, также использующих инвентарные номера вагонов для точного определения местонахождения каждого вагона на сортировочной станции [10]. В Северной Америке введена в эксплуатацию система ав-

томатической радиочастотной идентификации вагонов Amtech стандарта ISO 10374. Систему выпускает компания Amtech Systems Division – подразделение корпорации Intermec Technologies (США). В 1991 г. Ассоциация американских железных дорог приняла решение об обязательной установке кодовых бортовых датчиков Amtech на всех без исключения железнодорожных вагонах и локомотивах. К концу 1997 г. кодовыми бортовыми датчиками Amtech было оборудовано 1,52 млн вагонов и 1 100 локомотивов, на сети установили 3 000 считывателей. В Европе для идентификации транспортных средств используют систему Dynicom – совместную разработку фирм Amtech и Alcatel. Она отличается от североамериканской системы рабочими характеристиками, местами расположения считывателя и датчика. На железнодорожном транспорте систему Dynicom используют во Франции, Швейцарии, Польше, Испании [9].

Цель

В связи с изложенным целью этой работы является анализ действующих систем автоматического управления роспуском составов на сортировочных станциях, с определением их недостатков и обоснованием необходимости цифровой конкретизации координат положения вагонов и локомотивов на путях надвига и в сортировочном парке с учетом инвентарных номеров подвижных единиц.

Методика

Исследованы принципы влияния низкочастотных физических воздействий на длину отраженной волны в волоконно-оптическом кабеле, уложенном вдоль рельсов. Обоснована принципиальная пригодность оптоволоконных технологий для распределенного акустического зондирования DAS (Distributed Acoustic Sensing). Дана оценка эффективности применения системы DAS для непрерывного слежения за перемещением вагонов и локомотивов, мониторинга свободности и занятости путей на сортировочных станциях. Использована методика моделирования и технологии настройки рефлектограмм для проведения измерений в волоконно-оптическом кабеле. Проанализи-

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

ровано использование координатно-временной информации для контроля местоположения горючего локомотива, обеспечивающей автоматическое позиционирование подвижных единиц.

Результаты

В настоящее время целый ряд развитых железных дорог уделяет повышенное внимание технологиям мониторинга, основанным на распределенных виртуальных акустических датчиках в оптоволокне. Применение технических решений на основе волоконной брэгговской решетки (Fibre Bragg Grating – FBG) подтвердило принципиальную пригодность оптоволоконных технологий для обнаружения прохода колес подвижного состава [5]. Технология FBG предусматривает формирование в оптоволокне посредством лазерного источника сигналов периодической структуры, обладающей свойствами отражателя для импульсов волны определенной длины. В волоконно-оптический кабель передаются световые импульсы высокой частоты с последующей оценкой отраженного сигнала. Звуковые колебания и вибрации влекут за собой изменение интенсивности сигнала обратного рассеяния в режиме реального времени (рис. 1).



Рис. 1. Принцип действия распределенного акустического зондирования

Fig. 1. The operation principle of distributed acoustic sounding

На длину отраженной волны λB оказывает влияние любая вариация физических или механических параметров брэгговской решетки [2, 15]. Суть явления выражает известное равенство (1), где первое слагаемое в правой части показывает влияние растяжения на λB , а вторая часть – влияние температуры на λB .

$$\Delta \lambda B = \lambda B(1 - \rho\alpha)\Delta\epsilon + \lambda B(\alpha + \xi)\Delta T, \quad (1)$$

где $\Delta \lambda B$ – изменение длины волны Брэгга; $\rho\alpha$, α и ξ – коэффициенты фотоупругости, термического расширения и термооптический коэффициент волокна соответственно; $\Delta\epsilon$ – изменение натяжения; ΔT – изменение температуры.

Для обычных решеток, наблюдаемых в кварцевом волокне при $\lambda B \approx 1\,550$ нм, чувствительность к растяжению и температуре составляет приблизительно 1,2 пм/мк и 10 пм/С соответственно. Оба члена уравнения (1) независимы. Это значит, что волоконные решетки Брэгга можно использовать для измерения температуры, изолировав волокно от растяжения. Следовательно, зная температуру, можно проводить термокомпенсированные измерения растяжения, за это обычно отвечает вторая изолированная решетка Брэгга [11].

Помимо температуры и растяжения, волоконные решетки Брэгга можно использовать для измерений других физических величин, таких как давление, ускорение, смещение и т. п., встроив их в датчик. Применение технических решений на основе волоконной брэгговской решетки FBG подтвердило принципиальную пригодность оптоволоконных технологий для распределенного акустического зондирования DAS (Distributed Acoustic Sensing), основанного на выявлении изменений в отражениях световых сигналов, посылаемых в кабель лазерным источником. Эти изменения обусловлены воздействием на кабель внешних акустических сигналов низкой частоты. Когерентные световые импульсы заданной частоты посылаются лазерным источником в одномодовое волокно и частично отражаются под действием естественных внешних физических факторов. Интенсивность отраженного сигнала зависит от времени, прошедшего с момента отправки импульса, что позволяет сделать выводы о физических изменениях в определенных участках оптического волокна. Эти изменения могут быть обусловлены корпусным шумом и вибрациями вблизи волоконно-оптического кабеля. Специально разработанные алгоритмы позволяют классифицировать причины изменений, основываясь на выделении обратного рассеяния из отраженного сигнала. Благодаря этому

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

измеряемые сигнатуры могут быть преобразованы в полезную информацию [6].

На основе технологии DAS фирма Frauscher Sensortechnik GmbH (Austria) разработала систему акустического зондирования FAS (Frauscher Acoustic Sensing) (рис. 2). Структурная схема FAS состоит из: оптоволоконного кабеля (Optical Fibre), уложенного вдоль пути (Track); оптического блока (OPTI unit), посылающего высокочастотные световые импульсы в оптоволокно и измеряющего интенсивность обратного рассеяния; блока обработки (PROC unit), преобразующего сигналы в спектры мощности и классифицирующего зарегистрированные события; прикладного блока (APPL unit), определяющего координаты места события и передающего информационные пакеты в пользовательский интерфейс для отображения информации на мониторе (DISP unit) [2].

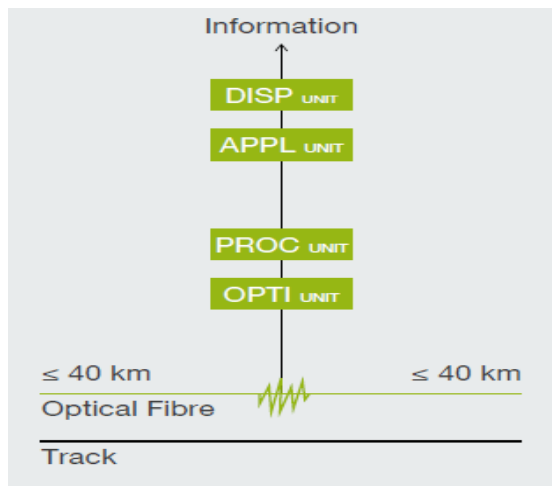


Рис. 2. Структурная схема системы акустического зондирования FAS

Fig. 2. The structural diagram of the acoustic sounding of system FAS

Посредством технологии DAS любое одно-модовое волокно преобразуется в серию последовательно расположенных виртуальных микрофонов. При размещении волоконно-оптических кабелей вдоль железнодорожных путей появляется возможность непрерывного слежения за движением поездов.

В режиме мониторинга технического состояния подвижного состава осуществляется непрерывный контроль излома оси колесной пары, осевой шейки или колеса, контроль дефек-

тов поверхности катания колес подвижного состава, фиксации изломов боковой рамы вагонной тележки, фиксации трещин в рельсах [5]. С помощью системы FAS можно измерять скорость движения поезда и осуществлять взвешивание вагонов на ходу поезда.

Следует отметить, что система FAS позволяет осуществлять как мониторинг технического состояния подвижного состава, так и контроль состояния компонентов пути – рельсов, рельсовых креплений, балластных подушек. Нарботан опыт применения системы для контроля в целом железнодорожных путей и области вокруг них. Среди других назначений отмечено использование FAS в разных системах контроля и управления на железнодорожном транспорте [5].

На сортировочных станциях система FAS, после реконструкции, может быть применена в виде устройства DAS для непрерывного слежения за перемещением вагонов и локомотивов, мониторинга свободности и занятости путей.

Научная новизна и практическая значимость

Пространственное разрешение чувствительных элементов оптического волокна может быть равным 10 м при укладке оптоволоконного кабеля в грунт. Существенное повышение чувствительности до 0,2 м реализуется при фиксации оптоволоконного кабеля на пружинных элементах крепления рельса к шпалам. При непрерывной длине волокна порядка 1 250 м (равной длине станционного пути) обеспечивается действие примерно 6 250 независимых акустических датчиков, размещенных вдоль рельсовой линии. Фактически осуществляется непрерывный мониторинг всего станционного пути.

Определение порядкового номера вагона в поезде возможно при использовании метчиков прохода колес (датчиков колес подвижного состава) [8]. В отличие от рельсовых цепей, непосредственно устанавливающих свободность или занятость станционных путей, система счета осей конкретизирует сведения о контролируемом подвижном составе. Использование счетчиков импульсов, функционирующих по специальным алгоритмам, дает воз-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

можность осуществлять счет физических вагонов независимо от числа осей в них. Система регистрации прохода колес, построенная на счетчиках импульсов, позволяет однозначно фиксировать отдельные вагоны. Совместное действие устройства DAS, регистрирующего перемещение состава на конкретном пути, и системы регистрации прохода колес реализуют конкретную локализацию каждой подвижной единицы на определенной координате пути. На спускной части сортировочной горки локализация отцепов позволит точно управлять вагонными замедлителями для исключения нагонов отцепов и запуска «чужаков». Система пользовательского интерфейса отображает в удобном виде как данные, полученные непосредственно от системы DAS, так и информацию, сформированную при помощи комбинированных технических решений, включая дополнительно счетчики осей и систему регистрации прохода колес подвижного состава. Обнаруженные с помощью DAS и комбинированного технического решения события классифицируются, и полученная информация предоставляется в наглядном виде [12].

При моделировании и настроечных регулировках устройства DAS определен способ крепления оптоволоконного кабеля к рельсам, расчетным методом определены величина оконечных согласующих сопротивлений и параметры так называемых «мертвых зон» оптоволоконного кабеля. Осуществлена имитация отражающих событий с определением координат. На рис. 3 представлена рефлектограмма с отметками отражающих событий в левой части. Амплитуда сигналов составила -3 дБ. На конце волокна зафиксировано мощное отражающее событие помехи с амплитудой -8 дБ. Для предотвращения этого влияния и согласования параметров на конце волокна устанавливают специальный терминальный блок – аттенюатор (Terminator) [14, 16]. После подключения терминального блока рефлектограмма приобретает вид (рис. 4), подтверждающий готовность системы DAS к проведению измерений.

При регулировке системы DAS регистрируется контроль место нахождения локомотивов с измерением скорости и направления движения, а также длины подвижного состава.

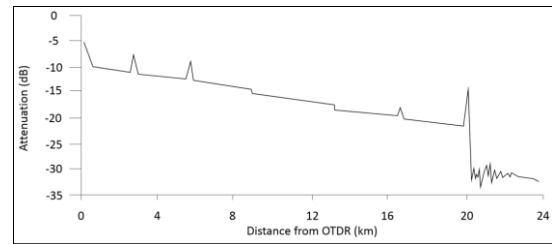


Рис. 3. Рефлектограмма для настройки системы DAS

Fig. 3. Reflectogram for setting the DAS system

В ходе испытаний, после аналого-цифрового преобразования и цифровой фильтрации, результаты контроля отображаются на главном мониторе системы [1, 13]. На рис. 5 приведено информационное окно системы DAS. Указана фактическая скорость движения поезда и время фиксации результатов контроля.



Рис. 4. Рефлектограмма системы DAS после регулировки

Fig. 4. Reflectogram after the DAS system adjustment

Использование опции GPS дает возможность указывать географические координаты местонахождения поезда.

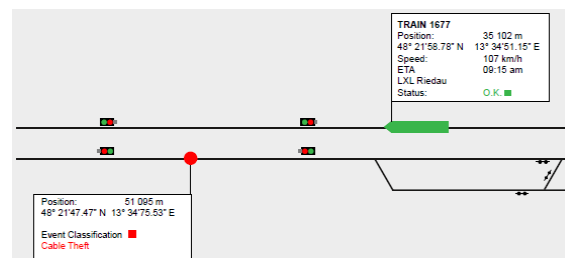


Рис. 5. Пример информационного окна системы DAS

Fig. 5. Example of the information window of the DAS system

Для автоматической идентификации инвентарных номеров вагонов с помощью специальной компьютерной программы обработки видеоизображений можно использовать систему

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

відеоконтроля бокових стенок и крыши подвижных единиц. Сокращение финансовых издержек возможно при использовании видеокamer и программных продуктов автоматизированной системы коммерческого осмотра поездов и вагонов АСКО ПВ. Для универсализации систем АСКО ПВ и идентификации номеров вагонов программно-аппаратный комплекс (ПАК) необходимо дополнить драйвером чтения и записи потоков информации с видеокamer при контроле поездов на входе в парки прибытия сортировочных станций, драйвером контроля базы данных натуральных листов, а также автоматического поиска и присоединения ТГНЛ к выходным базам данных с фактическими инвентарными номерами вагонов [3].

Качество изображений, формируемых цветными IP-видеокамерами с разрешением 2М (1 920×1 080 пикселей) и кодеком H.264/H.265, позволит детально рассмотреть конструкции вагонов и надписи на их стенках с детализацией изображений не более 2–4 мм на один пиксель. Для надежности считывания инвентарных номеров вагонов освещенность участков видеосъемки должна быть не менее 50 лк.

Процент распознавания при списывании цифр с двух сторон вагона и последующей сравнительной обработке должен быть не менее 99 % от числа номеров, нанесенных по стандарту [12]. Затем осуществляется автоматическое сравнение с номерами вагонов из ТГНЛ и восстановление нераспознанных цифр по ТГНЛ. Программный модуль определяет тип и физическую длину вагона на основании инвентарного номера. При необходимости вычислительный комплекс запрашивает отсутствующие сведения из банка данных технической конторы, в которой предполагается наличие терминала по автоматизированной обработке натуральных листов на прибывающие поезда. Сформированный таким образом пакет данных на прибывший поезд с инвентарными номерами вагонов автоматиче-

ски передается в АСУСС для составления плана расформирования составов.

Один кабельный распределенный акустический сенсор заменяет собой тысячи точечных датчиков и снижает потребность в дополнительных системах для мониторинга передвижений локомотивов и вагонов по станционным путям. Существенно повышается оперативность управления расформированием составов в режиме реального времени за счет точного определения место нахождения влияющих событий вдоль волоконно-оптического кабеля.

Горочный комплекс КСАУ СП, дополненный системами DAS и идентификации инвентарных номеров вагонов, обеспечит ведение полноценной цифровой поездной и вагонной модели сортировочного процесса на надвигной и спускной частях горки и в сортировочном парке. При этом «привязка» инвентарного номера к конкретной подвижной единице существенно сократит количество ручных операций по управлению горочными локомотивами и обеспечит полную автоматизацию управления вагонными замедлителями.

Выводы

Исследование процессов физического воздействия влияющих событий на изменение длины отраженной волны в волоконно-оптическом кабеле показало принципиальную пригодность оптоволоконных технологий для распределенного акустического зондирования. Использование этой технологии на железнодорожных путях сортировочных станций обеспечит точное позиционирование подвижных единиц в координатно-временной системе расформирования и формирования составов, что позволит реализовать полноценную цифровую модель сортировочного процесса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Баранов Л. А. Оценки погрешности и помехоустойчивости тракта аналого-цифрового преобразования в системах автоматического контроля и управления. *Электротехника*. 2017. № 9. С. 29–36.
2. Бахтиярова Е. А., Чигамбаев Т. О., Сансызбай К. М. Технология будущего: распределенное акустическое зондирование DAS в режиме реального времени. *Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика* : материалы XLI Междунар. науч.-практ. конф. Алматы : КазАТК им. М. Тынышпаева, 2017. С. 49–54.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

3. Бурченков В. В., Холодильников О. В. Техническая диагностики состояния подвижного состава и перспективы ее развития в Западной Европе и США. *Вестник БелГУТа : Наука и транспорт*. 2017. № 1 (34). С. 5–9.
4. Гапанович В. А., Шабельников А. Н. Системы безопасности в управлении технологическим процессом сортировочных станций. *Автомат., связь, информат.* 2014. № 11. С. 2–5.
5. Розенберг Е. Н., Озеров А. В. Построение систем управления и обеспечения безопасности движения поездов на ВСМ. *Железнодорожный транспорт*. 2018. № 3. С. 34–41.
6. Розенбергер М., Халл А. Распределенное акустическое зондирование как основа для железнодорожных приложений. *Железные дороги мира*. 2016. № 12. С. 57–65.
7. Савицкий А. Г., Шурдак А. В., Мошкин И. В. Инновационный подход к управлению движением на станциях. *Автомат., связь, информат.* 2016. № 3. С. 24–27; № 4. С. 36–38; № 5. С. 25–28.
8. Андерс Э., Берндт Т. *Системы автоматизации и телемеханики на железных дорогах мира* : учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта / пер. с англ.; под ред. Г. Тега, С. Власенко. Москва : Интекст, 2010. 496 с.
9. Шабельников А. Н., Иванченко В. Н. Зарубежные системы автоматизации сортировочных горок. *Автомат., связь, информат.* 2014. № 1. С. 30–33. № 3. С. 45–48.
10. Шобель А. Напольные системы мониторинга подвижного состава. *Железные дороги мира*. 2014. № 3. С. 51–59.
11. Бурдин А. В., Василец А. А., Бурдин В. А., Морозов О. Г., Кузнецов А. А., Нуреев И. И., Фасхутдинов Л. И., Кафарова А. М., Минаева А. Ю., Севрук Н. Л. Результаты экспериментальных исследований маломодовых режимов волоконных брэгговских решеток на многомодовых световодах. *Infokommunikationstechnologien*. 2016. Vol. 14. № 1. С. 19–33. DOI: <https://doi.org/10.18469/ikt.2016.14.1.03>
12. Burchenkov V. V. Decision making based on the results of automatic diagnostics of parts and assemblies of rolling stock. *World of Transport and Transportation*. 2019. Vol. 17. Iss. 4. P. 232–243. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-4-232-243>
13. Kong F., Li W., Yao J. Transverse load sensing based on a dual-frequency optoelectronic oscillator. *Optics Letters*. 2013. Vol. 38. Iss. 14. P. 2611–2613. DOI: <https://doi.org/10.1364/OL.38.002611>
14. Ogawa K., Koyama S., Haseda Y., Fujita K., Ishizawa H., Fujimoto K. Wireless, portable fiber grating interrogation system employing optical edge filter. *Sensors*. 2019. Vol. 19 (14). P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19143222>
15. Willis M. E., Barfoot D., Ellmauthaler A., Wu X., Barrios O., Erdemir C., Quinn D. Quantitative quality of distributed acoustic sensing vertical seismic profile data. *The Leading Edge*. 2016. Vol. 35. Iss. 7. P. 562–648. DOI: <https://doi.org/10.1190/tle35070605.1>
16. Yao J. P. Microwave photonics for high resolution and high speed interrogation of fiber Bragg grating sensors. *International Photonics and Optoelectronics Meetings*. 2015. Vol. 34. P. 230–242. DOI: <https://doi.org/10.1364/oedi.2014.oth2c.1>

В. В. БУРЧЕНКОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Вагони», Білоруський державний університет транспорту, вул. Кірова, 34, Гомель, Республіка Білорусь, 246653, тел. +37 (529) 53 03 784, ел. пошта lenadva@tut.by, ORCID 0000-0002-3664-4655

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ РОБОТИ СОРТУВАЛЬНИХ СТАНЦІЙ НА ОСНОВІ ДИСТАНЦІЙНОГО АКУСТИЧНОГО ЗОНДУВАННЯ

Мета. Основною метою цієї роботи є аналіз наявних систем автоматичного управління розпуском составів на сортувальних станціях, із визначенням їх недоліків та обґрунтуванням необхідності цифрової конкретизації координат знаходження вагонів і локомотивів на коліях насування і в сортувальному парку з урахуванням інвентарних номерів рухомих одиниць. **Методика.** Досліджено принципи дії низькочастотних фізичних впливів на довжину відбитої хвилі у волоконно-оптичному кабелі, укладеному вздовж рейок. Обґрунтовано принципову придатність оптоволоконних технологій для розподіленого акустичного зондування DAS (Distributed Acoustic Sensing). Оцінено ефективність застосування системи DAS для безперервного стеження за переміщенням вагонів і локомотивів, моніторингу вільності і зайнятості колій на сортувальних станціях. Застосовано методику моделювання та технології налаштування рефлектограм для проведення вимірювань у волоконно-оптичному кабелі. Проаналізовано використання координатно-часової інформації для контролю місця

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: <https://doi.org/10.15802/stp2020/199482>

© В. В. Бурченков, 2020

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

знаходження гіркового локомотива, що забезпечує автоматичне позиціонування рухомих одиниць. **Результат.** Визначення координат «вікон» у сортувальному парку має важливе значення для скорочення непродуктивних утрат часу з осаджування або підтягування вагонів, а також зайвого перепробігу гіркових локомотивів. Отриману інформацію від підлогових датчиків системи DAS про кількість і типи вагонів у рухомому відчепі можна використовувати для виявлення «чужинців» на коліях сортувального парку. У цьому випадку безперервне стеження за відчепом підвищить достовірність інформації в підсистемі управління прицільним гальмуванням на спускній частині сортувальної гірки. Для автоматичного визначення інвентарних номерів вагонів із допомогою спеціальної комп'ютерної програми обробки відеозображень можна використати автоматизовану систему контролю інвентарних номерів (АСКІН). Для цього програмний апаратний комплекс необхідно доповнити драйвером читання і запису потоків інформації з відеокамер під час контролю поїздів на вході в парки прибуття сортувальних станцій. **Наукова новизна.** Оснащення колій сортувальних станцій волоконно-оптичними кабелями й апаратурою системи DAS дозволить підвищити оперативність управління розформуванням й формуванням поїздів у режимі реального часу за рахунок точного визначення координат перебування локомотивів і вагонів на станційних коліях. **Практична значимість.** Комплексна система автоматичного управління сортувальним процесом (КСАУ СП), доповнена системами DAS та ідентифікації інвентарних номерів вагонів, забезпечить ведення повноцінної цифрової поїзної і вагонної моделі сортувального процесу на насувній та спускній частині гірки і в сортувальному парку.

Ключові слова: сортувальні станції; розподілене акустичне зондування; оптоволоконні датчики; лічильники осей; волоконна брегівська решітка; рухомий склад; маневрова робота

V. V. BURCHENKOV^{1*}

¹*Dep. «Cars», Belarusian State Transport University, Kirova St., 34, Gomel, 246653, Republic of Belarus, tel. +37 (529) 53 03 784, e-mail lenadva@tut.by, ORCID 0000-0002-3664-4655

IMPROVING THE TECHNOLOGY OF WORK OF MARSHALLING YARDS BASED ON REMOTE ACOUSTIC SOUNDING

Purpose. The article analyzes the automatic control systems for train sorting at marshalling yards. It indicates their shortcomings and substantiates the need for digital specification of the coordinates of cars and locomotives position on humping tracks and in the marshalling yard, taking into account inventory numbers of rolling units. **Methodology.** The principles of influence of low-frequency physical effects on the reflected wavelength in a fiber-optic cable laid along the rails are studied. The fundamental suitability of fiber-optic technologies for distributed acoustic sounding DAS (Distributed Acoustic Sensing) is substantiated. The use efficiency of the DAS system at marshalling yards for continuous monitoring the movement of cars and locomotives and track vacancy and occupancy at sorting stations was assessed. The simulation methodology and reflectogram setting technology for measurements in a fiber-optic cable were used. The use of coordinate-time information to control the location of the hump locomotive, which ensures the automatic positioning of rolling units, is analyzed. **Findings.** Of great importance is the coordinate determination of the «gaps» at the classification yard in order to reduce unproductive time losses for backup shunting or pulling of cars. The information received from the DAS floor sensors about the number and type of cars in the moving cut can be used to identify «outsiders» at the classification yard. In this case, continuous tracking of the cut will increase the information reliability in the target braking control subsystem at the descending part of the marshalling yard. For automatic determining the inventory numbers of cars using a special computer program for processing video images, it is possible to use the automatic control system of inventory numbers of cars ASKIN. To do this, the software and hardware complex must be supplemented with a driver for reading and writing information flows from video cameras when monitoring trains at the entrance of the receiving tracks of marshalling yards. **Originality.** Equipment of sorting station tracks with fiber-optic cables and DAS system equipment will make it possible to increase the management efficiency of train making and breaking-up in real time by accurately determining the coordinates of locomotives and cars on station tracks. **Practical value.** The comprehensive automatic control system of sorting process, supplemented by the DAS systems and the identification of inventory numbers of cars, will ensure maintenance of a complete digital train and car model of the sorting process at the humping and descending parts of the hump and in the sorting yard.

Keywords: marshalling yards; distributed acoustic sounding; fiber-optic sensors; axis counters; fiber Bragg grating; rolling stock; shunting operation

REFERENCES

1. Baranov, L. A. (2017). Estimation of error and noise immunity of the analog-to-digital conversion path in automatic control and control systems. *Electrical engineering*, 9, 29-36. (in Russian)
2. Bakhtiyarova, Ye. A., Chigambaev, T. O., & Sansyzbay, K. M. (2017). Tekhnologiya budushchego: raspredelennoe akusticheskoe zondirovanie DAS v rezhime realnogo vremeni. *Innovative technologies in transport: education, science, and practice: materials of the XLI International science-practice. conf.* Almaty: KazATK im. M. Tynyshpaev, 49-54. (in Russian)
3. Burchenkov, V. V., & Kholodilov, O. V. (2017). Technical diagnostics of the state of rolling stock and prospects for its development in Western Europe and the USA. *Bulletin of BelGUT: Science and Transport*, 1(34), 5-9. (in Russian)
4. Gapanovich, V. A., & Shabelnikov, A. N. (2014). Sistemy bezopasnosti v upravlenii tekhnologicheskimi protsessami sortirovochnykh stantsiy. *Automation, communication and Informatics*, 11, 2-5. (in Russian)
5. Rozenberg, Ye. N., Ozerov, A. V. (2018). Postroenie sistem upravleniya i obespecheniya bezopasnosti dvizheniya poezdov na VSM. *Zheleznodorozhnyy transport*, 3, 34-41. (in Russian)
6. Rozenberger, M., & Khall, A. (2016). Raspredelennoe akusticheskoe zondirovanie kak osnova dlya zheleznodorozhnykh prilozheniy. *Zheleznye dorogi mira*, 12, 57-65. (in Russian)
7. Savitskiy, A. G., Shurdak, A. V., & Moshkin, I. V. (2016). Innovatsionnyy podkhod k upravleniyu dvizheniem na stantsiyakh. *Automation, communication and Informatics*, 3, 24-27; 4, 36-38; 5, 25-28. (in Russian)
8. Anders, E., & Berndt, T. (2010). *Systems of automatics and telemechanics on the Railways of the world: textbook for universities*. By G. Teega, S. Vlasenko. Moscow: Intext. (in Russian)
9. Shabelnikov, A. N., & Ivanchenko, V. N. (2014). Zarubezhnye sistemy avtomatizatsii sortirovochnykh gorok. *Automation, communication and Informatics*, 1, 30-33; 3, 45-48. (in Russian)
10. Shobel, A. (2014). Napolnye sistemy monitoringa podvizhnogo sostava. *Zheleznye dorogi mira*, 3, 51-59. (in Russian)
11. Bourdine, A. V., Vasilets, A. A., Bourdin, V. A., Morozov, O. G., ... & Kafarova, A. M. (2016). Results of experimental studies of multimode fiber Bragg gratings on multimode fibers. *Infokommunikacionnye Tehnologii*, 14(1), 19-33. DOI: <https://doi.org/10.18469/ikt.2016.14.1.03> (in Russian)
12. Burchenkov, V. V. (2019). Decision making based on the results of automatic diagnostics of parts and assemblies of rolling stock. *World of Transport and Transportation*, 17(4), 232-243. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-4-232-243> (in Russian and English)
13. Kong, F., Li, W., & Yao, J. (2013). Transverse load sensing based on a dual-frequency optoelectronic oscillator. *Optics Letters*, 38(14), 2611-2613. DOI: <https://doi.org/10.1364/OL.38.002611> (in English)
14. Ogawa, K., Koyama, S., Haseda, Y., Fujita, K., Ishizawa, H., & Fujimoto, K. (2019). Wireless, Portable Fiber Bragg Grating Interrogation System Employing Optical Edge Filter. *Sensors*, 19(14), 1-12. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19143222> (in English)
15. Willis, M. E., Barfoot, D., Ellmauthaler, A., Wu, X., Barrios, O., Erdemir, C., ... & Quinn, D. (2016). Quantitative quality of distributed acoustic sensing vertical seismic profile data. *The Leading Edge*, 35(7), 562-648. DOI: <https://doi.org/10.1190/tle35070605.1> (in English)
16. Yao, J. (2015). Microwave photonics for high resolution and high speed interrogation of fiber Bragg grating sensors. *International Photonics and OptoElectronics Meetings*, 34, 230-242. DOI: <https://doi.org/10.1364/oedi.2014.oth2c.1> (in English)

Поступила в редколлегию: 01.10.2019

Принята в печать: 30.01.2020

УДК 629.454.22:656.072.6

С. В. ВОЙТКІВ

ТзОВ «Науково-технічний центр «Автополіпром», вул. Зубрівська, 32/24, Львів, Україна, 79066,
тел. +38 (067) 447 04 90, ел. пошта voytkivsv@ukr.net, ORCID 0000-0002-7789-2081

МЕТОДИКА ОЦІНКИ РІВНЯ КОМФОРТАБЕЛЬНОСТІ ПАСАЖИРСЬКИХ КУПЕЙНИХ СПАЛЬНИХ ВАГОНІВ

Мета. У роботі передбачено розроблення методики для проведення об'єктивної оцінки комфортабельності перевезень пасажирів та зручності користування пасажирськими купейними спальними вагонами локомотивної тяги або потягів постійного формування. Сучасні купейні спальні вагони різних моделей європейських та інших виробників різняться багатьма розмірними параметрами, вмістимістю й комплектацією пасажирських купе і вагонів, наявністю душових стояків у туалетних приміщеннях чи душових кабін загального або індивідуального користування тощо і забезпечують пасажирів відповідний рівень зручності користування ними та різний рівень комфортабельності перевезень. Під час проєктування нових перспективних і конкурентоспроможних купейних спальних вагонів теж доцільно мати таку методику для розроблення їх компоновальних схем і планувань та для оптимального вибору тих чи інших розмірних параметрів вагонів і особливо пасажирських купе. **Методика.** На основі аналізу компоновальних схем та планувань наявних купейних спальних вагонів різних європейських виробників, їх розмірних параметрів і комплектації, розмірних параметрів та комплектації пасажирських купе визначено критерії оцінки комфортабельності купейних спальних вагонів трьох груп – розмірних параметрів, вмістимості й комплектації. **Результати.** Запропоновано кілька показників зручності та комфортабельності пасажирських і службових приміщень купейних спальних вагонів і формули для їх обчислення. Також запропоновано вираз для визначення узагальненого показника комфортабельності купейних спальних вагонів та зручності користування ними. **Наукова новизна.** Уперше розроблено методику об'єктивної оцінки комфортабельності купейних спальних вагонів та зручності користування ними пасажирів. **Практична значимість.** Запропоновані показники оцінки комфортабельності пасажирських купейних спальних вагонів і формули для їх обчислення можна використовувати на етапах розроблення й вибору ескізних пропозицій або ескізних проєктів нових перспективних конкурентоспроможних вагонів задля забезпечення їх максимальної зручності та комфортабельності. Методика може бути корисною також і для оцінки тендерних пропозицій на закупівлю купейних спальних вагонів.

Ключові слова: спальний вагон; пасажирське купе; комфортабельність спального вагона; показник комфортабельності спального вагона

Вступ

Залізничний транспорт України є провідною галуззю в дорожньо-транспортному комплексі країни, бо забезпечує майже 50 % річного обсягу пасажирських перевезень. Але рівень комфортабельності перевезень пасажирів усіма видами потягів постійного формування та пасажирських вагонів локомотивної тяги далекий від сучасних вимог. Адже зношення пасажирських вагонів, у т. ч. і купейних спальних вагонів різних класів, котрі перебували в експлуатації станом на 1-ше січня 2019 року, склало понад 92 % [8].

За таких умов надзвичайно актуальним завданням вітчизняної галузі машинобудування є проєктування й організація виробництва но-

вих перспективних і конкурентоспроможних пасажирських купейних спальних вагонів, здатних забезпечити суттєво кращий рівень комфортабельності перевезень пасажирів. Зрозуміло, що для об'єктивної оцінки рівня комфортабельності наявних та нових перспективних пасажирських купейних спальних вагонів необхідна відповідна методика.

Мета

У роботі передбачено розроблення методики оцінки зручності користування та рівня комфортабельності, а також конкурентоспроможності проєктованих перспективних купейних спальних вагонів порівняно з наявними вагонами-аналогами.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Методика

Оцінювання зручності користування пасажирськими купейними спальними вагонами та рівня їх комфортабельності проведено на основі вибору та застосування об'єктивних критеріїв трьох груп, які враховують вмістимість, розмірні параметри та комплектацію вагонів, їх службових і пасажирських приміщень. Вибір критеріїв оцінки комфортабельності пасажирських купейних спальних вагонів виконано на основі аналізу компоновальних схем і планувань наявних вагонів цього типу різних європейських та інших виробників, а також визначення їх вагомості, тобто впливу на комфортабельність вагонів.

Рівень комфортабельності сучасних магістральних пасажирських вагонів локомотивної тяги визначається їх класом. Відповідно до [1], пасажирські купейні спальні вагони поділяються на вагони трьох класів – класу «люкс», 1 та 2-го класів. Основні критерії комфортабельності вагонів цих класів наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Критерії комфортабельності пасажирських купейних спальних вагонів

Table 1

Comfort criteria for passenger compartment sleeping cars

Найменування параметра	Клас вагона		
	«люкс»	1	2
Параметри пасажирського купе:			
– вмістимість, чол.	1	2	4
– кількість спальних диванів	1	2	2
– кількість спальних полиць	–	–	2
– умивальник	+	–	–
– індивідуальний туалет	+	–	–
– душова кабіна	+	–	–
Службове купе	+	+	+
Купе для відпочинку провідників	+	+	+
Туалет загального користування	1	2	2

Примітка: *За необхідності.

Проте рівень комфортабельності купейних спальних вагонів навіть одного класу може суттєво різнитися, адже їх пасажирські і службові приміщення можуть мати різні розмірні параметри. Наприклад, пасажирські вагони 1 і 2-го класів моделі 61–779 ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» мають ширину по кузову лише 3,021 м [6] за допустимої за габаритом рухомого складу 1–ВМ до 3,4 м [4]. Крім того, розмірні параметри різних приміщень та купе вагонів теж можуть суттєво відрізнятися, відповідно до технічних вимог ДСТУ 4049 [3], О+Р 562 [5] та СП 2.5.1198 [7], наведених у табл. 2.

Напрями підвищення комфортабельності пасажирських вагонів шляхом упровадження нових систем опалення, вентиляції та кондиціювання повітря, інформаційних табло, застосування нових матеріалів, вакуумних туалетів тощо розглянуті в роботі [9], а застосування різної вмістимості й комплектації пасажирських купе – у роботі [2]. У роботах [10, 17] наведено методики визначення комфортабельності перевезень пасажирів, що базуються здебільшого на суб'єктивних показниках, які характеризують сприйняття пасажирями рівня комфортабельності перевезень (дотримання норм гігієни у вагонах, безпечність оздоблювальних матеріалів, мультимедійний сервіс, якість обслуговування тощо), і об'єктивних показниках діяльності транспортних структур (час у дорозі, вартість квитків тощо).

У роботах [11–16] розглянуто такі об'єктивні показники комфортабельності пасажирських вагонів, як рівень шуму, рівень вібрацій, рівень температур та питома площа на одного пасажирів, яка у європейських країнах становить від 0,85 м²/пас. (Англія) до 1,18 м²/пас. (Німеччина). Проте запропоновані методики оцінки комфортабельності пасажирських вагонів, особливо купейних спальних, не враховують багатьох їх конструктивних параметрів (розмірних, комплектації, вмістимості), від яких суттєво залежить комфортабельність перевезень пасажирів.

Оцінку комфортабельності нових пасажирських купейних спальних вагонів на етапі розроблення ескізних пропозицій слід проводити на основі трьох груп оціночних критеріїв – розмірних параметрів вагонів, пасажирських

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

і службових купе, туалетів та інших службових приміщень, параметрів вмістимості та комплектації вагонів і пасажирських купе.

Таблиця 2

Основні вимоги до пасажирських купейних спальних вагонів

Table 2

Basic requirements for passenger compartment sleeping cars

Найменування параметра	Клас вагона		
	«люкс»	1	2
Розмірні параметри пасажирського купе, не менше, м: – довжина	2,0 ²	2,1 ¹ /1,9 ²	
– ширина	–	1,9 ¹	
– ширина дверей	0,55 ²	0,56/ 0,65 ¹	0,5 2 ²
Габаритні розміри диванів, не менше, м: – довжина	1,84 ²	1,9/ 1,84 ²	
– ширина	0,7 ²	0,75/ 0,6 ^{1,2}	0,6/ 0,6 ²
Відстань між диванами, не менше, м	0,5 ²	0,6/ 0,6 ¹	
Довжина спальної полиці, не менше, м	–	1,83 ¹	
Відстань між диваном і перегородкою, не менше, м	0,5 ²	–	–
Ширина коридора вагона, не менше, м	0,75/ 0,68 ²		

Примітки: ¹Вимоги О+Р 562 [5]. ²Вимоги СП 2.5.1198 [7]. Інші вимоги – ДСТУ 4049 [3].

До основних розмірних параметрів вагонів, які мають найбільший вплив на їх комфортабельність, належать габаритні розміри по кузову (довжина й ширина), довжина й ширина пасажирського приміщення, у якому розміщені пасажирські купе, ширина проходу по вагону й ширина його дверей з обох боків, довжина й ширина тамбурів і ширина їх бокових вхідних дверей. Комфортабельність вагонів за наведеними критеріями пропонуємо оцінювати коефіцієнтом k_b :

$$k_b = k_{\text{пл}} \times k_{\text{пр}} \times k_t, \quad (1)$$

де $k_{\text{пл}}$ – коефіцієнт площі вагона для розміщення пасажирських купе; $k_{\text{пр}}$ – коефіцієнт зручності проходу по вагону; k_t – коефіцієнт зручності тамбурів вагона.

Коефіцієнт площі вагона для розміщення пасажирських купе визначаємо за виразом:

$$k_{\text{пл}} = \frac{S_{\text{пл}}}{L_k \times B_k}, \quad (2)$$

де L_k і B_k – відповідно довжина та ширина вагона по кузову, м; $S_{\text{пл}}$ – площа вагона, призначена для розміщення пасажирських купе, м². Її визначаємо так:

$$S_{\text{пл}} = L_{\text{пл}} \times (B_k - 2t_b), \quad (3)$$

де $L_{\text{пл}}$ – довжина пасажирського приміщення, м; t_b – товщина боковин вагона, м.

Коефіцієнт зручності проходу по вагону залежить від його ширини та ширини проміжних дверей у перегородках, які відділяють прохід від інших приміщень вагона:

$$k_{\text{пр}} = \frac{b_{\text{пр}}}{[b_{\text{пр}}]} \times \frac{b_{\text{дв}}^{\text{пр}}}{[b_{\text{дв}}^{\text{пр}}]}, \quad (4)$$

де $b_{\text{пр}}$ і $[b_{\text{пр}}]$ – відповідно ширина й регламентована мінімальна ширина проходу по вагону, м; $b_{\text{дв}}^{\text{пр}}$ і $[b_{\text{дв}}^{\text{пр}}]$ – відповідно ширина й регламентована мінімальна ширина дверей до коридора пасажирського салону, м.

Коефіцієнт зручності тамбурів вагона залежить від обох розмірних параметрів та ширини бокових вхідних дверей, його визначаємо за формулою:

$$k_t = \frac{b_{\text{дв}}^{\text{т}}}{[b_{\text{дв}}^{\text{т}}]} + \frac{l_t \times b_t}{[l_t] \times [b_t]}, \quad (5)$$

де $b_{\text{дв}}^{\text{т}}$ і $[b_{\text{дв}}^{\text{т}}]$ – відповідно ширина й регламентована мінімальна ширина вхідних бокових дверей, м; l_t і b_t – відповідно довжина й ширина тамбура, м; $[l_t]$ і $[b_t]$ – відповідно,

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

регламентовані мінімальні довжина і ширина тамбура, м.

До основних розмірних параметрів пасажирських купе належить його довжина й ширина, довжина й ширина дивана, відстань між диванами або між диваном і перегородкою, ширина дверей купе. Комфортабельність пасажирського купе спального вагона визначаємо за формулою:

$$k_{\text{пк}} = k_s^{\text{пк}} \times k_{\text{см}}^{\text{д}} \times k_{\text{см}}^{\text{сп}} \times k_i \times k_{\text{дв}}^{\text{пк}}, \quad (6)$$

де $k_s^{\text{пк}}$ – коефіцієнт питомої площі пасажирського купе; $k_{\text{см}}^{\text{д}}$ і $k_{\text{см}}^{\text{сп}}$ – коефіцієнти зручності спального місця, відповідно дивана або верхньої спальної полиці; k_i – коефіцієнт ширини між диванами або між диваном і перегородкою купе; $k_{\text{дв}}^{\text{пк}}$ – коефіцієнт ширини дверей пасажирського купе.

Коефіцієнт питомої площі пасажирського купе характеризує його простір, що припадає на одного пасажирів:

$$k_s^{\text{пк}} = k^* \times \frac{l_{\text{пк}} \times b_{\text{пк}}}{n_{\text{пас}}^{\text{пк}}}, \quad (7)$$

де $l_{\text{пк}}$ і $b_{\text{пк}}$ – відповідно довжина та ширина пасажирського купе, м; $n_{\text{пас}}^{\text{пк}}$ – вмістимість пасажирського купе, чол.; k^* – коефіцієнт розмірності, чол./м².

Коефіцієнти зручності спальних місць визначаємо за виразом:

$$k_{\text{см}} = \frac{l_{\text{см}}^i \times b_{\text{см}}^i}{[l_{\text{см}}^i] \times [b_{\text{см}}^i]}, \quad (8)$$

де $l_{\text{см}}^i$ і $[l_{\text{см}}^i]$ – відповідно довжина й ширина спального місця – дивана або спальної полиці, м; $[l_{\text{см}}^i]$ і $[b_{\text{см}}^i]$ – відповідно регламентовані мінімальні довжина й ширина дивана або спальної полиці, м.

Коефіцієнт ширини між диванами або між диваном і перегородкою купе визначаємо за виразом:

$$k_i = \frac{b_i}{[b_i]}, \quad (9)$$

де b_i і $[b_i]$ – відповідно відстань між диванами або диваном і перегородкою, м.

Коефіцієнт зручності входу-виходу з пасажирського купе залежить від ширини провітрів дверей, його можна визначити за виразом:

$$k_{\text{дв}}^{\text{пк}} = \frac{b_{\text{дв}}^{\text{пк}}}{[b_{\text{дв}}^{\text{пк}}]}, \quad (10)$$

де $b_{\text{дв}}^{\text{пк}}$ і $[b_{\text{дв}}^{\text{пк}}]$ – відповідно ширина та регламентована мінімальна ширина дверей купе, м.

Коефіцієнт зручності службового купе враховує його площу та ширину дверей:

$$k_{\text{ск}} = \frac{s_{\text{ск}}}{[s_{\text{ск}}]} \times \frac{b_{\text{дв}}^{\text{ск}}}{[b_{\text{дв}}^{\text{ск}}]}, \quad (11)$$

де $s_{\text{ск}}$ і $[s_{\text{ск}}]$ – відповідно площа та регламентована мінімальна площа службового купе, м²; $b_{\text{дв}}^{\text{ск}}$ і $[b_{\text{дв}}^{\text{ск}}]$ – відповідно ширина й регламентована ширина дверей купе, м.

Коефіцієнт зручності купе відпочинку провідників враховує розмірні параметри спальних місць, відстань між диваном і перегородкою купе та ширину дверей:

$$k_{\text{кв}} = \frac{l_{\text{см}} \times b_{\text{см}}}{[l_{\text{см}}] \times [b_{\text{см}}]} \times k^* \times l_{\text{кв}} \times b_{\text{п}} \times \frac{b_{\text{дв}}^{\text{кв}}}{[b_{\text{дв}}^{\text{кв}}]}, \quad (12)$$

де $l_{\text{см}}$ і $[l_{\text{см}}]$ – відповідно довжина та регламентована мінімальна довжина спального місця, м; $b_{\text{см}}$ і $[b_{\text{см}}]$ – відповідно ширина та регламентована мінімальна ширина спального місця, м; k^* – коефіцієнт розмірності, м⁻¹; $l_{\text{кв}}$ – довжина купе відпочинку провідників, м; $b_{\text{п}}$ – відстань між диваном і перегородкою купе, м; $b_{\text{дв}}^{\text{кв}}$ і $[b_{\text{дв}}^{\text{кв}}]$ – відповідно ширина та регламентована мінімальна ширина дверей купе відпочинку провідників, м.

Коефіцієнт зручності користування туалетним приміщенням загального користування дорівнює:

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

$$k_{\text{тп}} = \frac{\sum s_{\text{тп}}}{n_{\text{тп}} \times [s_{\text{тп}}]} \times \frac{\sum b_{\text{дв}}^{\text{тп}}}{n_{\text{тп}} \times [b_{\text{дв}}^{\text{тп}}]} \times \frac{\sum b_{\text{тп}}}{n_{\text{тп}} \times [b_{\text{тп}}]}, \quad (13)$$

де $s_{\text{тп}}$ і $[s_{\text{тп}}]$ – відповідно площа й регламентована мінімальна площа туалетного приміщення, м; $b_{\text{дв}}^{\text{тп}}$ і $[b_{\text{дв}}^{\text{тп}}]$ – відповідно ширина й регламентована мінімальна ширина туалетного приміщення, м; $b_{\text{тп}}$ і $[b_{\text{тп}}]$ – відповідно ширина й регламентована мінімальна ширина дверей туалетного приміщення, м; $n_{\text{тп}}$ – кількість туалетних приміщень загального користування, од.

Коефіцієнт комфортабельності купейних спальних вагонів за кількістю туалетних приміщень загального користування і кількістю їх користувачів визначаємо за виразом:

$$k_{\text{тп}}^{\text{н}} = \frac{n_{\text{тп}}}{N_{\text{пас}} + 2}, \quad (14)$$

де $N_{\text{іаіа}}$ – пасажиромістимість вагона, чол.

Коефіцієнт комфортабельності купейних спальних вагонів за кількістю душових стояків або кабінок у санвузлі загального користування дорівнює:

$$k_{\text{д}}^{\text{н}} = \frac{k^{\text{д}} \times n_{\text{д}}}{N_{\text{пас}}}, \quad (15)$$

де $k^{\text{д}}$ – коефіцієнт типу душових установок, для суміщених душових стояків $k^{\text{д}}=0,5$, для душових кабінок $k^{\text{д}}=1,0$; $n_{\text{д}}$ – кількість туалетних приміщень загального користування у вагоні, од.

Коефіцієнт комфортабельності пасажирського купе за комплектацією диванами, відкидними спальними полицями, окремими сидіннями, шафою для одягу, умивальником, ящиком для сміття, унітазом та душовим стояком або душовою кабіною пропонуємо визначати за виразом:

$$k_{\text{к}}^{\text{пк}} = \frac{n_{\text{д}} + 0,5n_{\text{сп}} + 0,5(n_{\text{сид}} + n_{\text{ш}} + n_{\text{ум}}^{\text{пк}} + n_{\text{см}}^{\text{пк}})}{n_{\text{пас}}} + \frac{0,75(n_{\text{ум}}^{\text{с}} + n_{\text{см}}^{\text{с}} + n_{\text{ун}} + n_{\text{дс}}) + n_{\text{дп}}}{n_{\text{пас}}^{\text{пк}}}, \quad (16)$$

де $n_{\text{д}}$ і $n_{\text{сп}}$ – кількість відповідно диванів та спальних полиць у купе, од.; $n_{\text{сид}}$ – кількість окремих сидінь у купе, од.; $n_{\text{ш}}$ – кількість шаф для верхнього одягу в купе, од.; $n_{\text{пас}}^{\text{пк}}$ – пасажиромістимість купе, чол.; $n_{\text{ум}}^{\text{пк}}$ і $n_{\text{ум}}^{\text{с}}$ – наявність умивальника відповідно в купе або в індивідуальному санвузлі, од.; $n_{\text{см}}^{\text{пк}}$ і $n_{\text{см}}^{\text{с}}$ – наявність ящика для сміття відповідно в купе або в індивідуальному санвузлі, од.; $n_{\text{ун}}$ – наявність унітаза в індивідуальному санвузлі, од.; $n_{\text{дс}}$ – наявність душового стояка в індивідуальному санвузлі, од.; $n_{\text{дп}}$ – наявність окремої душової кабіни в індивідуальному санвузлі, од.

Узагальнений коефіцієнт комфортабельності пасажирських купейних спальних вагонів визначаємо за виразом:

$$k_{\text{ком}} = k_{\text{в}} \times (k_{\text{тп}} + k_{\text{тп}}^{\text{н}} + k_{\text{д}}^{\text{н}}) + (k_{\text{пк}} \times k_{\text{к}}^{\text{пк}}) + (k_{\text{ск}} \times k_{\text{кв}}), \quad (17)$$

за умови однакової комплектації іншим обладнанням пасажирських купе, службових приміщень і вагонів у цілому.

Результати

За запропонованими виразами (1–17) розраховані коефіцієнти комфортабельності пасажирських купейних спальних вагонів трьох класів:

– вагонів 1 та 2-го класів моделей 61–779А і 61–779 вмістимістю 20 і 40 пас., розміщених відповідно у дво- та чотиримісних пасажирських купе виробництва ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» [3];

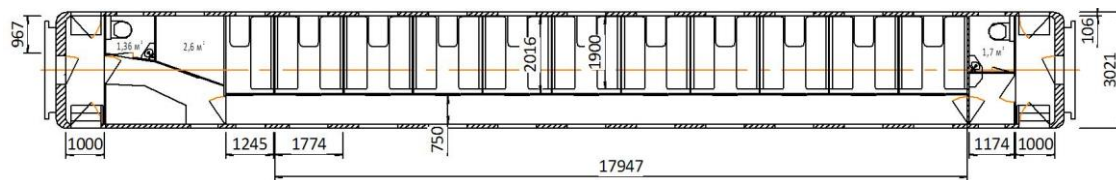
– перспективного конкурентоспроможного купейного спального вагона проєкту vS–01 (рис. 1), розробленого на базі вагона 1-го класу моделі 61–779А, вмістимістю 20 чол., розміщених в аналогічних за шириною двомісних купе, який відрізняється від базового збільшеною шириною кузова, збільшеною шириною службових приміщень і пасажирських купе, компонуванням і додатковою комплектацією пасажирських купе тощо.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Розмірні та інші параметри наявних вагонів 1 та 2-го класів моделей 61-779 і 61-779А виробництва ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» та пропонованого вагона 1-го класу

підвищеної комфортабельності проекту sV-01 і результати розрахунків показників їх комфортабельності наведені в табл. 3.

a – a



б – б

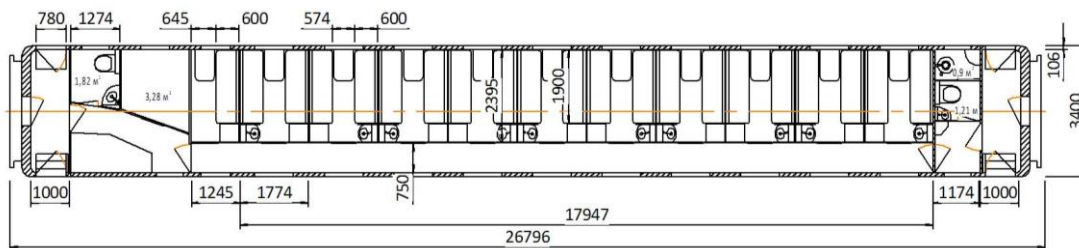


Рис. 1. Розрахункові схеми купейних спальних вагонів:
а – моделей 61-779 і 61-779А; б – моделі sV-01 (проект)

Fig. 1. Calculation schemes of compartment sleeping cars:
a – models 61-779 and 61-779A; b – models sV-01 (project)

Наукова новизна та практична значимість

У роботі вперше запропонована методика об'єктивної оцінки комфортабельності пасажирських купейних спальних вагонів та зручності користування ними пасажирами на основі групи показників, пов'язаних із вмістимістю вагонів і пасажирських купе, із розмірними параметрами й комплектацією вагонів та їх пасажирських і службових приміщень, запропоновані формули для їх обчислення. Уперше запропоновано також узагальнений показник комфортабельності пасажирських купейних спальних вагонів і вираз для його розрахунку.

Практична значимість роботи полягає у використанні запропонованих показників оцінки комфортабельності пасажирських купейних спальних вагонів і формул для їх обчислення на етапах розроблення й вибору ескізних пропозицій або ескізних проектів нових перспективних конкурентоспроможних купейних спальних вагонів задля забезпечення їх максимальної зручності та комфортабельності перевезень пасажирів на магістральних регіональних маршрутах.

Описану методику можна використовувати також і для проведення об'єктивної оцінки тендерних пропозицій на закупівлю купейних спальних вагонів із позицій їх технічного рівня, зручності та комфортабельності.

Таблиця 3

Оцінка комфортабельності пасажирських купейних спальних вагонів

Table 3

Comfort assessment of passenger compartment sleeping cars

Найменування параметра	Регламентовані величини	Модель вагону		
		61–779 А	61–779	sV–01
Клас вагона		1–CB	2	1–CB*
Параметри вагонів: – довжина/ ширина, м		26,696/ 3,021		26,696/ 3,4
– довжина/ ширина пасажирського приміщення, м		17,947		
– площа пасажирського приміщення, м ²		50,41		57,21
– ширина проходу по вагону, м	[0,75]	0,75		
– ширина дверей проходу по вагону, м	[0,7]	0,7		
– довжина/ ширина тамбурів, м	[2,7/ 1,0]	2,597/ 1,0		3,188/ 1,0
– ширина вхідних дверей тамбурів, м	[0,78]	0,78		
Коефіцієнт комфортабельності вагонів, k_g		0,6		0,81
Параметри пасажирських купе: – довжина/ ширина, м		2,016/ 1,774		2,395/ 1,774
– вмістимість, чол.		2	4	2
– довжина/ ширина дивана, м	[1,9/ 0,6]	1,9/ 0,6		
– довжина/ ширина спальної полиці, м	[1,83/ 0,6]	1,9/ 0,6	1,83/ 0,6	1,9/ 0,6
– відстань між диванами, м	[0,6]	0,574		
– ширина дверей, м	[0,56]	0,56		
Коефіцієнт комфортабельності купе, $k_{пк}$		1,71	0,86	2,03
Параметри службового купе: – площа, м ²	[2,6]	2,6		3,28
– ширина дверей, м	[0,43]	0,43		
Коефіцієнт зручності службового купе, $k_{ск}$		1,0		1,26
Параметри купе відпочинку, м: – довжина	[1,675]	2,016		2,395
– довжина/ ширина спального місця	[1,665/ 0,58]	1,9/ 0,6		
– відстань між спальним місцем і перегородкою	–	0,645		
– ширина дверей	[0,43]	0,43		
Коефіцієнт зручності купе відпочинку, $k_{кв}$		0,92		1,09

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Продовження табл. 3
Continuation of Table 3

Найменування параметра	Регламентовані величини	Модель вагону		
		61–779 А	61–779	sV–01
Параметри загальних туалетів: – площа, м ²	[1,2]	1,36/ 1,37		1,82/ 1,21
– ширина, м	[0,9]	0,967/ 1,274		1,274/ 1,031
– ширина дверей, м	[0,49]	0,5		
Коефіцієнт зручності туалетів, $k_{\text{тп}}$		1,44		1,65
Кількість туалетів загального користування, од.	[2]	2		
Коефіцієнт туалетів на одну особу, $k_{\text{тп}}^{\text{n}}$		0,09	0,05	0,09
Кількість душових кабін загального користування, од.		–		1
Коефіцієнт душових кабін на одну особу, $k_{\text{д}}^{\text{n}}$		–	–	0,05
Комплектація пасажирського купе, од. – кількість диванів		2	2	2
– кількість спальних полиць		–	2	–
– кількість окремих сидінь		–	–	–
– наявність шафи для верхнього одягу		–	–	1
– наявність умивальника / ящика для сміття в купе або в індивідуальному санвузлі		–	–	1/1
– наявність унітаза в індивідуальному санвузлі		–	–	–
– наявність індивідуального душового стояка / душової кабіни в індивідуальному санвузлі		–	–	0/ 1
Коефіцієнт комфортабельності пасажирського купе, $k_{\text{к}}^{\text{пк}}$		1,0	0,75	1,75
Узагальнений коефіцієнт комфортабельності пасажир- ських купейних спальних вагонів, $k_{\text{ком}}$		3,63	2,67	5,08

Висновки

Запропонована методика на основі різних критеріїв оцінки зручності користування та комфортабельності купейних спальних вагонів забезпечує:

– об’єктивність аналізу й оцінки зручності користування та рівня комфортабельності наявних пасажирських купейних спальних вагонів

різних моделей європейських та інших виробників;

– обґрунтований вибір розмірних параметрів вагонів, пасажирських і службових купе та інших службових приміщень на стадіях розроблення ескізних пропозицій та / або ескізних проєктів нових перспективних конкурентоспроможних купейних спальних вагонів;

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

– обґрунтованість та об'єктивність вибору моделей вагонів для придбання Укрзалізницею під час проведення тендерів на їх закупівлю й оцінки тендерних пропозицій різних учасників.

Деякі формули для визначення коефіцієнтів комфортабельності чи зручності користування вагонами або їх пасажирськими чи службовими приміщеннями можна застосовувати і для оцінки рівня комфортабельності інших спальних вагонів та вагонів із місцями для сидіння.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ГОСТ 33885-2016. Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Методы испытаний по санитарно-гигиеническим и экологическим показателям. [Чинний від 2017-09-01]. Москва : Стандартинформ, 2017. 45 с.
2. Донченко А. В., Троцкий М. В., Крупа А. Г., Рейдемейстер Г. В. Типаж перспективных пассажирских вагонов локомотивной тяги для магистральных железных дорог Украины. *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. 2007. № 14. С. 132–135.
3. ДСТУ 4049-2001. Вагоны пассажирські магістральні локомотивної тяги. Вимоги безпеки. [Чинний від 2002-03-01]. Київ : Держстандарт України, 2001. 24 с.
4. ДСТУ Б В.2.3-29:2011. Габарити наближення будівель і рухомого складу залізниць колії 1520 (1524) мм (ГОСТ 9238-83, MOD). [Чинний від 2012-12-01]. Київ : Мінрегіон України, 2012. 50 с.
5. О+Р 562. Санитарно-технические требования к конструкции пассажирского вагона. I издание. [Чинний від 2008-05-01]. Тегеран : Комитет ОСЖД, 2007. 22 с.
6. ПАТ «Крюковский вагоностроительный завод». Пассажирское вагоностроение. Каталог. URL: <http://www.kvsz.com/images/catalogs/tsn.pdf> (дата звернення: 21.12.2019).
7. СП 2.5.1198-03. Санитарные правила по организации пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте. [Чинний від 2003-06-03]. Москва : МПС РФ, 1998. 46 с.
8. «Укрзалізниця» на межі розвалу : 92 % пасажирських вагонів скоро підуть на звалище. URL: <https://znaj.ua/society/218197-ukrzhaliznitsya-na-mezhi-rozvalu-92-pasazhirskih-vagoniv-skoro-pidut-na-zvalishche> (дата звернення: 23.12.2019).
9. Федюшин Ю. М., Лобойко Д. М., Донченко А. В., Пшінько О. М., Приходько В. І., Шкабров О. А. Аналіз світових тенденцій і перспектив розвитку пасажирського вагонобудування. *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. 2005. № 7. С. 25–32.
10. Eboli L., Mazzulla G. A methodology for evaluating transit service quality based on subjective and objective measures from the passenger's point of view. *Transport Policy*. 2011. Vol. 18. Iss. 1. P. 172–181. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2010.07.007>
11. Huang W., Shuai B. A methodology for calculating the passenger comfort benefits of railway travel. *Journal of Modern Transportation*. 2018. Vol. 26. Iss. 2. P. 107–118. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-018-0157-y>
12. Jiang Y., Chen B. K., Thompson C. A comparison study of ride comfort indices between Sperling's method and EN 12299. *International Journal of Rail Transportation*. 2019. № Vol. 7. Iss. 4. P. 279–296. DOI: <https://doi.org/10.1080/23248378.2019.1616329>
13. Moon J. H., Lee J. W., Jeon, C. H., Lee S. H. Thermal comfort analysis in a passenger compartment considering the solar radiation effect. *International Journal of Thermal Sciences*. 2016. Vol. 107. P. 77–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.03.013>
14. Leksin A. G., Mineeva N. I., Morgunov A. V., Timoshenkova E. V., Gribov A. V., Demin V. N., Vaskina M. Y. Forecasting the heat comfort of passengers in the electric train shops. theory and practice. *Hygiene and Sanitation*. 2019. Vol. 98. № 5. P. 489–493. DOI: <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-5-489-493>
15. Lupták V., Drozdziel P., Stopka O., Stopková M., Rybicka I. Approach Methodology for Comprehensive-Assessing the Public Passenger Transport Timetable Performances at a Regional Scale. *Sustainability*. 2019. № 11. P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11133532>
16. Park B., Jeon J.-Y., Choi S., Park J. Short-term noise annoyance assessment in passenger compartments of high-speed trains under sudden variation. *Applied Acoustics*. 2015. Vol. 97. P. 46–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.04.007>
17. Shen W., Xiao W., Wang X. Passenger satisfaction evaluation model for Urban rail transit : A structural equation modeling based on partial least squares. *Transport Policy*. 2016. Vol. 46. P. 20–31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2015.10.006>

С. В. ВОЙТКИВ

ООО «Научно-технический центр «Автополипром»», ул. Зубривская, 32/24, Львов, Украина, 79066,
тел. +38 (067) 447 04 90, эл. почта voytkivsv@ukr.net, ORCID 0000-0002-7789-2081

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УРОВНЯ КОМФОРТАбельНОСТИ ПАССАЖИРСКИХ КУПЕЙНЫХ СПАЛЬНЫХ ВАГОНОВ

Цель. В работе предусмотрена разработка методики для проведения объективной оценки комфортабельности перевозок пассажиров и удобства пользования пассажирскими купейными спальными вагонами локомотивной тяги или поездов постоянного формирования. Современные купейные спальные вагоны различных моделей европейских и других производителей отличаются многими размерными параметрами, вместимостью и комплектацией пассажирских купе и служебных помещений, наличием душевых стоек в туалетных помещениях или душевых кабин общего или индивидуального пользования и т. д. и обеспечивают пассажирам соответствующий уровень удобства пользования ими и разный уровень комфортабельности перевозок. При проектировании новых перспективных и конкурентоспособных купейных спальных вагонов также целесообразно иметь такую методику для разработки их компоновочных схем и планировок и для оптимального выбора тех или иных размерных параметров вагонов и особенно пассажирских купе. **Методика.** На основе анализа компоновочных схем и планировок существующих купейных спальных вагонов различных европейских производителей, их размерных параметров и комплектации, размерных параметров и комплектации пассажирских купе определены критерии оценки комфортабельности купейных спальных вагонов трех групп – размерных параметров, вместимости и комплектации. **Результаты.** Предложено несколько показателей удобства и комфортабельности пассажирских и служебных помещений купейных спальных вагонов и формулы для их вычисления. Также предложено выражение для определения обобщенного показателя комфортабельности купейных спальных вагонов и удобства пользования ими. **Научная новизна.** Впервые разработана методика объективной оценки комфортабельности пассажирских купейных спальных вагонов и удобства пользования ими пассажиров. **Практическая значимость.** Предлагаемые показатели оценки комфортабельности пассажирских купейных спальных вагонов и формул для их вычисления можно использовать на этапах разработки и выбора эскизных предложений или эскизных проектов новых перспективных конкурентоспособных вагонов с целью обеспечения их максимального удобства и комфортабельности. Методика может быть полезна также и для оценки тендерных предложений на закупку купейных спальных вагонов.

Ключевые слова: спальный вагон; пассажирское купе; комфортабельность спального вагона; показатель комфортабельности спального вагона

S. V. VOYTKIV

Scientific and Technical Center Autopoliprom Ltd., Zubrivska St., 32/24, Lviv, Ukraine, 79066, tel. +38 (067) 447 04 90,
e-mail voytkivsv@ukr.net, ORCID 0000-0002-7789-2081.

ASSESSMENT METHODOLOGY OF COMFORT LEVEL OF PASSENGER COMPARTMENT SLEEPING CARS

Purpose. The work is aimed to develop the method of objective assessment of passenger transportation comfort and use convenience of passenger sleeping car of locomotive traction or train sets. Indeed, modern compartment sleeping cars of various models of European and other manufacturers are distinguished by many dimensional parameters, the capacity and equipment of passenger compartments and service accommodations, the presence of shower in the restrooms, etc. They provide passengers with proper level of use convenience and a different level of transportation comfort. When designing new perspective and competitive sleeping cars it is also expedient to have such a methodology for the development of their layout diagrams and designing and for the optimum choice of one or another size parameters of cars and, in particular case, passenger compartments. **Methodology.** Based on the analysis of the layout diagrams and designing of existing compartment sleeping cars of various European manufacturers, their dimensional parameters and equipment, dimensions and equipment of passenger compartments, criteria

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

for comfort evaluating of compartment sleeping cars of three groups – dimensional parameters, capacity and equipment are determined. **Findings.** Several indicators of the convenience and comfort of passenger and service rooms of compartment sleeping cars and formulas for their calculation are proposed. An expression for determining a generalized indicator of the comfort of compartment sleeping cars and the convenience of using them is also proposed. **Originality.** For the first time a method of objective assessment of the comfort of passenger compartment sleeping cars and the convenience of using them by passengers is proposed. **Practical value.** The proposed indicators for evaluating the comfort of passenger compartment sleeping cars and formulas for their calculation can be used at the stages of development and selection of draft offers or outline designs of new promising competitive cars in order to ensure their maximum convenience and comfort. The methodology may also be useful for evaluating tenders for the purchase of compartment sleeping cars.

Keywords: sleeping car; passenger compartment; sleeping car comfort; comfort index of sleeping car

REFERENCES

1. *Vagony passazhirskie lokomotivnoj tyagi. Metody ispytaniy po sanitarno-gigienicheskim i ekologicheskim pokazatelyam, 45 GOST 33885-2016* (2017). (in Russian)
2. Donchenko, A. V., Trotskiy, M. V., Krupa, A. G., & Reydemeyster, G. V. (2007). Tipazh perspektivnykh passazhirskikh vagonov lokomotivnoj tyagi dlya magistralnykh zheleznykh dorog Ukrainy *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 14, 132-135. (in Russian)
3. *Vahony pasazhyrski mahistralni lokomotyvnoi tiahly. Vymohy bezpeky, 24 DSTU 4049-2001* (2001). (in Ukrainian)
4. *Habaryty nablyzhenia budivel i rukhomoho skladu zaliznyts kolii 1520 (1524) mm (HOST 9238-83, MOD), 50 DSTU B B.2.3-29:2011* (2012). (in Ukrainian)
5. *Sanitarno-tehnicheskie trebovaniya k konstrukcii passazhirskogo vagona. I izdanie, 22 O+R 562* (2007). (in Russian)
6. *PAT «Kryukovskiy vagonostroitelnyy zavod». Passazhirskoe vagonostroenie*. Katalog. Retrieved from <http://www.kvsz.com/images/catalogs/tsn.pdf> (in Russian)
7. *Sanitarnye pravila po organizacii passazhirskih perevozok na zheleznodorozhnom transporte, 46 SP 2.5.1198-03* (1998). (in Russian)
8. «Ukrzaliznytsia» na mezhi rozvalu: 92 % pasazhyrskykh vahoniv skoro pidut na zvalyshche. Retrieved from <https://znaj.ua/society/218197-ukrzaliznytsia-na-mezhi-rozvalu-92-pasazhirskikh-vagoniv-skoropidut-na-zvalyshche> (in Ukrainian)
9. Fediushyn, Yu. M., Loboiko, D. M., Donchenko, A. V., Pshinko, O. M., Prykhodko, V. I., & Shkabrov, O. A. (2005). Analiz svitovykh tendentsii i perspektyv rozvytku pasazhyrskoho vahonobuduvannya. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 7, 25-32. (in Ukrainian)
10. Eboli, L., & Mazzulla, G. (2011). A methodology for evaluating transit service quality based on subjective and objective measures from the passenger's point of view. *Transport Policy*, 18(1), 172-181. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2010.07.007> (in English)
11. Huang, W., & Shuai, B. (2018). A methodology for calculating the passenger comfort benefits of railway travel. *Journal of Modern Transportation*, 26(2), 107-118. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-018-0157-y> (in English)
12. Jiang, Y., Chen, B. K., & Thompson, C. (2019). A comparison study of ride comfort indices between Sperling's method and EN 12299. *International Journal of Rail Transportation*, 7(4), 279-296. DOI: <https://doi.org/10.1080/23248378.2019.1616329> (in English)
13. Moon, J. H., Lee, J. W., Jeong, C. H., & Lee, S. H. (2016). Thermal comfort analysis in a passenger compartment considering the solar radiation effect. *International Journal of Thermal Sciences*, 107, 77-88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.03.013> (in English)
14. Leksin, A. G., Mineeva, N. I., Morgunov, A. V., Timoshenkova, E. V., Gribov, A. V., Demin, V. N., & Vaskina, M. Y. (2019). Forecasting the heat comfort of passengers in the electric train shops. theory and practice. *Hygiene and Sanitation*, 98(5), 489-493. DOI: <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-5-489-493> (in English)

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

15. Lupták, V., Drożdziel, P., Stopka, O., Stopková, M., & Rybicka, I. (2019). Approach Methodology for Comprehensive Assessing the Public Passenger Transport Timetable Performances at a Regional Scale. *Sustainability*, 11(13), 1-18. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11133532> (in English)
16. Park, B., Jeon, J.-Y., Choi, S., & Park, J. (2015). Short-term noise annoyance assessment in passenger compartments of high-speed trains under sudden variation. *Applied Acoustics*, 97, 46-53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.04.007> (in English)
17. Shen, W., Xiao, W., & Wang, X. (2016). Passenger satisfaction evaluation model for Urban rail transit: A structural equation modeling based on partial least squares. *Transport Policy*, 46, 20-31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2015.10.006> (in English)

Надійшла до редколегії: 27.09.2019

Прийнята до друку: 27.01.2020

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 004.738

В. В. СКАЛОЗУБ^{1*}, Л. О. ПАНІК^{2*}, О. Д. ПАНАРІН^{3*}

^{1*}Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта skalozhubtk@gmail.com, ORCID 0000-0002-1941-4751

^{2*}Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта leon140377@gmail.com, ORCID 0000-0003-1343-3000

^{3*}Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта sashapanarin@mail.ru, ORCID 0000-0001-9050-463X

УНІФІКОВАНИЙ ПАРАЛЕЛЬНИЙ АЛГОРИТМ ТА ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНУВАННЯ НЕОДНОРІДНИХ ПОТОКІВ У МЕРЕЖАХ

Мета. У статті передбачено розробити універсальний уніфікований паралельний синхронний алгоритм (УПСА), призначений для реалізації завдань із розрахунку максимальних однопродуктових і багатодуктових потоків, а також створити програмний комплекс, який забезпечує формування площинних графових моделей потоків та виконує оптимальне планування неоднорідних потоків у транспортних та інших мережах. **Методика.** У роботі досліджено можливості раніше створеного та всебічно перевіреного евристичного паралельного синхронного алгоритму розрахунку максимальних однопродуктових і багатодуктових потоків у мережах, встановлено його потенційні обмеження й визначено додаткові вдосконалені процедури, які перетворюють евристичний алгоритм в універсальний паралельний. Запропонований паралельний синхронний алгоритм використовує стратегію пошуку в ширину за одночасного визначення можливих шляхів потоків через мережу з оцінкою їх пропускних здатностей. При цьому досліджено можливість на одній ітерації виконувати паралельно аналіз декількох збільшувальних потоків через мережу. **Результати.** Запропоновано універсальний уніфікований паралельний синхронний алгоритм розрахунку максимальних потоків у мережах, розроблено уніфіковану процедуру та програмний комплекс для планування неоднорідних, а також конкурувальних потоків у транспортних та інших мережах. Розроблений програмний комплекс реалізує завдання щодо формування площинних графових моделей мереж, для яких вирішується завдання оптимального планування неоднорідних та конкурувальних багатокритеріальних потоків у транспортних мережах. **Наукова новизна.** Розроблено новий універсальний уніфікований паралельний синхронний алгоритм та процедуру розрахунку оптимальних однорідних, багатодуктових та конкурувальних потоків у транспортних мережах. **Практична значимість.** Цінність отриманих результатів визначається універсальними можливостями та ефективністю процедури планування неоднорідних потоків у мережах на основі застосування нового паралельного синхронного алгоритму, а також розробленим програмним комплексом, який забезпечує можливість вирішення завдань аналізу і планування однорідних та багатодуктових потоків у транспортних мережах, реалізації завдань розрахунку конкурентних моделей формування транспортних та інформаційних потоків. Програмний комплекс має вбудований редактор інтерактивного моделювання мереж та панель інструментів, що забезпечує як створення нових, так і завантаження наявних графів

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

мереж із бібліотек моделювання, збереження оптимальних потоків у мережі у вигляді зображення та у вигляді текстового файлу, виведення помилок під час роботи з програмою.

Ключові слова: транспортні мережі; максимальні потоки; паралельні алгоритми; неоднорідні та конкурвальні потоки; програмне забезпечення

Вступ

У багатьох сучасних сферах діяльності завдання з аналізу, планування та керування потоками в мережах є надзвичайно поширеними. Розвиток сучасних мережевих технологій потребує вдосконалення методів управління потоками. Виходячи з потреб і вимог до головних характеристик досліджуваних процесів, представлених моделями мереж, а також під час планування та раціональної організації транспортних потоків, формують однорідні або багатопродуктові моделі таких процесів [1–3, 7]. Розроблено різноманітні математичні моделі транспортних, інформаційних, фінансових та інших потоків у мережах, у тому числі як відображень задач оптимального або раціонального планування [1, 3, 7]. Одним із головних завдань під час формування та аналізу транспортних та інших мереж є визначення максимальних потоків. Його результати широко застосовують для вирішення багатьох практичних завдань планування, моделювання тощо [4, 7, 11–14]. При цьому таких використовують різноманітні кількісні та якісні властивості мереж. Розрахунки максимальних потоків також застосовують для реалізації завдань планування багатопродуктових і багатокритеріальних потоків, завдань пошуку розподільних множин ребер графових моделей транспортних та багатьох інших мереж [2, 7, 10, 16].

Для розрахунків максимальних однопродуктових цілочисельних потоків у мережних моделях базовим є метод Форда–Фалкерсона [2, 7, 9, 15]. Загалом існує понад двадцять інших алгоритмів для розрахунку максимальних потоків у мережах. Серед них одними з перших і найбільш поширених є алгоритми Форда–Фалкерсона, Едмондса–Карпа [3], Дініца [4]. На сьогодні проведено аналіз особливостей, переваг і недоліків алгоритмів, також визначено оцінки складності таких алгоритмів, що наведені в дослідженнях [2–4] та ін. Завдання розрахунку максимального потоку потребує досить значних обчислювальних ресурсів. Разом

із цим можливі певні структури моделей мереж, для яких ці алгоритми мають слабку збіжність [1, 2]. Зараз відомо багато програмних засобів реалізації зазначених алгоритмів, при цьому реалізовано послідовні та паралельні версії алгоритмів [5, 6]. Відзначається суттєве зростання складності завдань із програмної реалізації алгоритмів аналізу неоднорідних і компромісних потоків у мережах [2, 5, 7].

Необхідно зазначити, що питання формування паралельних алгоритмів, призначених для розрахунків максимальних потоків (МП) у мережах, потребує подальшого дослідження. У статті [6] розроблено та досліджено можливість паралельного синхронного алгоритму (ПСА) розрахунку максимальних неоднорідних потоків у транспортних мережах, який придатний для розрахунку однопродуктових, багатопродуктових та формування компромісних потоків за рахунок застосування моделей раціонального вибору. Також наведено приклади, що демонструють придатність, ефективність і широкі можливості застосування ПСА для вирішення завдань аналізу та оптимального планування неоднорідних потоків у транспортних мережах.

Моделі та завдання аналізу великої кількості різноманітних процесів можуть бути представлені у формі графів. Це призводить до поширення саме завдань із аналізу, оптимального планування й управління потоками в мережах [3]. На практиці часто потоки в транспортних та інших мережах є неоднорідними, зокрема багатопродуктовими, а також динамічними (урахування терміну передачі, зміна параметрів у часі та ін. [4]), об'єкти потоків у мережах можуть мати різні властивості за функціональним призначенням, вимогами до сервісів тощо [3]. Зростання потреб щодо передачі та обробки інформації, яка надходить мережами, призводить до завдань організації та оптимізації функціонування мережевих інформаційних систем (МІС). При цьому важливу роль відіграють завдання розподілу конкуруювальних потоків. Такі завдання, як правило, потребують окремих мо-

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

делей та методів реалізації. Застосування до них паралельних алгоритмів типу ПСА також представлено в зазначеній роботі.

Мета

У попередніх дослідженнях авторів було зроблено нову уніфіковану процедуру планування однорідних, нечітких багатопродуктових і динамічних, а також конкуруючих потоків у транспортних мережах і мережевих інформаційних системах із використанням можливості ПСА, що базується на евристичному базисі. Разом із високою універсальністю та ефективністю алгоритми на основі ПСА мають певну обмеженість застосування, яка визначається їх евристичною сутністю. Через ці обставини потенційно можливі структури мереж не можуть бути ефективно досліджені на основі ПСА. Вирішенню питань забезпечення універсальності паралельного алгоритму розрахунку МП, достовірності результатів аналізу, а також уніфікації форми ПСА та можливості його розширення і присвячена представлена стаття.

Метою статті є розробка уніфікованого паралельного синхронного алгоритму розрахунку максимальних потоків та створення програмного забезпечення, призначеного для оптимального планування неоднорідних потоків у транспортних та інших мережах.

Методика

Розглянемо базові засади ПСА, а також можливості застосування евристичного паралельного синхронного алгоритму розрахунку МП у мережах із метою встановлення його можливих обмежень і визначення шляхів удосконалення процедур, які забезпечують перетворення цього алгоритму до універсального (УПСА). На основі УПСА розроблено програмний комплекс, який достовірно та ефективно реалізує завдання з оптимального планування неоднорідних потоків у транспортних мережах.

Формально транспортна мережа – це орієнтований граф $G = (V, E)$, у якому кожне ребро (u, v) має позитивну пропускну здатність $c(u, v) > 0$ і потік $f(u, v)$ [2]. Виділяють дві вершини: витік s та стік t , причому будь-яка інша вершина мережі лежить на шляху з вершини s до вершини t . Позначимо через

$$G = \{(V, E), c, s, t\} \quad (1)$$

транспортну мережу (далі також мережу), у якій $c(u, v)$ – пропускна здатність; $f(u, v)$ – потік через ребро (u, v) ; V – множина вузлів; E – множина ребер.

Для пояснення сутності ПСА та його специфіки щодо визначення МП наведемо схему алгоритму Едмондса–Карпа (А–ЕК) [2]. Для цього пояснимо поняття залишкової мережі (ЗМ), що формується за ітераціями, як мережі, пропускні здатності ребер якої модифікуються на основі величин визначених та збільшувальних потоків. А–ЕК визначають такі етапи. Спочатку беруть, що всі потоки мережі дорівнюють нулю, а ЗМ збігається із заданою транспортною мережею. У ЗМ на підставі дерева маршрутів знаходять найкоротший шлях (НКШ) із витoku до стоку. Якщо такого шляху не існує – МП знайдено, зупинитися. Через НКШ (збільшувальний шлях) пускають максимально можливий потік таким чином: на НКШ у ЗМ знаходять ребро з мінімальною пропускну здатністю C_{\min} , для кожного ребра на НКШ збільшують потік на C_{\min} , а на протилежному йому ребрі зменшують на C_{\min} . Модифікують ЗМ для всіх ребер НКШ, а також для протилежних, розраховують нову пропускну здатність, змінюючи на C_{\min} . Якщо така пропускна здатність дорівнює нулю, ребро вилучають з графа мережі, якщо ж здатність стала позитивною – додають ребро до ЗМ. Виконують перехід до пошуку НКШ з витoku до стоку. Складність алгоритму Едмондса–Карпа дорівнює $O(VE^2)$ [2, 4].

Під час формування математичних моделей із розрахунку МП розмірності відповідних оптимізаційних задач, як правило, дорівнюють числу ребер у мережах (1). Умови неперервності потоків досягаються за допомогою застосування спеціальних методів представлення та забезпечення відповідних рівнянь [2, 3, 7]. В алгоритмах розрахунку максимального багатопродуктового потоку (МБП) припускається можливість існування кількох неоднакових витоків і стоків, окремих для потоків різних продуктів [7]. У моделях МБП також додатково враховуються обмеження на одночасні загальні оцінки величин потоків усіх продуктів відпові-

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

дними ребрами мереж. У рішеннях завдань МБП структури оптимальних потоків окремих продуктів також можуть залежати від уведеної нумерації потоків продуктів та послідовності їх урахування під час розрахунків. При цьому значення загального потоку залишаються постійними. За умов конкуренції окремих потоків продуктів такі рішення щодо МБП не можуть бути застосовані на практиці [3, 5].

Розроблений і представлений у статтях [5, 6] ПСА максимальних потоків у мережах використовує стратегію пошуку в ширину та одночасного визначення можливих шляхів потоків через мережу з відомими на певному кроці ЗМ пропускними здатностями дуг (ребер). У розробленому в [5, 6] ПСА розпаралелювання виконується за рахунок синхронізації процесів формування вузлів дерева вузловими процедурами, у яких одночасно виконується аналіз можливих значень додаткових, збільшувальних, потоків, що можуть розповсюджуватися по наступних визначених ребрах ЗМ (за рахунок паралельного виклику відповідних вузлових процедур). Тут виникає можливість на одній ітерації виконувати паралельно аналіз декількох збільшувальних потоків через ЗМ.

У ПСА вузлові процедури можуть виконуватися, якщо до них за схемою мережі (1) надійшли всі вхідні потоки. Для контролю синхронізації вузлових процедур вводять кроковий параметр послідовності виконання процедур і надходження потоків (t). Значення параметра вказує «довжину» шляху від витоку до відповідного вузла в ЗМ. Якщо на кроці (t) до вузла-процедури надійшов вхідний потік, процедура переходить у стан активності, а в разі надходження всіх вхідних параметрів – стає готовою і паралельно виконує виклик усіх вихідних вузлів-процедур, передаючи їм розраховані нею параметри можливих потоків за цими шляхами. При цьому сама переходить до стану «виконано», а число активних вузлів $N_a(t)$ зменшується на одиницю. Система синхронізації контро-

лює число активних процедур на кроках (t). За параметром $N_a(t) > 0$ також виконують контроль можливого блокування процесів формування маршрутів через ЗМ, зокрема – коли немає жодного вузла, до якого на кроках (t) надійшли всі вхідні потоки. У такому випадку передбачено передачу синхронізувального «нульового» потоку. Вибір вузла-процедури для розблокування обирають за такими ознаками: мінімальна кількість відсутніх вхідних потоків, зп рівності – мінімальність номера кроку активізації процедури (t), за рівності цих параметрів – менша кількість вихідних вузлів. Виникнення відзначених процесів блокування може бути можливе під час аналізу багатопродуктових потоків. У подальших процедурах синхронізувальний потік ураховують в алгоритмі, як і всі інші.

Детальне описання структури базового паралельного синхронного алгоритму (БПСА) розрахунку максимального потоку в мережі (1) наведено у [6]. На його основі можна побудувати алгоритми аналізу інших категорій потоків (багатопродуктових, нечітких, динамічних та ін.) [5, 6]. Загальна схема БПСА пошуку максимального потоку, запропонованого в [5, 6], наведена в табл. 1. На відміну від традиційних методів розрахунків максимальних потоків у мережах, БПСА на прямому ходу об'єднує всі три основних етапи класичних алгоритмів МП: 1) розрахунок усіх можливих шляхів через мережу; 2) вибір одного шляху з мінімальним значенням довжини; 3) пропуск цим шляхом максимального доповнювального потоку. При цьому також виконують коригування пропускних здатностей дуг мережі. Сутність ефективності БПСА полягає в тому, що за рахунок спеціальної процедури синхронізації створюється можливість обробки декількох зворотних потоків одночасно, тобто на одному етапі аналізу мережі.

Таблиця 1

Схема базового синхронного паралельного алгоритму пошуку максимального потоку

Table 1

Scheme of the basic synchronous parallel algorithm for finding the maximum flow

Встановити значення $V_{\max} = 0$, пропускні здатності всіх дуг модифікованої мережі $G'(N, A)$ дорівнюють вихідній $G(N, A)$ (прямий хід $U_p = 0$).
До тих пір, поки не досягнутий стік t : Синхронно виконувати передачу потоку по мережі відповідно до номерів вузлів $\{N_i\}$, контролюючи їх активність і готовність. Для готових вузлів виконувати передачу максимального вхідного потоку у вузли, які виходять. Сформувати всі варіанти шляхів через мережу. Знайти величини потоків за кожним із можливих шляхів.
Змінити напрямок потоку на протилежний (зворотний хід $U_p = 1$).
Поки не досягнутий вузол (джерело) s , виконувати: Аналіз зворотних додаткових неперервних потоків. Процедуре оцінки умов розпаралелювання потоків у мережі на основі аналізу умов із визначення раціональних зворотних потоків. Фіксація вузлів зворотних маршрутів.
Перерахунок розміру додаткового потоку $V^*(U_p = 1)$, якщо $V^*(U_p = 1) = 0$ – кінець алгоритму.
Коригування V_{\max} відповідно до $V^*(U_p = 1)$. Модифікація мережі $G'(N, A)$. Перейти на крок 2.

Відповідно до наведеної у табл. 1 схеми паралельного алгоритму планування МП на прямому ході БПСА будують усі можливі шляхи через мережу. Разом із цим одночасно оцінюють максимальну пропускну здатність кожного можливих шляхів. На наступному етапі, у разі зворотного ходу алгоритму через мережу, формують справжні величини потоків, а також перевіряють можливість їх незалежного додаткового обліку. Узятая така схема обробки потоків у вузлах мережі:

$$V_{i_k j} = \min \{d_{i_k j}, V'_{i_k j}\};$$

$$V_{j r_q} = \max \{V_{i_k j}\}.$$

Додатковий потік: $V''_{i_k j} = \max(\min) \{V_{j r_q}\},$

i_k – максимальний вхідний потік $V_{i_k j}$.

Стани вузлів моделі мережі: ЧЕКАЄ, АКТИВНИЙ, ГОТОВИЙ, ПЕРЕДАНО.

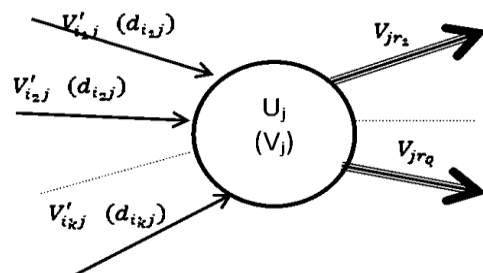


Рис. 1. Схема паралельних потоків у вузлах моделі мережі

Fig. 1. Scheme of parallel flows in the nodes of the network model

Особливість БПСА полягає в тому, що для забезпечення можливості паралельної (на одному етапі аналізу) обробки декількох потоків застосовано процедури синхронізації зворотних потоків. Процедура синхронізації враховує виявлені під час дослідження властивості синхронізованих потоків у мережах. Призначення

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

процедури синхронізації – вибір вузла мережі для передачі умовного потоку синхронізації (розблокування алгоритму БПСА за однакових властивостей вузлів). Ураховують таку послідовність вимог щодо параметрів вузла: входження до множини активних вузлів мережі; мінімальна кількість неактивізованих вхідних потоків; мінімальна відстань від витоку мережі до вузла; максимальне число вхідних потоків до вузла; мінімальний номер вузла в мережі. На

основі проведення «процедури розблокування» обирають один вузол мережі, якому передають потік синхронізації, що забезпечує реалізацію БПСА.

У роботах [5–7] розроблено паралельні алгоритми для неоднорідних потоків БПСА, що мають таке уточнене представлення (табл. 2):

$$s = \{(s_k, t_k)\}, \quad G_k(N_k, A_k) \quad \text{– підмережа } k\text{-ого продукту.}$$

Таблиця 2

Схема паралельного алгоритму пошуку максимального потоку для неоднорідних потоків

Table 2

Scheme of the parallel algorithm for finding the maximum flow for inhomogeneous flows

Для кожного продукту встановити початкові значення $V_k^* = 0; G_k(N_k, A_k)$.
Незалежно виконати паралельний аналіз усіх продуктів, використовуючи БПСА (без обмежень на загальну пропускну здатність).
Виділити роздільну множину, визначити потоки продуктів за дугами цієї множини.
Вирішити конфлікт продуктів на кожній із дуг роздільної множини (з урахуванням загального обмеження на пропускну здатність), модель (2).
Розрахувати оцінки потоків продуктів за всіма дугами роздільної множини.
Розрахувати потоки продуктів по мережі.
Контроль умов закінчення або ж коригування мереж $G_k(N_k, A_k)$.

Наведемо окремі функції вузлових процедур ПСА $P_r(t)$ детальніше, ураховуючи можливість неоднозначності цих розрахунків, а саме умови щодо рівності величин декількох максимальних вхідних або мінімальних збільшувальних потоків за маршрутами. Якщо величину $V_{kj}(t) = \max(\hat{V}_{ik}(t), i \in \text{Ein}_k(t))$ мають кілька вхідних вузлів, за $i_k \max(t)$ виступає вхідний вузол із меншим (t) (відповідає найкоротшому шляху до вузла за числом кроків), за рівності параметрів (t) беруть вузол із меншим числом вихідних ребер. За рівності кількох мінімальних збільшувальних потоків, режим $up(1)$, за $i_k \min(t)$ також обирають вузол із меншим (t) , за рівності (t) – вузол із меншим числом вихідних ребер. Як свідчить наведений перелік умов визначення вхідних–вихідних вузлів ПСА, вибір вузлів для розвитку процесу формування

оптимальних потоків носить неточно визначений, евристичний характер. Потенційно залишається можливість існування певних структур мережі, для яких наведення умов щодо визначення таких оптимальних кроків алгоритму буде неможливим. Створення в рамках ПСА процедури, що дозволяє виконувати усунення такого роду невизначеності, означає отримання універсального уніфікованого паралельного алгоритму для аналізу потоків у мережах.

У [5, 6] також наведена процедура і результати планування потоків на основі принципу компромісу:

$$F_C(V) = \max_V(\theta = \min_k(V_k / D_k)) = \theta_C, \quad (2)$$

де V_k – величина компромісного потоку k -ого продукту; D_k – його максимальний потік у мережі. Модель формування компромісних потоків (2) в окремих випадках не відображає прин-

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

цип справедливого розподілу ресурсів мережі між конкурувальними потоками. Зокрема, у (2) не враховано, що окремі потоки можуть мати ненульові мінімальні величини, V_k завжди позитивні, незалежно від змін інших. У цих випадках планування компромісних потоків раціонально виконувати з урахуванням фактичних мінімальних рівнів потоків, що виконано у наступному розділі.

Результати

Дослідимо питання щодо формування універсального паралельного синхронного алгоритму (УПСА) розрахунку максимальних потоків у мережах, розроблено відповідної уніфікованої процедури, а також програмного комплексу для планування неоднорідних, конкурувальних потоків у транспортних мережах, які враховують потреби модифікації компромісу (2).

Проведені розрахунки МП для багатьох складних мережних моделей дозволили визначити умови та вимоги, виконання яких забезпечувало реалізацію завдань оптимального планування потоків, а також запропонувати форму УПСА. По-перше, у моделі на рис. 1 додатковий потік $V_{i,j}^* = \max(\min)\{V_{j,q}\}$ мав бути мінімальним або максимальним, та однозначно встановити, яким саме, не вдалося. По-друге, відповідно до п. 4.2 БПСА (табл. 1) неможливо гарантувати повноту умов раціонального вибору, а також їх упорядкування.

У результаті аналізу встановлене правило розпаралелювання для п. 4.2, яке усуває зазначені вище недоліки евристичного алгоритму. У разі виникнення умов невизначеності щодо вибору наступних вузлів, в УПСА виконують процедуру паралельного запуску зворотних потоків, які не детермінуються переліком списку умов раціонального вибору (див. наведений вище перелік). При цьому встановлено, що така процедура є достатньою, забезпечує реалізацію завдання розрахунку МП для будь-якої послі-

довності та числа умов вибору. Уведення в п. 4.2 БПСА такої процедури розпаралелювання перетворює його на УПСА.

Для модифікування моделі компромісних потоків (2), з урахуванням деяких можливих позитивних мінімальних потоків, у наведеній вище схемі НПСА, у п. 4 (табл. 2), необхідно додатково реалізувати завдання – визначити мінімальні можливі потоки для кожного із продуктів. Для цього необхідно окремо для кожного продукту розрахувати максимальні потоки $\max V_k$, а також при цьому визначити об'єми всіх інших продуктів, що проходять мережею. Мінімальне значення потоку продукту V_j серед усіх рішень для інших максимальних потоків буде дорівнювати $\min V_j$ під час формування компромісу типу (2). Остаточню в п. 4 НПСА для моделі компромісу (2) потрібно використовувати величини $(V - \min V_k)$, які визначені вище.

На основі наведених модифікацій було створено програмний комплекс, призначений для планування однорідних, багатопродуктових та компромісних потоків у транспортних та інформаційних мережах.

На рис. 2–4 представлені фрагменти програмної реалізації.

На рис. 2 зображено редактор інтерактивного моделювання мереж та панель інструментів. Панель складається з функціональних блоків: зміна режиму; розрахунок максимального потоку та діапазону потоків; зміна ваги дуг (пропускна здатність); встановлення витоку та стоку; виведення знайдених потоків; виведення початково заданого графа; відкриття нового вікна з таблицею результуючих потоків, їх шлях та величина; встановлення налаштувань програми до початкових значень; завантаження наявних графів мереж із бібліотек моделювання; збереження графа у вигляді зображення; збереження результатів роботи програми у вигляді текстового файлу; виведення помилок під час роботи з програмою.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

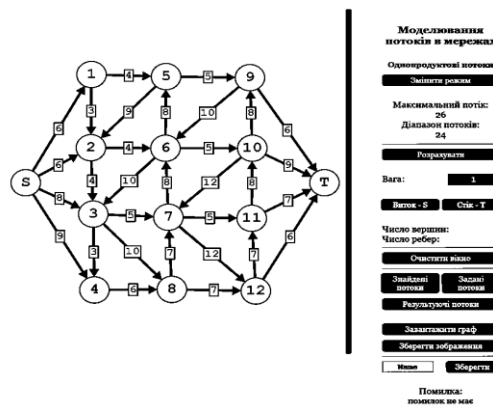


Рис. 2. Розрахунок максимального однопродуктового потоку

Fig. 2. Calculation of maximum one-commodity flow

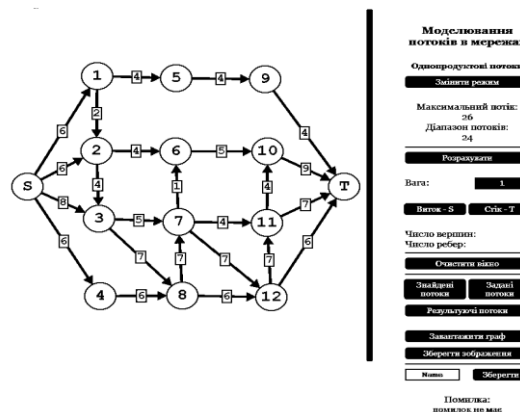


Рис. 3. Виведення результуючих потоків (зі зміною структури мережі)

Fig. 3. Output of the resulting flows (with network structure change)

На рис. 3 зображена мережа зі знайденими потоками. Значення ребер знайдених потоків отримане сумуванням величин результуючих потоків, що проходять через ребра, ребра без потоків не відображаються.

На рис. 4. зображена таблична форма з результуючими потоками, їх величиною та шляхом. Шлях визначає індекси вузлів, по яких пройшов потік.

№	Вага	Шлях
1	7	S, 3, 8, 7, 12, 11, T
2	4	S, 1, 5, 9, T
3	4	S, 2, 6, 10, T
4	6	S, 4, 8, 12, T
5	2	S, 2, 3, 7, 11, 10, T
6	2	S, 1, 2, 3, 7, 11, 10, T
7	1	S, 3, 7, 6, 10, T

Рис. 4. Виведення результуючих потоків у вигляді таблиці

Fig. 4. Output of the resulting flows in the form of a table

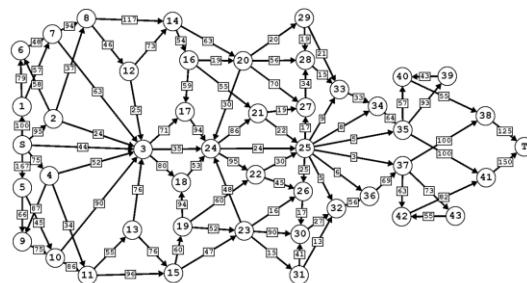


Рис. 5. Вихідна модель однопродуктової мережі

Fig. 5. The output model of one-commodity network

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

На рис. 5 зображена однопродуктова мережа, що складається із 45 вузлів та 91 дуги. Максимальний потік цієї мережі дорівнює 100. На рис. 6 представлено оптимальне рішення завдання розрахунку максимального потоку.

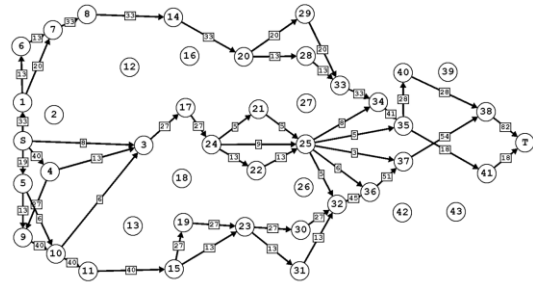


Рис 6. Максимальний однопродуктовий потік через мережу

Fig. 6. Maximum one-commodity flow through the network

Наукова новизна та практична значимість

У статті розроблено новий універсальний паралельний синхронний алгоритм та процедуру розрахунку оптимальних однорідних, багатопродуктових та конкурентних потоків у транспортних мережах.

Практична цінність отриманих результатів визначається універсальними можливостями та ефективністю процедури планування неоднорідних потоків у мережах на основі застосування нового паралельного синхронного алгоритму, а також розробленим програмним комплексом, який забезпечує можливість вирішення завдань аналізу і планування багатопродуктових потоків у транспортних мережах, а також реалізації завдань розрахунку конкуруючих моделей формування транспортних та інформаційних потоків.

Висновки

Розроблено та досліджено можливості паралельного синхронного алгоритму розрахунку максимальних неоднорідних потоків у транспортних мережах, який придатний для розрахунку однопродуктових, багатопродуктових та формування компромісних потоків за рахунок застосування моделей раціонального вибору. Наведені приклади демонструють придатність, ефективність і широкі можливості застосування паралельного алгоритму для вирішення завдань аналізу та оптимального планування неоднорідних потоків у транспортних мережах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гасников В. А. *Введение в математическое моделирование транспортных потоков* : Учебное пособие. Москва : МЦНМО, 2013. 428 с.
2. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. *Алгоритмы : построение и анализ*. Пер. с англ. 2-е изд. Москва : Вильямс, 2005. 1296 с.
3. Скалозуб В. В., Цейтлин С. Ю., Череди́ченко М. С. *Интеллектуальные информационные технологии и системы железнодорожного транспорта* : монография. «Системные технологии моделирования сложных процессов». Днепр, 2016. С. 560–589.
4. Скалозуб В. В., Паник Л. А. О построении обобщенных моделей планирования неоднородных транспортных потоков. *Системные технологии*. 2016. № 5 (106). С. 94–101.
5. Скалозуб В. В., Паник Л. О. Паралельні синхронні алгоритми аналізу та планування неоднорідних потоків у транспортних мережах. *Системные технологии*. 2017. № 5 (112). С. 183–197.
6. Скалозуб В. В., Паник Л. А. Реализация динамических, конкурентных и нечетких моделей планирования многопродуктовых потоков в транспортных сетях. *Наука и прогрес транспорту*. 2018. № 3 (75). С. 113–127. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/133742>
7. Филлипс Д. И., Гарсиа-Диас А. *Методы анализа сетей*. Москва : Мир, 1984. 496 с.
8. Bozhenyuk A., Gerasimenko E. Algorithm for Monitoring Minimum Cost in Fuzzy Dynamic Networks. *Information Technology and Management Science*. 2013. Vol. 16. Iss. 1. P. 53–59. DOI: <https://doi.org/10.2478/itms-2013-0008>
9. Bozhenyuk A. V., Gerasimenko E. M., Kacprzyk J. Maximum and Minimum Cost Flow Finding in Networks in Fuzzy Conditions. *Flows in Networks Under Fuzzy Conditions*. 2016. Vol. 346. P. 23–75. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-41618-2_2

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

10. Capuni I., Zhuri N., Dardha R. TimeStream: Exploiting video streams for clock synchronization. *Ad Hoc Networks*. 2019. Vol. 91. P. 236–248. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2019.101878>
11. Holzhauser M., Sven O. Krumke, Clemens Thielen. Maximum flows in generalized processing networks. *Journal of Combinatorial Optimization*. 2016. Vol. 33. Iss. 4. P. 1226–1256. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10878-016-0031-y>
12. Kovacs P. Minimum-cost flow algorithms : An experimental evaluation EGRES Technical Report. *EGRES Technical Report*. 2013. No. 4. P. 1–40. URL : <https://web.cs.elte.hu/egres/tr/egres-13-04.pdf> (дата звернення: 17.05.2018).
13. Reardon L. Networks and problem recognition: advancing the Multiple Streams Approach. *Policy Sciences*. 2018. Vol. 51. Iss. 4. P. 457–476. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11077-018-9330-8>
14. Rezende P., Kianpisheh S., Glitho R., Madeira E. An SDN-Based Framework for Routing Multi-Streams Transport Traffic Over Multipath Networks. *ICC 2019 – 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. Shanghai, China. 2019. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICC.2019.8762061>
15. Schiopu C., Ciurea E. The Maximum Flows in Planar Dynamic Networks. *Intern. Journal of Computers Communications & Control*. 2016. Vol. 11. Iss. 2. P. 282–291. DOI: <https://doi.org/10.15837/ijccc.2016.2.2444>
16. Sifaleras A. Minimum cost network flows: problems, algorithms, and software. *YUJOR*. 2013. Vol. 23. Iss. 1. DOI: <https://doi.org/10.2298/YJOR121120001S>

В. В. СКАЛОЗУБ^{1*}, Л. А. ПАНИК^{2*}, А. Д. ПАНАРИН^{3*}

^{1*}Каф. «Компьютерные информационные технологии», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, эл. почта skalozhubtk@gmail.com, ORCID 0000-0002-1941-4751

^{2*}Каф. «Компьютерные информационные технологии», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, эл. почта leon140377@gmail.com, ORCID 0000-0003-1343-3000

^{3*}Каф. «Компьютерные информационные технологии», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, эл. почта sashapanarin@mail.ru, ORCID 0000-0001-9050-463X

УНИФИЦИРОВАННЫЙ ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ И ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ ПОТОКОВ В СЕТЯХ

Цель. В статье предусмотрено разработать универсальный унифицированный параллельный синхронный алгоритм, предназначенный для реализации задач по расчету максимальных однопродуктовых и многопродуктовых потоков, а также создать программный комплекс, обеспечивающий формирование плоскостных графовых моделей потоков и выполняющий оптимальное планирование неоднородных потоков в транспортных и других сетях. **Методика.** В работе исследованы возможности ранее созданного и всесторонне проверенного эвристического параллельного синхронного алгоритма расчета максимальных однопродуктовых и многопродуктовых потоков в сетях, установлены его потенциальные ограничения и определены дополнительные усовершенствованные процедуры, которые превращают эвристический алгоритм в универсальный параллельный. Предложенный параллельный синхронный алгоритм использует стратегию поиска в ширину при одновременном определении возможных путей потоков через сеть с оценкой их пропускных способностей. При этом исследована возможность на одной итерации выполнять параллельно анализ нескольких увеличивающих потоков по сети. **Результаты.** Предложен универсальный унифицированный параллельный синхронный алгоритм расчета максимальных потоков в сетях, разработана унифицированная процедура и программный комплекс для планирования неоднородных, а также конкурентных потоков в транспортных и других сетях. Разработанный программный комплекс реализует задачи по формированию плоскостных графовых моделей сетей, для которых решается задача оптимального планирования неоднородных и конкурирующих многокритериальных потоков в транспортных сетях. **Научная новизна.** Разработан новый универсальный унифицированный параллельный синхронный алгоритм и процедура расчета оптимальных однородных, многопродуктовых и конкурирующих потоков в транспортных сетях. **Практическая значимость.** Ценность полученных результатов определяется универсаль-

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

ними возможностями и эффективностью процедуры планирования неоднородных потоков в сетях на основе применения нового параллельного синхронного алгоритма, а также разработанным программным комплексом, который обеспечивает возможность решения задач анализа и планирования однородных и многопродуктовых потоков в транспортных сетях, реализации задач расчета конкурирующих моделей формирования транспортных и информационных потоков. Программный комплекс имеет встроенный редактор интерактивного моделирования сетей и панель инструментов, что обеспечивает как создание новых, так и загрузку существующих графов сетей из библиотек моделирования, сохранение оптимальных потоков в сети в виде изображения и в виде текстового файла, вывод ошибок при работе с программой.

Ключевые слова: транспортные сети; максимальные потоки; параллельные алгоритмы; неоднородные и конкурирующие потоки; программное обеспечение

V. V. SKALOZUB^{1*}, L. A. PANIK^{2*}, A. D. PANARIN^{3*}

^{1*}Dep. «Computer Information Technology», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. (056) 373 15 35, e-mail skalozhubtk@gmail.com, ORCID 0000-0002-1941-4751

^{2*}Dep. «Computer Information Technology», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. (056) 373 15 35, e-mail leon140377@gmail.com, ORCID 0000-0003-1343-3000

^{3*}Dep. «Computer Information Technology», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. (056) 373 15 35, e-mail sashapanarin@mail.ru, ORCID 0000-0001-9050-463X

UNIFIED PARALLEL ALGORITHM AND PROGRAMMING COMPLEX OF OPTIMAL PLANNING OF NON-UNIFORM FLOWS IN THE NETWORKS

Purpose. The purpose of the article is to develop a universal unified parallel synchronous algorithm for the implementation of tasks for calculation of maximum one- and multicommodity flows, as well as the creation of a software complex that provides the formation of surface graph models of flows and performs optimal planning of non-uniform flows in transport and other networks. **Methodology.** The paper investigates the possibilities of previously created and comprehensively verified heuristic parallel synchronous algorithm for calculating maximum one- and multicommodity flows in the networks, establishes its potential limitations, and determines additional advanced procedures that transform the algorithm into a universal parallel algorithm. The proposed parallel synchronous algorithm uses a width-first search strategy while simultaneously identifying possible paths of flows through the network with an estimation of their throughput. Herewith the possibility of analyzing several incremental flows across the network in one iteration was studied. **Findings.** The article proposes a universal unified parallel synchronous algorithm for calculating maximum flows in networks and develops a unified procedure and software package for planning of non-uniform as well as competitive flows in transport and other networks. The developed software complex implements the problems of formation of surface graph models of networks, for which the problem of optimal planning of non-uniform and competitive multicriteria flows in transport networks is solved. **Originality.** The article develops a new universal unified parallel synchronous algorithm and procedure for the calculation of optimal uniform, multicommodity and competitive flows in transport networks. **Practical value.** The practical value of the obtained results is determined by the universal capabilities and efficiency of the procedure for planning non-uniform flows in the networks based on the application of a new parallel synchronous algorithm, as well as the developed software complex, which provides the ability to solve the problems of analysis and planning of uniform and multicommodity flows in transport networks, as well as the implementation of calculation tasks of competitive models of transport and information flows formation. The software complex has a built-in editor of interactive network modeling and a toolbar, which provides both creation of new and downloading existing graphs of networks from the modeling libraries, preservation of optimum flows in the network in the form of an image and a text file, output of errors when working with the program.

Keywords: transport networks; maximum flows; parallel algorithms; non-uniform and competitive flows; software

REFERENCES

1. Gasnikov, V. A. (2013). *Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie transportnykh potokov*: Uchebnoe posobie. Moscow: MTSNMO. (in Russian)
2. Kormen, T. K., Leyzerson, C. I., Rivest, R. L., & Shtayn, K. (2011). *Algoritmy: Postroenie i analiz*. Moscow: Williams. (in Russian)
3. Skalozub, V. V., Tseytlin, S. Y., & Cherednichenko, M. S. (2016). *Intellektualnye informatsionnye tekhnologii i sistemy zheleznodorozhnogo transporta*: monografiya. In A. I. Mikhaleva (Ed.). *Sistemnye tekhnologii modelirovaniya slozhnykh protsessov*. Dnipro. (in Russian)
4. Skalozub, V. V., & Panik, L. A. (2016). The construction of generalized models for planning heterogeneous transport flows. *System technologies*, 5(106), 94-101. (in Russian)
5. Skalozub, V. V., & Panik, L. O. (2017). Parallel Synchronous Algorithms of Analysis and Planning of Inhomogeneous Flows in Transpotnic Networks. *System technology*, 5(112), 183-197. (in Ukrainian)
6. Skalozub, V. V., & Panik, L. O. (2018). Implementation of the dynamic, competitive and fuzzy models for planning of the multi-product flows in transport networks. *Science and Transport Progress*, 3(75), 113-127. (in Russian)
7. Fillips, D. I., & Garsia-Dias, A. (1984). *Metody analiza setey*. Moscow: Mir. (in Russian)
8. Bozhenyuk, A. & Gerasimenko, E. (2013). Algorithm for Monitoring Minimum Cost in Fuzzy Dynamic Networks. *Information Technology and Management Science*, 16(1), 53-59. DOI: <https://doi.org/10.2478/itms-2013-0008> (in English)
9. Bozhenyuk, A. V., Gerasimenko, E. M., Kacprzyk, J., & Rozenberg, I. N. (2016). Maximum and Minimum Cost Flow Finding in Networks in Fuzzy Conditions. *Flows in Networks Under Fuzzy Conditions*, 346, 23-75. Cham: Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-41618-2_2 (in English)
10. Capuni, I., Zhuri, N., & Dardha, R. (2019). TimeStream: Exploiting video streams for clock synchronization. *Ad Hoc Networks*, 91, 236-248. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2019.101878> (in English)
11. Holzhauer, M., Krumke, S. O., & Thielen, C. (2016). Maximum flows in generalized processing networks. *Journal of Combinatorial Optimization*, 33(4), 1226-1256. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10878-016-0031-y> (in English)
12. Kovacs, P. (2013). Minimum-cost flow algorithms: An experimental evaluation EGRES Technical Report. *EGRES Technical Report*, 4, 1-40. Retrieved from <https://web.cs.elte.hu/egres/tr/egres-13-04.pdf> (in English)
13. Reardon, L. (2018). Networks and problem recognition: advancing the Multiple Streams Approach. *Policy Sciences*, 51(4), 457-476. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11077-018-9330-8> (in English)
14. Rezende, P., Kianpisheh, S., Glitho, R., & Madeira, E. (2019). An SDN-Based Framework for Routing Multi-Streams Transport Traffic Over Multipath Networks. *ICC 2019–2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICC.2019.8762061> (in English)
15. Schiopu, C., & Ciurea, E. (2016). The Maximum Flows in Planar Dynamic Networks. *International Journal of Computers Communications & Control*, 11(2), 282-291. DOI: <https://doi.org/10.15837/ijccc.2016.2.2444> (in English)
16. Sifaleras, A. (2013). Minimum cost network flows: Problems, algorithms, and software. *YUJOR*, 23(1), 3-17. DOI: <https://doi.org/10.2298/YJOR121120001S> (in English)

Надійшла до редколегії: 02.10.2019

Прийнята до друку: 04.02.2020

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК. 669.15

В. В. НЕТРЕБКО

Каф. «Обладнання та технології зварювального виробництва», Національний університет «Запорізька політехніка»,
вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063, тел. +38 (050) 486 27 40, ел. пошта olgavvn@ukr.net,
ORCID 0000-0003-3283-0116

ВПЛИВ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ЗНОСОСТІЙКОГО ЧАВУНУ НА МІЖФАЗНЕ РОЗПОДІЛЕННЯ МАРГАНЦЮ ПІСЛЯ ВІДПАЛУ ЗА 690 °С

Мета. У роботі ми ставимо за мету отримати регресійні залежності концентрації марганцю в металевій основі зносостійкого високохромистого чавуну та коефіцієнта його розподілу між карбідами й основою від вмісту в чавуні С, Cr, Mn та Ni після відпалу за 690 °С. **Методика.** Щоб досягти мети досліджено чавуни, що містили 1,09...3,91 % С; 11,43...25,57 % Cr; 0,6...5,4 % Mn; 0,19...3,01 % Ni та 0,8...1,2 % Si. Для отримання достовірних результатів застосовано: аналітичний огляд публікацій, мікроструктурний та локальний мікрорентгеноспектральний методи, математичну статистику та регресійний аналіз отриманих залежностей. **Результати.** За допомогою використання методів математичної статистики отримано регресійні залежності розподілу марганцю між фазами та величини його концентрації в металевій основі чавунів від вмісту С, Cr, Mn та Ni після відпалу за 690 °С. Під час відпалу відбувався перерозподіл марганцю шляхом заміщення в карбідах його атомів на атоми хрому. Вплив хрому та нікелю суттєво змінювався відповідно до вмісту в чавуні марганцю. Мінімальні значення коефіцієнта розподілу марганцю 0,16 спостерігалися за мінімального вмісту вуглецю й марганцю та максимальної кількості хрому й нікелю. Максимальна концентрація марганцю в основі 5,79 % визначена за мінімального вмісту вуглецю й нікелю та максимального вмісту хрому й марганцю. Це дозволило визначити хімічні склади чавунів, що забезпечують необхідний вміст марганцю в металевій основі після відпалу за 690 °С. **Наукова новизна.** Отримано регресійні залежності вмісту марганцю в основі та коефіцієнта його міжфазного розподілу від вмісту в чавуні С, Cr, Mn та Ni після відпалу за 690 °С. **Практична значимість.** Визначені закономірності розподілу марганцю між фазами у високохромистих чавунах після відпалу за 690 °С можуть бути використані під час розробки нових складів зносостійких чавунів у системі Fe–C–Cr–Mn–Ni для виливок, що потребують термічної обробки.

Ключові слова: зносостійкий чавун; відпал; марганець; металева основа; карбіди; розподіл між фазами

Вступ

Використання високохромистих чавунів для деталей, які експлуатують в умовах інтенсивного абразивного та гідроабразивного зношування, обумовлено їх структурою та властивостями, що визначаються кількістю карбідної фази та станом металевої основи [1, 4, 9, 11, 16, 19]. Легування високохромистих чавунів марганцем сприяє утворенню мартенситних або аустенітно-мартенситних структур, що суттєво підвищує зносостійкі властивості цих матеріа-

лів у різних умовах експлуатації [13, 16]. Утворення конкретного типу структури металевої основи визначається концентрацією в ній марганцю [16]. Марганець має здатність до утворення карбідів та посідає проміжне місце між хромом і залізом за спорідненістю до вуглецю. Таким чином, марганець одночасно міститься як у металевій основі, так і в карбідах. У процесі термічної обробки відбувається перерозподіл елементів між карбідами та основою, що обумовлено утворенням метастабільних фаз під

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

час кристалізації. Кількість карбідів визначається вмістом вуглецю. Тип карбіду і, відповідно, його твердість залежать від співвідношення хрому та вуглецю.

Карбіди утворюються лише вуглецем, що не розчинений у металевій основі. Відповідно до цього зміни в розчинності вуглецю в металевій основі впливають не тільки на кількість карбідної фази, а й на тип карбіду. За утворення феритної основи майже весь вуглець міститься в карбідах. За утворення аустеніту частина вуглецю (до 2 %) може міститися у твердому розчині, що суттєво зменшує кількість карбідів та може призвести до зміни їх типу. З іншого боку, за утворення аустеніту можливе мартенситне перетворення, що збільшує твердість основи до 1 100 HV₅₀ [4, 8]. Отже, зміни в розчинності вуглецю в металевій основі впливають як на її стан, так і на кількість карбідної фази, відповідно, і на розподіл елементів.

До елементів, що суттєво впливають на розчинність вуглецю в металевій основі та її стан, належать хром, марганець і нікель. Нікель сприяє утворенню аустеніту та зменшує розчинність вуглецю в основі, але він не входить до складу карбідів, що утворюються у високохромистих чавунах, тому за термічної обробки не відбувається його перерозподілу. Вплив марганцю на структуру та властивості високохромистих чавунів полягає у його природі. Він сприяє і утворенню аустеніту, і збільшенню в ньому розчинності вуглецю. Дані про вплив хімічного складу чавуну на розподіл марганцю між фазами в литому стані наведено в роботі [14]. Відношення вмісту марганцю в карбідах до його кількості у сталях становить 4:1 [5].

За кристалізації утворюються фази (карбіди та дендрити) з хімічною і структурною неоднорідністю [15]. У процесі охолодження виливків у формі відбувається перерозподіл елементів, що може негативно вплинути на експлуатаційну стійкість деталей. Вміст марганцю в чавуні впливає на концентрацію хрому в зонах біля карбідів. За збільшення вмісту марганцю в чавуні концентрація хрому в зонах біля карбідів зменшується [17]. Вміст марганцю в карбідах зменшується внаслідок заміщення атомів марганцю атомами хрому. Утворення зон, збідне-

них хромом, негативно впливає на експлуатаційну стійкість деталей.

На розподіл елементів між фазами впливають різні фактори [3, 10]. Термічна обробка (відпал) впливає на напружений стан виливків, сприяє утворенню більш стабільних фаз, призводить до перерозподілу елементів між фазами та змінює напружено-деформаційний стан металевої основи навколо карбідів, що суттєво змінює властивості чавунів [6, 7, 12, 18, 20]. Отже, на розподіл та перерозподіл марганцю між фазами впливають: хімічний склад чавуну; термічна обробка; стан металевої основи та розчинність у ній вуглецю з відповідними змінами в кількості карбідів.

Мета

Ураховуючи вищезгадане, метою дослідження є отримання залежності концентрації марганцю в металевій основі зносостійкого високохромистого чавуну та коефіцієнта його розподілу між карбідами й основою від вмісту в чавуні C, Cr, Mn та Ni після відпалу за 690 °C.

Методика

Для отримання достовірних даних проведено аналітичний огляд вітчизняних і світових публікацій із розподілу марганцю у високохромистих чавунах після термічної обробки. Плавлення чавунів виконано в печі ІСТ-0,06 із кислим футеруванням. Для підвищення точності хімічного складу чавунів, використаних у плані експерименту, попередньо виплавлено модельні сплави, у які додано легувальні елементи з урахуванням вигару. Чавун розлито за температури 1 390...1 410 °C. Маса виливку становила 50 кг. Зразки чавунів досліджено у стані литва без ТО та після відпалу за 690 °C з витримкою 9 год та охолодженням у печі. Зразки для металографічних досліджень виготовлено відповідно до стандартних методик [2] та оброблено реактивом Марбле. Хімічний склад металевої основи й карбідів визначено в локальних точках на мікроскопі РЕМ–106И. Розподіл марганцю між фазами після відпалу за 690 °C з витримкою протягом 9 годин визначено через коефіцієнт розподілу (K_{Mn}^{690}), що вираховано

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

як співвідношення концентрації марганцю в карбідній фазі (Mn_K^{690}) до його вмісту в металевій основі (Mn_O^{690}):

$$KP_{Mn}^{690} = Mn_K^{690} / Mn_O^{690}.$$

Обробку результатів дослідження виконано з використанням методів математичної статистики й активного планування експерименту. Побудову математичних залежностей проведено відповідно до рівнів та інтервалів варіювання факторів, наведених у табл. 1. Загальна кількість досліджень становила 21, із яких 5 – на нульовому рівні.

Таблиця 1

Матриця дробового планування факторного експерименту 2⁴⁺¹

Table 1

Matrix of fractional factorial experiment planning 2⁴⁺¹

Рівні варіювання факторів		Змінні фактори, mass. %			
		C (X ₁)	Cr (X ₂)	Mn (X ₃)	Ni (X ₄)
Базовий	0	2,5	18,5	3,0	1,6
Інтервал	Δ	1,0	5,0	1,7	1,0
Зоряне плече	1,414 Δ	1,41	7,07	2,4	1,41
Верхні рівні	+1	3,5	23,5	4,7	2,6
	+1,414	3,91	25,57	5,4	3,01
Нижні рівні	-1	1,5	13,5	1,3	0,6
	-1,414	1,09	11,43	0,6	0,19

Модель досліджуваних залежностей подано у вигляді полінома другого ступеня. Регресійні залежності отримано з використанням методу мінімізації квадратів відхилень функції. Дисперсійний аналіз отриманих залежностей проведено відповідно до стандартних методик із використанням критеріїв Фішера, Стюдента та

Кохрена. Значення цих критеріїв відповідали табличним даним. Довірча ймовірність (P) становила 0,95, а рівень значущості (q) – 0,05.

Результати

За результатами математичної обробки експериментальних даних отримано регресійні залежності вмісту марганцю в основі (Mn_O^{690}) та коефіцієнта його розподілу між фазами (KP_{Mn}^{690}) від вмісту в чавуні C, Mn, Cr і Ni після відпалу:

$$\begin{aligned} Mn_O^{690} = & 0,707 - 0,207C + 1,09Mn + 0,38Cr - \\ & - 0,261Ni - 0,015MnCr + 0,10MnNi - \\ & - 0,043(Cr/C), \text{ mass \%}; \\ KP_{Mn}^{690} = & 0,119C + 0,1Mn - 0,145Cr - 0,242Ni - \\ & - 0,001Mn^2 + 0,003Cr^2 + 0,058Ni^2 - \\ & - 0,008CrC + 0,003CrNi + 2,351. \end{aligned}$$

Дані рівняння є математично ймовірнісними відповідно до критеріїв Стюдента, Фішера і Кохрена. Склади чавунів, у яких утворюються мінімальні й максимальні значення функцій Mn_O^{690} та KP_{Mn}^{690} , представлено в табл. 2.

Таблиця 2

Мінімальні й максимальні значення функцій Mn_O^{690} та KP_{Mn}^{690}

Table 2

Minimum and maximum values of functions Mn_O^{690} and KP_{Mn}^{690}

Функція	Рівень		Вміст у чавуні, mass. %			
			C	Mn	Cr	Ni
Mn_O^{690}	min	0,37	1,09	0,60	11,43	3,01
	max	5,79	1,09	5,40	25,57	0,19
KP_{Mn}^{690}	min	0,16	1,09	0,60	25,57	3,01
	max	2,48	3,91	0,60	11,43	0,19

Аналіз табл. 2 показує, що максимальний вміст марганцю в основі забезпечується за мінімального вмісту вуглецю й нікелю та максимальної кількості хрому й марганцю. Це пояс-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

нюється тим, що за вмісту 1,09 % С утворюється мінімальна кількість карбідної фази, що збільшує вміст марганцю в основі. Максимальна концентрація хрому (25,57 %) в чавуні сприяє тому, що в разі відпау за 690 °С значна кількість марганцю в карбідах заміщується хромом. Вплив нікелю на концентрацію марганцю в основі полягає в тому, що зростання вмісту в чавуні нікелю зменшує розчинність вуглецю в металевій основі, унаслідок чого збільшується кількість карбідної фази, яка розчинює марганець у значній кількості. Відповідно до цього, чим менше нікелю в чавуні (0,19 %), тим більше марганцю міститься в металевій основі.

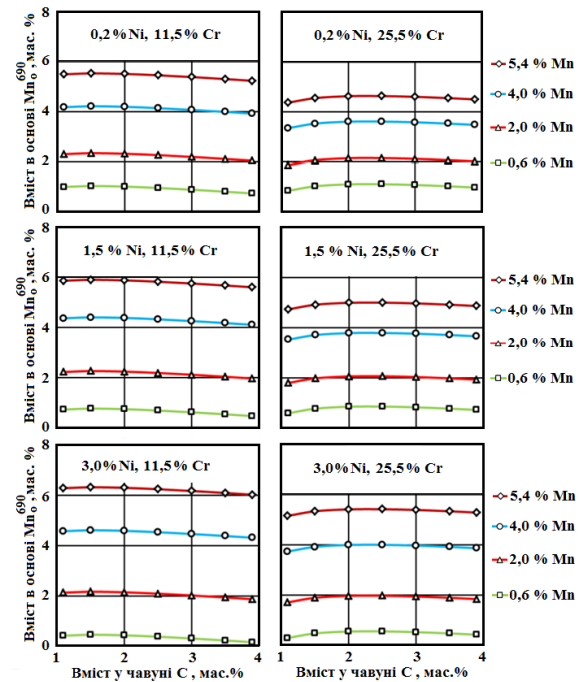
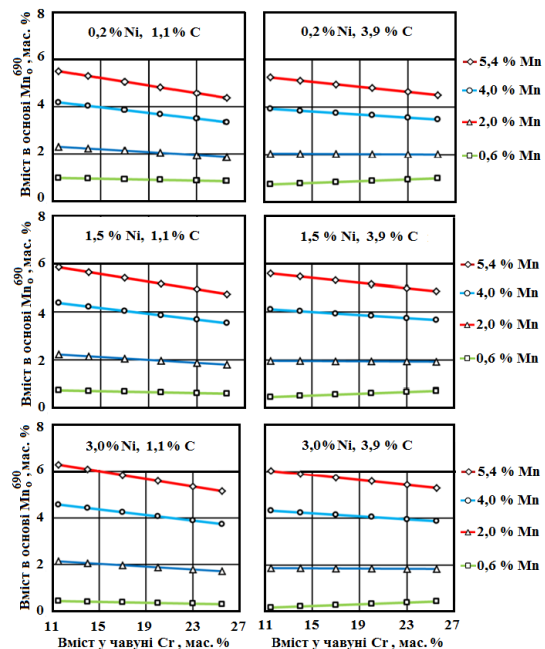
Збільшення кількості марганцю в чавуні (до 5,4 %) призводить до зростання аустенітної складової в металевій основі і стабілізації аустеніту. Утворення стабільного аустеніту з максимальною розчинністю вуглецю зменшує кількість карбідної фази. За таких умов чим більше в чавуні марганцю, тим більша його концентрація в металевій основі.

Наведений механізм впливу хімічного складу чавуну на кількість марганцю в металевій основі пояснює те, що мінімальна концентрація марганцю в основі після відпау утворюється за мінімального вмісту С (1,09 %), Cr (11,43 %) і Mn (0,6 %) та максимальної кількості Ni (3,01 %).

Влив вмісту в чавуні С, Mn, Cr і Ni після відпау за 690 °С, за мінімальних та максимальних концентрацій цих елементів, згідно з планом дослідження наведено на рис. 1, 2 і 3.

Особливість впливу вуглецю на концентрацію марганцю в основі полягає в тому, що збільшення вмісту вуглецю сприяє не тільки утворенню аустеніту, унаслідок чого збільшується концентрація марганцю в основі, а й змінює тип карбіду.

За вмісту в чавуні 1,09 % С утворюються карбіди M_7C_3 , а понад 2,0 % С – карбіди M_3C . У системі Fe–C–Cr карбіди $(Cr,Fe)_7C_3$ розчиняють до 55 % хрому, а карбіди $(Fe,Cr)_3C$ – до 20 %. За даними [5], карбіди M_3C можуть розчиняти до 30 % Mn. Відповідно збільшення частки карбідів M_3C зменшує вміст Mn в основі (див. рис. 1).

Рис. 1. Вплив С, Cr, Mn та Ni на вміст $Mn_{O^{690}}$ Fig. 1. The effect of C, Cr, Mn and Ni on the content of $Mn_{O^{690}}$ Рис. 2. Вплив С, Cr, Mn та Ni на вміст $Mn_{O^{690}}$ Fig. 2. The influence of C, Cr, Mn and Ni on the content of $Mn_{O^{690}}$

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

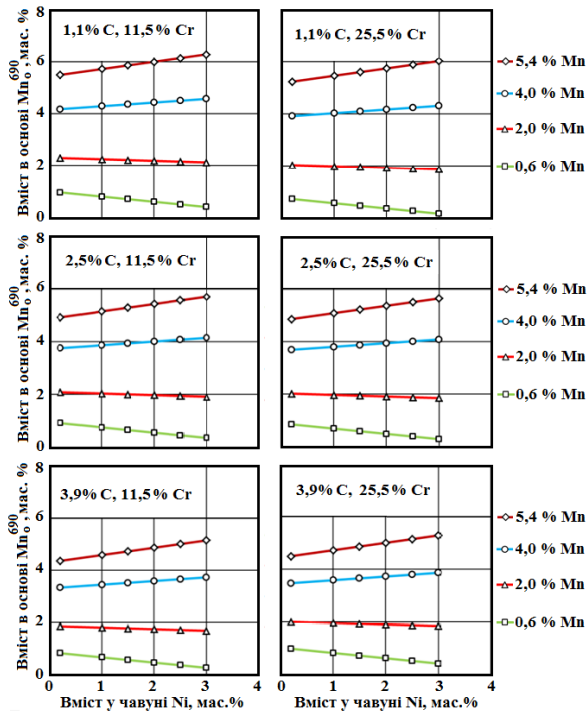
Рис. 3. Вплив C, Cr, Mn та Ni на вміст Mn_0^{690}

Fig. 3. The effect of C, Cr, Mn and Ni
on the content of Mn_0^{690}

Аналіз впливу хімічного складу чавуну на коефіцієнт розподілу марганцю між фазами (KP_{Mn}^{690}) після відпалу за 690°C підтвердив механізм впливу елементів наведений вище (рис.4).

Слід зауважити, що за низького вмісту хрому (11,5 %) у чавуні утворювалися карбіди цементитного типу (M_3C), які розчиняли значну кількість марганцю, що призводило до зниження його концентрації в основі. Відповідно до цього зростання вмісту вуглецю за 11,5 % хрому зменшувало вміст Mn в основі ($KP_{Mn}^{690} > 1$), а за 25,5 % хрому – збільшувало ($KP_{Mn}^{690} < 1$). Вплив нікелю обумовлений його природою. За вмісту до 1,5 % нікелю переважала його здатність утворювати аустеніт, що збільшувало вміст марганцю в основі, відповідно, коефіцієнт KP_{Mn}^{690} зменшився. За збільшення вмісту нікелю понад 1,5 % посилювалася його здатність зменшувати розчинність вуглецю в металевій основі, що сприяло утворенню карбідної фази зі значним вмістом марганцю, і коефіцієнт KP_{Mn}^{690} збільшився.

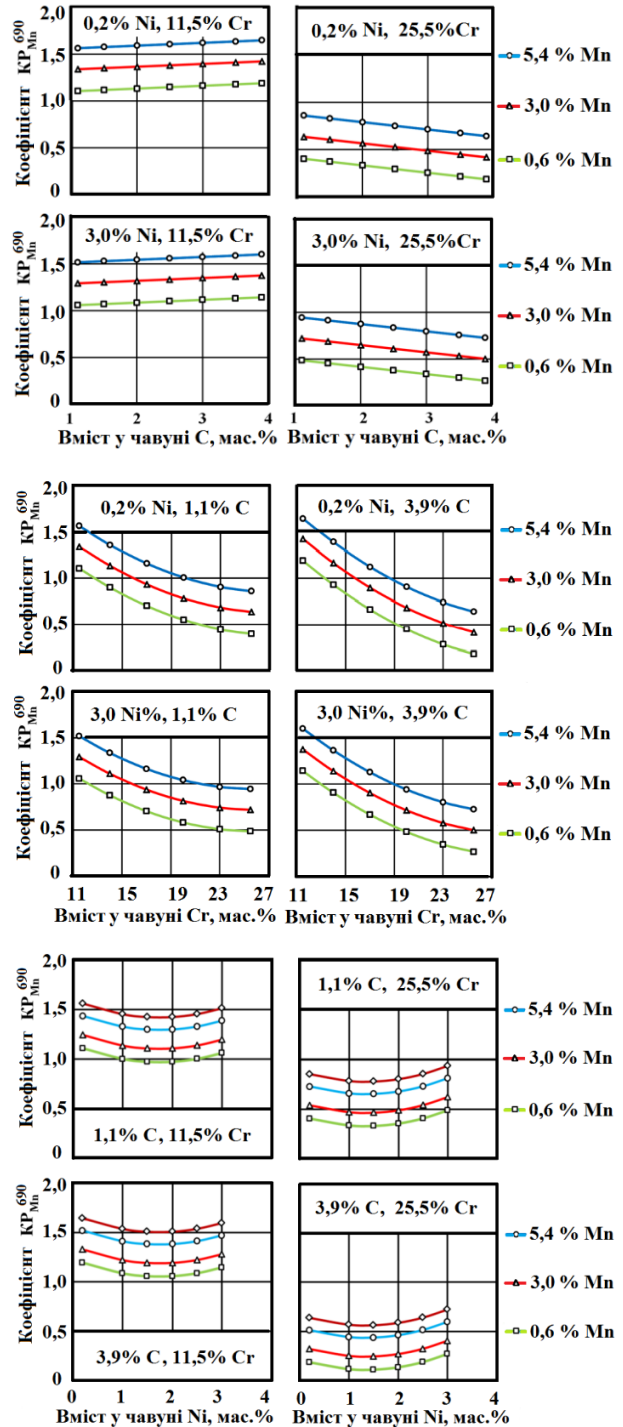
Рис. 4. Вплив C, Cr, Ni та Mn на коефіцієнт розподілу марганцю між фазами KP_{Mn}^{690}

Fig. 4. The influence of C, Cr, Ni and Mn on the manganese distribution coefficient between phases KP_{Mn}^{690}

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Наукова новизна та практична значимість

Отримані регресійні залежності вмісту марганцю в основі та коефіцієнта його міжфазного розподілу від вмісту в чавуні С, Cr, Mn та Ni після відпалу за 690 °С дозволяють прогнозувати вміст марганцю в металевій основі виробів із високохромистого чавуну, що потребують термічної обробки.

Вміст марганцю в металевій основі чавуну та величина коефіцієнта його розподілу після відпалу визначаються процесами перерозподілу елементів, що залежать від взаємодії С, Cr, Ni та Mn, а також від їх кількісного вмісту.

Отримані закономірності розподілу Mn між фазами у високохромистих чавунах після відпалу за 690 °С можуть бути використані під час

розробки нових складів зносостійких чавунів у системі Fe–C–Cr–Mn–Ni для виливок, що потребують термічної обробки.

Висновки

1. Вплив С, Cr, Mn та Ni на вміст марганцю в основі чавуну та коефіцієнт його розподілу після відпалу мають протилежні прояви і залежать від кількісних показників вмісту конкретного елемента та їх сумісного впливу на процеси карбідоутворення й перерозподілу елементів під час термічної обробки.

2. Максимальна концентрація марганцю 5,79 % в металевій основі високохромистих чавунів після відпалу за 690 °С виникає за вмісту 1,09 % вуглецю, 5,40 % марганцю, 25,57 % хрому та 0,19 % нікелю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Брыков М. Н., Ефременко В. Г., Ефременко А. В. *Износостойкость сталей и чугунов при абразивном изнашивании*. Херсон : Гринь Д. С., 2014. 364 с.
2. Вакуленко І. О. *Структурний аналіз в матеріалознавстві*. Дніпропетровськ: Маковецький, 2010. 124 с.
3. Волчок И. П., Нетребко В. В. Влияние легирования и термической обработки на распределение элементов и свойства высокохромистых чугунов. *Науч. вестн. Донбас. гос. машиностр. акад. : сб. науч. тр.* 2015. № 3 (18Е). С. 52–59.
4. Гарбер М. Е. *Износостойкие белые чугуны*. Москва : Машиностроение, 2010. 280 с.
5. Гудремон Э. *Специальные стали*. Москва : Металлургия, 1966. Т. 1. 736 с.
6. Гуляев А. П., Гуляев А. А. *Металловедение*. Москва : Альянс, 2015. 544 с.
7. Евсеева Н. А., Мищенко В. Г. Изменение фазового состояния коррозионностойкой стали 03X17H3Г9МБДЮЧ при нагреве и охлаждении. *Строительство, материаловедение, машиностроение : Стародубовские чтения*. 2017. Вып. 95. С. 79–81.
8. Ефременко В. Г., Чабак Ю. Г. *Материалы триботехнического назначения : учебное пособие*. Мариуполь : ПГТУ, 2015. 245 с.
9. Ефременко В. Г., Чабак Ю. Г. *Формирование структуры в высокохромистых чугунах : монография*. Мариуполь : ПГТУ, 2016. 232 с.
10. Ефременко В. Г., Чейлях А. П., Козаревская Т. В., Шимидзу К., Чабак Ю. Г., Ефременко А. В. Межфазное распределение химических элементов в комплексно-легированном белом чугуне. *Вісн. Приазов. держ. техн. ун-ту. Серія : Технічні науки : зб. наук. пр.* 2014. Вып. 28. С. 89–99.
11. Кириллов А. А., Белов В. Д., Рожкова Е. В., Дядькова А. Ю., Зуев И. Е. Структурно и неструктурно чувствительные свойства хромистых чугунов. *Черные металлы*. 2007. № 9. С. 7–13.
12. Куцова В. З., Ковзель М. А., Гребенева А. В., Ратнікова І. В., Швець П. Ю. Вплив термічної обробки на зносостійкість та перерозподіл легуючих елементів у структурі чавуну 280×32н3ф в процесі зносу тертям. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2016. № 1. С. 72–80.
13. Малинов Л. С., Малинов В. Л. Износостойкие марганцовистые стали с метастабильным аустенитом. *Металлургические процессы и оборудование*. 2014. № 2. С. 19–24.
14. Нетребко В. В., Волчок И. П. Влияние химического состава чугуна на межфазное распределение Mn. *Наука та прогрес транспорту*. 2016. № 6 (66). С. 115–123. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/90489>
15. Нетребко В. В. К вопросу образования карбидов Fe₃C и Fe₇C₃ в высокохромистых чугунах. *Наука та прогрес транспорту*. 2016. № 3 (63). С. 138–147. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/7473>

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

16. Чейлях Я. А., Цуркан М. Л., Чейлях А. П. Функциональные материалы и технологии с эффектом самоупрочнения при эксплуатации и их экономическая эффективность. *Металл и литье Украины*. 2017. № 1 (284). С. 20–29.
17. Belikov S., Volchok I., Netrebko V. Manganese influence on chromium distribution in high-chromium cast iron. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2013. Vol. 58. Iss. 3. P. 895–897. DOI: <https://doi.org/10.2478/amm-2013-0095>
18. Efremenko V.G., Wu K.M., Chabak Yu. G., Shimizu K., Isayev O.B., Kudin V.V. Alternative Heat Treatments for Complex-Alloyed High-Cr Cast Iron Before Machining. *Metallurgical and Materials Transaction A*. 2018. Vol. 49. Iss. 8. P. 3430–3440. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-018-4722-0>
19. Gierek A., Bajka L. *Zeliwo stopowe jako tworzywo konstrukcyjne*. Katowice : Slask, 1976. 230 p.
20. Zhang Y., Shimizu K., Yaer X., Kusumoto K., Efremenko V.G. Erosive wear performance of heat treated multi-component cast iron containing Cr, V, Mn and Ni eroded by alumina spheres at elevated temperatures. *Wear*. 2017. Vol. 390–391. P. 135–145. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.07.017>

В. В. НЕТРЕБКО

Каф. «Оборудование и технологии сварочного производства», Национальный университет «Запорожская политехника», ул. Жуковского, 64, Запорожье, Украина, 69063, тел. +38 (050) 486 27 40, эл. почта olgavvn@ukr.net, ORCID 0000-0003-3283-0116

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ИЗНОСОСТОЙКОГО ЧУГУНА НА МЕЖФАЗНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАРГАНЦА ПОСЛЕ ОТЖИГА ПРИ 690 °С

Цель. В работе мы ставим цель получить регрессионные зависимости концентрации марганца в металлической основе износостойкого высокохромного чугуна и коэффициентам его распределения между карбидами и основой от содержания в чугуне С, Cr, Mn и Ni после отжига при 690 °С. **Методика.** Для достижения цели исследованы чугуны, содержащие 1,09...3,91 % С; 11,43...25,57 % Cr; 0,6...5,4 % Mn; 0,19...3,01 % Ni и 0,8...1,2 % Si. Для получения достоверных результатов применены: аналитический осмотр публикаций, микроструктурных и локальный микрорентгеноспектральный методы, математическая статистика и регрессионный анализ полученных зависимостей. **Результаты.** С помощью использования методов математической статистики получено регрессионные зависимости распределения марганца между фазами и величины его концентрации в металлической основе чугунов от содержания С, Cr, Mn и Ni после отжига при 690 °С. При отжиге происходило перераспределение марганца путем замещения в карбидах его атомов на атомы хрома. Влияние хрома и никеля существенно менялось в соответствии с содержанием в чугуне марганца. Минимальные значения коэффициента распределения марганца 0,16 наблюдались при минимальном содержания углерода и марганца и максимального количества хрома и никеля. Максимальная концентрация марганца в основе 5,79 % определена при минимальном содержании углерода и никеля и максимальном содержании хрома и марганца. Это позволило определить химические составы чугунов, обеспечивающие необходимое содержание марганца в металлической основе после отжига при 690 °С. **Научная новизна.** Получены регрессионные зависимости содержания марганца в основе и коэффициента его межфазного распределения от содержания в чугуне С, Cr, Mn и Ni после отжига при 690 °С. **Практическая значимость.** Выявленные закономерности распределения марганца между фазами в высокохромистых чугунах после отжига при 690 °С могут быть использованы при разработке составов износостойких чугунов в системе Fe–C–Cr–Mn–Ni для отливок, требующих термической обработки.

Ключевые слова: износостойкий чугун; отжиг; марганец; металлическая основа; карбиды; распределение между фазами

V. V. NETREBKO

Dep. «Equipment and Technology of Welding Production», Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zhukovskoho St., 64, Zaporizhzhia, Ukraine, 69063, tel. +38 (050) 486 27 40, e-mail olgavvn@ukr.net, ORCID 0000-0003-3283-0116

THE INFLUENCE OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF WEAR-RESISTANT CAST IRON ON THE INTERPHASE DISTRIBUTION OF MN AFTER ANNEALING AT 690°C

Purpose. The article is aimed to obtain the regression dependences of manganese distribution between carbides and the metal base on the content of pig iron C, Cr, Mn and Ni after annealing at 690°C. **Methodology.** To achieve this purpose cast iron containing 1.09... 3.91% C; 11.43... 25.57% Cr; 0.6... 5.4% Mn; 0.19... 3.01% Ni and 0.8... 1.2% Si have been studied. To obtain reliable results analytical analysis of publications, microstructural and local micro-X-ray spectral methods, mathematical statistics and regression analysis of the obtained dependences were used. **Findings.** Using the methods of mathematical statistics, regression dependences of the manganese distribution between the phases and the magnitude of its concentration in the metallic basis of high-chromium cast iron on the content of C, Cr, Mn, and Ni after annealing at 690°C were obtained. During annealing, manganese was re-distributed by replacing its atoms with chromium atoms in carbides. The effect of chromium and nickel varied significantly according to the content of manganese in cast iron. The minimum values of the manganese distribution coefficient of 0.16 were observed at the minimum carbon and manganese content and the maximum amount of chromium and nickel. The maximum concentration of manganese in the basis of 5.79% was determined with the minimum content of carbon and nickel and the maximum content of chromium and manganese. This made it possible to determine the chemical compositions of cast iron, which provide the required content of manganese in the metal base after annealing at 690°C. **Originality.** The regression dependences of the manganese content in the base and the coefficient of its interphase distribution on the content in cast iron of C, Cr, Mn and Ni after annealing at 690°C were obtained. **Practical value.** The obtained dependences of manganese distribution between phases in high-chromium cast iron after annealing at 690°C can be used during the development of the new wear resistant cast irons in the system Fe-C-Cr-Mn-Ni for castings that require heat treatment.

Keywords: wear-resistant cast iron; annealing; manganese; metal base; carbides; distribution between phase

REFERENCES

1. Brykov, M. N., Yefremenko, V. G., & Yefremenko, A. V. (2014). *Iznosostoykost staley i chugunov pri abrazivnom iznashivanii*. Herson: Grin D. S. (in Russian)
2. Vakulenko, I. A., & Bolshakov V. I. (2008). *Morfologiya struktury i deformatsionnoye uprochneniye stali*. Dnipropetrovsk: Makovetskyi. (in Russian)
3. Volchok, I. P., & Netrebko, V. V. (2015). Effect of alloying and heat treatment on the distribution of the elements and properties of high chrome cast iron. *Scientific bulletin of DSEA*, 3(18E), 52-59. (in Russian)
4. Garber, M. Ye. *Iznosostoykie belye chuguny*. (2010). Moscow: Mashinostroenie. (in Russian)
5. Gudremon, E. (1966). *Spetsialnyye stali*. Moscow: Metallurgiya. (in Russian)
6. Gulyaev, A. P., & Gulyaev, A. A. (2015). *Metallovedenie*. Moscow: Alyans. (in Russian)
7. Evseeva, N. A. & Mishenko, V. G. (2017). The phase change corrosion resistant steel 03X17H3Г9МБДЮЧ during heating and cooling. *Construction, materials science, mechanical engineering*, 95, 79-81. (in Russian)
8. Yefremenko, V. G., & Chabak, Yu. G. (2015). *Formirovanie struktury v vysokokhromistyykh chugunakh: monografiya*. Mariupol: PSTU. (in Russian)
9. Efremenko, V. G., & Chabak, Yu. G. (2016). *Formirovanie struktury v vysokokhromistyykh: monografiya*. Mariupol: PSTU. (in Russian)
10. Efremenko, V. G., Cheiliakh, O. P., Kozarevska, T. V., Shimizu, K., Chabak, Y. G., & Efremenko, O. V. (2014). Phase chemical elements distribution in complex-alloyed white cast iron. *Reporter of the Priazovskyi state technical university. Section: Technical sciences*, 28, 89-99. (in Russian)
11. Kirillov, A. A., Belov, V. D., Rozhko, Y. V., Diadkova, A. Y., & Zueva, I. E. (2007). Strukturno i nestrukturno chuvstvitelnyye svoystva khromistyykh chugunov. *Stahl und Eisen*, 9, 7-13. (in Russian)
12. Kutsova, V. Z., Kovzel, M. A., Hrebeneva, A. V., Ratnikova, I. V., & Shvets, P. Yu. (2016). Vplyv termichnoi obrobky na znosostiikist ta pererozpodil lehuichuykh elementiv u strukturi chavunu 280×32n3f v protsesi znosu tertiam. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*, 1, 72-80. (in Ukrainian)
13. Malinov, L. S., & Malinov, V. L. (2014). Wear-resistant manganese steel with metastable austenite and the effect of self-hardening under loading. *Metallurgical processes and equipment*, 2, 16-18. (in Russian)

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

14. Netrebko, V. V., & Volchok, I. P. (2016). Influence of the cast iron's chemical composition on the interphase distribution of Mn. *Science and Transport Progress*, 6(66), 115-123.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/90489>. (in Russian)
15. Netrebko, V. V. (2016). About the issue of carbides Fe_3C and Fe_7C_3 formation in high-chromium cast irons. *Science and Transport Progress*, 3(63), 138-147. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/7473> (in Russian)
16. Cheylyakh, Ya., Tsurkan, M., & Cheylyakh, O. (2017). Funkcyonalnye materialy i tekhnologii s efektom samouprochneniya pri ekspluatatsii i ikh ekonomicheskaya effektivnost. *Metal and Casting of Ukraine*, 1(284), 20-29. (in Russian)
17. Belikov, S., Volchok, I., & Netrebko, V. (2013). Manganese influence on chromium distribution in high-chromium cast iron. *Archives of Metallurgy and Materials*, 58(3), 895-897.
DOI: <https://doi.org/10.2478/amm-2013-0095> (in English)
18. Efremenko, V. G., Wu, K. M., Chabak, Y. G., Shimizu, K., Isayev, O. B., & Kudin, V. V. (2018). Alternative Heat Treatments for Complex-Alloyed High-Cr Cast Iron Before Machining. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 49(8), 3430-3440 (in English). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-018-4722-0> (in English)
19. Gierek, A., & Bajka, L. (1976). *Zeliwo stopowe jako tworzywo konstrukcyjne*. Katowice: Slask. (in Polish)
20. Zhang, Y., Shimizu, K., Yaer, X., Kusumoto, K., & Efremenko, V. G. (2017). Erosive wear performance of heat treated multi-component cast iron containing Cr, V, Mn and Ni eroded by alumina spheres at elevated temperatures. *Wear*, 390-391, 135–145. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.07.017> (in English)

Надійшла до редколегії: 27.09.2019

Прийнята до друку: 28.01.2020

УДК 621.791.14

С. О. ПЛІТЧЕНКО^{1*}, М. М. ГРИЩЕНКО²

^{1*}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 56, ел. пошта plitchenko@ukr.net, ORCID 0000-0002-0613-2544

²Каф. «Прикладна механіка та матеріалознавство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. пошта dnuzt_texmat@ukr.net, ORCID 0000-0002-3690-5130

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ РОЗВИТКУ СТРУКТУРНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ПІД ЧАС ЗВАРЮВАННЯ ТЕРТЯМ ІЗ ПЕРЕМІШУВАННЯМ БАГАТОФАЗОВОГО АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ

Мета. За основну мету роботи ми ставимо: дослідження умов розвитку структурних перетворень під час зварювання тертям із перемішуванням (ЗТП); встановлення характеру окремого внеску структурних складових у досягнення умов надпластичної течії; визначення характеру впливу розміру зерна на мікротвердість матриці сплаву під час ЗТП. **Методика.** Зварювання тертям із перемішуванням виконано на спеціально розробленому обладнанні. Матеріалом були пластини товщиною 2,9 мм зі сплаву алюмінію АМг6 із хімічним вмістом легувальних елементів у межах марочного складу. Температуру та тиск від інструмента на кромки під час зварювання визначено на спеціально розробленому стенді. Силу притискання інструмента до металу виміряно динамометром типу ДС–0,1. За характеристики міцності мікрооб'ємів сплаву було взято мікротвердість, яку виміряно на приладі ПМТ–3, за навантаження на індентор 0,05 Н. **Результати.** За різних співвідношень частоти обертання робочого інструмента та нормального притискання до кромок визначено ступінь нагрівання металу та якість формування шва. Оцінено ступінь впливу технологічних параметрів ЗТП на температуру розігріву металу в зоні дії заплечиків робочого інструмента. Розглянуто розвиток рекристалізаційних процесів в умовах двофазних сплавів. Показано, що збиральна рекристалізація меншою мірою визначається об'ємною часткою другої фази, її дисперсністю та спроможністю взаємодіяти з металевою матрицею. Оцінено вплив градієнта температур на величину мікротвердості для структур зони термічного впливу, за умов практично незмінної морфології зерен. **Наукова новизна.** Визначено умови розвитку структурних перетворень під час зварювання тертям із перемішуванням та механізм впливу розміру зерна на мікротвердість матриці. Перевищення оптимальної температури в зоні з'єднання під час зварювання сприяє прискоренню дифузії по межах між фазами та зерен, що призводить до формування градієнта концентрацій легувальних елементів, і в першу чергу Mg, збільшуючи ефект зміцнення від стану твердого розчину. **Практична значимість.** У результаті дослідження визначено адитивний характер зміцнення від впливу твердого розчину та меж зерен за умов надпластичної течії. Стан, наближений до надпластичного, досягається за рахунок зменшення ефекту зміцнення твердого розчину та збільшення внеску від меж дрібних зерен. Досягнення стану надпластичної деформації стає можливим завдяки максимальному зменшенню ефекту деформаційного зміцнення.

Ключові слова: зварювання тертям із перемішуванням (ЗТП); теплова енергія; робочий інструмент; розмір зерна; оптимальна температура

Вступ

За результатами досліджень [5, 11, 12] процесу зварювання тертям із перемішуванням (ЗТП) визначена залежність якості зварного шва від технологічних чинників, що спрямовані на досягнення високого рівня пластичності металу для перемішування його в області шва. Технологія зварювання тертям із перемішуван-

ням у першу чергу залежить від розвитку процесів дифузійного масопереносу за час дії робочого інструмента. На підставі цього, максимальний розігрів металу, за [10, 13], є найбільш необхідною умовою, а якість шва повинна бути пропорційною температурі нагрівання. Разом із цим, за даними [8, 11], визначається вплив розвитку процесів структурних перетворень і відповідна залежність комплексу властивостей, у першу чергу характеристик міцності зварного

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

з'єднання. Необмежене підвищення температури сплаву від роботи інструмента супроводжується відповідним прискоренням розвитку процесів статичних та динамічних структурних перетворень.

Визначена чутливість технології ЗТП до температури та швидкості пластичної деформації призводить до ускладнень у керуванні процесами структуроутворення. Неоднорідність температурного поля впливає на структурну ліквідацію, що негативно позначається на комплексі властивостей зварного з'єднання.

Дослідження умов розвитку структурних перетворень під час зварювання тертям із перемішуванням із використанням структуроутворення стане запорукою удосконалення вказаної технології.

За визначеною формою робочого інструмента забезпечується одночасний розігрів і перемішування металу кромки по товщині та в одній із поверхонь шва. Запечки інструмента забезпечують формування необхідного градієнта температур у зоні з'єднання, а штифт сприяє переходу металу по всьому об'єму в надпластичний стан із відповідним перемішуванням.

За надпластичною течією металевих матеріалів діюче напруження й розмір зерна пов'язані співвідношенням:

$$\sigma = Ad^a, \quad (1)$$

де d – розмір зерна; a – узятو приблизно рівним 1; A – постійна [2].

За (1), обґрунтованою метою є отримання структури з наддрібним розміром зерна від 1 до декількох мкм. Другою умовою є досягнення великої пластичності, що обумовлено підтримкою незмінним розміру зерна під час пластичної течії. За кривими навантаження, характерною ознакою досягнення надпластичної течії є незмінність або зниження діючого напруження за деформації.

Існування визначеного співвідношення в розподілі зерен за розмірами обумовлене необхідністю підтримки безперервного розповсюдження пластичної течії в різних мікрооб'ємах металу. Так, найбільш дрібні зерна деформуються примусово уздовж меж із великими кутами дезорієнтації, що забезпечується низьким рівнем діючого напруження. Разом із

чим зерна великих розмірів деформуються по всьому об'єму, що визначає необхідність безперервного підвищення діючого напруження. За численними дослідженнями, такий механізм може бути реалізований лише для сплавів із низькими гомологічними температурами.

Таким чином, для різних груп зерен (умовно великих і малих розмірів) слід очікувати розвитку надпластичної течії за різних механізмів. За температур, нижчих від оптимального значення, коли пластичних властивостей металу стає недостатньо для досягнення потрібного рівня його перемішування, сліди від дії робочого інструмента стають грубішими, з явними ознаками відриву дисперсних фрагментів [11].

З іншого боку, коли відбувається перегрів металу до температур, вищих за оптимальне значення [7, 8], зона термічного впливу і шов мають міцність значно нижчу від похідного стану.

Рештки впливу від процесів деформаційного зміцнення в разі розповсюдження пластичної деформації можуть стати чинником підвищення міцності металу шва до рівня похідного стану. Порушення балансу між накопиченням дефектів кристалічної будови під час ЗТП та їх анігіляцією, за температур 0,8...0,85 від температури плавлення [5], механізм структуроутворення може бути якісно іншим. За [2], надпластична течія повинна супроводжуватися обертанням випадково орієнтованих зерен від напрямку діючого напруження, або чергуванням проковзування металу поблизу з межами зерен, із подальшою їх міграцією [4], як у випадку збиральної рекристалізації [1].

Мета

За основну мету роботи ми ставимо: дослідження умов розвитку структурних перетворень під час зварювання тертям із перемішуванням; визначення ступеня впливу об'ємної частки другої фази двофазних сплавів системи Al–Mg на процеси в матриці під час зварювання тертям із перемішуванням; встановлення характеру окремого внеску структурних складових у досягнення умов надпластичної течії; визначення характеру впливу розміру зерна на мікротвердість матриці сплаву під час ЗТП.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Методика

Для досліджень обрано сплав на основі алюмінію із вмістом 6,5 % Mg, 0,85 % Mn, 0,13 % Fe, 0,135 % Cu, решта Al. Пластини товщиною 2,9 мм піддавали зварюванню в стик за технологією ЗТП на устаткуванні [10]. Форма й розміри робочого інструмента аналогічні [11]. За співвідношеннями частоти обертання (ω) інструмента від 800 до 1 600 хв⁻¹ і сили його притискання (P) від 0,58 до 1,4 кН до кромок за швидкості переміщення вздовж шва 40 мм/хв визначено температуру нагрівання сплаву. Для вимірювання температури (T) використано термопари типу хромель–алюмель, які розташовували на різній відстані від зварного з'єднання. Структуру досліджено під мікроскопом «Еріquant», за збільшень від 50 до 500 разів. Підготовку об'єкта для досліджень структури та оцінку розміру зерна здійснено відповідно до методик кількісної металографії. Характеристикою міцності мікрооб'ємів сплаву було взято мікротвердість (H_μ). H_μ виміряно на приладі ПМТ-3 за навантаження на індентор 0,05 Н.

Результати

Температура розігріву кромок шва поблизу з коренем з'єднання за оцінкою енергії активації процесу ЗТП [11] в дійсності визначає характер залежності швидкості розігріву металу від основних технологічних параметрів (рис. 1, а). За характером залежності крива нагрівання повинна бути розділена на три частини з якісно різним характером зміни температури.

Для першої ділянки, пропорційно швидкості обертання робочого інструмента й сили притискання його до з'єднувальних кромок, відбувається підвищення температури сплаву. На другій ділянці монотонне збільшення температури досягається за постійної сили притискання інструмента, а на останній – за її зниження.

Аналіз характеру співвідношення $T \sim (P, \omega)$ (рис. 1, а) свідчить, що момент порушення прямо пропорційної залежності відповідає однаковій температурі 90 °С. Слід вважати, що за такої температури досягаються умови, коли ефект пом'якшення компенсує частину деформаційного зміцнення від пластичної течії. Дійс-

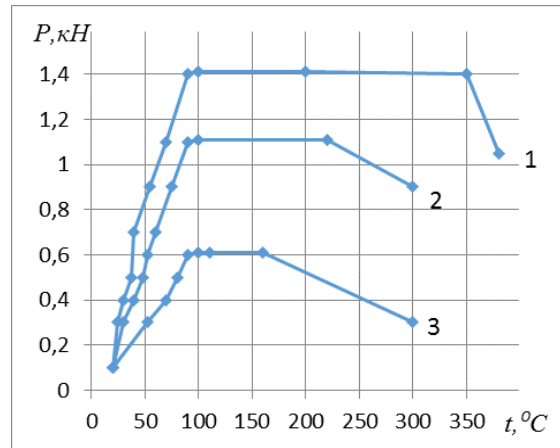
но, підвищення температури гарячого обтискування, приводячи до прискорення процесів дифузійного масопереносу, визначає співвідношення в розвитку вказаних процесів [13]. Структурні перетворення є результатом формування дислокаційних полігональних осередків із різним типом субмеж і кутів дезорієнтації [1].

Відома залежність $T \sim (P, \omega)$ (рис. 1, а):

$$T_R = 0,4 \cdot T_S, \quad (2)$$

де T_R і T_S – відповідно температури розвитку процесів рекристалізації та плавлення металевого матеріалу [10].

а – а



б – б

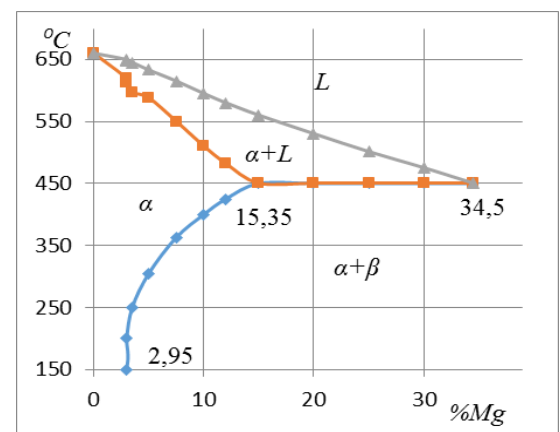


Рис. 1. Співвідношення між температурою нагрівання поверхні сплаву, P і ω робочого інструмента (1 – 800; 2 – 1 250; 3 – 1 600 хв⁻¹) (а) та частина діаграми стану Al–Mg (б)

Fig. 1. Ratio between the heating temperature of the alloy surface, P and ω of the working tool (1 – 800; 2 – 1 250; 3 – 1 600 min⁻¹) (a) and part of the Al–Mg (b) state diagram

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Наведене рівняння дозволить оцінити умови розвитку процесів структурних перетворень під час ЗТП.

Згідно з аналізом (2), температура відхилення від прямо пропорційного співвідношення в дійсності збігається з температурою початку розвитку процесів статичної рекристалізації [1]. Однак для двофазних сплавів розвиток рекристалізації, і в першу чергу збиральної, меншою мірою визначається об'ємною часткою другої фази, її дисперсністю та спроможністю взаємодіяти з металевою матрицею [1].

Так, за діаграмами стану двокомпонентних систем Al–Mg, Al–Mn, Al–Fe, досліджуваний сплав складається з α -твердого розчину і частинок другої фази: Al_2Mg (рис. 1, б), Al_6Mn та Al_3Fe . За діаграмами, хімічні з'єднання належать до частково взаємодійних із матрицею. Температурний інтервал існування фаз визначає, що після нагрівання вище за 270...280 °С, для вмісту 6,5 % Mg, повинні повністю бути розчинені частинки β -фази (рис. 1, б), а вище за 480 °С уже будуть розчинені Al_6Mn та Al_3Fe . Хоча, за реальних умов зварювання, високий градієнт температур та визначена інерція системи повинні зсунути момент деградації хімічних з'єднань у бік більш високих температур від ліній фазової рівноваги. У разі сприятливих умов розвитку ЗТП, за температур досліджуваного сплаву 380...470 °С, у дійсності відбувається прискорення процесів дифузійного масопереносу, що призведе до деградації хімічних з'єднань. Більше того, указані процеси призведуть до виникнення градієнта концентрації легувальних хімічних елементів, і в першу чергу Mg в матриці, що збільшить ефект зміцнення сплаву від стану твердого розчину.

Окрім температури розігріву, слід очікувати впливу на стан матриці деформації від дії стрижня та заплечиків робочого інструмента. Підтримка визначеного співвідношення між зародженням та анігіляцією дислокацій під час ЗТП, збереження їх загальної кількості, проковзування по межах зерен [4] стають додатковим джерелом збагачення матриці на легувальні елементи. На підставі цього структуроутворення під час ЗТП повинно визначатися не тільки зміною розміру зерна, але й станом тве-

рдого розчину, що підтверджується зміною твердості сплаву.

Для забезпечення умов надпластичної течії необхідна підтримка визначеного співвідношення між швидкостями введення й анігіляції дислокацій, а загальна їх кількість буде визначати термодинамічний стимул розвитку процесів динамічної рекристалізації. Разом із цим присутність у структурі частинок хімічних з'єднань може суттєво впливати на умови підтримки незмінним розмір зерна матриці в разі надпластичної течії.

Розвиток процесів збиральної рекристалізації у двофазних металевих матеріалах обумовлений моментом відриву межі зерна матриці від частинок другої фази. У результаті у структурі виникають ділянки з розташуванням частинок у середині зерен. У досліджуваному сплаві одночасний розвиток коалесценції частинок та часткова їх деградація повинні знизити ефект гальмування меж зерен матриці за збиральної рекристалізації.

У загальному вигляді рушійна сила збиральної рекристалізації спрямована на зниження поверхневої енергії внутрішніх меж розподілу в металевому матеріалі.

Протилежну спрямованість має вплив частинок другої фази на міграцію меж зерен під час нагрівання та витримки за певних температур.

Умова відриву межі зерна від частинок дорівнює вказаним впливом у вигляді співвідношення [9]:

$$d = \frac{2 \cdot D}{3 \cdot f}, \quad (3)$$

де d – середній розмір зерна; D – діаметр частинок; f – об'ємна частка другої фази.

За співвідношенням (3), підвищення дисперсності частинок другої фази та їх об'ємної частки супроводжується зменшенням розміру зерна матриці. Коефіцієнт пропорційності є характеристикою, залежною від f . Так, за [1], для вуглецевих сталей зниження об'ємної частки цементиту може призводити до прогресуючого відхилення розрахованих за (3) значень d від реальних після розвитку збиральної рекристалізації. Наведена похибка може бути компенсована лише завдяки зміні коефіцієнта пропорційності.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

На підставі цього надмірне підвищення температури під час ЗТП призведе до виникнення високого градієнта температури кромки, а момент прискореного розчинення хімічних з'єднань буде зсунутий в область більш високих температур.

Як результат виникає додатковий чинник впливу з боку залишків частинок других фаз на процеси структуроутворення в матриці сплаву. Підтвердженням наведеного положення є дані зміни d під час зварювання тертям із перемішуванням.

Для області температур 330...360 °C незначне збільшення температури деформації під заплечиками супроводжується вагомим зниженням рівня деформувального зусилля порівняно з другою ділянкою за постійного P . Характер зміни P можна розглядати як тенденцію в досягненні умов надпластичної течії під час ЗТП. Дійсно, за більшістю досліджень, моментом досягнення умов надпластичної течії вважається різке зниження деформувального зусилля.

За рівнянням (1) може бути виконана вимога лише для структур з однаковими розмірами фаз, на рівні 3...5 мкм [1]. Досягнення максимальної пластичності буде визначатися спроможністю підтримувати незмінною дисперсність структури в цілому.

Після формування зварного шва визначили суттєві зміни структури залежно від локальної температури розповсюдження пластичної деформації (рис. 2). У похідному стані сплав мав структуру з розміром зерна порядку 3...4 мкм.

Під час ЗТП пластична деформація супроводжується обов'язковим формуванням градієнта температур по товщині з'єднувальних кромки. Пов'язано це з відстанню прошарків сплаву від поверхні дії заплечиків робочого інструмента.

Висока чутливість розвитку надпластичної течії в металевих матеріалах до стабільності підтримки умов температурно-деформаційного процесу призводить до того, що незначні відхилення від оптимальних значень супроводжуються різким зниженням пластичності сплаву [1]. Результат детальнішого дослідження мікроструктури сплаву від температури інтенсивного перемішування під час ЗТП наведений на рис. 3.

а – а



б – б

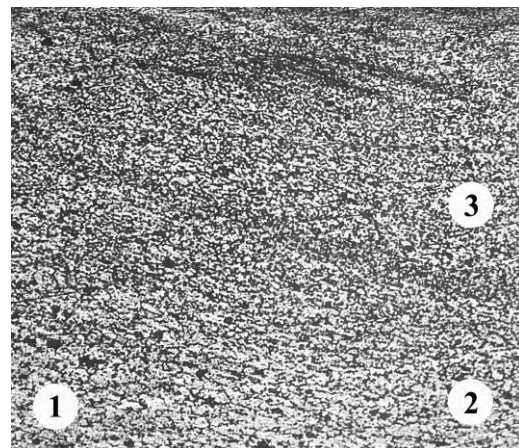


Рис. 2. Структура сплаву в області інтенсивного перемішування під час ЗТП, ($\omega = 1\,250\text{ хв}^{-1}$).

Температура нагрівання сплаву:
1 – 330 °C; 2 – 345 °C; 3 – 360 °C.

Збільшення:
а – 50; б – 175

Fig. 2. Alloy structure in the area of intensive stirring during the friction stir welding, ($\omega = 1\,250\text{ min}^{-1}$).

Alloy heating temp.:
1 – 330°C; 2 – 345°C; 3 – 360°C.

Magnification:
a – 50; b – 175

Дослідження структури свідчать, що морфологія зерен залишається практично незмінною. З іншого боку, уже незначної зміни температури достатньо для початку формування зерен зі спрямуванням розповсюдження пластичних деформацій. Це підтверджується наближенням орієнтації зерен до напрямку дії максимальних дотичних напружень (рис. 2, б).

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

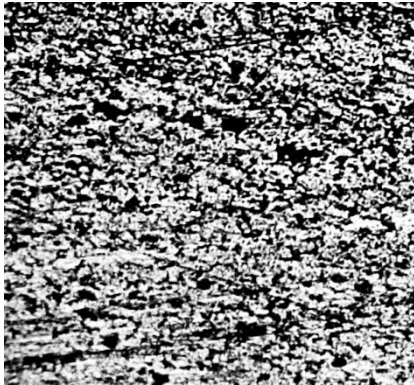
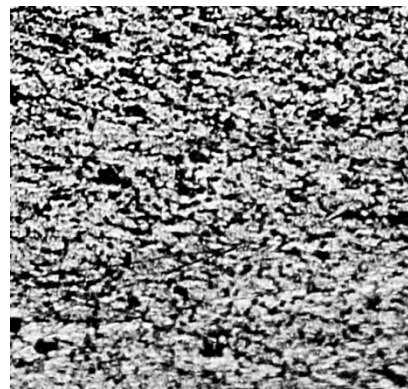
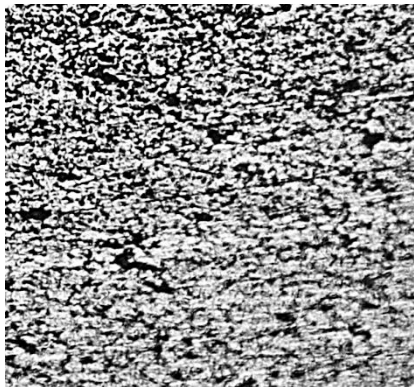
a – a*b – b**в – c*

Рис. 3. Мікроструктура сплаву АМг6 за $\omega = 1\,250\text{ хв}^{-1}$ залежно від температури перемішування, збільшення 500:
a – 330 °C; *b* – 345 °C; *в* – 360 °C

Fig. 3. Microstructure of AMg6 alloy at $\omega = 1\,250\text{ min}^{-1}$ depending on the stirring temperature, magnification 500:
a – 330°C; *b* – 345°C; *c* – 360°C

Із метою розділення впливу на характеристики міцності сплаву від меж зерен і стану твердого розчину було використано співвідношення типу Холла–Петча [1, 2]:

$$\sigma_T = \sigma_i + k_y \cdot d^{-0.5}, \quad (4)$$

де σ_T – умовна межа плинності; σ_i – напруження течії за необмеженого розміру зерна; k_y – коефіцієнт, що визначає проникливість меж зерен розповсюдженню течії.

Широке застосування (4) [1, 3] вказує на можливість використання його для оцінки локальної пластичної деформації на розмір зерен сплаву під час ЗТП за замірами мікротвердості.

Ураховуючи відсутність чіткої межі у структурі між визначеними зонами (рис. 2, *б*), аналіз здійснювали лише для двох об'ємів із температурами 330 і 360 °C. Після оцінки розміру зерна матриці в мікрооб'ємах, з відповідними температурами й мікротвердістю, було побудовано співвідношення для H_μ :

$$H_\mu = H_{\mu_i} + k_y \cdot d^{-0.5}, \quad (5)$$

де характеристики H_{μ_i} і k_y – аналогічні (4).

За результатами кореляційного співвідношення $H_\mu - d$ (рис. 4) можна визначити, що вагомий вплив на рівень H_μ має зерно матриці.

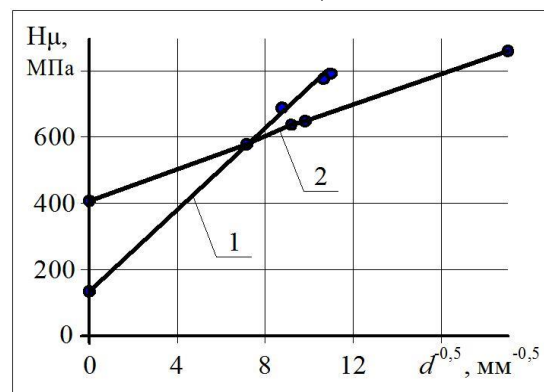


Рис. 4. Вплив розміру зерна α -твердого розчину на мікротвердість, залежно від мікрооб'ємів із температурою сплаву:
 1 – 360 °C; 2 – 330 °C

Fig. 4. Effect of grain size of α -solid solution on microhardness, depending on micro-volumes with alloy temperature:
 1 – 360°C; 2 – 330°C

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Разом із цим вплив частинок другої фази залежить від їх розташування у структурі металевих матеріалів. Коли частинки мають розташування в середині зерен, відбувається перехід ролі основного структурного елемента від розміру зерна до відстані між частинками. За параметрами (5) визначено, що збільшення температури розігріву від 330 до 360 °С знижує внесок у рівень мікротвердості від стану твердого розчину (H_{μ}), а опір розповсюдженню течії від меж зерен із великими кутами дезорієнтації зростатиме більше як у два рази.

У наслідок такого характеру впливу стає можливим розділити внесок структурних складових у досягнення умов надпластичної течії. За підвищення температури ефект зміцнення від стану твердого розчину буде знижуватися, а внесок від меж зерен буде зростати.

Окрім цього, стає в нагоді порівняння мікротвердості для однакових d , але за різних температур деформації. Відомо, що в разі зниження температури напруження течії від деформаційного зміцнення буде зростати, хоча рівень пом'якшення за термін витримки металу у випадку таких температур буде більшим [1].

Підтверджує це рис. 4. Для розміру зерна 8 мкм після ЗТП в об'ємі сплаву з температурою 330 °С H_{μ} після охолодження дорівнює менше ніж 700 МПа, а для об'єму з 360 °С – приблизно на 15 % вище. Для інтервалу відносно більших d може бути інше співвідношення. Після екстраполяції на розмір зерна 28 мкм отримано значення H_{μ} 520 МПа для 330 °С, а для об'єму з температурою 360 °С – 480 МПа.

Таким чином, отримано якісно різне співвідношення $H_{\mu}^{330} > H_{\mu}^{360}$, ніж для 330 °С. Наведені співвідношення H_{μ} для двох температур та розмірів зерна слід розглядати як оцінку впливу деформаційного зміцнення в досягнення умов надпластичної течії. За даними вуглецевих сталей, у разі збільшення d фериту [1] параметри деформаційного зміцнення зростають, що підтверджує необхідність формування структури з наддрібним зерном для розвитку надпластичної течії.

Інша складова технології – це підтримка стабільного співвідношення між швидкістю деформації та температурою [8, 12].

За отриманими результатами (рис. 1 – 4), технологічні параметри повинні забезпечувати мінімальний внесок від впливу деформаційного зміцнення в розвиток надпластичної течії. Окрім формування наддрібного зерна та підтримки незмінної кількості дислокацій для розповсюдження надпластичної течії.

Слід враховувати можливий внесок від додаткового чинника – стану твердого розчину, якому практично не приділено уваги.

Ураховуючи, що дослідження технології ЗТП у більшості випадків обмежуються формуванням стикових з'єднань, було здійснено спроби застосування такої технології для зварювання елементів з іншим розташуванням у просторі. На рис. 5 наведено результат під час проходження інструмента уздовж гребеня куткового з'єднання (рис. 5, а). Порівняно з відомими результатами [6, 7], рис. 5, було внесено якісні зміни у форму робочого інструмента, особливо щодо форми поверхні заплечиків (рис. 5, в). Порівняно зі стиковим з'єднанням, більший об'єм металу кромок визначає необхідність проведення додаткових досліджень стосовно формування температурного поля і його впливу на рівень остаточних напружень у зоні шва й області термічного впливу.

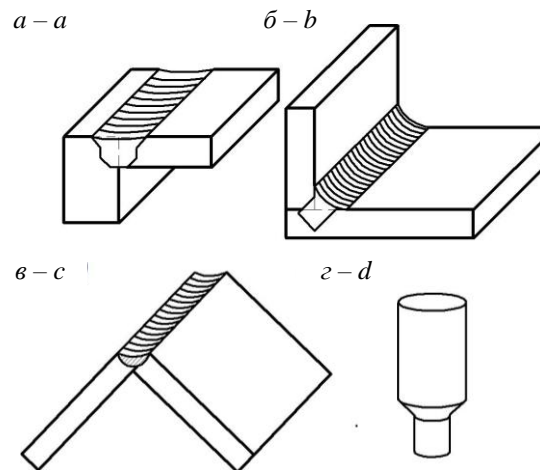


Рис. 5. Види зварних з'єднань та різновид інструмента:

- а – зовнішнє стандартне кутове ; б – внутрішнє кутове;
- в – зовнішнє кутове гребеневе;
- г – робочий інструмент спеціальної конструкції

Fig. 5. Types of welded joints and variety of tools:
а – external standard bias welding; б – internal bias welding;
в – external ridged bias welding;
г – working tool of special design

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

У цілому слід вважати, що для досягнення умов надпластичної течії повинен бути максимально знижений ефект від розвитку процесів деформаційного зміцнення.

Наукова новизна та практична значимість

Визначено умови розвитку структурних перетворень під час зварювання тертям із перемішуванням та механізм впливу розміру зерна на мікротвердість матриці. Перевищення оптимальної температури в зоні з'єднання під час зварювання сприяє прискоренню дифузії по межах між фазами та зерен, що призводить до формування градієнта концентрацій легувальних елементів, і в першу чергу Mg, збільшуючи ефект зміцнення від стану твердого розчину.

Висновки

1. У результаті дослідження визначено адитивний характер зміцнення від впливу твердого розчину та меж зерен за умов надпластичної течії.

2. Стан, наближений до надпластичного, досягається за рахунок зменшення ефекту зміцнення твердого розчину та збільшення внеску від меж дрібних зерен.

3. Досягнення стану надпластичної деформації стає можливим завдяки максимальному зменшенню ефекту деформаційного зміцнення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вакуленко И. А., Большаков В. И. *Морфология структуры и деформационное упрочнение стали*. Днепро : Маковецкий, 2008. 196 с.
2. Грабский М. В. *Структурная сверхпластичность*. Москва : Металлургия, 1975. 272 с.
3. Crist B. W., Smith C. V. Comparison of the Hall–Petch parameters of zone–refined iron determined by the grain size and extrapolation methods. *Acta Metallurgica*. 1967. Vol. 15. Iss. 5. P. 809–816. DOI: [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(67\)90362-8](https://doi.org/10.1016/0001-6160(67)90362-8)
4. Hubbard D. *Plastic Deformation: Processes, Properties and Applications*. USA : Nova Science Publishers, 2016. 198 p.
5. Kumar S. Dharani, Kumar S. Sendhil. Investigation of mechanical behavior of friction stir welded joints of AA6063 with AA5083 aluminum alloys. *Mechanics and Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 23. Iss. 1. P. 59–63. DOI: <https://doi.org/10.2478/mme-2019-0008>
6. Mishra A., Tiwari A., Shukla M. K., Rose A. R. Analysis of Tools used in Friction Stir Welding process. *International Journal of Current Engineering and Technology*. 2018. Vol. 8. No 6. P. 1519–1524. DOI: <https://doi.org/10.14741/ijcet/v.8.6.2>
7. Mishra R. S., Mahoney M. W. Friction stir welding and processing. Ohio : ASM International, 2007. 355 p.
8. Rane Abhishek J., Yadav Milind S. Effect of friction stir welding process on mechanical and thermal behavior of dissimilar materials. *International journal of engineering sciences & research technology*. 2018. Vol. 7 (4). P. 420–428. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1218671>
9. Smith C. S. Grains, phases and interfaces: An interpretation of microstructure. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 1948. Vol. 175. P. 15–67. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-010-0215-5>
10. Vakulenko I. O., Plitchenko S. O. Determination activation energy of friction stir welding. *Welding and Related Technologies* : Proc. of 9th Intern. Conf. of Young Scientists (Kyiv, 23–26 May 2017). Kyiv, 2017. P. 54–58.
11. Vakulenko I. O., Plitchenko S. O., Murashova N. H., Bohomaz V. N. Concept of determining the friction stir welding mode. *Науковий вісник НГУ*. 2018. No 4. P. 99–105. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-4/9>
12. Villegas J. F., Dominguez J. V., Ochoa G. V., Unfried-Silgado J. Thermo-Mechanical Modeling of Friction-Stir Welding Tool Used in Aluminum Alloys Joints. *Contemporary Engineering Sciences*. 2017. Vol. 10. No. 34. P. 1659–1667. DOI: <https://doi.org/10.12988/ces.2017.711156>
13. Xiao Y., Zhan H., Gu Y., Li Q. Modeling heat transfer during friction stir welding using a meshless particle method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 104. P. 288–300. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jheatmasstransfer.2016.08.047>

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

С. А. ПЛИТЧЕНКО^{1*}, Н. Н. ГРИЩЕНКО²

^{1*}Каф. «Прикладная механика и материаловедение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56,

эл. почта plit4enko@ukr.net, ORCID 0000-0002-0613-2544

²Каф. «Прикладная механика и материаловедение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56,

эл. почта dnuzt_texmat@ukr.net, ORCID 0000-0002-3690-5130

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ РАЗВИТИЯ СТРУКТУРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ МНОГОФАЗНОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

Цель. В качестве основной цели работы мы ставим: исследование условий развития структурных преобразований при сварке трением с перемешиванием (СТП); установку характера отдельного вклада структурных составляющих в достижение условий сверхпластического течения; определение характера влияния размера зерна на микротвердость матрицы сплава при СТП. **Методика.** Сварку трением с перемешиванием выполнено на специально разработанном оборудовании. Материалом были пластины толщиной 2,9 мм из сплава алюминия АМгб с химическим содержанием легирующих элементов в пределах марочного состава. Температуру и давление от инструмента на кромки при сварке определено на специально разработанном стенде. Силу прижатия инструмента к металлу измеряно динамометром типа ДС–0,1. В качестве характеристики прочности микрообъемов сплава была принята микротвердость, которую измеряно на приборе ПМТ–3, при нагрузке на индентор 0,05 Н. **Результаты.** При различных соотношениях частоты вращения рабочего инструмента и нормального прижатия к кромкам определено степень нагрева металла и качество формирования шва. Оценена степень влияния технологических параметров СТП на температуру разогрева металла в зоне действия заплечиков рабочего инструмента. Рассмотрено развитие рекристаллизационных процессов в условиях двухфазных сплавов. Показано, что собирательная рекристаллизация в меньшей степени определяется объемной долей второй фазы, ее дисперсностью и способностью взаимодействовать с металлической матрицей. Оценено влияние градиента температур на величину микротвердости для структур зоны термического влияния, в условиях практически неизменной морфологии зерен. **Научная новизна.** Определены условия развития структурных преобразований при сварке трением с перемешиванием и механизм влияния размера зерна на микротвердость матрицы. Превышение оптимальной температуры в зоне соединения при сварке способствует ускорению диффузии по границам между фазами и зерен, что приводит к формированию градиента концентраций легирующих элементов, и в первую очередь Mg, увеличивая эффект упрочнения от состояния твердого раствора. **Практическая значимость.** В результате исследования определен аддитивный характер упрочнения от воздействия твердого раствора и границ зерен в условиях сверхпластического течения. Состояние, приближенное к сверхпластическому, достигается за счет уменьшения эффекта упрочнения твердого раствора и увеличения вклада от границ мелких зерен. Достижение состояния сверхпластической деформации становится возможным благодаря максимальному уменьшению эффекта деформационного упрочнения.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием (СТП); тепловая энергия; рабочий инструмент; размер зерна; оптимальная температура

S. O. PLITCHENKO^{1*}, M. M. GRISCHENKO²

^{1*}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 56, e-mail plit4enko@ukr.net, ORCID 0000-0002-0613-2544

²Dep. «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 56, e-mail dnuzt_texmat@ukr.net, ORCID 0000-0002-3690-5130

RESEARCH OF DEVELOPMENT CONDITIONS OF STRUCTURAL TRANSFORMATIONS DURING FRICTION STIR WELDING OF MULTIPHASE ALUMINUM ALLOY

Purpose. We aim to investigate the development conditions of structural transformations during friction stir welding (FSW); establish the nature of individual influence of structural components in achieving superplastic flow conditions; determine the influence nature of grain size on the groundmass microhardness during FSW. **Methodology.** Friction stir welding was performed on specially designed equipment. The material was 2.9 mm thick AMg6 aluminum alloy plates with the chemical content of alloying elements within the grade composition. The temperature and pressure from the tool on the edges during welding were determined on a specially designed stand. The tool pressing force to the metal was measured with a dynamometer type DC-0.1. Microhardness measured on the PMT-3 device with the indentation load of 0.05 N was taken as a characteristic of alloy microvolumes strength. **Findings.** Different degrees of rotation of the working tool and normal pressure to the edges determined the degree of metal heating and the quality of the seam formation. The influence degree of the technological parameters of the FSW on the metal heating temperature in the area of the working tool shoulder is estimated. The development of recrystallization processes in the conditions of two-phase alloys is considered. It has been shown that collective recrystallization is less determined by the volume fraction of the second phase, its dispersity and ability to interact with the metal matrix. The effect of the temperature gradient on the microhardness for the structures of the heat-affected zone is estimated under conditions of a practically unchanged grain morphology. **Originality.** The conditions for the development of structural transformations during friction stir welding and the influence mechanism of grain size on the matrix microhardness are determined. Exceeding the optimum temperature in the joint area during welding contributes to the diffusion accelerating along the boundaries between phases and grains, resulting in the formation of a concentration gradient of alloying elements and, first of all Mg, increasing the hardening effect of the solid solution state. **Practical value.** According to the results, the additive character of the hardening from the influence of the solid solution and grain boundaries under the conditions of superplastic flow is determined. A state close to the superplastic flow is achieved by reducing the effect of hardening the solid solution and increasing the contribution from the small grains boundaries. Achieving a state of superplastic deformation is possible by minimizing the effect of strain hardening.

Keywords: friction stir welding (FSW); thermal energy; working tool; grain size; optimum temperature

REFERENCES

1. Vakulenko, I. A., & Bolshakov, V. I. (2008). *Morfologiya struktury i deformatsionnoe uprochnenie stali*. Dnepropetrovsk: Makovetskiy Y. V. (in Russian)
2. Grabskiy M. V. (1975). *Strukturnaya sverkhplastichnost'*. Moscow: Metallurgiya. (in Russian)
3. Christ, B. W., & Smith, G. V. (1967). Comparison of the hall-petch parameters of zone-refined iron determined by the grain size and extrapolation methods. *Acta Metallurgica*, 15(5), 809-816. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(67\)90362-8](https://doi.org/10.1016/0001-6160(67)90362-8) (in English)
4. Hubbard, D. (2016). *Plastic Deformation: Processes, Properties and Applications*. USA: Nova Science Publishers. (in English)
5. Kumar, S. Dharani, & Kumar, S. Sendhil. (2019). Investigation of mechanical behavior of friction stir welded joints of AA6063 with AA5083 aluminum alloys. *Mechanics and Mechanical Engineering*, 23(1), 59-63. (in English)
6. Mishra, A., Tiwari, A., Shukla, M. K., & Rose, A. R. (2018). Analysis of Tools used in Friction Stir Welding process. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 8(6). 1519-1524. <https://doi.org/10.14741/ijcet/v.8.6.2> (in English)
7. Mishra, R. S., & Mahoney, M. W. (2007). *Friction stir welding and processing*. Ohio: ASM International. (in English)
8. Rane, Abhishek J., & Yadav, Milind S. (2018). Effect of friction stir welding process on mechanical and thermal behavior of dissimilar materials. *International journal of engineering sciences & research technology*, 7(4), 420-428. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1218671> (in English)
9. Smith, C. S. (1948). Grains, phases and interfaces: An interpretation of microstructure. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 175, 15-67. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-010-0215-5> (in English)

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

10. Vakulenko, I. O., & Plitchenko, S. O. (2017). Determination activation energy of friction stir welding. *Proceedings of the 9th International Conference Young Scientists Welding and Related Technologies, May 23-26, 2017*, 54-58. (in English)
11. Vakulenko, I. O., Plitchenko, S. O., Murashova, N. H., & Bohomaz, V. N. (2018). Concept of determining the friction stir welding mode. *Naukovyi Visnyk NHU*, 4, 99-105.
DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-4/9> (in English)
12. Villegas, J. F., Dominguez, J. V., Ochoa, G. V., & Unfried-Silgado, J. (2017). Thermo-mechanical modeling of friction-stir welding tool used in aluminum alloys joints. *Contemporary Engineering Sciences*, 10(34), 1659-1667. DOI: <https://doi.org/10.12988/ces.2017.711156> (in English)
13. Xiao, Y., Zhan, H., Gu, Y., & Li, Q. (2017). Modeling heat transfer during friction stir welding using a meshless particle method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 104, 288-300.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.047> (in English)

Поступила в редколлегию: 01.10.2019

Принята к печати: 03.02.2020

МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.865.8:62-231.311

Р. П. ПОГРЕБНЯК^{1*}, М. Р. ПОГРЕБНЯК^{2*}

^{1*}Каф. «Прикладна механіка», Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (091) 906 54 24, ел. пошта rogrebnyakk@ukr.net, ORCID 0000-0002-4685-1818

^{2*}Каф. «Автоматизація та комп'ютерні системи», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (095) 499 75 01, ел. пошта mrogrebnyakk@gmail.com, ORCID 0000-0002-2961-3383

КІНЕМАТИЧНИЙ СИНТЕЗ ПРЯМОЛІНІЙНО-НАПРЯМНИХ ЦЕНТРАЛЬНИХ КРИВОШИПНО-ПОВЗУНКОВИХ МЕХАНІЗМІВ ЗАХОПЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ЗА ЕНЕРГЕТИЧНИМ ІНДЕКСОМ ПЕРЕДАЧІ РУХУ

Мета. Основна мета роботи – виконати кінематичний аналіз і синтез відомих схем прямолінійно-напрямних центральних кривошипно-повзункових механізмів за критерієм енергетичного індексу передачі руху з обмеженням припустимими кутами тиску в кінематичних парах і найменшим відхиленням траєкторії руху від прямолінійності на ділянці наближення. Визначити схему, яка найкраще задовольняє умови синтезу й запропонувати на її основі механізм захоплювального пристрою. **Методика.** Досягнення поставленої мети здійснено засобами аналітичної кінематики плоских механізмів теорії механізмів і машин та математичним моделюванням положень і руху ланок. **Результати.** Проектування механізмів різноманітних захоплювачів, що забезпечують постійне зусилля затискання об'єктів різної товщини зі сталою потужністю приводу та мінімальними енергетичними витратами, може бути виконане за критерієм енергетичного індексу передачі руху (ЕІПР). На його основі проведено аналіз відомих прямолінійно-напрямних центральних кривошипно-повзункових механізмів із подовженим шатуном за критерієм найменшого відхилення від одиниці ЕІПР. З'ясовано, що практичне використання більшості таких механізмів за цим критерієм украй обмежене або неможливе. Оптимізаційним синтезом кінематичних залежностей отримано єдині значення відносних параметрів і діапазон повороту ведучого кривошипа для схеми прямолінійно-напрямого центрального кривошипно-повзункового механізму з подовженим шатуном за повзун, що найкраще задовольняють вимоги критерію оптимізації і виконують обмеження за кутами тиску. На основі оптимальних параметрів схеми центрального прямолінійно-напрямого механізму запропоновано спарений паралелограмний одинадцятиланковий стрижньовий захоплювач, що забезпечує прямолінійний рух затискних елементів зі сталою швидкістю й постійною силою затискання, рівною номінальній рушійній силі приводу. **Наукова новизна.** Уперше проведено якісний і кількісний аналіз відомих схем центральних прямолінійно-напрямних кривошипно-повзункових механізмів за критерієм енергетичного індексу передачі руху (ЕІПР) і виконано оптимальний синтез захоплювального пристрою за результатами проведеного аналізу. **Практична значимість.** Запропоновано практичні рекомендації щодо вибору схеми, відносних розмірів і розташування ланок механізму для центрального прямолінійно-напрямого кривошипно-повзункового механізму захоплювача, які реалізують вимоги критерію оптимізації та обмеження припустимими кутами тиску.

Ключові слова: механічний захоплювач; напрямний механізм; енергетичний індекс передачі руху (ЕІПР); кут тиску

Вступ

До захоплювальних пристроїв маніпуляторів, як до окремих механізмів з індивідуальним приводом, висувають різноманітні вимоги щодо їх функціональності, простоти, енергоефективності, надійності та ін. Однією з найбільш вагомих вимог є універсальність як здатність затискати й утримувати різні об'єкти за розмірами, вагою та конфігурацією без переналагодження та заміни робочих елементів. При цьому сила затискання об'єктів різних розмірів повинна бути достатньою і сталою для надійного їх утримання під час перехідних режимів роботи руки маніпулятора. Окрім цього, об'єкт не повинен бути пошкоджений або зруйнований.

Кінематичні схеми простих механічних стрижньових захоплювачів мають невелику кількість рухомих ланок і, зазвичай, один ступінь свободи й один двигун приводу. Переважна більшість таких механізмів є діадними з однорухомими кінематичними з'єднаннями.

Ще одна важлива вимога конструювання механізмів захоплювачів – забезпечення прямолінійного руху затискних елементів у всьому діапазоні їх переміщення. Така траєкторія руху забезпечує співпадіння центра захоплювача з центром робочих елементів [9] у всьому діапазоні товщин затискуваних деталей і гарантує їх високу точність базування. Зазвичай кінематичні схеми таких захоплювачів у яких затискні елементи здійснюють точний прямолінійний рух, більш складні.

При конструюванні захоплювачів, що реалізують умову прямолінійного руху затискних елементів, можливе застосування схем прямолінійно-напрямних механізмів. Такі стрижньові механізми використовують для відтворення на всій або окремій ділянці руху точки ланки траєкторії, близької до прямої лінії. Ця ланка утворює кінематичні пари тільки з рухомими ланками механізму.

Найвідоміші та найпоширеніші напрямні механізми запропоновані й розроблені давно. Відомі випрямляльні кулісні конхoidalні механізми, еліптичні та λ -подібні прямилі, чотирьохланкові прямилі Рело, Дежонжа, Уатта, Чебишева, Робертса, Еванса, Скотта, Рассела [1, 7, 8] та ін. Прямолінійний рух певної точки шатуна в цих механізмах можливий тільки на обме-

женій ділянці траєкторії та за визначеними відношеннями довжин ланок. Із різних причин не всі вони підходять для використання в механізмах захоплювачів. Теоретично доведено, що точний рух по прямій лінії будь-якої точки шатуна шарнірного механізму можливий тільки для не менш ніж шестиланкової схеми. Для здійснення прямолінійного руху всього затискного елемента захоплювача до механізму додають діаду, що утворює паралелограм.

Оскільки в чотирьохшарнірного механізму траєкторія руху лише наближена до прямої, то геометричний синтез таких механізмів зводиться до визначення відносних розмірів ланок і їх розташування за умови найменшого й симетричного відхилення дійсної траєкторії руху від прямолінійної. Як показує досвід такого проектування, зменшення відхилення відбувається за рахунок зменшення довжини ділянки прямолінійного руху. Відоме [2] аналітичне визначення відносних розмірів ланок, що забезпечує мінімальне симетричне відхилення дійсної траєкторії руху точки шатуна від прямолінійної, яке здійснене П. Чебишевим для його чотирьохшарнірного λ -подібного прямилі: $2\lambda = 3 - \rho$, де $\lambda = l/a$, $\rho = r/a$, l – довжина шатуна і коромисла, a – довжина станини. Можливе визначення довжини прямолінійної ділянки й величини відхилення від прямолінійної траєкторії точки шатуна, значення якого може бути незначним.

Дослідники запропонували велику кількість різних схем і конструкцій захоплювачів різного призначення, у тому числі й механічних стрижньових [1, 3, 9, 13, 17, 19], однак питання оптимального метричного синтезу схеми механізму за певними критеріями руху з визначенням оптимальних розмірів і положень ланок механізму залишаються складними і мало вивченими. Відомі роботи українських учених школи проф. Я. Кіницького з аналітичного дослідження важільних механізмів із зупинкою веденої ланки на базі напрямних кривошипно-повзункових механізмів [4, 5, 6]. Щодо механізмів захоплювачів, в основі яких лежать схеми кривошипно-повзункових прямолінійно-напрямних механізмів, то їх раціональний метричний синтез за певними критеріями практично не досліджений.

Слід зауважити, що для уникнення додаткових динамічних навантажень кінематичний синтез напрямних механізмів захоплювачів пот-

МАШИНОБУДУВАННЯ

рібно вести в напрямі пошуку сталої швидкості затискних елементів на ділянці прямолінійного руху.

Проектування механізмів захоплювачів, що забезпечують постійне зусилля затискання об'єктів різної товщини зі сталою потужністю приводу та мінімальними енергетичними витратами, потрібно виконувати за критерієм енергетичного індексу передачі руху (ЕПР) [10]:

$$\frac{V_{вих}}{V_{ex}} \cos \alpha = U_V \sim 1.$$

Для схем наближених прямолінійно-напрямних механізмів кут α між вектором сили затискання $P_{вих}$ і вектором швидкості $V_{вих}$ точки прикладання цієї сили прийнятий рівним π , тоді ЕПР можна визначати за залежністю:

$$\frac{V_{вих}}{V_{ex}} = |U_V| \sim 1.$$

Кінематичний синтез за подібним трансмісійним індексом для інших механізмів стрижневих захоплювачів виконаний у роботах [12, 14, 15, 18, 19, 20].

Мета

Основна мета роботи – виконати кінематичний аналіз і синтез схем прямолінійно-напрямних механізмів центрального кривошипно-повзункового захоплювального пристрою за критерієм енергетичного індексу передачі руху із обмеженням припустимими кутами тиску в кінематичних парах і найменшим відхиленням траєкторії руху від прямолінійності на ділянці наближення.

Методика

Досягнення поставленої мети здійснено заходами аналітичної кінематики плоских стрижневих механізмів та математичним моделюванням положень і руху ланок.

Результати

Проведемо якісний аналіз придатності прямолінійно-напрямних центральних кривошипно-повзункових механізмів задоволенню їх відомих схем критерію енергетичного індексу передачі руху.

Центральний кривошипно-повзунковий напрямний механізм із параметрами $OA = AB = AC$ (рис.1) забезпечує точний прямолінійний рух точки C шатуна BC за ведучих ланок 1 або 3 й називається «еліптичне правило».

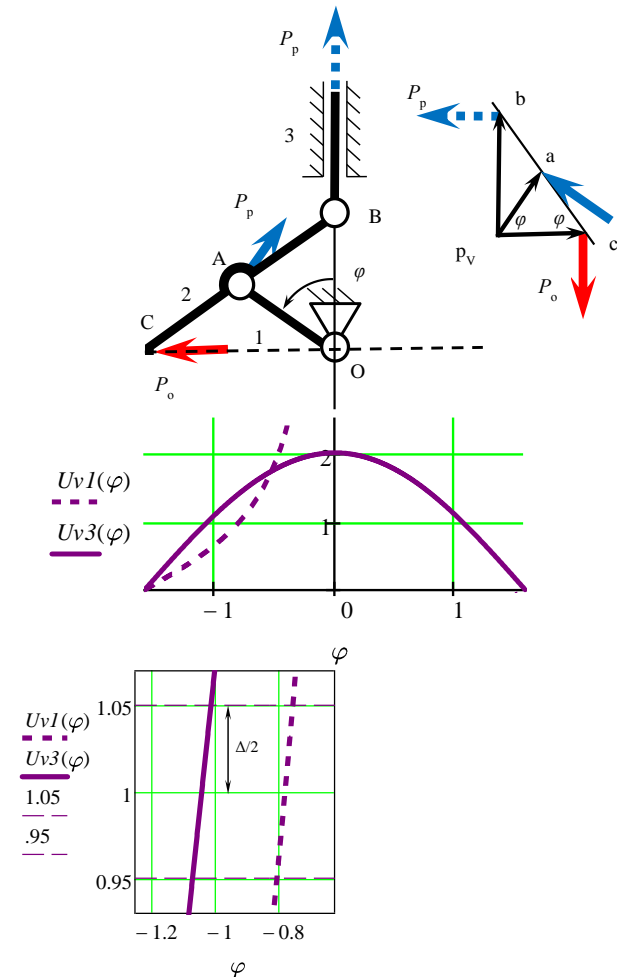


Рис. 1. Кінематична схема, план швидкостей і графіки зміни ЕПР прямолінійно-напрямного центрального кривошипно-повзункового механізму «еліптичне правило»

Fig. 1. Kinematic scheme, velocity plan and EMTI (energetic motion transmission index) change graphs of the guide bearing central slide-crank mechanism «elliptical rule»

За ведучого повзуна 3 ЕПР може бути виражений через відношення відповідних відрізків із плану швидкостей

$$U_{V3} = \frac{V_{вих}}{V_{ex}} \cos \alpha = \frac{(p_v c)}{(p_v b)} = \frac{1}{\tan \varphi}$$

МАШИНОБУДУВАННЯ

і досягає одиниці, якщо кут $\varphi = \pi/4$. За ведучого кривошипа 1 ЕПР виразимо через відношення відрізків плану:

$$U_{V1} = \frac{(p_v c)}{(p_v a)} = 2 \cos \varphi,$$

який досягає одиниці, якщо кут $\varphi = \pi/3$. В обох випадках кут α між вектором сили затискання $P_{\text{вих}}$ і вектором швидкості $V_{\text{вих}}$ точки прикладання цієї сили точно дорівнює π . У разі припущення симетричного відхилення $\Delta/2 = 5\%$ від $|U_V| = 1$ діапазон зміни кута повороту кривошипа для обох випадків, що відповідає цьому діапазону, не більше 5° (рис.1), і тому практичне використання за даним критерієм такого механізму неможливе.

Відомий напрямний механізм на основі еліптичного правила з іншими відношеннями довжин ланок в одиницях довжини кривошипа $\sigma = AB/OA = 1,37$, $\gamma = AC/OA = 2,27$ [1] (рис. 2). Рух точки С тільки на окремій ділянці траєкторії наближається до прямої лінії і за постійної швидкості вхідної ланки, прийнятої за одиницю, ЕПР може бути оцінений як відхилення від одиниці на ділянці наближення. Кінематичні характеристики механізму визначимо засобами аналітичної кінематики.

Координати точки А кривошипа в системі координат XOY:

$$x_A = OA \cdot \cos \varphi; \quad y_A = OA \cdot \sin \varphi,$$

Візьмемо для одиничного кривошипа $OA=1$, тоді:

$$x_A = \cos \varphi; \quad y_A = \sin \varphi. \quad (1)$$

Параметр

$$a = \sqrt{\sigma^2 - (\sin \varphi)^2} \quad (2)$$

Координати точки В:

$$x_B = x_A + a; \quad y_A = 0. \quad (3)$$

Координати точки С:

$$x_C = x_A + (x_A - x_B) \frac{\gamma}{\sigma} \quad (4)$$

$$y_C = y_A \left(1 + \frac{\gamma}{\sigma}\right)$$

Проекції швидкості точки А кривошипа на осі:

$$V_{x_A} = -\omega \cdot OA \cdot \sin \varphi; \quad V_{y_A} = \omega \cdot OA \cdot \cos \varphi.$$

Для одиничного кривошипа й одиничної кутової швидкості $\omega = 1$, тоді:

$$V_{x_A} = -\sin \varphi; \quad V_{y_A} = \cos \varphi. \quad (5)$$

$$v_A = \frac{V_{y_A} \cdot y_A}{a}. \quad (6)$$

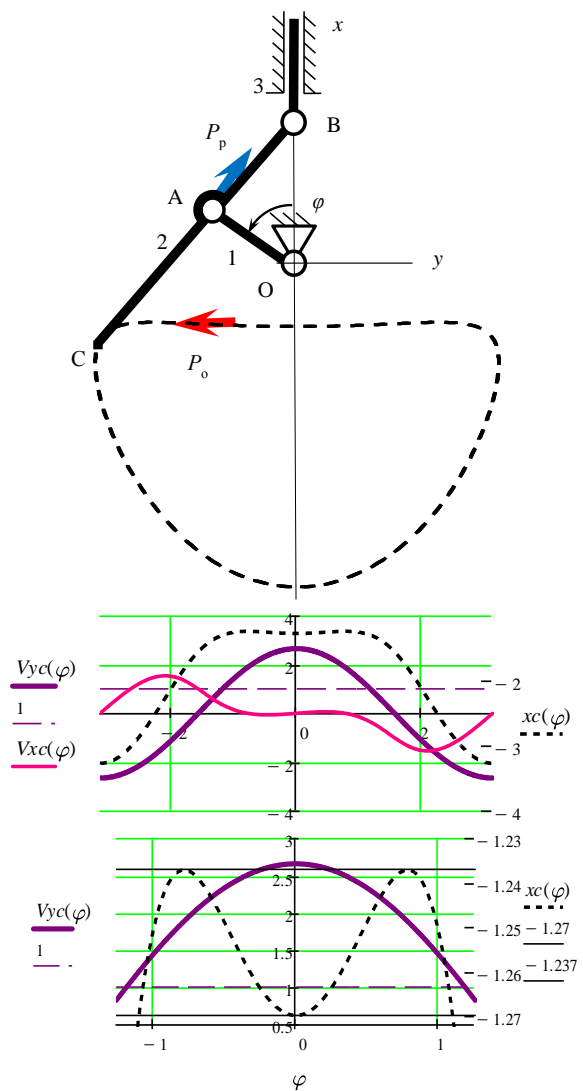


Рис. 2. Кінематична схема і графіки зміни кінематичних параметрів прямолінійно-напрямого центрального кривошипно-повзункового механізму

Fig. 2. Kinematic scheme and graphs of change of kinematic parameters of guide bearing central slide-crank mechanism

МАШИНОБУДУВАННЯ

Швидкість повзуна:

$$V_B = V_{x_A} + v_A. \quad (7)$$

Проекції швидкості точки С шатуна на осі визначимо за аналогічними залежностями (4):

$$V_{x_C} = V_{x_A} + (V_{x_A} - V_B) \frac{\gamma}{\sigma}$$

$$V_{y_C} = V_{y_A} \left(1 + \frac{\gamma}{\sigma}\right)$$

За отриманими залежностями виконано моделювання кінематичних параметрів механізму засобами MathCad. Точність наближення оцінена відстанню $2E$ між паралельними прямими, проведеними через екстремальні значення координати x_C на ділянці наближення. Для цієї схеми $2E = 1,27 - 1,2372 = 0,033$, що складає 3,3 % довжини кривошипа (найменшої ланки схеми). Проекція швидкості V_{x_C} на цій ділянці практично дорівнює нулю, тому приймаємо $V_{y_C} = V_C$. ЕППР за взято одиничної лінійної швидкості точки А ведучої ланки $V_C = 1$ набуде значення V_{y_C} , яке на ділянці наближення значно відхиляється від одиниці (1,1...2,7), і за цим критерієм схема не може бути прийнятною. Крім того, ця швидкість змінна, що погіршує динамічні показники експлуатації механізму.

Схема може бути поліпшена в напрямі збільшення точності наближення, але прийнятний діапазон існування ЕППР унеможливорює коефіцієнт $1 + \frac{\gamma}{\sigma}$, який завжди і значно більший за одиницю.

На ділянці наближення реалізована може бути тільки схема з ведучим кривошипом, схема з ведучим повзуном неможлива через критичні кути тиску.

У роботі [15] розглянутий кінематичний синтез такого механізму захоплювача за чотирма критеріями оптимізації (індекс захоплювання, показники маси, пришвидження і швидкості) засобами MathLab, який привів дослідників до схеми напрямного механізму. Однак, як показали наші дослідження, схема не задовольняє вимогам індексу ЕППР.

Розглянемо ще одну можливу схему прямо-лінійно-направного центрального кривошипно-повзункового механізму з подовженим шату-

ном напрямком за повзун (рис.3). У роботі [1] представлений такий механізм з відносними розмірами $\sigma = AB/OA = 1,86$, $\gamma = AC/OA = 2,76$. Тут також рух точки С лише на окремій ділянці траєкторії наближається до прямої лінії, і ЕППР оцінимо як відхилення від одиниці на ділянці наближення. За залежностями (1) – (3) визначимо координати точок А і В, координати точки С визначимо як:

$$x_C = \frac{\gamma \cdot x_A - (\gamma + \sigma)x_B}{\sigma}$$

$$y_C = \frac{\gamma \cdot y_A}{\sigma}$$

За залежностями (5) – (7) визначимо відповідні швидкості. Проекції швидкості точки С вихідної ланки визначимо за формулами:

$$V_{x_C} = \frac{\gamma \cdot V_{x_A} - (\gamma + \sigma)V_B}{\sigma}$$

$$V_{y_C} = \frac{\gamma \cdot V_{y_A}}{\sigma}. \quad (8)$$

Математичним моделюванням побудовані симетрична шатунна крива крайньої точки шатуна С, відповідні швидкості точок механізму та необхідні параметри оцінки ЕППР на ділянці наближення. Для цієї схеми точність наближення дорівнює $2E = 3,62 - 3,57 = 0,05$, яка зменшалась порівняно з попередньою схемою і складає 5 % довжини кривошипа. Проте значно збільшилася довжина ділянки наближення, що розширює можливості схеми. Як бачимо, проекція швидкості V_{x_C} на цій ділянці мало відрізняється від нуля, тому ЕППР можна взяти рівним V_{y_C} , який змінюється за законом косинуса. Однак схема задовольняє прийнятому симетричному відхиленню $\Delta/2 = 5\%$ від критерію ЕППР тільки на двох нетривалих ділянках наближення, а на більшій частині зони наближення значно відхиляється від одиниці (0,72...1,48), і тому теж не може бути прийнятною.

Оптимізаційним синтезом залежностей (1) – (3) та (5) – (8) отримані єдині значення параметрів σ і γ , що задовольняють прийнятому відхиленню критерію ЕППР на всій довжині ділянки наближення. На рис. 4 представлені графіки зміни кінематичних параметрів такої схеми. Як

МАШИНОБУДУВАННЯ

видно з рисунка, довжина ділянки наближення скоротилася, але значно зросла точність наближення ($2E = 3,055 - 3,05415 = 0,00085$), а значення ЕПР не виходять за межі $\pm 5\%$ відхилення.

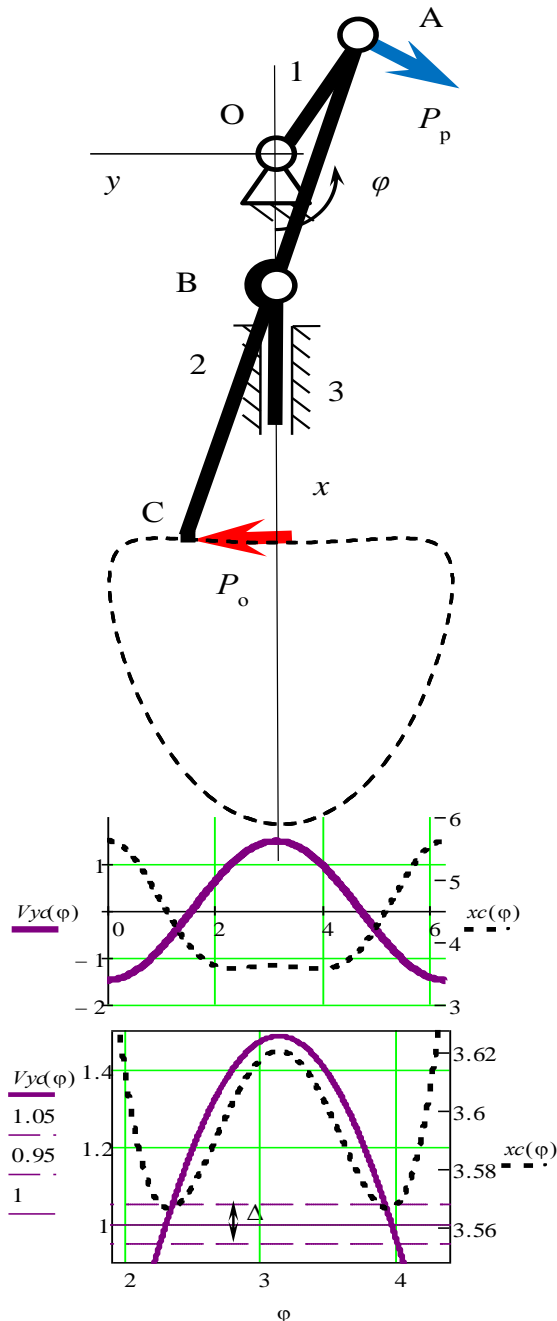


Рис. 3. Кінематична схема і графіки зміни ЕПР прямолінійно-напрямого центрального кривошипно-повзункового механізму

Fig. 3. Kinematic scheme and EMTI change graphs of the guide bearing central slide-crank mechanism

На основі оптимальних параметрів схеми може бути спроектований одинадцятиланковий стрижневий механізм захоплювача на основі спареного паралелограмного центрального кривошипно-повзункового механізму з ведучим кривошипом. Ведучі кривошипи 1 і 6 (рис. 5) синхронно впливають на шатуни 2 і 7, які подовжені за повзуни 3 і 8, що рухаються в напрямних станини. На кінці шатунів шарнірно закріплені ланки 5 і 10, що містять затискні елементи захоплювача. Додані ланки 4 й 9 утворюють паралелограм і забезпечують прямолінійний рух затискних елементів захоплювача.

При затисканні об'єктів різної товщини орієнтація та положення затискних елементів захоплювача залишаються незмінними й збігаються з центром захоплювача, який переміщується прямолінійно вздовж поперечної осі. Використання такого захоплювача може бути прийнятним не тільки для переміщення, але й для базування об'єкта маніпулювання.

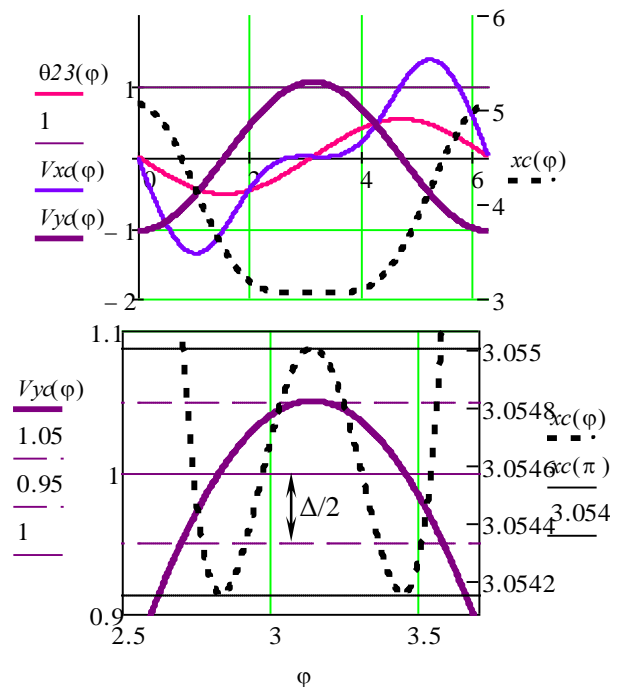


Рис. 4. Графіки зміни кінематичних параметрів оптимального прямолінійно-напрямого центрального кривошипно-повзункового механізму

Fig. 4. Change graphs of kinematic parameters of the optimal guide bearing central slide-crank mechanism

МАШИНОБУДУВАННЯ

У складі механізму захоплювача є тільки двоповідкові структурні групи, механізм має станину, й більшість кінематичних пар є нижчими обертовими, що мають вищу надійність експлуатації.

Додаткові обмеження синтезу здійснює дотримання припустимої величини кутів тиску, які в деяких положеннях механізму можуть виходити за межі дозволених. Значення кута тиску в поступальній парі повзун–напрямна дорівнює куту нахилу шатуна, який визначимо за залежністю (8), його допустиме значення прийнято [4] $[\theta_{23}] \leq \frac{1}{6} \pi$:

$$\theta_{23}(\varphi) = \arcsin[(\sin \varphi) / \sigma] \quad (8)$$

Як видно з графіка (рис. 3), у всьому діапазоні роботи механізму допустиме значення не перевищене, а максимальне його значення досягається за кута $\pi/2$ й дорівнює $\theta_{23} = 0,52$ р.

У такому механізмі затискання в діапазоні кута повороту кривошипа $2,72 \text{ р} < \varphi < 3,56 \text{ р}$, що відповідає руху затискних елементів на ділянці наближення, сила затискання об'єкта буде сталою та рівною номінальній рушійній силі привода у всьому діапазоні товщин деталей, які затискають.

Характер кривих (рис. 4) показує, що збільшення довжини ділянки наближення, відповідно і кута експлуатації механізму, відбувається в разі збільшення допустимого відхилення Δ й дозволяє виконати пошук єдиного рішення для симетричного відхилення від $U_V = 1$.

Після визначення оптимальних геометричних параметрів синтезу механізму захоплювача рекомендовано виконати його структурний аналіз із визначенням та усуненням шкідливих надлишкових зв'язків [10, 11, 12, 18], що значно підвищує надійність такого механізму.

Наукова новизна та практична значимість

Уперше проведено якісний і кількісний аналіз різних схем центральних прямолінійно-напрямних кривошипно-повзункових механізмів за критерієм енергетичного індексу передачі руху (ЕІПР), а також виконано оптимальний синтез захоплювального пристрою за результатами проведеного аналізу.

Запропоновано практичні рекомендації щодо вибору схеми, розташування ланок механізму, коефіцієнтів їх відносних розмірів для центрального прямолінійно-напрямного кривошипно-повзункового механізму захоплювача.

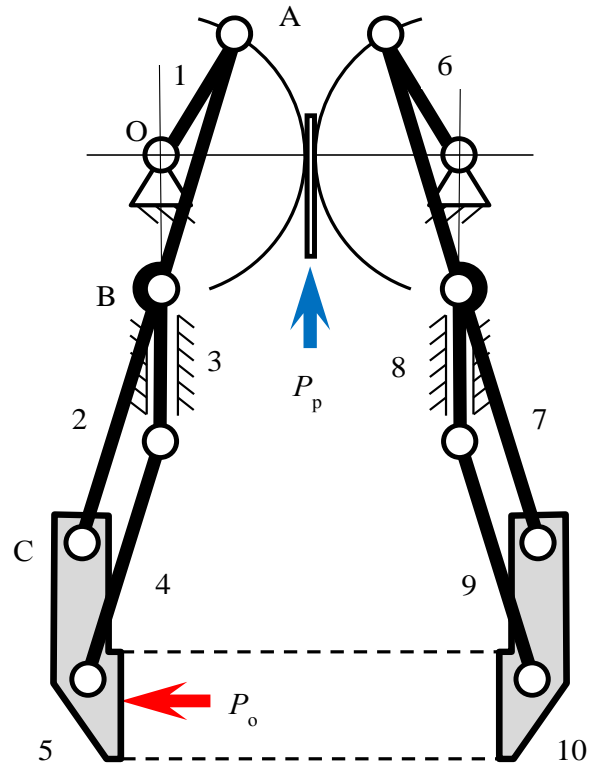


Рис. 5. Кінематична схема захоплювального пристрою, побудованого на основі оптимального спареного прямолінійно-напрямного центрального кривошипно-повзункового механізму

Fig. 5. Kinematic scheme of the gripping device, constructed on the basis of optimal paired guide bearing central slide-crank mechanism

Висновки

Виконано енергетичний синтез геометричних параметрів прямолінійно-напрямних кривошипно-повзункових механізмів захоплювального пристрою за критерієм найменшого відхилення від одиниці швидкісної функції.

У результаті аналізу відомих схем центральних прямолінійно-напрямних кривошипно-повзункових механізмів визначено схему, яка найбільш відповідає критерію енергетичного індексу передачі руху на прямолінійній ділянці наближення. Для цієї схеми і побудованого на

МАШИНОБУДУВАННЯ

її основі механізму захоплювача існують значення відносних параметрів довжин ланок і діапазон повороту кривошипа, за яких відхилення від критерію оптимізації мінімальне й задовольняють обмеження за кутами тиску.

Напрямні механізми, що спроектовані за критерієм ЕПР, як правило, задовольняють вимоги інших критеріїв оптимізаційного синтезу для механізмів захоплювальних пристроїв і важільних механізмів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Артоболевский И. И. *Механизмы в современной технике*: в 7 т. Москва : Наука, 1971. т. 2 : *Рычажные механизмы*. 560 с.
2. Баранов Г. Г. *Курс теории механизмов и машин*. Москва : Машгиз, 1958. 488 с.
3. Боренштейн Ю. П. *Исполнительные механизмы захватывающих устройств*. Ленинград : Машиностроение, 1982. 302 с.
4. Воробьев Е. И., Егоров О. Д., Попов С. А. *Механика промышленных роботов* : учеб. пособие для вузов: в 3 кн. Кн. 2 : *Расчет и проектирование механизмов*. Москва : Высшая школа, 1988. 367 с.
5. Кіницький Я. Т., Трасковецька Л. М., Міняйло П. В. Дослідження якісних кінематичних характеристик важільних механізмів із зупинкою вихідної ланки, одержаних на базі прямолінійно напрямного кривошипно-повзунного механізму. *Вісник ХНУ*. 2018. Iss. 3. С. 12–15.
6. Кіницький Я. Т., Міняйло П. В. Кінематика важільних механізмів із зупинкою вихідної ланки, одержаних на базі прямолінійно-направного кривошипно-повзунного механізму. *Вісник ХНУ*. 2017. Iss. 3. С. 14–17.
7. Кіницький Я. Т., Харжевський В. О., Марченко М. В. *Синтез важільних механізмів із зупинкою вихідної ланки на базі напрямних механізмів* : монографія. Хмельницький, 2013. 432 с.
8. Кожевников С. Н., Есипенко Я. И., Раскин Я. М. *Механизмы*. Москва : Машиностроение, 1965. 1059 с.
9. Крайнев А. Ф. *Словарь-справочник по механизмам*. Москва : Машиностроение, 1987. 560 с.
10. Погребняк Р. П. Повторювані зв'язки у схемах стрижньового повзунно-шатунного механізму захоплювального пристрою. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 4 (76). С. 81–88.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/140547>
11. Погребняк Р. П. Пошук та усунення надлишкових зв'язків у захоплюючих пристроях (захоплювачах) механізмів маніпуляторів. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 7. С. 91–95.
12. Погребняк Р. П. Структурний аналіз і кінематичний синтез спареного стрижньового кулісного механізму захвата робота. *Підйомно-транспортна техніка*. 2017. № 4 (56). С. 57–66.
13. Челпанов И. Б., Колпашников С. Н. *Схваты промышленных роботов*. Ленинград : Машиностроение, 1989. 287 с.
14. Bai G., Kong X., Ritchie J. M. Kinematic Analysis and Dimensional Synthesis of a Meso-Gripper. *Journal of Mechanisms and Robotics*. 2017. Vol. 9. Iss. 3. P. 1–59. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4035800>
15. Lanni C., Ceccarelli M. An Optimization Problem Algorithm for Kinematic Design of Mechanisms for Two-finger Grippers. *The Open Mechanical Engineering Journal*. 2009. Vol. 3. Iss. 1. P. 49–62.
DOI: <https://doi.org/10.1874155X00903010049>
16. Monkman G. J., Hesse S., Steinmann R., Schunk H. *Robot grippers*. Weinheim : Wiley-VCH, 2007. 463 p.
DOI: <https://doi.org/10.1002/9783527610280>
17. Pogrebnyak R. P. Structural analysis and rational design parallelogram arm gripping device. *Теория и практика металлургии*. 2015. № 1/2. С. 123–125.
18. Rao R. V., Waghmare G. Design Optimization of Robot Grippers Using Teaching-learning-based Optimization Algorithm. *Advanced Robotics*. 2015. Vol. 29. Iss. 6. P. 431–447.
DOI: <https://doi.org/10.1080/01691864.2014.986524>
19. Rimon E., Burdick J. *The Kinematics and Mechanics of Grasping Mechanisms*. The Mechanics of Robot Grasping, 2019. Cambridge : Cambridge University Press. P. 411–440.
DOI: <https://doi.org/10.1017/9781108552011.020>
20. Lin Wen-Yi, Hsiao Kuo-Mo. Optimum synthesis of a 10-link gripping mechanism using new grasping indices. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*. 2016. Vol. 39. Iss. 7. P. 809–815.
DOI: <https://doi.org/10.1080/02533839.2016.1187086>

Р. П. ПОГРЕБНЯК^{1*}, М. Р. ПОГРЕБНЯК^{2*}

^{1*}Каф. «Прикладная механика», Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепро, Украина, 49005, тел. +38 (091) 906 54 24, эл. почта pogrebnyakk@ukr.net, ORCID 0000-0002-4685-1818

^{2*}Каф. «Автоматизация и компьютерные системы», Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», пр. Дмитрия Яворницкого, 19, Днепро, Украина, 49005, тел. +38 (095) 499 75 01, эл. почта mpogrebnyakk@gmail.com, ORCID 0000-0002-2961-3383

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ПРЯМОЛИНЕЙНО-НАПРАВЛЯЮЩИХ ЦЕНТРАЛЬНЫХ КРИВОШИПНО-ПОЛЗУННЫХ МЕХАНИЗМОВ ЗАХВАТЫВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ ИНДЕКСУ ПЕРЕДАЧИ ДВИЖЕНИЯ

Цель. Основная цель работы – выполнить кинематический анализ и синтез известных схем прямолинейно-направляющих центральных кривошипно-ползунных механизмов по критерию энергетического индекса передачи движения с ограничением допустимыми углами давления в кинематических парах и наименьшим отклонением траектории движения от прямолинейности на участке приближения. Определить схему, которая лучше всего удовлетворяет условиям синтеза, и предложить на ее основе механизм захватывающего устройства. **Методика.** Достижение поставленной цели осуществлено средствами аналитической кинематики плоских механизмов теории механизмов и машин и математическим моделированием положений и движения звеньев. **Результаты.** Проектирование механизмов разных захватов, обеспечивающих постоянное усилие зажима объектов различной толщины с постоянной мощностью привода и минимальными энергетическими затратами, может быть выполнено по критерию энергетического индекса передачи движения (ЭИПД). На его основе проведен анализ известных прямолинейно-направляющих центральных кривошипно-ползунных механизмов с продленным шатуном по критерию наименьшего отклонения от единицы ЭИПД. Выяснено, что практическое использование большинства таких механизмов по данному критерию крайне ограничено или невозможно. Оптимизационным синтезом кинематических зависимостей получены единственные значения относительных параметров и диапазон поворота ведущего кривошипа для схемы прямолинейно-направляющего центрального кривошипно-ползунного механизма с продленным шатуном за ползун, что лучше всего соответствуют критерию оптимизации и удовлетворяют ограничениям по углам давления. На основе оптимальных параметров схемы центрального прямолинейно-направляющего механизма предложен спаренный параллелограммный одиннадцатизвенный стержневой механизм, который обеспечивает прямолинейное движение зажимных элементов с постоянной скоростью и постоянной силой зажима, равной номинальной движущей силе привода. **Научная новизна.** Впервые проведен качественный и количественный анализ известных схем центральных прямолинейно-направляющих кривошипно-ползунных механизмов по критерию энергетического индекса передачи движения (ЭИПД) и выполнен оптимальный синтез захватывающего устройства по результатам проведенного анализа. **Практическая значимость.** Предложены практические рекомендации по выбору схемы, относительных размеров и расположения звеньев механизма центрального прямолинейно-направляющего кривошипно-ползунного механизма захвата, реализующих требования критерия оптимизации и ограничения допустимыми углами давления.

Ключевые слова: механический захват; направляющий механизм; энергетический индекс передачи движения (ЭИПД); угол давления

R. P. POGREBNIYAK^{1*}, M. R. POHREBNIYAK^{2*}

^{1*}Dep. «Applied Mechanics», National Metallurgical Academy of Ukraine, Haharina Av., 4, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (091) 906 54 24, e-mail pogrebnyakk@ukr.net, ORCID 0000-0002-4685-1818

^{2*}Dep. «Automation and Computer Systems», National Technical University «Dnipro Polytechnic», D. Yavornytskoho Av., 19, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (095) 499 75 01, e-mail mpogrebnyakk@gmail.com, ORCID 0000-0002-2961-3383

KINEMATIC SYNTHESIS OF THE GUIDE BEARING CENTRAL SLIDE-CRANK MECHANISM OF THE GRIPPING DEVICE BASED ON THE ENERGETIC MOTION TRANSMISSION INDEX

Purpose. The main objective of the work is to perform a kinematic analysis and synthesis of the known schemes of guide bearing central slide-crank mechanisms by the criterion of the energy index of motion transmission with the restriction by the allowable pressure angles in the sliding pairs and the smallest deviation of the trajectory from straightness in the approximation area. The article is also aimed to determine the scheme that best suits the synthesis conditions and to propose the gripping device mechanism on its basis. **Methodology.** This purpose is achieved by means of analytical kinematics of flat mechanisms of the mechanism and machine theory and mathematical modeling of the positions and movement of links. **Findings.** The design of mechanisms with different gripping devices providing a constant clamping force of objects of various thicknesses with a constant drive power and minimal energy costs can be performed by the criterion energetic motion transfer index (EMTI). On its basis the analysis of the known straight-guiding central crank-slider mechanisms with an extended connecting rod is carried out according to the criterion of the smallest deviation from the EMTI unit. It was found that the practical use of main part of these mechanisms according to this criterion is extremely limited or impossible. Using optimized synthesis of kinematic equations, it was obtained the only values of the relative parameters and the rotation ranges of the driving crank for the guide bearing central slide-crank mechanisms with an extended connecting rod that best meet the optimization criterion and satisfy the restrictions for pressure angles. Based on the optimal parameters of the guide bearing central slide-crank mechanism a paired parallelogram eleven-link mechanism is proposed that provides the rectilinear movement of the gripping elements with a constant speed and constant clamping force which is equal to the nominal driving force of the drive. **Originality.** For the first time, a qualitative and quantitative analysis of the known schemes of the guide bearing central slide-crank mechanisms according to the criterion of the energetic motion transfer index was carried out and the optimal synthesis of the gripping device according to the results of the analysis was performed. **Practical value.** Practical recommendations are suggested for choosing a scheme, relative sizes and arrangement of links of the guide bearing central slide-crank mechanism of the gripping mechanism that corresponds to the requirements of the optimization criterion and restriction by the allowable pressure angles.

Keywords: mechanical gripping device; guiding mechanism; energetic motion transfer index (EMTI); pressure angle

REFERENCES

1. Artobolevskiy, I. I. (1971). *Mekhanizmy v sovremennoy tekhnike*. Moscow: Nauka. (in Russian)
2. Baranov, G. G. (1958). *Kurs teorii mekhanizmov i mashin*. Moscow: Mashgiz. (in Russian)
3. Borenshteyn, Y. P. (1982). *Ispolnitelnye mekhanizmy zakhvatyvayushchikh ustroystv*. Leningrad: Mashinostroyeniye. (in Russian)
4. Vorobov, Y. I., Yegorov, O. D., & Popov, S. A. (1988). *Mekhanika promyshlennykh robotov*. In K. V. Frolov, Y. I. Vorobov (Eds.). *Raschet i proyektirovaniye mekhanizmov*. Moscow: Vysshaya shkola. (in Russian)
5. Kinytskyi, Ya. T., Traskovetska, L. M., & Miniailo, P. V. (2018). The investigation of the qualitative kinematic characteristics of the dwell linkage mechanisms which are based on the straight-line path generating slider-crank mechanism. *Herald of Khmelnytskyi national university*, 3, 12-15. (in Ukrainian)
6. Kinytskyi, Ya. T., Kharzhevskiy, V. O., & Marchenko, M. V. (2013). *Syntezy vazhilnykh mekhanizmiv iz zupynkoiu vykhidnoi lanky na bazi napriamnykh mekhanizmiv: monohrafiya*. Khmelnytskyi. (in Ukrainian)
7. Kozhevnikov, S. N., Yesipenko, Ya. I., & Raskin, Ya. M. (1965). *Mekhanizmy*. Moscow: Mashinostroyeniye. (in Russian)
8. Kinytskyi, Ya. T., Miniailo, P. V. (2017). The kinematics of dwell linkage mechanisms which are based on the straight-line path generating slider-crank mechanism. *Herald of Khmelnytskyi national university*, 3, 14-17. (in Ukrainian)
9. Kraynev, A. F. (1987). *Slovar-spravochnik po mekhanizmam*. Moscow: Mashinostroyeniye. (in Russian)
10. Pogrebnyak, R. P. (2018). Repeated Connections in the Schemes of Link Slider-crank Mechanism of Gripping Device. *Science and Transport Progress*, 4(76), 81-88. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/140547> (in Ukrainian)

МАШИНОБУДУВАННЯ

11. Pogrebnyak, R. P. (2015). Poshuk ta usunennya nadlishkovikh zv'yazkiv u zakhoplyuyuchykh prystroyakh (zakhoplyuvachakh) mekhanizmiv manipulyatoriv. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*, 7, 91-95. (in Ukrainian)
12. Pogrebnyak, R. P. (2017). Strukturniy analiz i kinematychnyi sintez strizhnovogo kulisnogo mekhanizmu zakhvata. *Pidymno-transportna tekhnika*, 2(54), 47-56. (in Ukrainian)
13. Chelpanov, I. B., & Kolpashnikov, S. N. (1989). *Skhvaty promyshlennykh robotov*. Leningrad: Mashinostroyeniye. (in Russian)
14. Bai, G., Kong, X., & Ritchie, J. M. (2017). Kinematic Analysis and Dimensional Synthesis of a Meso-Gripper. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 9(3), 1-59. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4035800> (in English)
15. Lanni, C., & Ceccarelli, M. (2009). An Optimization Problem Algorithm for Kinematic Design of Mechanisms for Two-finger Grippers. *The Open Mechanical Engineering Journal* 3(1), 49-62. DOI: <https://doi.org/10.1874155X00903010049> (in English)
16. Monkman, G. J., Hesse, S., Steinmann, R., & Schunk, H. (2007). *Robot Grippers*. Weinheim: Wiley-VCH. DOI: <https://doi.org/10.1002/9783527610280> (in English)
17. Pogrebnyak, R. P. (2015). Structural analysis and rational design parallelogram arm gripping device. *Theory and Practice Steel Industry*, 1/2, 124-126. (in English)
18. Rao, R. V., & Waghmare, G. (2015). Design Optimization of Robot Grippers Using Teaching-learning-based Optimization Algorithm. *Advanced Robotics*, 29(6), 431-447. DOI: <https://doi.org/10.1080/01691864.2014.986524> (in English)
19. Rimon, E., & Burdick, J. (2019). *The Kinematics and Mechanics of Grasping Mechanisms*. The Mechanics of Robot Grasping. Cambridge: Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781108552011.020> (in English)
20. Lin, Wen-Yi, & Hsiao, Kuo-Mo (2016). Optimum synthesis of a 10-link gripping mechanism using new grasping indices. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 39(7), 809-815. DOI: <https://doi.org/10.1080/02533839.2016.1187086> (in English)

Надійшла до редколегії: 27.09.2019

Прийнята до друку: 28.01.2020

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.463.027-048.35

В. Г. РАВЛЮК¹, І. М. АФАНАСЕНКО², М. Г. РАВЛЮК³

¹Каф. «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

²Каф. «Вагони», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейербаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта afanassenkoigor@kart.edu.ua, ORCID 0000-0003-4391-1595

³Каф. «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

ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГАЛЬМОВИХ КОЛОДОК ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ ЗА ШКІДЛИВОГО ЗНОСУ

Мета. Це дослідження спрямоване на визначення геометричних параметрів гальмових колодок вантажних вагонів за шкідливого зносу. **Методика.** Виконано комплекс експлуатаційних і теоретичних досліджень щодо виникнення шкідливого зносу, який змінює геометричні параметри корисної площі контакту гальмових колодок вантажних вагонів за різних встановлених нормативних зазорів між колодкою і колесом, що суттєво погіршує ефективність гальмування поїздів. За допомогою зібраного статистичного матеріалу виконано комп'ютерне математичне моделювання верхньої шкідливої стертість за різних зазорів і визначено негативні фактори, які впливають на роботу гальмової системи. Використано програмне забезпечення MathCAD і AutoCAD. **Результати.** У ході обстежень механічної частини гальм було звернено увагу на ненормативний знос гальмових колодок вантажних вагонів, який утворюється від того, що загальний центр ваги колодки й башмака, які розташовані на маятниковому підвішуванні, не збігаються з центром отвору в розпірці триангеля на будь-яких колодках. Для дослідження можливих причин виникнення ненормативного зносу гальмових колодок за різних зазорів між колодкою і колесом наведено їх реальні зображення й теоретичні схеми, які дають змогу також визначити зміну їх геометричних параметрів, що впливають на корисну площу контакту. Під час порівняння результатів розрахунків за координатним методом, виконаних у програмному середовищі MathCAD, і графічним – в AutoCAD, з визначення геометричних параметрів утворення верхнього шкідливого зносу колодки залежно від нормативного зазору між колесом і гальмовою колодкою теоретично доведено, що похибка між ними не перевищує 5–7 %. **Наукова новизна.** Уперше сформульовано засади методології визначення геометричних параметрів корисної площі контакту колодок за утвореного верхнього шкідливого зносу залежно від зазору між колесом і гальмовою колодкою з використання координатного та графічного методів. **Практична значимість.** Результати наукових досліджень, які отримані в роботі, доцільно застосовувати в конструкторських та технологічних відділах і бюро під час проектування, як механічних гальмових систем ходових частин інноваційних вагонів, так і для вдосконалення вагонів, які зараз експлуатуються на залізниці.

Ключові слова: гальмова колодка; вагон; триангель; ненормативний знос; метод; аналіз; геометричні параметри; стертість; колесо; зазор

Вступ

Для забезпечення своєчасних перевезень рухомий склад, нарівні з іншими технічними засобами, повинен працювати безвідмовно та гарантувати безпеку руху, особливо під час га-

льмування. Тому гальма є однією з основних складових частин сучасного рухомого складу, від рівня досконалості конструкції, ефективності, надійності й безвідмовної роботи яких значною мірою залежить безпека руху поїздів,

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

а також пропускна та перевізна спроможність залізниць. Аналіз безпеки руху у вагонному господарстві АТ «Укрзалізниця» за 2005–2018 рр. [1] свідчить про те, що механічні системи гальм візків вантажних вагонів дуже вразливі в нинішніх умовах і в більшості одиниць експлуатаційного вагонного парку перебувають у незадовільному стані. Тому у провідних організаціях, що тісно пов'язані із залізничним транспортом, виконують роботи щодо підвищення довговічності та надійності гальм вантажних поїздів.

Зменшення ефективності гальмувань рухомого складу безпосередньо пов'язано з нерівномірним зносом гальмових колодок, який має місце у значній кількості вантажних вагонів. Дослідженням причин і наслідків цього негативного явища присвячено значну кількість робіт. Серед них праця [17], у якій наведено пристрій, що використовується в гальмових важільних передачах (ГВП) візків для відведення колодок із автоматичним корегуванням їх взаємного положення відносно поверхонь кочення коліс. Проте важливо зазначити, що такий пристрій ускладнює конструкцію ГВП візка та потребує під час експлуатації систематичних трудомістких регулювань, у зв'язку з цим його використання є недоцільним.

Колектив авторів у роботі [7] наводить результати дослідних випробовувань, що дають змогу порівняти міцнісні характеристики деяких гальмових колодок вітчизняного виробництва з їх закордонними аналогами, які широко використовують у ходових частинах вагонів. Експлуатаційні випробовування вітчизняних гальмових колодок зі спеціальними вставками порівняно з колодками закордонних виробників дали змогу встановити, що утворення дефектів експлуатаційного характеру по колу кочення коліс значно зменшиться. Проте потрібно зауважити, що типова конструкція ГВП вантажних вагонів при цьому не змінюється, що може призвести до ненормативного зносу будь-яких типів гальмових колодок.

Особливості створення китайськими науковцями оригінальної інноваційної конструкції ГВП візка (мод. ZK1) представлено у праці [2]. За цією конструкції кріплення триангеля у візку відбувається безпосередньо до бокових рам, у яких для цього передбачені відлиті напрямні

кронштейни. Проте це рішення має певні недоліки: суттєво знижується надійність бокових візків через прилиті кронштейни, особливо в умовах експлуатаційних динамічних навантажень, а також зусиль, що передаються від гальмової системи вагона. У місцях взаємодії триангельної балки з боковиною візка є ймовірність появи втомних дефектів (тріщин), а це істотно впливає на безпеку руху поїздів.

У проаналізованому закордонному дослідженні [22] висвітлено аналіз деяких типових блокових гальм, які раціонально використовувати на рухомому складі метро Китаю. Деякі з них мають переваги гнучкої роботи, швидкої реакції і компактної структури. Блокові гальма використовують у деяких країнах у візках вантажних вагонів для забезпечення більш ефективного гальмування й рівномірного зносу гальмових колодок. Однак застосування таких гальмових блоків у візках вантажних вагонів збільшить їх масу, витрату повітря на гальмування, час на технічне обслуговування та трудомісткість ремонту вагона в цілому.

Автори статті [14] провели дослідження напружено-деформованого стану гальмової колодки, а також виконали аналіз температурних діапазонів залежно від прикладених навантажень, для аналізу було застосовано програмний комплекс SolidWorks. За результатами поведеного дослідження рекомендовано застосовувати інноваційний матеріал для виготовлення гальмових колодок, що дасть можливість суттєво продовжити строк їх використання.

У роботі [19] коротко проаналізовано різні гальмові засоби, які застосовують для гальмування гальмових систем «колодка–колесо». Звернено увагу на те, що композиційні колодки негативно діють на поверхню кочення колісних пар вантажних вагонів, через те що в зоні контакту «колодка–колесо» з'являються великі температури, а це призводить до утворення різного роду дефектів на поверхні кочення. Виходячи з цього, рекомендовано застосовувати дискові гальма.

Закордонні науковці зосереджені на дослідженні дискових гальм, розрахунках їх елементів на міцність, експлуатаційних спостереженнях за їх роботою, а також сконцентровані на розрахунках температурних режимів деяких

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

елементів гальмових систем рухомого складу [16, 18]. Під час гальмування поїзда фрикційними гальмами в зоні контакту триботехнічних тіл виникає теплова енергія, яка розсіюється примусовою конвекцією, провідністю та випромінюванням від відкритих поверхонь гальма. У працях [20, 21] зазначено, що перегрів триботехнічних пар може викликати несправність гальмової системи й негативно вплинути на безпеку руху. У зв'язку з цим поведено значну теоретичну роботу щодо підвищення температури під час гальмування для різних швидкостей руху і конструкції гальмових дисків.

Проаналізувавши літературні джерела, можемо зазначити, що проблемам ненормативного зносу гальмових колодок, які застосовують у гальмових системах трьохелементних візків, достатньо уваги приділено не було.

Мета

Це дослідження спрямоване на визначення геометричних параметрів гальмових колодок вантажних вагонів у разі шкідливого зносу.

Для досягнення сформульованої мети необхідно вирішити такі завдання:

- виконати аналіз причин виникнення верхнього шкідливого зносу, який змінює геометричні параметри корисної площі контакту гальмових колодок і виникає під час руху поїзда в режимах тяги та вибігу;
- розробити методологію визначення геометричних параметрів верхнього шкідливого зносу колодки залежно від нормативного зазору між колесом і гальмовою колодкою для поліпшення ефективності гальмування поїздів;
- за розробленою методологією побудувати графічні залежності: довжин шкідливого зносу гальмової колодки від її горизонтального зносу; шкідливої площі та об'єму зносу колодки від величини нерівномірного зносу залежно від зазору між колесом і колодкою для визначення геометричних параметрів корисної площі контакту колодки;
- запропонувати заходи стосовно ліквідації верхньої шкідливої стертості, яка спричиняє ненормативний знос гальмових колодок під час руху вантажних вагонів і суттєво погіршує ефективність гальмування поїздів.

Методика

У результаті обстежень механічної частини гальм візків вантажних вагонів було звернено увагу на те, що деякі гальмові колодки, які мали ненормативний знос, були встановлені на вагон повторно, але вже перевернуті таким чином, що шкідливий знос опинявся внизу, а у верхній частині колодки мали невикористаний раніше ресурс. Необхідно зазначити, що відповідно до вимог чинних нормативно-технологічних документів розвертання гальмових колодок не рекомендується [3]. Проте під час ПТО здійснюють розвертання гальмових колодок, які були знято для виконання деповського чи капітального ремонту вагонів, тракуючи це тим, що тоді їх знос буде вирівнюватися. Це пояснюється тим явищем, що для заміни непридатних колодок відсутня недостатня кількість нових, і робітники вимушені використовувати раніше зняті з вагонів під час ремонтів гальмові колодки з розвертанням їх на 180° (рис. 1 і 2) для подальшої експлуатації вантажних вагонів.

Через такі дії у вантажних поїздах суттєво погіршується ефективність гальмувань, і в процесі експлуатації таких гальмових колодок виникають масові несправності поверхонь кочення колісних пар, від яких зазнає збитків залізнична інфраструктура [6, 8].

Тому слід зазначити, що порушення інструкцій може призвести до тяжких наслідків на залізничному транспорті – транспортних подій, катастроф, аварій тощо, тобто прямо загрожувати безпеці руху на залізниці. Виходячи з цього, необхідно створити умови та пристрої, за яких гальмові колодки у візках вантажних вагонів будуть зношуватися рівномірно, – це дасть змогу, по-перше, використовувати їх від одного деповського ремонту до іншого, по-друге, зекономити для залізниці десятки тисяч гривень на закупівлю колодок, а по-третє, утилізувати гальмові колодки з незначною частиною робочої композиційної маси, яка залишається.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ



Рис. 1. Зображення клинодуально зношених гальмових колодок в експлуатації

Fig. 1. View of a wedge-dual worn brake pads in use

Із результатів досліджень відомо, що у трьохелементних візках вантажних вагонів колодки в процесі експлуатації зношуються клинодуально і в різних перерізах мають неоднакову товщину [4, 10]. Результат цього фізич-

ного процесу наведений на рис. 2, де показано ненормативно зношені гальмові колодки, що були зняті під час деповського ремонту вантажних вагонів АТ «Укрзалізниця» з візків.



Рис. 2. Клинодуально зношені гальмові колодки, непридатні до подальшої експлуатації, демонтовані з вантажних вагонів із великими залишками робочого тіла

Fig. 2. Wedge-dual worn brake pads, unfit for further use, dismantled from cars with large remains of working medium

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Як відомо, для зменшення швидкості поїзда необхідно здійснити гальмування, у результаті цього відбувається триботехнічний контакт між площиною гальмової колодки й поверхнею кочення колеса та утворюється фрикційний знос. Проте в ході обстежень гальмових колодок, знятих під час деповського й капітального ремонтів вантажних вагонів, було встановлено, що значна їх частина має шкідливий знос переважно у верхній частині, відношення якого не збігається із загальною площею зносу від гальмувань [5]. Одночасно обстеження 16 640 колодок у вантажних вагонах експлуатаційного парку в пунктах технічного обслуговування (ПТО) дозволило встановити, що значна їх частина за попушених гальм у рухомому поїзді на-

хилена. Унаслідок цього колодки своєю верхньою частиною торкаються коліс, які обертаються під час руху поїзда, й утворюється верхня шкідлива стертість. У ході вимірювань довжини шкідливого зносу колодки, який зменшує корисну площу і впливає на процес гальмування, було встановлено, що він може становити до 110 мм загальної довжини колодки (рис. 3). Також необхідно зазначити, що на гальмових колодках формуються два майданчики зносу: верхній – у якому колодка зношується кососиметрично, під час руху вантажних вагонів без гальмування, доволі посилено залежно від швидкості руху поїзда; нижній – яким колодка виконує процес гальмування вагона.



Рис. 3. Вимірювання довжини шкідливого зносу гальмової колодки, що утворився в експлуатації

Fig. 3. Measurement of the length of hazardous wear of brake pad formed during operation

Основними причинами виникнення клинодуального (ненормативного) зносу гальмових колодок вантажних вагонів є:

- нерівномірний розподіл питомого гальмового зусилля за довжиною колодки від зсуву реакції колеса на колодку щодо її осі симетрії в сторону налеглого кінця колодки;

- притиснення верхівки колодки під час руху поїзда шкідливим крутним моментом, який виникає з тієї причини, що вісь, яка проходить через центр отвору розпірки триангеля, не збігається з віссю маятникових підвісок, які утримують гальмові колодки;

- не працюють належним чином пристрої для нормативного зносу гальмових колодок, тобто вони не забезпечують потрібне відведення колодок від коліс, через це верх колодок третється об колеса під час руху поїзда з попушеними гальмами.

Для дослідження можливих явищ виникнення ненормативного зносу гальмових колодок наведена теоретична розрахункова схема (рис. 4), яка дозволяє встановити причини утворення такого зносу. Точка прикладення рівнодіючої реакції колеса від середини робочої частини колодки зміщується в сторону залегло-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

го кінця колодки. Це призводить до нерівномірного розподілення питомих тисків за всією робочою площею колодки, яка бере участь у процесі гальмування вагона [13].

Розглянувши схему дії гальмових сил на колеса трьохелементного візка вагона (рис. 4), можна встановити, що зовнішнє гальмове зусилля N_k – зусилля від триангеля, яке передається на башмак з колодкою під час гальмування, розкладається на дві складові: горизонтальне – $N_{гор}$ і зусилля вздовж осі підвіски, що викликає появу $P_{п}$ – реакції на дію гальмового

зусилля і є причиною виникнення деформацій розтягнення та стиснення підвіски відповідно для правого та лівого колеса. У разі обертання колісних пар проти годинникової стрілки за наведеною схемою зусилля $N_{к.п.}$ для правого та лівого колеса передається під різним кутом через конструктивне виконання важільної передачі та наявність зазорів у зоні контакту підвіски з башмаком. При цьому $\beta_2 > \beta_1$, й $\beta_1 < \alpha < \beta_2$, де α – кут підвішування гальмових колодок, P_T – зусилля за твірною колеса.

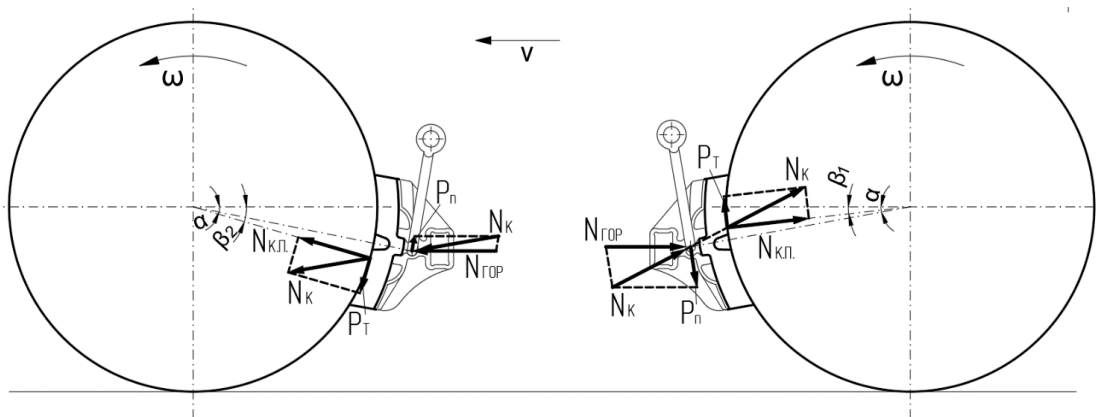


Рис. 4. Схема дії гальмових зусиль на колеса в разі однобічного їх гальмування

Fig. 4. The scheme of action of the braking forces on the wheels in case of their unilateral braking

У ГВП візків вантажних вагонів точка з'єднання вертикальних важелів із розпіркою триангеля зміщена в сторону колеса відносно точок з'єднання башмаків триангеля з маятниковими підвісками. Це призводить до впирання колодки верхньою частиною в обід колеса за попущених гальм. У результаті цього виникає значний за товщиною знос верхнього торця колодки, як наслідок – зменшується довжина її робочої поверхні.

У ході досліджень було встановлено, що чим менше відведення колодки від колеса і кут між поверхнею обода колеса та робочою частиною колодки, тим більша довжина, яка починається з верхнього кінця колодки і піддається зносу за попущених гальм. Однак слід зауважити, що за понаднормового зазору, який переважно більший внизу колодки на відміну від її верху, відбувається інтенсивний знос у верхній крайковій частині колодки (рис. 5).

Дослідження епізодів ненормативного зносу гальмових колодок [10–12] вказує на те, що нова колодка переважно починає зношуватися у своїй верхній частині (рис. 6, а), результатом цього є низька надійність пристроїв для рівномірного відведення колодок та утримування їх на відповідній відстані від поверхні кочення коліс. Унаслідок експлуатації вагона й досягнення ним пробігу близько 3 тис. км знос набуває подвійного вигляду як кінцевий знос з утворенням істотної фрикційної шкідливої стертості на верхньому кінці колодки (рис. 6, б). Однак нижня робоча частина гальмової колодки зношується клиноподібно, більше біля верхньої стертості з поступовим сповільненням в низу.

Тому слід зазначити, що верхні частини гальмових колодок переважно зношуються інтенсивніше за нижні (рис. 6, в). На верхній, укороченій стертістю частині колодки $l_{ск}$ концентрується значно більший питомий тиск q_v , ніж на

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

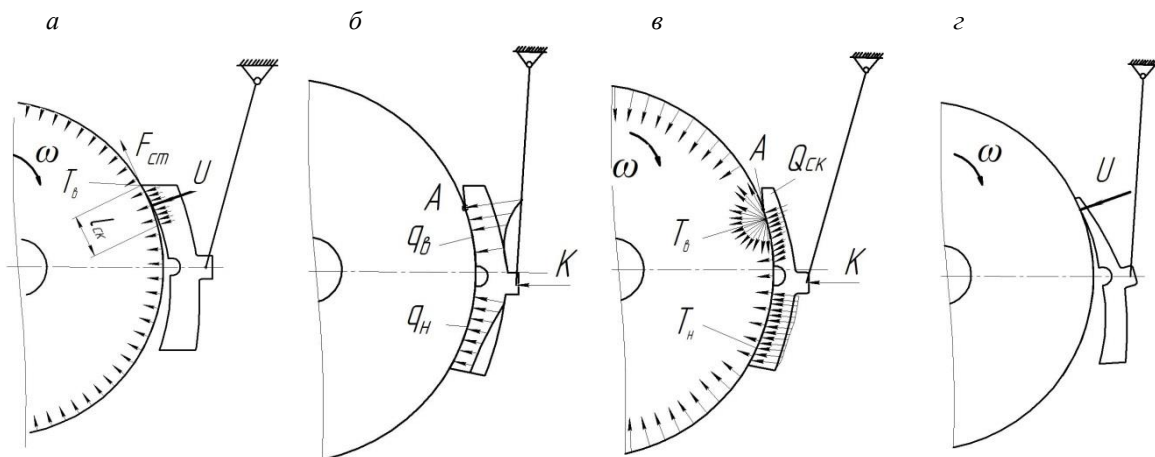
нижній q_n . У результаті такого явища знос зверху колодки проходить швидше, ніж очікувалося залежно від пробігу вантажного вагона, а це потребує заміни колодки з досить значними залишками робочого тіла, особливо у її нижній частині, яке б за нормальної роботи при-

строїв відведення могло бути використано ефективно (рис. 6, з). Під час гальмувань тепловиділення T_v значно збільшується нижче границі розмежування площин (точка А) з поступовим сповільненням до низу гальмової колодки T_n (рис. 6, в).



Рис. 5. Зображення клинодуального зносу гальмової колодки в експлуатації

Fig. 5. Picture of a wedge-dual wear of brake shoe in operation



спирання нової колодки верхньою крайкою в рухоме колесо і здійснення тертя без гальмування;

нерівномірність розподілу гальмових контактних натиснень q_b і q_n від колодки на колесо за наявної верхньої стертості;

гальмування, яке супроводжується підвищеним тепловиділенням T_v і T_n через верхню стертість колодки;

ненормативно зношена колодка, що підлягає заміні зі значними залишками робочого тіла внизу

Рис. 6. Хронологія відтворення етапів клинодуального зносу в гальмових колодках вантажних вагонів

Fig. 6. Timeline of reproduction of the stages of the wedge-dual wear in the brake pads of freight cars

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Як правило, клинодувальний знос колодок виникає через недосконалу конструкцію триангеля й низьку надійність ГВП візка, у якій від власної ваги її деталей утворюється гравітаційна сила [6, 8]. Під дією цієї сили відбувається схиляння колодки з притиснення її незначним зусиллям U до поверхні кочення колеса, яке обертається. Тому зі збільшенням пробігу вантажних вагонів утворюється площа, позначе-

на символом $Q_{ск}$, яка поступово буде збільшуватися. На ній розподіляється вказана сила з питомим натисненням $q_{ск}$, а також виникає сила тертя $F_{ст}$. Як приклад на рис. 7 наведено результат комп'ютерного моделювання з утворення клинодувального зносу гальмової колодки за відомої верхньої шкідливої стертіості 9 мм і нормативного зазору 7 мм між колесом і колодкою.

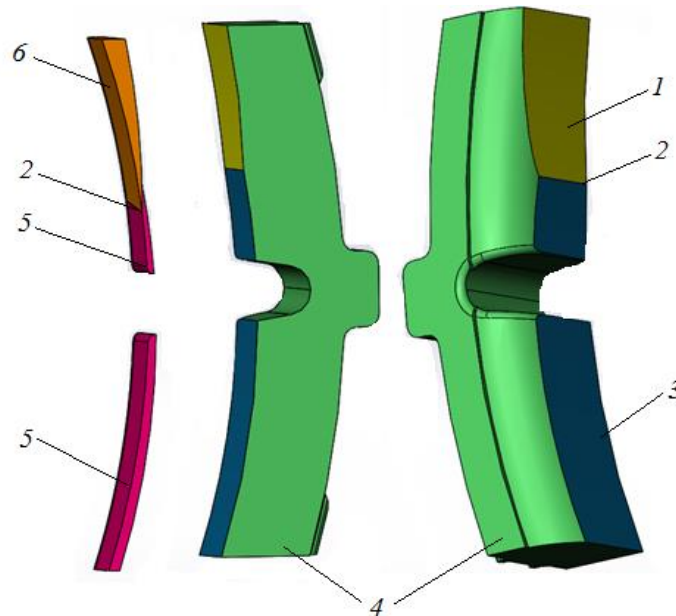


Рис. 7. 3D-моделі нарощування шкідливого та гальмового зносу колодки:

- 1 – шкідливо зношена площа колодки; 2 – лінія розмежування площин;
3 – площа гальмового (робочого) зносу колодки; 4 – тіло колодки;
5 – результат гальмового зносу; 6 – результат шкідливого зносу

Fig. 7. 3D models of increasing hazardous and brake wear of the pad:

- 1 – hazardously worn pad surface; 2 – plane separation line;
3 – plane of brake (working) wear of the pad ; 4 – pad body; 5 – result of brake wear; 6 – result of hazardous pad

Визначення геометричних параметрів довжини шкідливого зносу у верхній частині гальмової колодки в разі відомого зносу зверху. Розрахункова схема повертання гальмової колодки з башмаком зображена на рис. 8.

Поставлене завдання зводиться до визначення довжини дуги $\cup A'B$, яку можна обчислити за такою формулою [3]:

$$\cup A'B = \frac{\pi R_k \cdot \angle A'CB}{180}, \quad (1)$$

де R_k – розрахунковий радіус колеса вагона, м.

Позначимо систему координат у точці O . Вертикальною обираємо вісь Z , горизонталь-

ною X , як прийнято під час конструювання вагонів.

Розрахунки проводимо, використовуючи координатний метод. У першу чергу розрахуємо координати точки A' , що є точкою перетину кола з центром у точці O та радіусом $OA = OA'$ та кола з центром у точці C та радіусом R_k .

Рівняння кола з центром у точці O та радіусом OA буде мати такий вигляд:

$$x^2 + z^2 = OA^2, \quad (2)$$

відповідно кола в точці C :

$$(x - x_c)^2 + (z - z_c)^2 = R_k^2, \quad (3)$$

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

тут x_C , z_C координати точки C . Положення точки C можна записати у вигляді $x_C = R_O \cos \alpha_k$, $z_C = R_O \sin \alpha_k$, тоді рівняння (3) буде мати вигляд:

$$(x - R_O \cos \alpha_k)^2 + (z - R_O \sin \alpha_k)^2 = R_k^2, \quad (4)$$

де R_O – відстань між точками O та C ; α_k – кут нахилу колодки відносно центра колеса вагона.

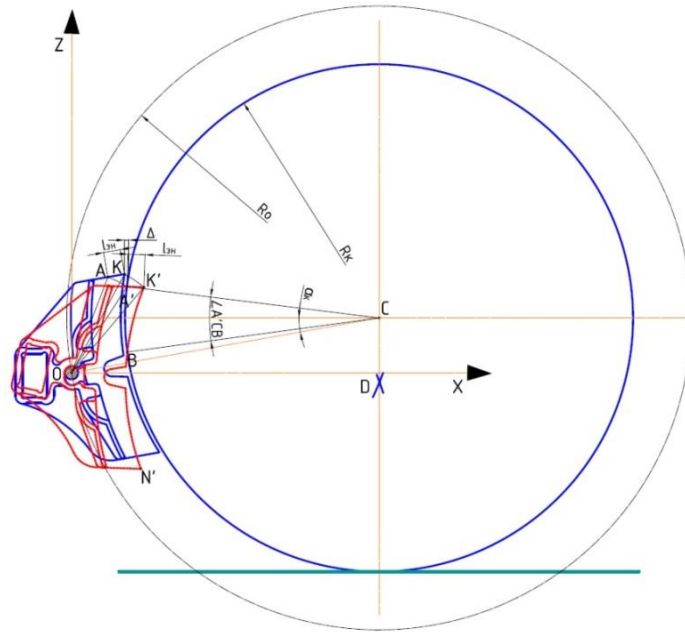


Рис. 8. Розрахункова схема обертання башмака з колодкою

Fig. 8. The design rotation scheme of the shoe with the pad

Положення точки A' визначаємо із системи рівнянь:

$$\begin{cases} x^2 + z^2 = OA^2, \\ (x - R_O \cos \alpha_k)^2 + (z - R_O \sin \alpha_k)^2 = R_k^2, \end{cases} \quad (5)$$

Слід зазначити, що координати точки A' $x_{A'}$, $z_{A'} > 0$ в обраній системі координат.

Визначимо координати точок A , K , K' , N' . Для цього розглянемо більш детально схему повороту колодки з башмаком. Схема повороту відносно маятникової підвіски зображена на рис. 9.

Положення точок A , K пов'язані з початковими параметрами системи маятникова підвіска – башмак – гальмова колодка: початкова тов-

щина колодки, величина зносу l_{zn} , розміри башмака, знос маятникової підвіски в зонах контакту з башмаком і боковою рамою візка. Для розв'язання задачі було взято, що башмак і гальмова колодка мають номінальні розміри.

Кут β визначаємо як кут між двома векторами OA та OA' , що є кутом повороту колодки відносно точки O :

$$\beta = \arccos \left(\frac{x_A \cdot x_{A'} + z_A \cdot z_{A'}}{\sqrt{(x_A^2 + z_A^2)} \sqrt{(x_{A'}^2 + z_{A'}^2)}} \right). \quad (6)$$

Координати точок K' , N' визначаємо з відомого кута β й початкових точок K , N .

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

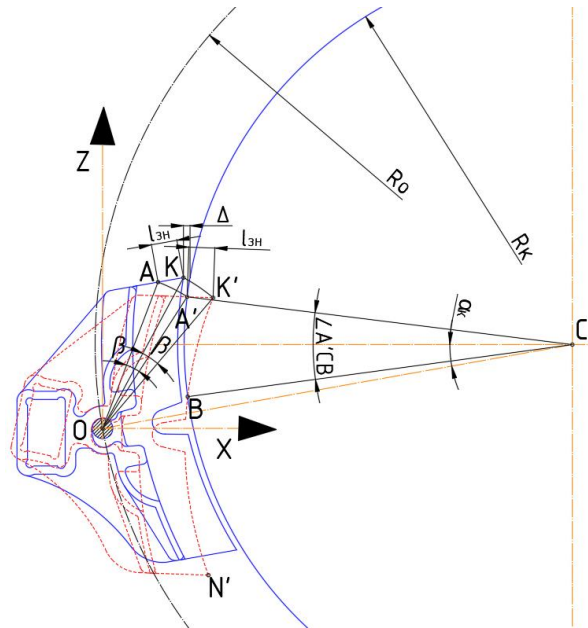


Рис. 9. Теоретична схема повороту башмака з колодкою відносно маятникової підвіски

Fig. 9. Theoretical rotation scheme of the shoe with the pad relative to the pendular suspension

Для знаходження положення точки D проводимо з точок K' , N' кола з радіусом $R_K + \Delta$ (де Δ – величина зазору між колодкою та колесом у вільному стані без повороту башмака з колодкою) і знаходимо їх точку перетину, яка є точкою D :

$$\begin{cases} (x - x_{K'})^2 + (z - z_{K'})^2 = (R_K + \Delta)^2, \\ (x - x_{N'})^2 + (z - z_{N'})^2 = (R_K + \Delta)^2. \end{cases} \quad (7)$$

Координати точки B можна знайти як точку перетину кола з центром у точці C , радіусом кола R_K і в точці D з радіусом $R_K + \Delta$. Для визначення складаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} (x - R_O \cos \alpha_K)^2 + (z - R_O \sin \alpha_K)^2 = R_K^2, \\ (x - x_D)^2 + (z - z_D)^2 = (R_K + \Delta)^2. \end{cases} \quad (8)$$

Визначивши координати точок A' і B , кут $\angle A'CB$ можна знайти як кут між двома прямими CA' і CB за формулою:

$$\cos \angle A'CB = \frac{|(z_C - z_{A'})(z_C - z_B) + (x_{A'} - x_C)(x_B - x_C)|}{\sqrt{(z_C - z_{A'})^2 + (x_{A'} - x_C)^2} \cdot \sqrt{(z_C - z_B)^2 + (x_B - x_C)^2}}, \quad (9)$$

звідки

$$\angle A'CB = \arccos \left(\frac{|(z_C - z_{A'})(z_C - z_B) + (x_{A'} - x_C)(x_B - x_C)|}{\sqrt{(z_C - z_{A'})^2 + (x_{A'} - x_C)^2} \cdot \sqrt{(z_C - z_B)^2 + (x_B - x_C)^2}} \right). \quad (10)$$

Знаючи кут $\angle A'CB$, за формулою (1) визначаємо довжину дуги.

Усі наведені рівняння розв'язано за допомогою програмного комплексу MathCAD [15]. Для порівняння результатів розрахунку використано функціонал графічного програмного

комплексу AutoCAD. Результати розрахунку в середовищі AutoCAD залежностей довжин шкідливого зносу гальмової колодки від відомого її горизонтального зносу зверху та зазору між колесом і колодкою наведені в табл. 1, а приклад графічного визначення на рис. 10.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Таблиця 1

Залежність довжини зносу композиційної колодки від її горизонтального зносу та зазору між колесом і колодкою

Table 1

Dependence of the wear length of the composition pad on its horizontal wear and the gap between the wheel and the pad

Зазор між коле- сом і колодкою, мм	Величина горизонтального зносу гальмової колодки, h , мм																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	20	30	40	50	
	Дефініційована довжина шкідливого зносу гальмової колодки, l , мм																			
3	41,78	66,1	82,13	93,49	101,96	108,49	113,66	117,85	121,29	124,16	126,57	128,63	130,39	131,91	133,23	137,74	141,52	142,64	142,92	
4	33,02	54,68	70,02	81,45	90,28	97,3	102,98	107,68	111,61	114,95	117,79	120,24	122,37	124,24	125,87	131,66	137,04	139,11	140,02	
5	27,24	46,53	60,92	72,05	80,9	88,21	94,05	99,05	103,29	106,94	110,08	112,82	115,23	117,35	119,24	126,07	132,81	135,73	137,22	
6	23,16	40,45	53,86	64,53	73,23	80,49	86,49	91,64	96,07	99,92	103,27	106,22	108,83	111,15	113,22	120,89	128,82	132,5	134,52	
7	20,12	35,75	48,22	58,39	66,84	73,99	80,00	85,22	89,75	93,73	97,21	100,31	103,06	105,53	107,75	116,1	125,04	129,41	131,91	
8	17,78	32	43,62	53,29	61,43	68,43	74,39	79,6	84,17	88,22	91,79	94,98	97,85	100,43	102,76	111,64	121,46	126,44	129,39	
9	15,91	28,95	39,81	48,98	56,81	63,59	69,47	74,65	79,22	83,29	86,91	90,17	93,11	95,76	98,18	107,5	118,06	123,6	126,95	
10	14,4	26,42	36,59	45,29	52,82	59,4	65,15	70,25	74,79	78,86	82,5	85,79	88,78	91,49	93,97	103,65	114,83	120,86	124,6	
12	12,08	22,46	31,46	39,33	46,26	52,42	57,88	62,79	67,21	71,22	74,84	78,15	81,17	83,94	86,49	96,61	108,83	115,71	120,12	
14	10,4	19,51	27,56	34,71	41,4	46,84	52,02	56,71	60,97	64,87	68,43	71,7	74,71	77,48	80,05	90,43	103,38	110,95	115,92	

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

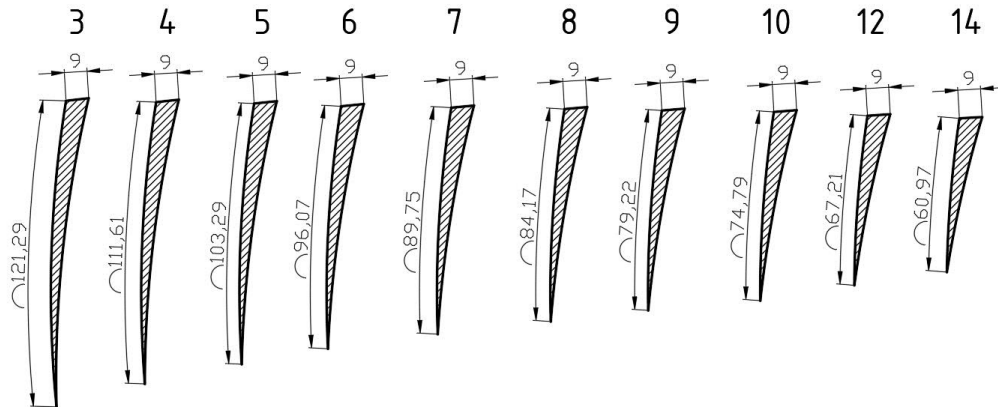


Рис. 10. Величини параметрів верхнього шкідливого зносу композиційної гальмової колодки отримані за результатами комп'ютерного моделювання

Fig. 10. Parameters of the upper hazardous wear of the composite brake pad obtained from the results of computer simulation

За результатами виконаних досліджень наведені графічні залежності: довжини шкідливого $l_{\text{ск}}$ зносу (рис. 11); шкідливої площі $Q_{\text{ск}}$ зносу колодки (рис. 13); шкідливого об'єму $V_{\text{ск}}$ зносу

колодки (рис. 14) – від величини зазору між колесом і колодкою (5–8 мм) за можливого горизонтального (шкідливого) зносу верху колодки.

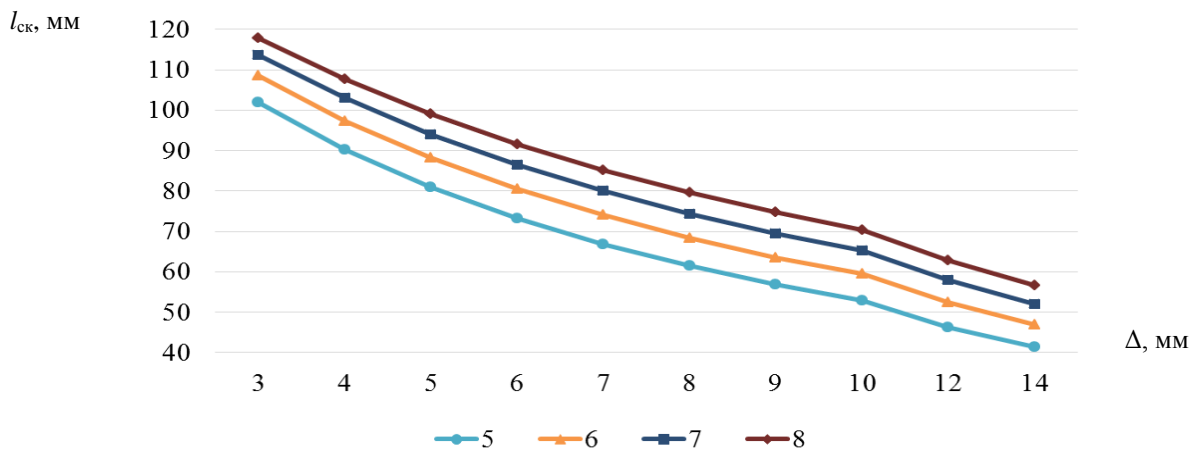


Рис. 11. Залежності довжини шкідливої стерстості за відомого горизонтального зносу верху колодки й зазору між колесом і колодкою

Fig. 11. Dependencies of the length of the hazardous wear with the known horizontal wear of the pad top and the gap between the wheel and the pad

Визначення площі нерівномірного зносу колодки. Розглянемо розрахункову схему визначення площі зносу гальмової колодки вантажного вагона (рис. 12).

Площу нерівномірного зносу гальмової колодки можна визначити як площу криволіній-

ної трапеції за $Q_{\text{ск}} = \int_a^b f(x)dx$, для цього складемо рівняння прямої, що проходить через точки A', K' :

$$\frac{x - x_{A'}}{x_{K'} - x_{A'}} = \frac{z - z_{A'}}{z_{K'} - z_{A'}}, \text{ або } z = \frac{(x - x_{A'})(z_{K'} - z_{A'})}{x_{K'} - x_{A'}} + z_{A'}.$$

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Коло, що імітує колесо вагона:

$$(z - z_C)^2 + (x - x_C)^2 = R_K^2, \quad z = \sqrt{R_K^2 - (x - x_C)^2} + z_C.$$

Коло, що проходить через точки B, K' з центром у точці D (рис. 8):

$$(z - z_D)^2 + (x - x_D)^2 = (R_K + \Delta)^2, \quad z = \sqrt{(R_K + \Delta)^2 - (x - x_D)^2} + z_D.$$

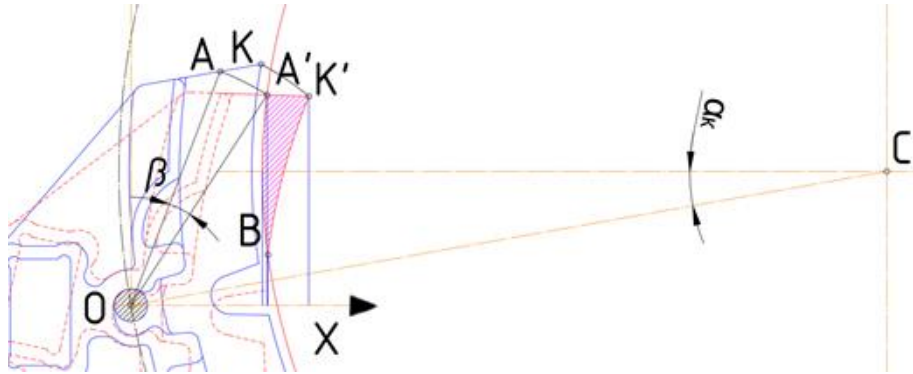


Рис. 12. Розрахункова схема визначення площі нерівномірного зносу гальмової колодки

Fig. 12. Calculation scheme for determining the area of non-uniform wear of the brake pad

Площа нерівномірного зносу:

$$Q_{CK} = \int_{x_{A'}}^{x_{K'}} \left(\frac{(x - x_{A'})(z_{K'} - z_{A'})}{x_{K'} - x_{A'}} + z_{A'} \right) dx - \int_{x_B}^{x_{K'}} \left(\sqrt{(R_K + \Delta)^2 - (x - x_D)^2} + z_D \right) dx - \\ - \int_{x_{A'}}^{x_B} \left(\sqrt{R_K^2 - (x - x_C)^2} + z_C \right) dx + \int_{x_C - R_K}^{x_{A'}} \left(\sqrt{R_K^2 - (x - x_C)^2} + z_C \right) dx.$$

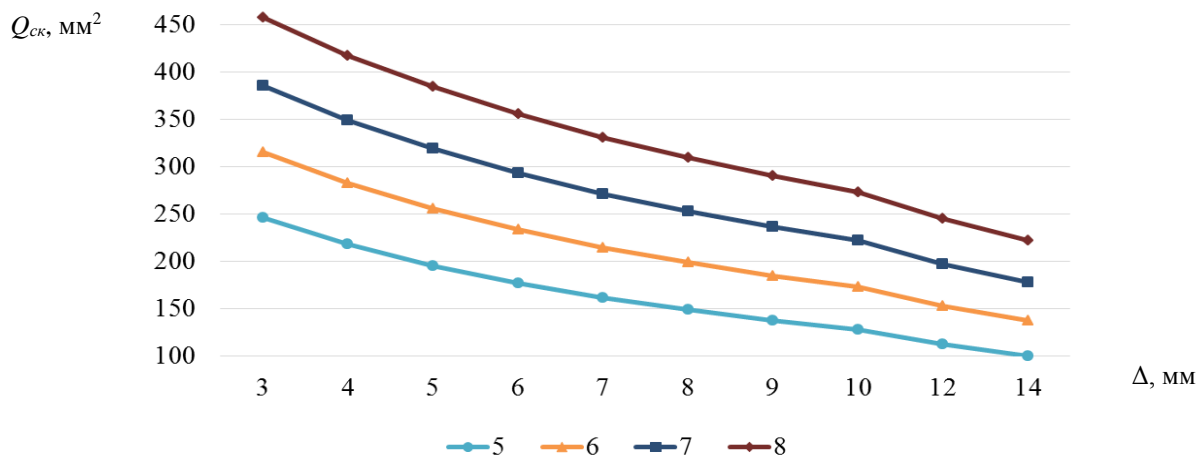


Рис. 13. Залежності площі шкідливої стертості за відомого горизонтального зносу верху колодки й зазору між колесом і колодкою

Fig. 13. Dependencies of the area of hazardous wear with known horizontal wear of the pad top and the gap between the wheel and the pad

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

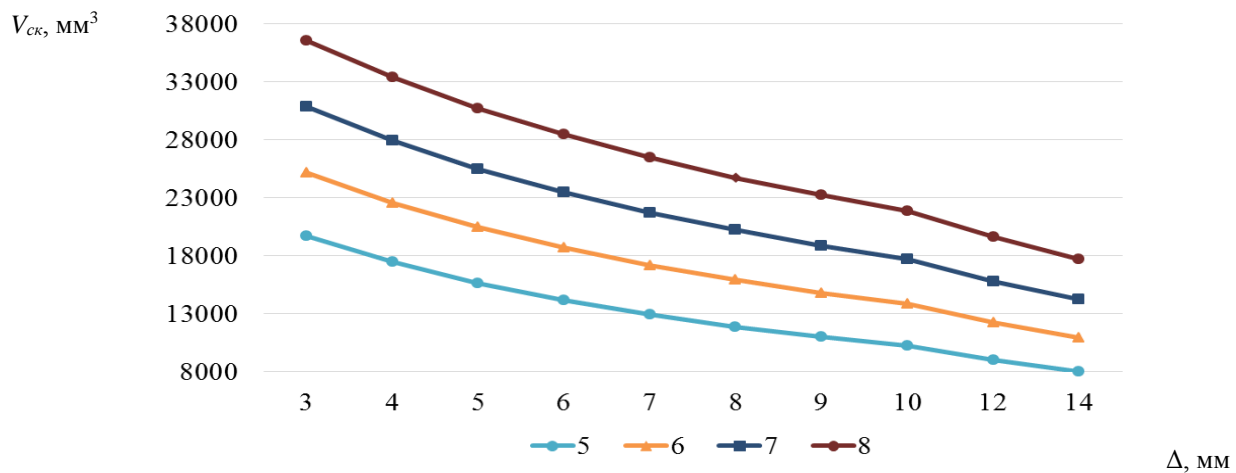


Рис. 14. Залежності об'єму шкідливої стертості за відомого горизонтального зносу верху колодки й зазору між колесом і колодкою

Fig. 14. Dependency of the amount of hazardous wear with known horizontal wear of the pad top and the gap between the wheel and the pad

Для вирішення завдання щодо ліквідації ненормативного зносу гальмових колодок вантажних вагонів на увесь їх регламентований термін експлуатації запропоновано інноваційний пристрій [9], у конструкції якого виконано зміни в розпірці триангеля.

Такий результат досягається за рахунок збалансування триангеля в осях його підвішування та відповідною фіксацією такого стану за попущених гальм вагона. При цьому колодки будуть займати однакове положення відносно поверхонь кочення коліс і не будуть торкатися їх своїми верхніми краями. Запропонований пристрій має: дві пари гальмових колодок, які жорстко закріплені в гальмових башмаках на балці триангеля й утримуються поблизу поверхні кочення коліс на маятникових підвісках візка; двоплечі вертикальні важелі, які шарнірно приєднані до розпірки триангеля і в яких шарнір їх з'єднання розташовується на одній прямій по осі А підвішування триангеля на маятникових підвісках (рис. 15).

Запропонований пристрій має напрямний криволінійний стрижень, кінці якого можуть шарнірно переміщуватися в циліндричних ковзунах, які приварені вздовж розпірок суміжних триангелів симетрично відносно отвору шарніра приєднання двоплечих важелів. Слід зазначити, що у напрямному криволінійному стрижні ра-

діуси на колінах згину не дозволяють йому взаємодіяти з надресорною балкою візка вантажного вагона навіть тоді, коли він перебуває у завантаженому стані. Також коліна стрижня утримують його від переміщення й випадання.

Інноваційний пристрій для забезпечення нормативного відведення колодок від коліс у гальмовій системі візків вантажних вагонів дає змогу ліквідувати сили, що діють на триангель за попущених гальм від ваги двоплечих вертикальних важелів. У пристрої на одній лінії розміщується центр отвору для валика і двох опорних шарнірів маятникових підвісок гальмових башмаків. У зв'язку з цим центр з'єднання двоплечих вертикальних важелів із розпіркою триангеля буде знаходитися на одній прямій. Водночас напрямний криволінійний стрижень буде сприяти нормативному відведенню гальмових колодок від поверхонь кочення коліс і чітко утримувати їх за попущених гальм вагона паралельно до коліс. Інноваційний пристрій дасть змогу збільшити ресурс колодок, забезпечить більш надійну роботу з точки зору ненормативного зносу гальмових колодок і дозволить дещо спростити конструкцію типового пристрою М 1180.000 ТУ 32 ЦВ 1351-80, який широко застосовують в усіх вантажних вагонах на АТ «Укрзалізниця» і залізницях країн СНД.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

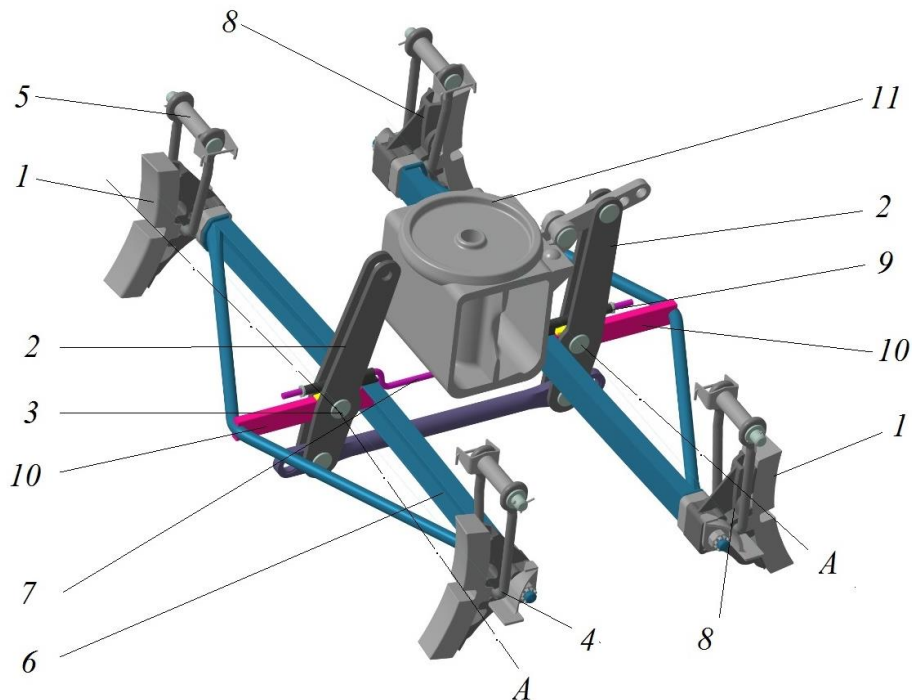


Рис. 15. Пристрій для забезпечення нормативного відведення колодок від коліс у гальмовій системі візків вантажних вагонів:
 1 – гальмова колодка; 2 – вертикальний двоплечий важіль; 3 – з’єднувальний валик (шарнір);
 4; 8 – гальмовий башмак; 5 – маятникова підвіска; 6 – триангель;
 7 – напрямний криволінійний стрижень; 9 – циліндричний ковзун; 10 – розпірка;
 11 – надресорна балка візка

Fig. 15. Device for ensuring the standard removal of pads from the wheels in the brake system of bogies of freight cars:
 1 – brake pad; 2 – vertical double-arm lever; 3 – connecting roller (pivot); 4; 8 – brake shoe;
 5 – pendular suspension; 6 – brake beam; 7 – guide curve rod;
 9 – cylindrical bearing; 10 – king post; 11 – bogie bolster

Результати

У ході обстежень механічної частини гальм було звернено увагу на ненормативний знос гальмових колодок вантажних вагонів, який утворюється від того, що загальний центр ваги колодки й башмака, які розташовані на маятниковому підвішуванні, не збігаються з центром отвору в розпірці триангеля в будь-яких колодках. Для дослідження можливих причин виникнення ненормативного зносу гальмових колодок за різних зазорів між колодкою і колесом наведено їх реальні зображення й теоретичні схеми, які дають змогу також визначити зміну їх геометричних параметрів, що впливають на корисну площу контакту. Під час порівняння результатів розрахунків з координатним мето-

дом, виконаних у програмному середовищі MathCAD, і графічним (в AutoCAD) з визначення геометричних параметрів утворення верхнього шкідливого зносу колодки залежно від нормативного зазору між колесом і гальмовою колодкою теоретично доведено, що похибка між ними не перевищує 5–7 %.

Наукова новизна та практична значимість

Уперше сформульовано засади методології визначення геометричних параметрів корисної площі контакту колодок за утвореного верхнього шкідливого зносу залежно від зазору між колесом і гальмовою колодкою з використанням координатного та графічного методів. Результати наукових досліджень, які отримані в робо-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ті, доцільно застосовувати в конструкторських та технологічних відділах і бюро під час проектування, як механічних гальмових систем ходових частин інноваційних вагонів, так і для вдосконалення вагонів, які зараз експлуатуються на залізниці.

Висновки

За результатами виконаних наукових досліджень можна сформулювати такі висновки:

1. На основі зібраного статистичного матеріалу та за результатами огляду й вимірювання параметрів гальмової й робочої стерстості колодок у 2 080 вантажних вагонів виконано віртуальне моделювання процесу утворення шкідливої стерстості з використанням комп'ютерних програм, у дійсних експлуатаційних умовах під час технічного обслуговування, деповського й капітального ремонтів вантажних вагонів як інвентарного парку АТ «Укрзалізниця», так і приватних підприємств. Визначено шляхи вирішення проблеми – ліквідації ненормативного двоплощинного зносу колодок.

2. Встановлено, що клинодуальний знос гальмових колодок відбувається через неправильну роботу пристрою рівномірного відведення та утримування гальмових колодок відносно рухомої поверхні контртіла, яка потребує загальмування.

3. З'ясовано, що чим менший зазор між колодкою й колесом і, відповідно, кут між поверхнею обода колеса та робочою частиною колодки, тим більша довжина гальмової колодки,

яка починаючи з верхівки піддається зносу за попущених гальм. Однак слід зауважити, що за понаднормового зазору, який переважно більший внизу колодки на відміну від її верху, відбувається інтенсивний знос у верхній крайковій частині колодки.

4. Теоретично доведено, що в ненормативно зношених гальмових колодках у верхній частині значно перерозподіляється питомий тиск за всією її гальмовою довжиною в процесі гальмування. Донині жодна теоретична робота не враховувала важливості цього перерозподілу питомого тиску, що віддаляло теоретичні висновки від дійсних умов експлуатації колодок вантажних вагонів.

5. Сформульовано засади методології визначення геометричних параметрів колодок вантажних вагонів за утвореної їх верхньої шкідливої стерстості залежно від зазору між колесом та гальмовою колодкою. За розробленою методологією отримано графічні залежності геометричних параметрів колодок, які в наступних роботах дозволятимуть оцінити гальмову ефективність вантажного поїзда.

6. Теоретично доведено, що похибка між результатами розрахунків визначення геометричних параметрів верхньої шкідливої стерстості колодки залежно від нормативного зазору між колесом та гальмовою колодкою за координатним методом у програмному середовищі MathCAD і графічним – в AutoCAD, не перевищує 5–7 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Аналіз стану безпеки руху поїздів на залізницях України за 2017 рік*. Головне управління вагонного господарства. Київ, 2017. 24 с.
2. Блохин Е. П., Алпысбаев К. Т., Панасенко В. Я. [и др.]. Тележки ZK1 полувагонов, построенных в КНР. *Вагонный парк*. 2012. № 9 (66). С. 12–14.
3. Власова А. М. *Математика с MathCad*. Екатеринбург : УрФУ, 2017. 139 с.
4. *Інструкція з експлуатації гальм рухомого складу на залізницях України : ЦТ-ЦВ-ЦЛ-0015* : затв. наказом Укрзалізниці від 28 жовтня 1997 р. №264-Ц. Київ, 2004. 146 с.
5. *Інструкція з ремонту гальмівного обладнання : ЦВ-ЦЛ-ЦТ-0013* : затв. М-вом трансп. та зв'язку України 25.01.2005. Київ, 2005. 160 с.
6. Коптовец А. Н., Ширин Л. Н., Шляхов Э. М., Денищенко А. В., Зиль В. В., Яворская В. В. *Моделирование рабочих процессов трения в колодочном колесном тормозе шахтных локомотивов* : монография. Днепро : Гос. высш. учеб. завед. «Нац. горный ун-т», 2017. 258 с.
7. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Винстрот Б. У., Муковоз С. П. Испытания перспективных тормозных колодок на железных дорогах Украины. *Локомотив-информ*. 2015. № 7/8. С. 20–22.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

8. 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). С. 4–11.
DOI: <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2017-4-4-11>
9. 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.
10. Равлюк В. Г. Дефініція особливостей дуального зносу гальмових колодок вантажних вагонів. *Зб. наук. пр. Укр. держ. універ. залізнич. трансп.* 2019. Вип. 183. С. 46–59.
11. Равлюк В. Г. Дослідження особливостей дуального зносу колодок у гальмовій системі вантажних вагонів. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. Вип. 2 (80). С. 111–126.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/166114>
12. Равлюк В. Г. Модернізація елементів гальмової важільної передачі візків вантажних вагонів. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 5 (83). С. 108–121. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/182013>
13. Шпачук В. П., Пушня В. О., Рубаненко О. І., Гарбуз А. О. *Теоретична механіка. Динаміка* : консп. лек. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016. 222 с.
14. Ambikaprasad O. Chaubey, Raut Abhijeet A. Failure Analysis of Brake Shoe in Indian Railway Wagon. *IPASJ International Journal of Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 3. Iss. 12. P. 37–41.
15. Bird J. *Science and Mathematics for Engineering*. 6th Edition. Routledge, 2019. 576 p.
16. Gupta V., Saini K., Garg A. K., Krishan G., Parkash O. Comparative Analysis of Disc Brake Model for Different Materials Investigated Under Tragic Situations. *Asian Review of Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 5. No 1. P. 18–23.
17. Ravlyuk V., Ravliuk M., Hrebenuk V., Bondarenko V. Research of the calculation scheme for the brake lever transmission and construction of the load model for the brake pads of freight cars. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708. P. 1–8.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012026>
18. Sarip S. Design Development of Lightweight Disc Brake for Regenerative Braking – Finite Element Analysis. *International Journal of Applied Physics and Mathematics*. 2013. Vol. 3. No 1. P. 52–58.
DOI: <https://doi.org/10.7763/IJAPM.2013.V3.173>
19. Sharma, R. C., Dhingra M., Pathak R. K. Braking systems in railway vehicles. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2015. Vol. 4. Iss. 01. P. 206–211.
20. Vakkalagadda M. R. K., Srivastava D. K., Mishra A., Racherla V. Performance analyses of brake blocks used by Indian Railways. *Original Research Article*. 2015. Vol. 328–329. P. 64–76.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.044>
21. 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>
22. 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. Iss. 15. P. 17–23.
DOI: <https://doi.org/10.9790/1684-1503031723>

В. Г. РАВЛЮК¹, И. М. АФАНАСЕНКО², М. Г. РАВЛЮК³

¹Каф. «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

²Каф. «Вагоны», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61500, тел. +38 (057) 730 10 35, эл. почта afanasenkoigor@kart.edu.ua, ORCID 0000-0003-4391-1595

³Каф. «Вагоны», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61500, тел. +38 (057) 730 10 35, эл. почта ravmg@ukr.net, ORCID 0000-0002-6021-660X

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТОРМОЗНЫХ КОЛОДОК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ ПРИ ВРЕДНОМ ИЗНОСЕ

Цель. Это исследование направлено на определение геометрических параметров тормозных колодок грузовых вагонов при вредном износе. **Методика.** Выполнен комплекс эксплуатационных и теоретических исследований по возникновению вредного износа, из-за которого меняются геометрические параметры полезной площади контакта тормозных колодок грузовых вагонов при различных установленных нормативных зазорах между колодкой и колесом, что существенно ухудшает эффективность торможения поездов. С помощью собранного статистического материала выполнено компьютерное математическое моделирование верхней вредной стёртости при различных зазорах, а также определены негативные факторы, влияющие на работу тормозной системы. Использовано программное обеспечение MathCAD и AutoCAD. **Результаты.** В ходе обследований механической части тормозов было обращено внимание на ненормативный износ тормозных колодок грузовых вагонов, который образуется от того, что общий центр тяжести колодки и башмака, которые расположены на маятниковой подвеске, не совпадают с центром отверстия в распорке триангеля при любых колодках. Для исследования возможных причин возникновения ненормативного износа тормозных колодок при различных зазорах между колодкой и колесом приведены их реальные изображения и теоретические схемы, которые позволяют также определить изменение их геометрических параметров, влияющих на полезную площадь контакта. При сравнении результатов расчетов по координатному методу, выполненным в программной среде MathCAD, и по графическому (в AutoCAD), по определению геометрических параметров образования верхнего вредного износа колодки в зависимости от нормативного зазора между колесом и тормозной колодкой теоретически доказано, что погрешность между ними не превышает 5–7 %. **Научная новизна.** Впервые сформулированы основы методологии определения геометрических параметров полезной площади контакта колодок при образовании верхнего вредного износа в зависимости от зазора между колесом и тормозной колодкой с использованием координатного и графического методов. **Практическая значимость.** Результаты научных исследований, полученных в работе, целесообразно применять в конструкторских и технологических отделах и бюро при проектировании как механических тормозных систем ходовых частей инновационных вагонов, так и для совершенствования вагонов, которые сейчас эксплуатируются на железной дороге.

Ключевые слова: тормозная колодка; вагон; триангель; ненормативный износ; метод; анализ; геометрические параметры; стертость; колесо; зазор

V. G. RAVLYUK¹, I. M. AFANASENKO², M. G. RAVLIUK³

¹Dep. «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

²Dep. «Cars», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61500, tel. +38 (057) 730 10 35, e-mail afanassenkoigor@kart.edu.ua, ORCID 0000-0003-4391-1595

³Dep. «Cars», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61500, tel. +38 (057) 730 10 35, e-mail ravmg@ukr.net, ORCID 0000-0002-6021-660X

INVESTIGATION OF THE GEOMETRIC PARAMETERS OF THE BRAKE PADS OF FREIGHT CARS UNDER HAZARDOUS WEAR

Purpose. This study aims to determine the geometric parameters of the brake pads of freight cars under hazardous wear. **Methodology.** A set of operational and theoretical studies concerning the occurrence of hazardous wear, which changes the geometric parameters of the useful contact area of the brake pads of freight cars at different established gaps between the pad and the wheel, which significantly impairs the effectiveness of train braking. Using the collected statistical material, computer mathematical modeling of the upper hazardous wear at different gaps was performed and the negative factors affecting the brake system were identified. MathCAD and AutoCAD software was used. **Findings.** As a result of inspections of the mechanical part of the brakes, attention was paid to the abnormal wear of the brake pads of the freight cars, which is formed by the fact that the common gravity center of the pad and the shoe, placed on the pendular suspension, do not coincide with the center of the hole in brake beam king post

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

with any pads. In order to investigate possible causes of abnormal wear of the brake pads, their real images and theoretical schemes are given, which allow to establish the causes of the formation of abnormal wear of the pads at different gaps between the pad and the wheel and to determine their change of geometrical parameters that affect the useful contact area. When comparing the results of calculations according to the coordinate method performed in the MathCAD software environment and the graphic method (in AutoCAD), for determining the geometric parameters of the formation of the upper hazardous pad wear, depending on the regulatory pad wear between the wheel and the brake pad, it is theoretically proved that the error between them does not exceed 5–7%. **Originality.** For the first time, the principles of the methodology for determining the geometric parameters of the useful contact area of the pads with the formation of upper hazardous wear, depending on the gap between the wheel and the brake shoe, were formulated using coordinate and graphical methods. **Practical value.** It is advisable to apply the results of the research obtained in the work in the design and technological departments and bureaus when designing both mechanical brake systems for the undercarriage of innovative cars and for improvement of the cars currently operated at the railways.

Keywords: brake shoe; car; brake beam; abnormal wear; method; analysis; geometric parameters; wear; wheel; gap

REFERENCES

1. *Analiz stanu bezpeky rukhu poizdiv na zaliznycjakh Ukrajinu za 2017 rik.* (2017). Gholovne upravlinnja vaghonnogho ghospodarstva. Kyiv. (in Ukrainian)
2. Blokhin, Y. P., Alpysbaev, K. T., & Panasenko, V. Y. (2012). Telezhki ZK1 poluvagonov, postroennykh v KNR. *Vagonnyi park*, 9(66), 12-14. (in Russian)
3. Vlasova, A. M. (2017). *Matematika s MathCad*. Ekaterinburg: UrFU. (in Russian)
4. *Instruktsiia z ekspluatatsii halm rukhomoho skladu na zaliznytsiakh Ukrainy: TsT-TsV-TsL-0015, No. 264-Ts.* (2004). Kyiv. (in Ukrainian)
5. *Instrukcija z remontu ghaljmnogho obladnannja. CV-CL-CT-0013 No. 160.* (2005). Kyiv. (in Ukrainian)
6. Koptovec, A. N., Shirin, L. N., Shlyahov, E. M., Denishchenko, A. V., Zil, V. V., & Yavorskaya, V. V. (2017). *Modelirovanie rabochih processov treniya v kolodochnom kolesnom tormoze shahitnyh lokomotivov: Monografiya.* Dnipro: Gosudarstvennoe vysshee uchebnoe zavedenie «Natsionalnyy gornyy universitet» (in Russian)
7. Muradyan, L. A., Shaposhnik, V. Yu., & Vinstrot, B. U. (2015). Ispytaniya perspektivnykh tormoznykh kolodok na zheleznykh dorogah Ukrainy. *Lokomotiv-inform.* №7-8. 20-22. (in Russian)
8. 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), 4-11. DOI: <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2017-4-4-11> (in Russian)
9. Ravlyuk, V. G., & Nechvoloda, S. I. (2017). *UA Patent № 121889 Ukrainskyi instytut intelektualnoi vlasnosti* (Ukrpatent)
10. Ravlyuk, V. G. (2019). Definition of the dual wear features of the brake shoes of freight cars. *Zbirnyk naukovykh prats USURT*, 183, 46-59. (in Ukrainian)
11. Ravlyuk, V. G. (2019). Investigation of features of dual wear of pads in brake system of freight cars. *Science and Transport Progress*, 2(80), 11-126. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/166114> (in Ukrainian)
12. Ravlyuk, V. G. (2019). The modernization of the elements of the brake lever transmission of freight cars bogies. *Science and Transport Progress*, 5(83), 108-121. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/182013> (in Ukrainian)
13. Shpachuk, V. P., Pushnja, V. O., Rubanenko, O. I., & Gharbuz, A. O. (2016). *Konspekt lekcij z dyscypliny «Teoretychna mekhanika. Dynamika».* Kharkiv: O. M. Beketov National University of Urban Economy. (in Ukrainian)
14. Ambikaprasad, O. Chaubey, & Abhijeet, A. Raut. (2015). Failure Analysis of Brake Shoe in Indian Railway Wagon. *IPASJ International Journal of Mechanical Engineering*. 3(12) 37-41. (in English)
15. Bird, J. (2019). *Science and Mathematics for Engineering*. 6th Edition. Routledge. (in English)
16. Gupta, V., Saini, K., Garg, A. K., Krishan, G. & Parkash, O. (2016). Comparative Analysis of Disc Brake Model for Different Materials Investigated Under Tragic Situations. *Asian Review of Mechanical Engineering* 5(1), 18-23. (in English)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

17. Ravlyuk, V., Ravliuk, M., Hrebeniuk, V., & Bondarenko, V. (2019). Research of the calculation scheme for the brake lever transmission and construction of the load model for the brake pads of freight cars. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 708, 1-8.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012026> (in English)
18. Sarip, S. (2013). Design Development of Lightweight Disc Brake for Regenerative Braking – Finite Element Analysis. *International Journal of Applied Physics and Mathematics*, 3(1), 52-58.
DOI: <https://doi.org/10.7763/IJAPM.2013.V3.173> (in English)
19. Sharma, R. C., Dhingra, M., & Pathak, R. K. (2015). Braking systems in railway vehicles. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 4(01), 206-211. (in English)
20. Vakkalagadda, M. R. K., Srivastava, D. K., Mishra, A., & Racherla, V. (2015). Performance analyses of brake blocks used by Indian Railways. *Original Research Article*, 328-329, 64-76.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.044> (in English)
21. 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)
22. 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.
DOI: <https://doi.org/10.9790/1684-1503031723> (in English)

Надійшла до редколегії: 23.09.2019

Прийнята до друку: 24.01.2020

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.463.65.015:625.1.03

А. О. ШВЕЦЬ^{1*}

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

СТІЙКІСТЬ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ У РАЗІ ДІЇ СТИСКНИХ ПОЗДОВЖНИХ СИЛ

Мета. Ця робота спрямована на: теоретичне дослідження стійкості руху вагонів у разі дії на них поздовжніх сил квазістатичного характеру; визначення аналітичних залежностей для оцінки поздовжньої навантаженості вагонів у поїздах; аналіз впливу одночасної дії деяких факторів на значення поздовжніх сил, за яких ще зберігається стійкість руху вагонів. **Методика.** Оцінку стійкості вантажного вагона під час руху з різними швидкостями по криволінійних ділянках колії досліджено аналітичним методом. Розглянуто найбільш несприятливі схеми прикладання стискних поздовжніх сил у вертикальній та горизонтальній площині. **Результати.** Отримано вирази для обчислення значення коефіцієнта запасу стійкості від витискання поздовжньою стисною силою, що діє на вагон у складі вантажного поїзда. Розрахунки проведено у порожньому й завантаженому стані з поперечним розбігом рами кузова вагона відносно осі колії в напрямному перетині в 50 мм у кривій малого радіуса з урахуванням сил інерції від непогашеного прискорення. **Наукова новизна.** Теоретично досліджено вплив на стійкість руху квазістатичних поздовжніх стискних сил залежно від зміни швидкості та значення сили, а також вплив сил тертя в контакті гребеня колеса й рейки та ексцентриситету закріплення хвостової частини автозчеплення. Досліджено вплив поздовжніх стискних сил на стійкість вантажного рухомого складу під час руху у кривій малого радіуса зі швидкостями включно до конструкційного значення в 120 км/год. **Практична значимість.** Застосування результатів, отриманих за допомогою наведеної методики, сприятиме підвищенню стійкості вантажного рухомого складу, що у свою чергу дозволить збільшити технічну швидкість руху поїздів за рахунок зняття деяких наявних обмежень допустимих швидкостей. Використання викладеної методики визначення коефіцієнта запасу стійкості від витискання дозволить обґрунтовувати причину сходження коліс, а також розробляти й реалізовувати на практиці технічні заходи щодо запобігання витискання екіпажів, розпору та зсуву колії.

Ключові слова: безпека руху; піввагон; коефіцієнт запасу стійкості від витискання; криволінійні ділянки колії; поздовжні сили; швидкість руху

Вступ

Забезпечення стійкості руху вагонів у довгосоставних вантажних поїздах підвищеної вантажопідйомності залишається актуальною проблемою протягом тривалого часу. Величини допустимих поздовжніх сил увійшли в нормативно-технічні документи, відповідно до яких усі нові спроектовані й побудовані вагони повинні відповідати умовам стійкості від витискання та скочування з колії. Ці документи також служать настановою під час організації руху довгосоставних вантажних поїздів підвищеної вантажопідйомності. Однак у процесі експлуатації виникає необхідність коригування нормативних документів, особливо в разі підвищення швидкості руху та скасування занадто

жорстких обмежень на умови ведення поїздів [2, 4, 8, 19].

Поздовжня квазістатична стискна сила в поїзді є основним експлуатаційним параметром. Отже, одним із пріоритетних завдань вдосконалення технології керування поїздами є зниження цього силового фактора в процесі експлуатаційної роботи. Крім того, ще недостатньо вивчена, особливо в теоретичному плані, передача поздовжніх сил квазістатичного характеру на елементи й вузли вагонів, а також на залізничну колійну структуру [7–9, 22].

Поздовжні зусилля, що діють на вагони в поїзді, можна розглядати як механічні навантаження статичного, квазістатичного або динамічного характеру. Як правило, вони являють собою комбінацію статичних, квазістатичних

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

і динамічних дій, що діють одночасно на вагони [8, 11, 23].

Навантаження статичні й квазістатичні – це механічні впливи, які повільно змінюються в часі. Динамічні навантаження мають найрізноманітніший характер зміни. Основною проблемою під час класифікації поздовжніх зусиль є з'ясування відмінностей між статичними і квазістатичними зусиллями та динамічними. Таким чином, процес передачі поздовжніх сил на елементи кузова вагона, його ходові частини та залізничну колію буде відбуватися по-різному залежно від того, є поздовжня сила квазістатичною (статичною) чи ні [8, 14–16, 20].

Мета

Ця робота спрямована на теоретичне дослідження впливу поздовжніх сил квазістатичного характеру на стійкість руху вагонів, визначення аналітичних залежностей для оцінки поздовжньої навантаженості вагонів у поїздах, а також аналіз впливу поєднання деяких факторів на значення поздовжніх сил, за яких ще зберігається стійкість руху вагонів.

Методика

Основним критерієм оцінки динамічних якостей рухомого складу є критерій стійкості екіпажу проти сходження з рейок, що являє собою гранично допустиме відношення поперечних горизонтальних і вертикальних сил, які діють на набігаюче колесо. Не існує єдиної думки щодо того, яке відношення поперечних горизонтальних та вертикальних сил, що діють на колісну пару, слід брати за критерій стійкості екіпажу проти сходження колеса з рейок [8–10, 21].

Вибір розрахункових схем вагонів та поїзда визначається поставленим завданням і критерієм оцінки стійкості руху вагона [12, 16–18]. Крім того, розрахункова схема повинна враховувати можливість різних схем встановлення окремого вагона в рейковій колії залежно від

сил стискання або розтягування на криволінійній або прямій ділянці. Розрахункова схема повинна також відображати особливості передачі поздовжніх сил на елементи візків у вертикальному й горизонтальному (поперечному) напрямках (рис. 1) [6, 8].

Кожен випадок прикладання сил до вагона у вертикальній площині потрібно розглядати разом із різними випадками встановлення вагона в горизонтальній площині й окремо для розтягувальних і стискних поздовжніх сил на прямих та криволінійних ділянках колії. Причини виникнення додаткового групового впливу коліс візків на колію, викликаного квазістатичним розтягуванням або стисканням поїзда, такі: ексцентриситети закріплення хвостової частини автозчеплення у вертикальній Δ_1^B (рис. 1, а) та горизонтальній e (рис. 1, б) площині; вертикальні перекоси вантажних вагонів у разі стискання поїзда Δ_2^B (рис. 1, а).

Хвостовик автозчеплення моделі СА–3 (СА–3М), що експлуатується на багатьох залізницях, має радіус заокруглення 130 мм, а опорна плита, на яку хвостовою частиною автозчеплення передається поздовжня сила поїзда, має радіус заокруглення 150 мм. Тому стискна сила передається опорній плиті автозчепленням у точці, яка за перекосів вагонів за схемою «ялинки» переміщується в горизонтальній площині поперек екіпажа (рис. 1, б). Реально можливе значення для вагонів $e = 20$ мм [6, 15].

Ексцентриситет e можливий у результаті відхилення від проектного положення хвостової частини автозчеплення під час виготовлення екіпажа на заводі, а значення Δ_1^B обумовлено завантаженням вагона, вертикальною жорсткістю центрального ресорного підвішування та зносом коліс. У разі постановки порожнього вагона в поїзд із повністю завантаженими вагонами значення Δ_1^B (рис. 1, а) може досягати 80 мм [4].

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

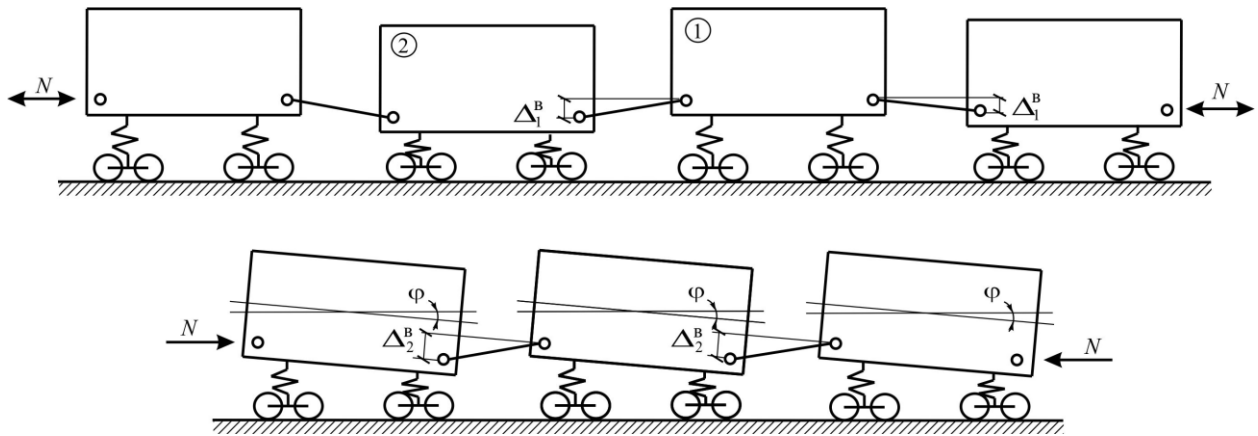
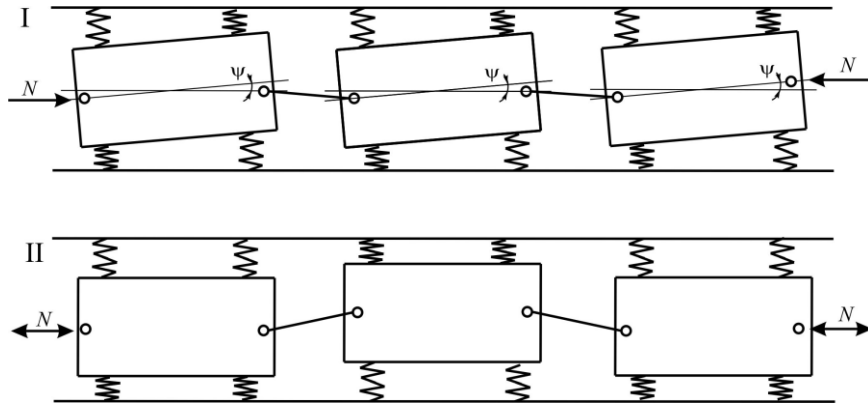
a – a*б – б*

Рис. 1. Схема розташування вагонів у складі поїзда в разі передачі поздовжнього зусилля:

a – установа вагонів у вертикальній площині з перекосом;*б* – у горизонтальній площині в разі перекосу за схемою «ялинка» (схема I) і хордове розташування (схема II)

Fig. 1. Scheme of arrangement of cars in a train in case of transmission of longitudinal force:

a – installation of cars in a vertical plane with a skew;*b* – in the horizontal plane in case of skew according to the herringbone pattern (scheme I) and chordal arrangement (scheme II)

За квазістатичного стикання поїзда вагони в процесі руху прагнуть перекоситися. Ходові частини, які взаємодіють із рейками, виконують функцію поперечних зв'язків та утримують вагони в основному положенні. Зазори між гребенями й головкою рейки, у ресорних, буксових та п'ятникових вузлах, звивистий рух екіпажів, ексцентриситети горизонтального й вертикального розташування хвостовиків автозчеплення відносно поздовжньої лінії осей автозчеплення призводять до того, що кузови й автозчеплення вагонів розташовуються в процесі руху з деякими перекосами. Найчас-

тіше такі перекоси виникають за схемою «ялинка», за якої додатковий боковий вплив колісних пар візків на колійну структуру є максимальним [3, 5, 6, 8].

У режимі рекуперативного гальмування вагони переважно займають положення максимального перекосу в межах зазору в рейковій колії, причому кути повороту дослідного й сусідніх із ним вагонів мають один знак (рис. 2, *a*). За руху по кривій у тяговому режимі вагони займають здебільшого хордове розташування (рис. 2, *б*) [5].

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

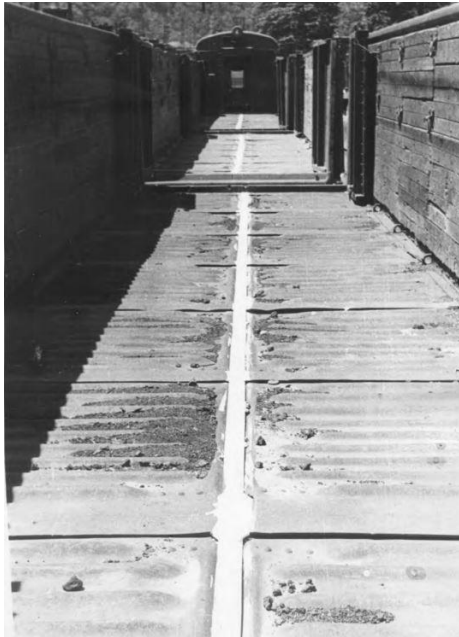
a – a*б – б*

Рис. 2. Взаємне розташування осей дослідного й сусідніх із ним вагонів:
a – режим рекуперативного гальмування; *б* – тяговий режим

Fig. 2. Mutual arrangement of axles of the experimental and neighboring cars:
a – mode of regenerative braking; *b* – traction mode

Зі збільшенням квазістатичного стискання поїзда перекося (рис. 1, *a*, *б*) збільшуються, викликаючи збільшення бокового й вертикального впливу коліс ходових частин вагона на колійну структуру. При цьому колеса сусідніх візків діють на протилежні рейкові нитки, тобто бокові сили реакції рейки на тиск колеса прагнуть розсунути колію або зсунути її вріз-нобіч.

Боковий вплив коліс візка на колію, зумовлений квазістатичним стисканням поїзда, доцільно знижувати зменшенням значення параметрів e та δ . Значення поперечного відхилення від осі колії п'ятникових перетинів рами вагона δ визначають за залежністю [6]:

$$\delta = e + \delta_0 + \delta_{\text{пр}}, \quad (1)$$

де δ_0 – непружне бокове переміщення шкворневого перетину вагона (за рахунок зазорів між гребенями й рейкою, у буксових, п'ятникових вузлах та інших з'єднаннях) у разі перекося за схемою «ялинки»; $\delta_{\text{пр}}$ – пружне бокове пере-

міщення кузова, що залежить від рамної сили H_p , значення якого:

$$\delta_y = \frac{H_p}{\varphi}, \quad (2)$$

де $\varphi = C_r$ – жорсткість бокового переміщення шкворневого перетину кузова після реалізації переміщення δ_0 , фактично є горизонтальною жорсткістю ресорного підвішування візка.

Основу методики визначення коефіцієнта стійкості від витискання поздовжніми силами складають дослідження, наведені в роботах [5, 8–10, 22]. Рух екіпажа у кривій розглянуто за різних у передній та задній частинах вагона: кутах нахилу кузовів до площини колії φ_1 та φ_2 ; кутах повороту автозчеплень відносно осі колії ψ_1 та ψ_2 ; врахованого повороту кузова вагона в межах зазору в колії на кут ψ . На вагон (рис. 3) діють стискні поздовжні сили, а сам екіпаж установлено в рейковій колії за схемою I – «ялинкою».

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

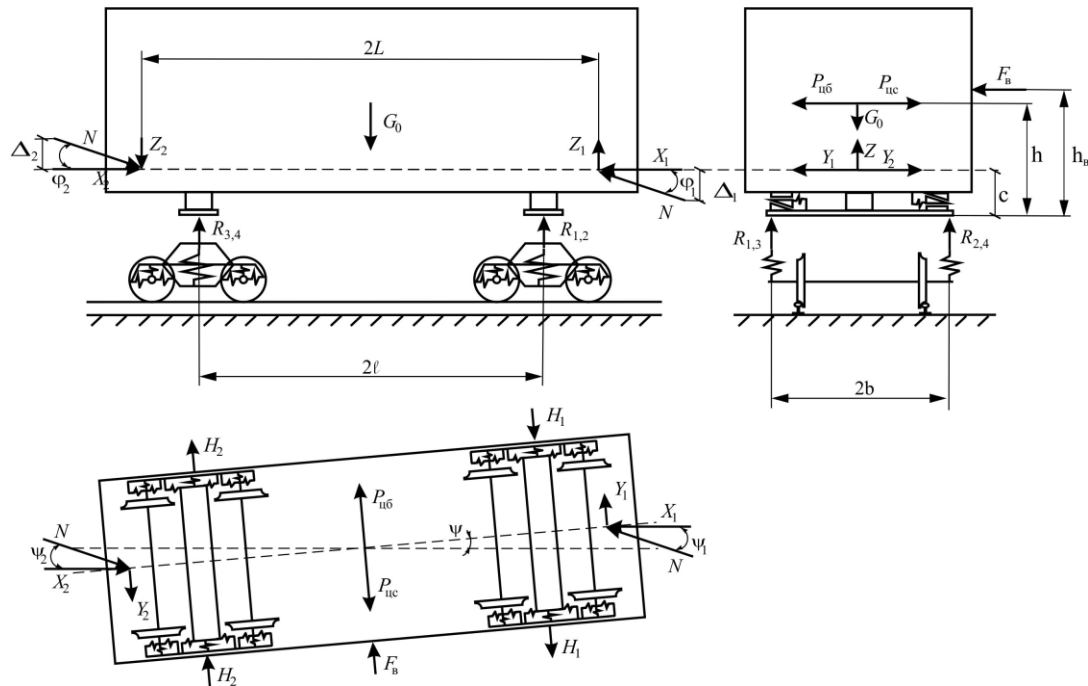


Рис. 3. Схема сил, що діють на вагон в разі встановлення за схемою «ялинки»

Fig. 3. Scheme of forces acting on the car in the case of placing according to the herringbone pattern

Сили, що діють на вагон, спроектовані на площину колії, а також площини, їй перпендикулярні – поздовжню відносно осі колії й поперечну. Наведені на рис. 3 позначення, а також

параметри, які використовують для визначення коефіцієнта стійкості від витискання поздовжніми силами, зведені в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри, які використовують для визначення коефіцієнта стійкості від витискання поздовжніми силами

Table 1

Parameters used to determine the lift resistance coefficient by longitudinal forces

Позначення	Параметр	Розмірність
N	поздовжня квазістатична сила в автозчепленні в разі дії на вагон стис- кних сил	кН
G_0	вага кузова вагона	кН
P_{nb}	відцентрова складова сил інерції	кН
P_{nc}	горизонтальна складова ваги екіпажа, що діє на нього під час руху по криволінійних ділянках колії	кН
Z_1, Z_2	вертикальні проєкції поздовжньої сили	кН
Y_1, Y_2	горизонтальні поперечні проєкції поздовжньої сили	кН
X_1, X_2	горизонтальні поздовжні проєкції поздовжньої сили	кН

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Продолжение табл 1
Continuation of Table 1

Позначення	Параметр	Розмірність
R_1, R_2, R_3, R_4	вертикальні складові реакцій опор	кН
H_1, H_2	горизонтальні складові реакцій опор	кН
P_1, P_2	вертикальні сили, що діють на колісну пару	кН
H_p	рамна сила, що діє на колісну пару	кН
G_1	вага не обресореної частини візка	кН
$G_{\text{кп}}$	вага колісної пари	кН
$G_{\text{віз}}$	вага візка	кН
C_r	горизонтальна жорсткість ресорного підвішування візка	кН/м
C_v	вертикальна жорсткість ресорного підвішування візка	кН/м
φ_1, φ_2	кути у вертикальній площині через різницю рівнів осей автозчеплень у з'єднанні двох вагонів	рад
ψ	кут повороту центральної осі кузова вагона в разі встановлення в колії з відхиленням п'ятників поперек колії	рад
ψ_1, ψ_2	кути в горизонтальній площині за стискання вагона в разі встановлення в колії з відхиленням п'ятників поперек колії	рад
Δ_1, Δ_2	різниця рівнів осей автозчеплень попереду й позаду вагона	м
e	ексцентриситет хвостової частини автозчеплення в результаті відхилення від проєктного положення під час виготовлення	м
$2b$	відстань між центрами шийок осей колісних пар	м
$2\delta_0$	сумарний поперечний розбіг рами кузова вагона відносно осі колії в напрямному перетині по шкворню	м
c	вертикальна відстань від верхньої площини центрального ресорного комплексу до рівня осі автозчеплення	м
$2L_{\text{зч}}$	довжина вагона по осях зчеплення	м
2ℓ	база вагона	м
$2L$	відстань між упорними плитами автозчеплень	м
R	радіус кривої	м
a	довжина корпусу автозчеплення від осі зчеплення до кінця хвостовика	м
$2S$	відстань між колами кочення коліс	м

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Продолжение табл 1

Continuation of Table 1

Позначення	Параметр	Розмірність
h	висота центра ваги кузова вагона над площиною обпирання надресорних балок	м
h_a	висота осі автозчеплення над рівнем головок рейок	м
$h_{вр}$	висота над рівнем площини головок рейок до верхньої площини центрального ресорного комплексу	м
r	радіус середньо зношеного колеса	м
$h_{ц}$	висота центра ваги вагона над рівнем головок рейок	м
$h_{в}^*$	висота над рівнем площини головок рейок до центра ваги бокової поверхні кузова вагона	м
$a_{неп}$	непогашене прискорення	м/с ²
g	прискорення вільного падіння	м/с ²
μ	коефіцієнт тертя між колесом і рейкою	
μ_2	коефіцієнт тертя між колесом і рейкою на не набігаючому колесі	
β	кут нахилу, утворений конусоподібною поверхнею гребеня колеса до горизонтальної осі	

Зусилля, зображені на рис. 3, визначають за методикою, наведеною в роботах [2, 8]. Розглянемо визначення кутів ψ , ψ_1 та ψ_2 в горизонтальній площині під час стискання вагона в разі

встановлення в колії з відхиленням п'ятників поперек колії (у різні боки від початкового відхилення поздовжньої осі вагона) на величину δ_0 (рис. 4).

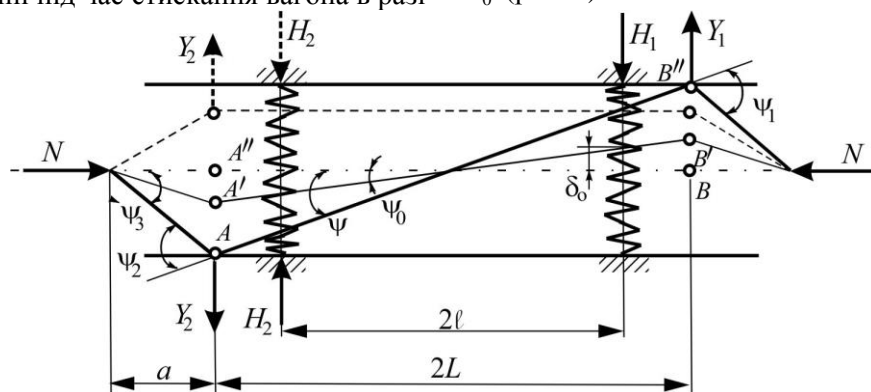


Рис. 4. Схема вагона для визначення складових поздовжніх сил у горизонтальній площині

Fig. 4. Car diagram for determining the components of longitudinal forces in the horizontal plane

На рис. 4 пунктирною лінією зображено сили взаємодії та положення центральної осі за хордового розташування дослідного вагона під дією стискних поздовжніх сил.

У випадку початкового перекосу осі вагона (рис. 3) за рахунок δ_0 поперечного відхилення

від осі колії п'ятникових перетинів рами вагона внаслідок розбігів колісної пари в рейковій колії, підшипників по шийках осі, букс відносно рами візка ($BB' = A'A'' = \delta_0 + e$), вісь вагона додатково відхилиться через деформацію ресор

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

під дією поперечних складових поздовжньої сили ($B'B'' = A'A = \delta_{\text{пр}}$).

Знаходимо кути повороту вагона у кривій, беручи, що всі вони однакові:

$$\psi = \frac{\delta}{\ell}; \quad (3)$$

$$\psi_1 = \frac{\delta}{\ell} \left(1 + \frac{L}{a} \right) + \frac{L_{3\text{ч}}}{R}; \quad (4)$$

$$\psi_2 = \frac{\delta}{\ell} \left(1 + \frac{L}{a} \right) - \frac{L_{3\text{ч}}}{R}. \quad (5)$$

Склавши рівняння рівноваги й рівняння спільності вертикальних переміщень (вертикальні жорсткості всіх ресорних комплектів однакові, а рама вагона абсолютно жорстка), визначаємо реакції опор та еквівалентний кут повороту кузова вагона від дії вертикальних складових поздовжньої сили φ_e [5, 10, 22]:

$$\varphi_e = \varphi_1 \cdot \left(\frac{L}{\ell} + 1 \right) + \varphi_2 \cdot \left(\frac{L}{\ell} - 1 \right); \quad (6)$$

$$R_1 = \frac{G_0}{4} - \frac{N}{4} \cdot \varphi_e + \frac{N}{4} \cdot \frac{c}{b} \cdot (\psi_1 - \psi_2) + \frac{G_0}{4} \cdot \frac{h}{gb} \cdot a_{\text{неп}}; \quad (7)$$

$$R_2 = \frac{G_0}{4} - \frac{N}{4} \cdot \varphi_e - \frac{N}{4} \cdot \frac{c}{b} \cdot (\psi_1 - \psi_2) - \frac{G_0}{4} \cdot \frac{h}{gb} \cdot a_{\text{неп}}; \quad (8)$$

$$H_1 = \frac{N}{4} \cdot \left(\psi_1 \cdot \left(\frac{L}{\ell} + 1 \right) + \psi_2 \cdot \left(\frac{L}{\ell} - 1 \right) + 2\psi \cdot \frac{L}{\ell} \right) + \frac{G_0}{2g} \cdot a_{\text{неп}}. \quad (9)$$

Оскільки кути ψ , ψ_1 та ψ_2 залежать від параметра δ , який у свою чергу залежить від H_p , то розрахунок за формулами (3)–(5) і (6)–(9) можливий методом послідовних наближень. Із достатньою для обчислення точністю можна

обмежитися першим наближенням, і формули (3)–(5) з урахуванням пружної поперечної деформації ресорних комплектів візків матимуть такий вигляд:

$$\psi = \frac{\delta_0 + e}{\ell} \cdot \left[1 + \frac{N \cdot L}{2\ell^2 \cdot C_r} \left(2 + \frac{L}{a} \right) \right]; \quad (10)$$

$$\psi_1 = \frac{\delta_0 + e}{\ell} \cdot \left[1 + \frac{N \cdot L}{2\ell^2 \cdot C_r} \left(2 + \frac{L}{a} \right) \right] \cdot \left(1 + \frac{L}{a} \right) + \frac{L_{3\text{ч}}}{R}; \quad (11)$$

$$\psi_2 = \frac{\delta_0 + e}{\ell} \cdot \left[1 + \frac{N \cdot L}{2\ell^2 \cdot C_r} \left(2 + \frac{L}{a} \right) \right] \cdot \left(1 + \frac{L}{a} \right) - \frac{L_{3\text{ч}}}{R}. \quad (12)$$

Із виразів (10)–(12) можна отримати залежності для визначення кутів у разі «чистого» перекосу вагона у прямій ділянці колії. Якщо знехтувати пружною поперечною деформацією ресорних комплектів візків та ексцентриситетом розташування хвостової частини автозчеплення, ці формули набувають вигляду, який отримано в роботах [2, 8].

Вертикальні P_1 , P_2 та горизонтальна H_p сили (рис. 5), що діють на колісну пару, визначають із рівноваги необресореної частини візка. У результаті системи лінійних рівнянь визначаємо вертикальну P_b і бокову поперечну P_6 реакції рейки на набігаючому колесі, а також коефіцієнт стійкості від витискання поздовжніми силами $K_{\text{ств}}$:

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

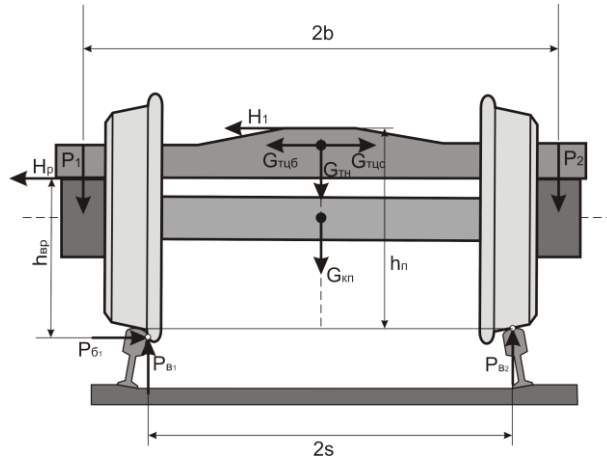


Рис. 5. Схема сил, що діють на візок

Fig. 5. The scheme of forces acting on the bogie

$$P_b = \frac{G_0}{8} + \frac{G_{\text{біз}}}{4} + \frac{N}{8} \cdot \left[(\psi_1 - \psi_2) \cdot \frac{h_a}{S} - \left[\varphi_1 \cdot \left(\frac{L}{\ell} + 1 \right) + \varphi_2 \cdot \left(\frac{L}{\ell} - 1 \right) \right] \cdot \frac{b}{S} + (\psi_1 + \psi_2 + 2\psi) \cdot \frac{L \cdot h_{\text{вп}}}{\ell \cdot S} \right]; \quad (13)$$

$$P_0 = \mu \cdot \left(\frac{G_0}{8} + \frac{G_{\text{біз}}}{4} \right) + \frac{N}{8} \cdot \left[(\psi_1 - \psi_2) \cdot \left(2 - \mu \cdot \frac{h_a}{S} \right) - \mu \cdot \left[\varphi_1 \cdot \left(\frac{L}{\ell} + 1 \right) + \varphi_2 \cdot \left(\frac{L}{\ell} - 1 \right) \right] \cdot \frac{b}{S} + (\psi_1 + \psi_2 + 2\psi) \cdot \frac{L}{\ell} \cdot \left(2 - \mu \cdot \frac{h_{\text{вп}}}{S} \right) \right]; \quad (14)$$

$$K_{\text{ств}} = \frac{tg\beta - \mu}{1 + \mu \cdot tg\beta} \cdot \frac{P_{\text{ваг}} + N \cdot \left[(\psi_1 - \psi_2) \cdot \frac{h_a}{S} - \varphi_e \cdot \frac{b}{S} + (\psi_1 + \psi_2 + 2\psi) \cdot \frac{L \cdot h_{\text{вп}}}{\ell \cdot S} \right]}{\mu \cdot P_{\text{ваг}} + N \cdot \left[(\psi_1 - \psi_2) \cdot \left(2 - \mu \cdot \frac{h_a}{S} \right) - \mu \cdot \varphi_e \cdot \frac{b}{S} + (\psi_1 + \psi_2 + 2\psi) \cdot \frac{L}{\ell} \cdot \left(2 - \mu \cdot \frac{h_{\text{вп}}}{S} \right) \right]}, \quad (15)$$

де $P_{\text{ваг}} = G_0 + 2G_{\text{біз}}$ – вага вагона, кН;
 $h_{\text{вп}} = r + r_{\text{ш}} \approx r$ – висота над рівнем площини головок рейок до верхньої площини центрального ресорного комплексу, м. Найчастіше цей параметр у ряді досліджень беруть рівним радіусу середньозношеного колеса.

За врахування сил інерції у кривій, вертикальну (13) та бокову (14) реакції рейки на набігаючому колесі підсумовують із силами інерції $P_{\text{ін}}$ і тиску вітру $F_{\text{в}}$ на бокову поверхню кузова вагона:

$$K_{\text{ств}}^{\text{І,П}} = \frac{tg\beta - \mu}{1 + \mu \cdot tg\beta} \cdot \frac{P_b \pm P_{\text{ін}} \cdot \frac{h_{\text{ц}}}{S} \pm F_{\text{в}} \cdot \frac{h_{\text{в}}^*}{S}}{P_0 \pm P_{\text{ін}} \cdot \left(2 - \mu \cdot \frac{h_{\text{ц}}}{S} \right) \pm F_{\text{в}} \cdot \left(2 - \mu \cdot \frac{h_{\text{в}}^*}{S} \right)}; \quad (16)$$

$$P_{\text{ін}} = (G_0 + 2 \cdot G_{\text{біз}}) \cdot \frac{a_{\text{нсп}}}{g} = P_{\text{ваг}} \cdot \frac{a_{\text{нсп}}}{g}. \quad (17)$$

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Відповідно до нормативної документації [6], коефіцієнт запасу стійкості колісної пари для другого розрахункового випадку визначають за формулою (6.67), у якій є тільки складові, що враховують вплив сили, спричиненої піднесенням зовнішньої рейки у кривій і спрямованої всередину кривої, але чомусь не враховують вплив відцентрової сили вагона, спрямованої

назовні кривої. Такий підхід явно збільшує стійкість від витискання назовні кривої та є недоцільним і небезпечним.

З урахуванням аналітичних виразів для визначення кутів у горизонтальній площині (10)–(12) запишемо отримані залежності для вертикальної (13) та бокової (14) реакцій рейки на набігаюче колесо:

$$P_B = \frac{1}{8} \cdot \left\{ P_{\text{ваг}}^{\text{ст}} + \frac{N^2}{C_r} \cdot \frac{\psi_a^2 \cdot h_{\text{вп}}}{(\delta_0 + e) \cdot S} + N \cdot \left[2\psi_a \cdot \frac{h_{\text{вп}}}{S} + \psi_{\text{кр}} \cdot \frac{h_a}{S} \right] \right\}; \quad (18)$$

$$P_6 = \frac{1}{8} \cdot \left\{ \mu \cdot P_{\text{ваг}}^{\text{ст}} + \frac{N^2}{C_r} \cdot \frac{\psi_a^2}{(\delta_0 + e)} \cdot \left(2 - \mu \cdot \frac{h_{\text{вп}}}{S} \right) + N \cdot \left[2\psi_a \cdot \left(2 - \mu \cdot \frac{h_{\text{вп}}}{S} \right) + \psi_{\text{кр}} \cdot \left(2 - \mu \cdot \frac{h_a}{S} \right) \right] \right\}, \quad (19)$$

де $P_{\text{ваг}}^{\text{ст}}$ – статичний тиск вагона (від колеса набігаючої колісної пари переднього візка (18)–(19)) на залізничну колію з урахуванням зневаження від поздовжньої сили, кН:

$$P_{\text{ваг}}^{\text{ст}} = P_{\text{ваг}} - N \cdot \varphi_e \cdot \frac{b}{S}; \quad (20)$$

ψ_a – кут, утворений поздовжньою віссю корпусу автозчеплення та віссю хребтової балки рами вагона в горизонтальній площині, рад:

$\psi_{\text{кр}}$ – кут повороту вагона, який залежить від розташування у кривій, рад:

$$\psi_{\text{кр}} = \frac{2L_{\text{зч}}}{R}. \quad (22)$$

Підставивши вирази (18) і (19) у формулу (16), ми отримаємо залежність для визначення коефіцієнта запасу стійкості від витискання поздовжніми силами, без урахування (23) та з урахуванням сил інерції й тиску вітру на бокову поверхню кузова вагона у кривій (24):

$$K_{\text{ств}} = \frac{tg\beta - \mu}{1 + \mu \cdot tg\beta} \cdot \frac{P_{\text{ваг}}^{\text{ст}} + \frac{N^2}{C_r} \cdot \frac{\psi_a^2 \cdot h_{\text{вп}}}{(\delta_0 + e) \cdot S} + N \cdot \left[2\psi_a \cdot \frac{h_{\text{вп}}}{S} + \psi_{\text{кр}} \cdot \frac{h_a}{S} \right]}{\mu \cdot P_{\text{ваг}}^{\text{ст}} + \frac{N^2}{C_r} \cdot \frac{\psi_a^2}{(\delta_0 + e)} \cdot \left(2 - \mu \cdot \frac{h_{\text{вп}}}{S} \right) + N \cdot \left[2\psi_a \cdot \left(2 - \mu \cdot \frac{h_{\text{вп}}}{S} \right) + \psi_{\text{кр}} \cdot \left(2 - \mu \cdot \frac{h_a}{S} \right) \right]}; \quad (23)$$

$$K_{\text{ств}}^{\text{I,II}} = \frac{tg\beta - \mu}{1 + \mu \cdot tg\beta} \cdot \frac{\left[P_{\text{ваг}}^{\text{ст}} + \frac{N^2}{C_r} \cdot \frac{\psi_a^2 \cdot h_{\text{вп}}}{(\delta_0 + e) \cdot S} + N \cdot \left[2\psi_a \cdot \frac{h_{\text{вп}}}{S} + \psi_{\text{кр}} \cdot \frac{h_a}{S} \right] \pm P_{\text{ін}} \cdot \frac{h_{\text{л}}}{S} \pm F_{\text{в}} \cdot \frac{h_{\text{в}}^*}{S} \right]}{\left[\mu \cdot P_{\text{ваг}}^{\text{ст}} + \frac{N^2}{C_r} \cdot \frac{\psi_a^2}{(\delta_0 + e)} \cdot \left(2 - \mu \cdot \frac{h_{\text{вп}}}{S} \right) + N \cdot \left[2\psi_a \cdot \left(2 - \mu \cdot \frac{h_{\text{вп}}}{S} \right) + \psi_{\text{кр}} \cdot \left(2 - \mu \cdot \frac{h_a}{S} \right) \right] \pm \right.} \cdot \left. \left[\pm P_{\text{ін}} \cdot \left(2 - \mu \cdot \frac{h_{\text{л}}}{S} \right) \pm F_{\text{в}} \cdot \left(2 - \mu \cdot \frac{h_{\text{в}}^*}{S} \right) \right] \right]}, \quad (24)$$

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

У формулі (24) верхні знаки відповідають установленню вагона, коли набігаюче колесо вкочується на зовнішню рейку (схема I), а нижні – установленню, коли набігаюче колесо вкочується на внутрішню рейку (схема II) [4].

Ця формула є розрахунковою, тому її не можна застосовувати для визначення стійкості в експериментах. В основу розрахунку покладена статична розрахункова схема. Однак вагон являє собою складну механічну систему, і під час руху взаємодія між його окремими частинами та між вагоном і колійною структурою носить динамічний характер [9, 10].

У роботі [1] наведено залежність для визначення коефіцієнта стійкості руху залізничного екіпажу, у якій на підставі експерименту враховано вплив швидкості руху колісної пари на

величину коефіцієнта тертя в контакті гребеня колеса і рейки:

$$\frac{P_0}{P_B} = \frac{tg\beta - \mu_0 \cdot (1 - 0,002v)}{1 + \mu_0 \cdot (1 - 0,002v) \cdot tg\beta}, \quad (25)$$

де v – швидкість руху, км/год; μ_0 – коефіцієнт тертя на межі зчеплення за $v = 0$. Для залізничного рухомого складу цей параметр для розрахунків рекомендується брати рівним $\mu_0 = 0,3 \div 0,33$.

Залежність для визначення коефіцієнта запасу стійкості від витискання поздовжніми силами $K_{\text{ств}}$ з урахуванням сил інерції у кривій $P_{\text{ін}}$ і складовою від дії вітрового навантаження на бокову поверхню кузова вагона F_B , використанням формули (25) матиме такий вигляд:

$$K_{\text{ств}}^{\text{I,II}} = \frac{tg\beta - \mu_0 \cdot (1 - 0,002v)}{1 + \mu_0 \cdot (1 - 0,002v) \cdot tg\beta} \cdot \left[\frac{P_{\text{ваг}}^{\text{ст}} + \frac{N^2}{C_r} \cdot \frac{\psi_a^2 \cdot h_{\text{вп}}}{(\delta_0 + e) \cdot S} + N \cdot \left[2\psi_a \cdot \frac{h_{\text{вп}}}{S} + \psi_{\text{кр}} \cdot \frac{h_a}{S} \right] \pm P_{\text{ін}} \cdot \frac{h_{\text{ц}}}{S} \pm F_B \cdot \frac{h_B^*}{S}}{\mu_2 \cdot P_{\text{ваг}}^{\text{ст}} + \frac{N^2}{C_r} \cdot \frac{\psi_a^2}{(\delta_0 + e)} \cdot \left(2 - \mu_2 \cdot \frac{h_{\text{вп}}}{S} \right) + N \cdot \left[2\psi_a \cdot \left(2 - \mu_2 \cdot \frac{h_{\text{вп}}}{S} \right) + \psi_{\text{кр}} \cdot \left(2 - \mu_2 \cdot \frac{h_a}{S} \right) \right] \pm \left[\pm P_{\text{ін}} \cdot \left(2 - \mu_2 \cdot \frac{h_{\text{ц}}}{S} \right) \pm F_B \cdot \left(2 - \mu_2 \cdot \frac{h_B^*}{S} \right) \right]} \right]. \quad (26)$$

Отримана залежність дає можливість урахування під час визначення коефіцієнта запасу стійкості від витискання поздовжніми силами $K_{\text{ств}}$ вплив сил тертя в контакті гребеня колеса і рейки як на набігаючому, так і на ненабігаючому колесі. У залежності (26) коефіцієнт тертя на набігаючому колесі позначено через $\mu_1 = \mu_0 \cdot (1 - 0,002v)$. Коефіцієнт тертя на ненабігаючому колесі з метою розрізнення цих па-

раметрів позначено відповідно до табл. 1 – μ_2 .

Число несприятливих комбінацій варіантів установлення вагонів у колії на прямих та кривих ділянках з урахуванням розтягувальних та стискових сил становить дев'ять [2, 6, 8]. Найбільш несприятливі схеми прикладання стискових поздовжніх сил у вертикальній площині представлені на рис. 6.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

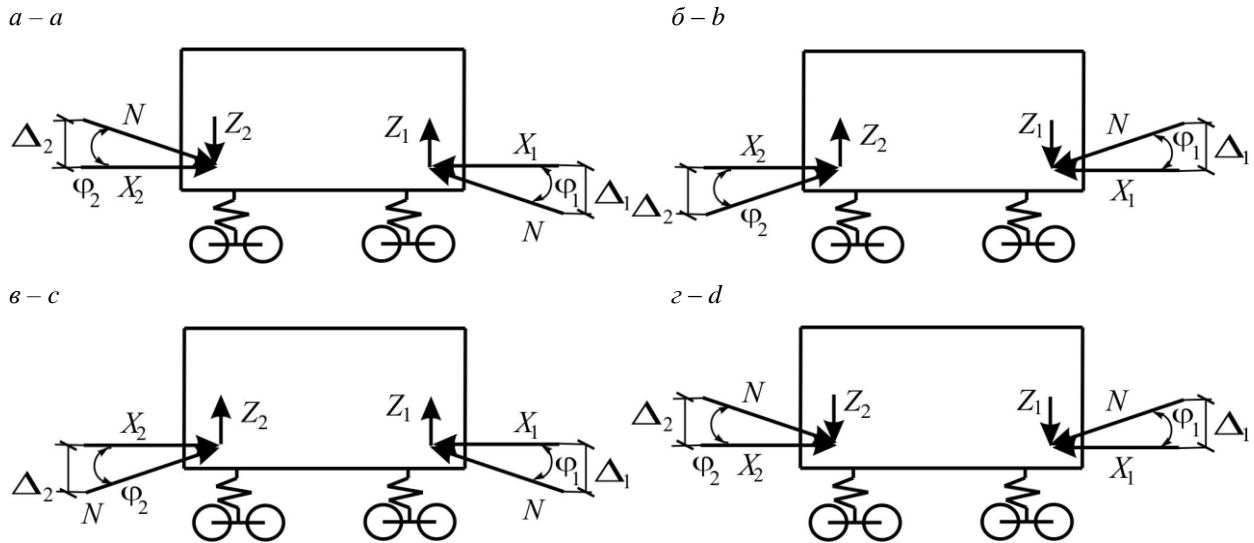


Рис. 6. Схеми прикладання проекцій поздовжніх сил у вертикальній площині:
а, б – протилежно спрямовані; в, г – односторонньо спрямовані

Fig. 6. Schemes for applying projections of longitudinal forces in the vertical plane:
а, б – opposite directed; в, г – unilaterally directed

Для цих випадків залежність для визначення коефіцієнта запасу стійкості від витискання поздовжніми силами (26) буде мати відмінності у виразах визначення еквівалентного кута повороту φ_e від дії вертикальних складових поздовжньої сили та статичного тиску вагона з урахуванням зневантаження від поздовжньої сили $P_{\text{ваг}}^{\text{ст}}$ відповідно для переднього та заднього візків.

Передній візок вагона:

$$\varphi_e = \varphi_1 \cdot \left(\frac{L}{\ell} + 1 \right) \pm \varphi_2 \cdot \left(\frac{L}{\ell} - 1 \right), \quad (27)$$

$$P_{\text{ваг}}^{\text{ст}} = P_{\text{ваг}} \mp N \cdot \varphi_e \cdot \frac{b}{S}. \quad (28)$$

Для схем прикладання поздовжніх сил, представлених на рис. 6, а, б, залежність (27) використовують зі знаком «+», а для схем на рис. 6, в, г, зі знаком «-». Статичний тиск вагона з урахуванням зневантаження від поздовжньої сили $P_{\text{ваг}}^{\text{ст}}$ за залежністю (28) визначають для схем прикладання поздовжніх сил на рис. 6, а, в – зі знаком «-», а для рис. 6, б, г – зі знаком «+».

Задній візок вагона:

$$\varphi_e = \varphi_1 \cdot \left(\frac{L}{\ell} - 1 \right) \pm \varphi_2 \cdot \left(\frac{L}{\ell} + 1 \right); \quad (29)$$

$$P_{\text{ваг}}^{\text{ст}} = P_{\text{ваг}} \pm N \cdot \varphi_e \cdot \frac{b}{S}. \quad (30)$$

Під час визначення коефіцієнта запасу стійкості від витискання поздовжніми силами $K_{\text{ств}}$ на внутрішню рейкову нитку для схем прикладання поздовжніх сил, представлених на рис. 6, а, б, залежність (29) використовують зі знаком «+», а для схем на рис. 6, в, г, зі знаком «-». Статичний тиск вагона з урахуванням зневантаження від поздовжньої сили $P_{\text{ваг}}^{\text{ст}}$ за залежністю (30) визначають для схем прикладання поздовжніх сил на рис. 6, а, в – зі знаком «+», а для рис. 6, б, г – зі знаком «-».

Результати

Вплив величини поздовжніх сил на коефіцієнт запасу стійкості від витискання показано на рис. 7–8, де наведено результати розрахунків руху порожнього й завантаженого піввагона моделі 12–532 по криволінійній ділянці колії радіусом 250 м із піднесенням зовнішньої рейки на

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

150 мм і поперечним розбігом рами кузова вагона відносно осі колії в напрямному перетині в 50 мм [4]. Допустима швидкість руху в такій кривій становить 65 км/год. Розрахунки проведено без урахування сил тертя і з урахуванням тертя в контактні гребеня колеса й рейки за швидкості руху, що дорівнює від 10 до 120 км/год.

При цьому передбачалося, що поздовжні сили, які діють на вагони, являють собою статичні або квазістатичні зовнішні сили, які повільно змінюються в часі. Допустиме значення коефіцієнта запасу стійкості колісної пари про-

ти сходження з рейок у разі витискання становить $[K_{\text{ств}}] = 1,2$ [4].

Під час розрахунків була врахована різниця у висоті між поздовжніми осями автозчеплень у вантажному поїзді, яка допускається не більше $\Delta_1 = 80$ мм попереду групи порожніх вагонів розташованих за завантаженими вагонами в складі потяга [6]. Позаду досліджуваного вагона різницю рівнів осей автозчеплень взято рівною $\Delta_2 = 40$ мм, що відповідає конструкційному (альбомному) допуску розташування осей зчеплення вантажних вагонів.

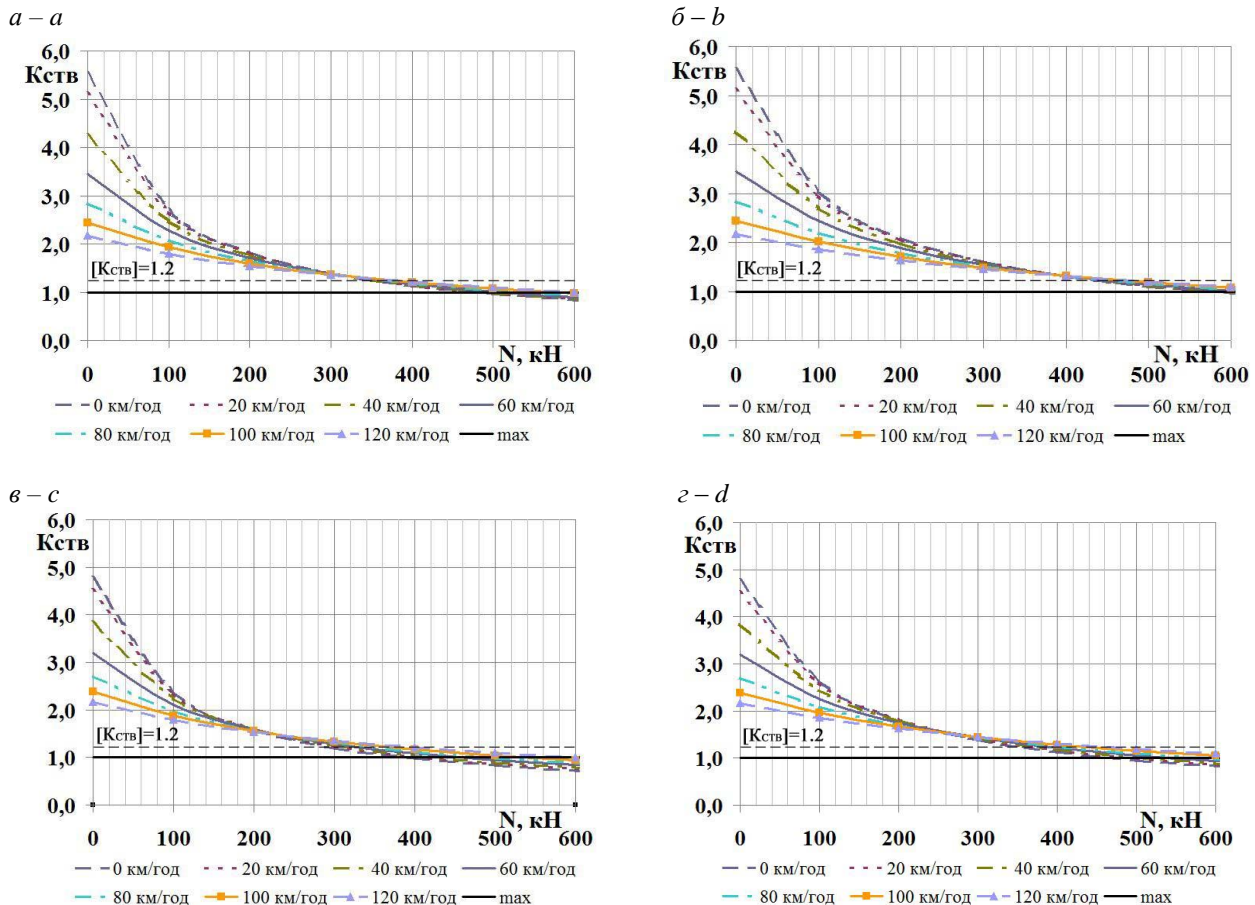


Рис. 7. Коефіцієнт запасу стійкості від витискання порожнього піввагона:

a, б – без урахування сил тертя в контактні гребеня колеса й рейки з і без ексцентриситету закріплення хвостової частини автозчеплення відповідно; *в, г* – з урахуванням сил тертя в контактні гребеня колеса й рейки з і без ексцентриситету закріплення хвостової частини автозчеплення відповідно

Fig. 7. Lift resistance coefficient of empty gondola:

a, b – without taking into account the friction forces at the contact point of the wheel flange and rail with and without the eccentricity of fastening the tail part of the automatic coupler, respectively; *c, d* – taking into account the friction forces at the contact point of the wheel flange and rail with and without the eccentricity of fastening the tail part of the automatic coupler, respectively

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

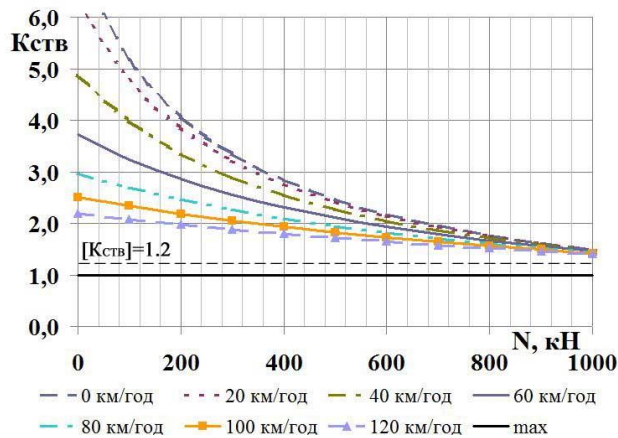
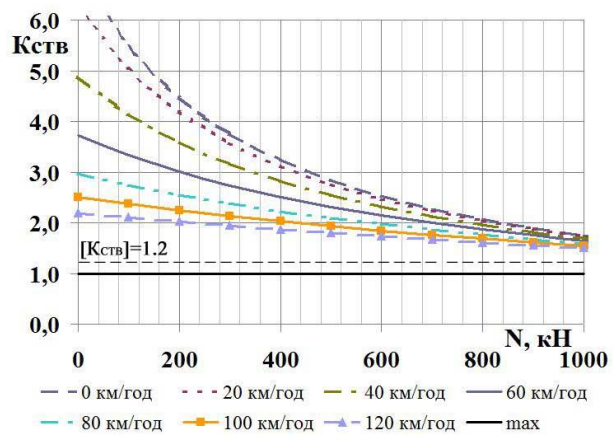
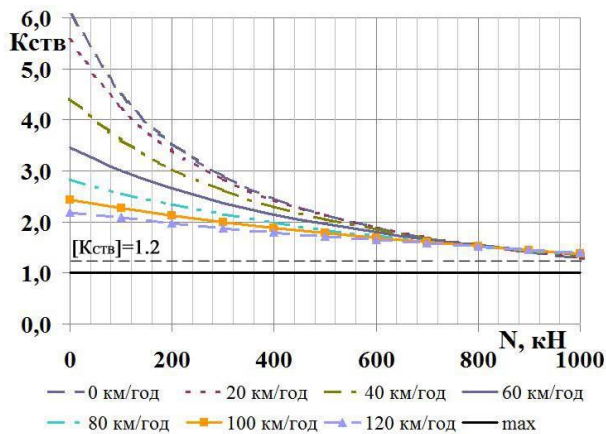
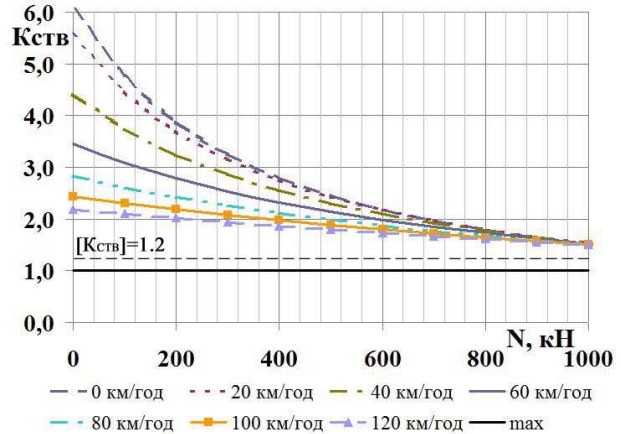
a – a*б – b**в – c**г – d*

Рис. 8. Коефіцієнт запасу стійкості від витискання завантаженого піввагона:
a, б – без урахування сил тертя в контактні гребеня колеса й рейки з і без ексцентриситету
 закріплення хвостової частини автозчеплення відповідно; *в, г* – з урахуванням сил тертя
 в контактні гребеня колеса й рейки з і без ексцентриситету закріплення
 хвостової частини автозчеплення відповідно

Fig. 8. Lift resistance coefficient of loaded gondola:

a, b – without taking into account the friction forces at the contact point of the wheel flange and rail with and without the eccentricity of fastening the tail part of the automatic coupler, respectively;
c, d – taking into account the friction forces at the contact point of the wheel flange and rail with and without the eccentricity of fastening the tail part of the automatic coupler, respectively

Аналіз отриманих значень коефіцієнта запасу стійкості від витискання порожнього піввагона (рис. 7) показує, що залежність (26) дає більш жорсткі результати порівняно із залежністю (24). Так, урахування різної величини тертя в контактні колеса та рейки за наявності ексцентриситету закріплення хвостовика автозчеп-

лення згідно з (26) показує відсутність запасу стійкості вже за 400 кН, а згідно з (24) – за стискної сили, яка дорівнює 500 кН. Ексцентриситет закріплення хвостової частини автозчеплення має істотний вплив на величину поздовжньої сили, здатну видавити порожній вантажний вагон. Відсутність ексцентриситету

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

призводить до збільшення поздовжньої сили в середньому на 50 кН для розрахунків за обома залежностями.

Аналіз отриманих результатів свідчить, що відповідно до допустимої швидкості руху у кривій радіусом 250 м за відсутності ексцентриситету порожній вагон зберігає встановлений запас стійкості до поздовжньої сили у 550 кН за залежності (24), а з урахування сил тертя в контакті колеса та рейки за (26) – до 450 кН. За наявності ексцентриситету закріплення хвостовика автозчеплення поздовжні сили відповідно зменшуються на 50 кН.

У завантаженому режимі (рис. 8) досліджуваний піввагон зберігає встановлений запас стійкості для вантажних вагонів під час дії допустимої нормативною документацією квазістатичної стискної сили величиною в 1 МН.

Наукова новизна та практична значимість

У результаті теоретичних досліджень отримано залежності коефіцієнта запасу стійкості від витискання поздовжніми силами з урахуванням ексцентриситету закріплення хвостової частини автозчеплення й величини тертя в контакті колеса й рейки.

Досліджено вплив поздовжніх стискних сил на стійкість вантажного рухомого складу під час руху у кривій малого радіуса зі швидкостями включно до конструкційного значення в 120 км/год.

Застосування результатів, отриманих за допомогою наведеної методики, сприятиме підвищенню стійкості вантажного рухомого складу, що у свою чергу дозволить збільшити технічну швидкість руху поїздів за рахунок зняття деяких наявних обмежень допустимих швидкостей.

Використання викладеної методики визначення коефіцієнта запасу стійкості від витискання дозволить обґрунтовувати причину сходження коліс, а також розробляти й реалізовувати на практиці технічні заходи щодо запобігання витискання екіпажів, розпору та зсуву колії.

Висновки

На підставі проведених теоретичних досліджень стійкості вантажного екіпажа на прикладі піввагона моделі № 12–532 можна зробити такі висновки:

- наявність ексцентриситету закріплення хвостової частини автозчеплення в порожніх вагонів істотно впливає на величину коефіцієнта запасу стійкості від витискання;
- зниження впливу на колію вантажних вагонів можливе за зменшення сумарного поперечного розбігу рами кузова вагона δ за рахунок зменшення ексцентриситету закріплення хвостової частини автозчеплення e та збільшення горизонтальної жорсткості ресорного підвішування C_r , а також за рахунок зменшення зазорів у буксових, п'ятникових та інших вузлах рухомого складу, які впливають на поперечні переміщення (перекося) кузова;
- у порожньому стані досліджуваний піввагон зберігає встановлений запас стійкості для вантажних вагонів під час руху з допустимою швидкістю в разі стискання силою в 550 кН за відсутності ексцентриситету закріплення хвостовика автозчеплення;
- у завантаженому стані досліджуваний піввагон зберігає встановлений запас стійкості для вантажних вагонів у разі дії допустимої нормативною документацією квазістатичної стискної сили величиною в 1 МН.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андриевский С. М., Крылов В. А. Сход колеса с рельса. *Исследования в области динамики и прочности локомотивов*. Сб. тр. ВНИИЖТа. Москва : Транспорт, 1969. №. 393. С. 20–41.
2. Вершинский С. В. *Динамика, прочность и устойчивость вагонов в тяжеловесных и скоростных поездах*. Сб. тр. ВНИИЖТа. Москва : Транспорт, 1970. №. 425. 208 с.
3. Данович В. Д., Малышева А. А. Математическая модель пространственных колебаний сцепа пяти вагонов, движущихся по прямолинейному участку пути. *Транспорт. Нагруженность и прочность подвижного состава : сб. науч. тр.* Днепропетр. гос. техн. ун-т ж.-д. трансп. Днепропетровск, 1998. С. 62–69.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

4. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). [Чинний від 2015–07–01]. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2017. 158 с.
5. Лазарян В. А., Блохин Е. П., Стамблер Е. Л. Движение легковесных вагонов в составах тяжеловесных поездов. Исследование переходных режимов движения поездов и динамики подвижного состава. Тр. ДИИТа. 1966. № 59. С. 34–47.
6. 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.
7. Мугинштейн Л. А., Ромен Ю. С. Влияние продольных сил на опасность сходов порожних вагонов в поездах. Вестник ВНИИЖТ, 2011. № 3. С. 3–6.
8. Черкашин, Ю. М., Костин Г. В. Определение допустимых продольных сил в поезде по условию обеспечения устойчивости движения вагонов. Исследование прочности, устойчивости, воздействия на путь и техническое обслуживание вагонов в поездах повышенных массы и длины : сб. тр. ВНИИЖТа. Москва : Транспорт, 1992. С. 4–31.
9. Швец А. А., Железнов К. И., Акулов А. С., Заболотный А. Н., Чабанюк Е. В. Некоторые аспекты определения устойчивости порожних вагонов от выжимания их продольными силами в грузовых поездах. Наука та прогрес транспорту. 2015. № 4 (58). С. 175–189. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/49281>
10. Швец А. А., Железнов К. И., Акулов А. С., Заболотный А. Н., Чабанюк Е. В. Определение допустимых сил при оценке устойчивости грузовых вагонов от выжимания в поездах. Наука та прогрес транспорту. 2016. № 1 (61). С. 189–192. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/61045>
11. Cole C., Spiriyagin M., Wu Q., Sun Y. Q. Modeling, simulation and applications of longitudinal train dynamics. *Vehicle System Dynamics*. 2017. Vol. 55. Iss. 10. P. 1498–1571. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2017.1330484>
12. Eckert J. J., Ramos P. G., Oliveira Junior A. J. S. D., Martins T. D. S., Kurka P. R. G. A dissipated energy model of shock evolution in the simulation of the dynamics of DGM's of railway compositions. *Mechanism and Machine Theory*, 2019. Vol. 134. P. 365–375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.12.034>
13. Fomin O., Kulbovsky I., Sorochinska E., Sapronova S., Bambura O. Experimental confirmation of the theory of implementation of the coupled design of center girder of the hopper wagons for iron ore pellets. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 5. Iss. 1 (89). P. 11–18. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109588>
14. Fomin O., Lovska A., Masliyev V., Tsymbaliuk A., Burlutski O. Determining strength indicators for the bearing structure of a covered wagon's body made from round pipes when transported by a railroad ferry. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 7. Iss. 1 (97). P. 33–40. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154282>
15. Fomin O., Shvets A., Hauser V., Prokopenko P. Transversal displacement of freight wagons bogies. *XVII International Scientific Conference: Dynamics of Rigid and Deformable Bodies* (Ústí nad Labem, Czech Republic, Oct. 09–11, 2019). Ústí nad Labem, 2019. Vol. 2198. Iss. 1. P. 020002-1–020002-4. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5140863>
16. Gong K., Xiang J., Mao J., Yu C. Contribution of variable gauge freight wheelsets to interoperability. *Journal of Central South University (Science and Technology)*. 2017. Vol. 48. Iss. 12. P. 3406–3414. DOI: <https://doi.org/10.11817/j.issn.1672-7207.2017.12.035>
17. Hazrati Ashtiani I., Rakheja S., Ahmed A.K.W. Influence of friction wedge characteristics on lateral response and hunting of freight wagons with three-piece bogies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2017. Vol. 231. Iss. 8. P. 877–891. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409716647095>
18. Kaiser I., Vinolas J., Gómez del Pulgar D., Galán R. Contribution of variable gauge freight wheelsets to interoperability. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2019. Vol. 233. Iss. 5. P. 489–505. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409718804960>
19. Pudovikov O. E., Sidorenko V. G., Sidorova N. N., Kiselev M. D. Systems for automatic control of locomotive speed of a freight train with distributed traction. *Russian Electrical Engineering*. 2019. Vol. 90. Iss. 9. P. 653–660. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068371219090086>

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

20. 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/jmerd.03.2019.06.09>
21. Rezvani M. A., Mazraeh A. Dynamics and stability analysis of a freight wagon subjective to the railway track and wheelset operational conditions. *European Journal of Mechanics, A/Solids*. 2017. Vol. 61. P. 22–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2016.08.011>
22. Shvets A. O., Zheliezov K. I., Akulov A. S., Zabolotnyi O. M., Chabaniuk Ye. V. Determination of the issue concerning the lift resistance factor of lightweight car. *Наука та прогрес транспорту*. 2015. № 6 (60). P. 134–148. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/57098>
23. Wu Q., Spiryagin M., Cole C. Longitudinal train dynamics: an overview. *Vehicle System Dynamics*. 2016. Vol. 54. Iss. 12. P. 1688–1714. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2016.1228988>

А. А. ШВЕЦ^{1*}

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

УСТОЙЧИВОСТЬ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ СЖИМАЮЩИХ ПРОДОЛЬНЫХ СИЛ

Цель. Данная работа направлена на: теоретическое исследование устойчивости движения вагонов при воздействии на них продольных сил квазистатического характера; определение аналитических зависимостей для оценки продольной нагруженности вагонов в поездах; анализ влияния одновременного действия некоторых факторов на значение продольных сил, при которых еще сохраняется устойчивость движения вагонов. **Методика.** Оценка устойчивости грузового вагона при движении с различными скоростями по криволинейным участкам пути исследована аналитическим методом. Рассмотрены наиболее неблагоприятные схемы приложения сжимающих продольных сил в вертикальной и горизонтальной плоскости. **Результаты.** Получены выражения для вычисления значения коэффициента запаса устойчивости от выжимания продольной сжимающей силой, действующей на вагон в составе грузового поезда. Расчеты проведены в порожнем и загруженном состоянии с поперечным разбегом рамы кузова вагона относительно оси пути в направляющем сечении в 50 мм в кривой малого радиуса с учетом сил инерции от непогашенного ускорения. **Научная новизна.** Теоретически исследовано влияние на устойчивость движения квазистатических продольных сжимающих сил в зависимости от изменения скорости и значения силы, а также влияние сил трения в контакте гребня колеса и рельса и эксцентриситета закрепления хвостовой части автосцепки. Исследовано влияние продольных сжимающих сил на устойчивость грузового подвижного состава при движении в кривой малого радиуса со скоростями вплоть до конструкционного значения в 120 км/ч. **Практическая значимость.** Применение результатов, полученных с помощью приведенной методики, будет способствовать повышению устойчивости грузового подвижного состава, что в свою очередь позволит увеличить техническую скорость движения поездов за счет снятия некоторых существующих ограничений допустимых скоростей. Использование методики определения коэффициента запаса устойчивости от выжимания позволит обосновывать причину схода колес, а также разрабатывать и реализовывать на практике технические меры по предотвращению выжимания экипажей, распора и сдвига колес.

Ключевые слова: безопасность движения; полувагон; коэффициент запаса устойчивости от выжимания; криволинейные участки пути; продольные силы; скорость движения

А. О. SHVETS^{1*}

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

STABILITY OF FREIGHT CARS UNDER THE ACTION OF COMPRESSIVE LONGITUDINAL FORCES

Purpose. The aim of the work is: a theoretical study of the car movement stability when exposed to longitudinal forces of a quasistatic nature; determination of analytical for estimating the longitudinal loading of cars in trains; the influence analysis of simultaneous action of certain factors on the value of longitudinal forces, at which the car movement stability is still preserved. **Methodology.** Assessment of the freight car stability when moving at different speeds along curved track sections was investigated using the analytical method. The most unfavorable schemes for applying compressive longitudinal forces in a vertical and horizontal plane are considered. **Findings.** Expressions are obtained for calculating the value of the car lift resistance coefficient by the longitudinal compressive force acting on the car as part of a freight train. The calculations were carried out in an empty and loaded state with a transverse run-up of the car body frame relative to the track axis in a guiding section of 50 mm in a curve of small radius taking into account the inertia forces from the unbalanced acceleration. **Originality.** In a theoretical study, the effect on the movement stability of quasistatic longitudinal compressive forces depending on the change in speed and the force value, as well as the effect of friction forces at the contact point of the wheel flange and rail and the eccentricity of fastening the tail of the automatic coupler, are considered. The influence of longitudinal compressive forces on the stability of freight rolling stock when moving in a curve of small radius with speeds up to a design value of 120 km/h is investigated. **Practical value.** The application of the results obtained by the above method will help to increase the stability of the freight rolling stock, which in turn will allow increasing the technical speed of train movement by removing some existing limits of permissible speeds. Using the described methodology for determining the car lift resistance coefficient will allow justifying the cause of wheel derailment, as well as to develop and put into practice the technical measures to prevent the lift of carriages, thrusts and shears of the track.

Keywords: traffic safety; gondola car; lift resistance coefficient; curved track sections; longitudinal forces; movement speed

REFERENCES

1. Andrievsky, S. M. & Krylov, V. A. (1969). *Skhod kolesa s relsa. Issledovaniya v oblasti dinamiki i prochnosti lokomotivov*. Sbornik trudov VNIIZhT. (in Russian)
2. Vershynskiy, S. V. (1970). *Dynamica, prochnost i ustoychivost vagonov v tyazhelovesnykh i skorostnykh poezdakh*. Sbornik trudov VNIIZhT. Moscow: Transport. (in Russian)
3. Danovich, V. D., & Malysheva, A. A. (1998). Mathematical Model of Spatial Oscillations of the Coupling of Five Cars Moving Along a Rectilinear Section of the Track. *In Transport. Stress loading and durability of a rolling stock*, 62-69. Dnepropetrovsk. (in Russian)
4. *Vagoni vantazhni. Zagalni vimogi do rozrakhunkiv ta proektuvannya novikh i modernizo-vanikh vagoniv kolii 1520 mm (nesamokhidnikh)*, 162 DSTU 7598:2014 (2017). (in Ukrainian)
5. Lazarian, V. A., Blokhin, E. P. & Stambler, E. L. (1966). Dvizhenie legkovesnykh vagonov v sostavakh tyazhelovesnykh poezdov. *Trudy Dnepropetrovskogo instituta inzhenerov zheleznodorozhnogo transporta imeni akademika V. Lazariana*, 59, 34-47. (in Russian)
6. Lysyuk, V. S. (2002). *Prichiny i mekhanizmy skhoda kolesa s relsa. Problema iznosa koles i relsov*. Moscow: Transport. (in Russian)
7. Muginshteyn, L. A., & Romen, Yu. S. (2011). Vliyanie prodolnykh sil na opasnost skhodov porozhnikov vagonov v poezdakh. *Vestnik VNIIZhT*, 3, 3-6. (in Russian)
8. Cherkashin, Yu. M. & Kostin, G. V. (1992). Opredelenie dopustimyykh prodolnykh sil v poezde po usloviyu obes-pecheniya ustoychivosti dvizheniya vagonov. *Issledovanie prochnosti, ustoychivosti, vozdeystviya na put i tekhnicheskoe obsluzhivanie vagonov v poezdakh povyshennykh massy i dliny*. Sbornik trudov VNIIZhT. Moscow: Transport, 4-31. (in Russian)
9. Shvets, A. A., Zheliezov, K. I., Akulov, A. S., Zabolotnyi, A. N., & Chabaniuk, Ye. V. (2015). Some Aspects of the Definition of Empty Cars Stability from Squeezing their Longitudinal Forces in the Freight Train. *Science and Transport Progress*, 4(58), 175-189. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/49281> (in Russian)
10. Shvets, A. A., Zheliezov, K. I., Akulov, A. S., Zabolotny, A. N., & Chabanyuk, E. V. (2016). Determination the permissible forces in assessing the lift resistant factor of freight cars in trains. *Science and Transport Progress*, 1(61), 189-192. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/61045> (in Russian)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

11. Cole, C., Spiryagin, M., Wu, Q. & Sun, Y. Q. (2017). Modeling, simulation and applications of longitudinal train dynamics. *Vehicle System Dynamics*, 55(10), 1498-1571, DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2017.1330484> (in English)
12. Eckert, J. J., Ramos, P. G., Oliveira Junior, A. J. S. D., Martins, T. D. S., & Kurka, P. R. G. (2019). A dissipated energy model of shock evolution in the simulation of the dynamics of DGM's of railway compositions. *Mechanism and Machine Theory*, 134, 365-375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.12.034> (in English)
13. Fomin, O., Kulbovsky, I., Sorochinska, E., Saprionova, S., & Bambura, O. (2017). Experimental confirmation of the theory of implementation of the coupled design of center girder of the hopper wagons for iron ore pellets. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5, 1(89), 11-18. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109588> (in English)
14. Fomin, O., Lovska, A., Masliyev, V., Tsymbaliuk, A., & Burlutski, O. (2019). Determining strength indicators for the bearing structure of a covered wagon's body made from round pipes when transported by a railroad ferry. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 7, 1(97), 33-40. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154282> (in English)
15. Fomin, O., Shvets, A., Hauser, V., & Prokopenko, P. (2019). Transversal displacement of freight wagons bogies. *AIP Conference Proceedings*, 2198(1), 020002-1-020002-4. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5140863> (in English)
16. Gong, K., Xiang, J., Mao, J., & Yu, C. (2017). Contribution of variable gauge freight wheelsets to interoperability. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 48(12), 3406-3414. DOI: <https://doi.org/10.11817/j.issn.1672-7207.2017.12.035> (in English)
17. Hazrati Ashtiani, I., Rakheja, S., & Ahmed, A.K.W. (2017). Influence of friction wedge characteristics on lateral response and hunting of freight wagons with three-piece bogies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 231(8), 877-891. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409716647095> (in English)
18. Kaiser, I., Vinolas, J., Gómez del Pulgar, D., & Galán, R. (2019). Contribution of variable gauge freight wheelsets to interoperability. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 233(5), 489-505. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409718804960> (in English)
19. Pudovikov, O. E., Sidorenko, V. G., Sidorova, N. N., & Kiselev, M. D. (2019). Systems for automatic control of locomotive speed of a freight train with distributed traction. *Russian Electrical Engineering*, 90(9), 653-660. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068371219090086> (in English)
20. 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)
21. Rezvani, M. A., & Mazraeh, A. (2017). Dynamics and stability analysis of a freight wagon subjective to the railway track and wheelset operational conditions. *European Journal of Mechanics, A/Solids*, 61, 22-34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2016.08.011> (in English)
22. Shvets, A. A., Zheliezov, K. I., Akulov, A. S., Zabolotnyi, A. N., & Chabaniuk, Ye. V. (2015). Determination of the issue concerning the lift resistance factor of lightweight car. *Science and Transport Progress*, 6(60), 134-148. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/57098> (in English)
23. Wu, Q., Spiryagin, M. & Cole, C. (2016). Longitudinal train dynamics: an overview. *Vehicle System Dynamics*, 54(12), 1688-1714, DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2016.1228988> (in English)

Надійшла до редколегії: 19.09.2019

Прийнята до друку: 22.01.2020

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

UDC 624.94.014.2:519.6

D. V. ROZUMENKO¹, D. O. BANNIKOV^{2*}

¹Fac. «Industrial and Civil Engineering», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (099) 681 68 38, e-mail dmitriy.rozumenko.v@gmail.com, ORCID 0000-0001-6058-9417

^{2*}Dep. «Construction Production and Geodesy», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 400 43 07, e-mail bdo2020@yahoo.com, ORCID 0000-0002-9019-9679

DYNAMIC PROPERTIES OF ONE-STOREY INDUSTRIAL BUILDING

Purpose. Recently, there has been a growing demand in Ukraine for the reuse of industrial buildings that have not been in exploitation for a certain period of time. At the same time, there are frequent cases when new technological equipment transfers significant dynamic loads to existing structures over a long period of time. Since the available data regarding the dynamic properties of industrial buildings are now practically absent, the main goal of the studies made by the authors is to evaluate and analyze own dynamic characteristics of a one-storey industrial building. **Methodology.** To achieve this goal, it was necessary first to choose the type of industrial building, which is common enough for the formulated conditions of the reuse possibility. A one-storey unheated industrial building with three purlins (purlins 15 + 15 + 6 m) with a steel supporting frame was taken as such a building. In the course of research, the cross sections of the main load-bearing elements were varied, as well as the schemes of their connection with each other. The calculations were carried out by the finite element method based on the Lira for Windows project complex. **Findings.** The obtained frequency spectra of the own dynamic characteristics for the main bearing structural elements of an industrial building of the type in question are in the range up to 30 Hz. Also, during the research, dependencies were obtained for changing this range for various cases of design decisions of the building. **Originality.** The research results presented in the publication make it possible to evaluate the range of the own dynamic characteristics of single-storey multipurlined unheated industrial buildings with the traditional structural solution of the steel frame. **Practical value.** The resulting range of the own dynamic characteristics of the industrial building of the type in question is quite dangerous for human health. The most unfavorable is the oscillation form of the columns, which actually involves the entire structural frame. Therefore, in the course of research, a special method was developed and tested to stabilize such vibrations «on the base» using flexible ropes.

Keywords: industrial building; modal analysis; dynamic characteristics; finite element method; complex Lira for Windows

Introduction

Today, a significant number of industrial buildings of various types and purposes were accumulated in Ukraine, which have not been in operation for a long time. Their construction falls on the second half of the twentieth century, and the corresponding space-planning and design solutions also meet the requirements of this period.

The desire of modern private companies to save some money while developing their own business-

es leads to the reuse of such buildings. At the same time, the available space-planning and design solutions they remain unchanged, trying to use them with modern production technologies. This approach is quite often implemented without any specialized project, without further professional calculations and even without basic feasibility studies.

As a result, the new technological equipment is placed directly on the existing elements of the supporting structures, it is attached virtually without

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

special design decisions. Quite often the duration of continuous operation of the equipment is measured by hours, and in some cases its operation is round the clock. At the same time, one of the factors in the operation of such equipment is often the dynamic impact caused by its moving parts.

The main component of such a dynamic impact is the vibration, which manifests itself in the form of transmission of the dynamic loading with a certain amplitude-frequency spectrum to the structural elements. As a consequence, the static work of load-bearing structures of the building, provided by the design and engineering documentation, is disrupted, transforming into a dynamic work.

The consequences of such a situation are manifested in a short period of time in the form of various damage and failure of the supporting structure elements, disruption of their proper functioning.

Purpose

Taking into account the above-mentioned, the main purpose of our study is to evaluate the dynamic characteristics of a one-storey industrial building.

To achieve this goal, it was necessary to first select the type of industrial building, which is quite common for the formulated conditions of the reuse possibility, and then to conduct a modal analysis of its design solution.

Methodology

A single-storey, unheated industrial building with three purlins of $15 + 15 + 6$ m was selected for the study. Its design solution is framed with the use of classical arrangement, which is described in detail in many professional sources, for example, [6]. The load-bearing elements are transverse frames, spaced in 5.3 m increments. The edge columns are made with a solid cross-section; valley stanchions have a two-stage construction with an in-through bottom. Trusses with a diagonal lattice, additional vertical posts and top cord slopes of 8.8° (15.6%) and 14.4° (25.8%), which, incidentally, is contrary to modern requirements [14], are provided as a ledger. The general view and design of the building under consideration are shown in Fig. 1. The material of the load-bearing elements of the frame was chosen steel, which is related to its lower logarithmic decrement of damping oscillations

in comparison with reinforced concrete or wood [9, 10].

It should be noted that this type of industrial buildings with small purlins is also widespread and popular in our time abroad [13].

The study was conducted in several stages, each of which evaluated own dynamic characteristics of the building under consideration.

At the *first stage*, the influence of the building length was assessed. Herewith, three cases were considered: building with the 4-step length of load-bearing transverse frames (the main variant), 6 and 10 steps, which made the total length of the building of 21.2; 31.8 and 53 m respectively.

At the *second stage*, the influence of the connection of the load-bearing transverse frame of the building with the foundation was assessed. Two cases of rigid and hinge connection are considered.

At the *third stage*, the influence of the rigidity of the main structural elements of the building – truss, column, crane beam, as well as roof purlins and longitudinal struts – was assessed.

To perform all these variant calculations, we used extremely popular in recent decades and tested numerical method of construction mechanics. It is the finite element method [12, 15, 17] based on the widely known domestic software complex Lira for Windows [11].

The constructed design model for the basic structural variant of the production building is shown in Fig. 2. All structural elements are simulated using rod finite elements of universal type from the standard library of the complex. The calculations were performed in geometrically and physically linear form. This approach avoided the issues of estimating the results convergence characteristic of finite elements of other types [4, 5].

It should be noted separately that performing dynamic calculations of building constructions is not regulated by any normative documents in our time. The current standard for designing steel structures in Ukraine [3] contains only guidance on the feasibility of their performance, but does not specify either the methods or the extent of their performance. The Ukrainian standard for determining the structural loading [2] contains no guidance at all on the calculation of dynamic loadings. The standard for determining seismic loadings [1] partially fill this gap, but such calculations are of a specific nature and are not suitable for perform-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

ing, for example, modal analysis of spatial building structures, which also include single-storey industrial buildings under consideration. Therefore, it is often necessary to borrow certain techniques and methods from other industries, first of all – mechanical engineering [16]. In particular, supreme frequency screening algorithms were applied, and only the first natural frequencies were taken into account.

Findings

The results of modal analysis for all three stages of research are summarized in Table 1. The lower natural partial frequencies for the basic structural elements are presented. In Fig. 3 – 6 the oscillation forms of the basic structural elements for the case shown in Table 1 in dark color are presented. For all other cases, the fluctuation forms were qualitatively identical.

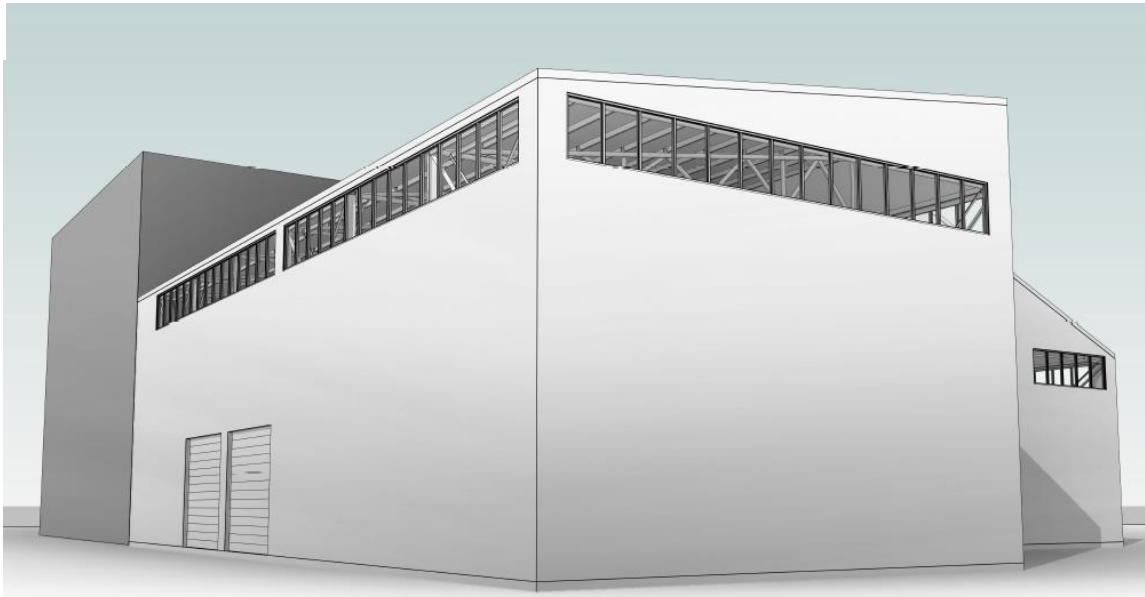
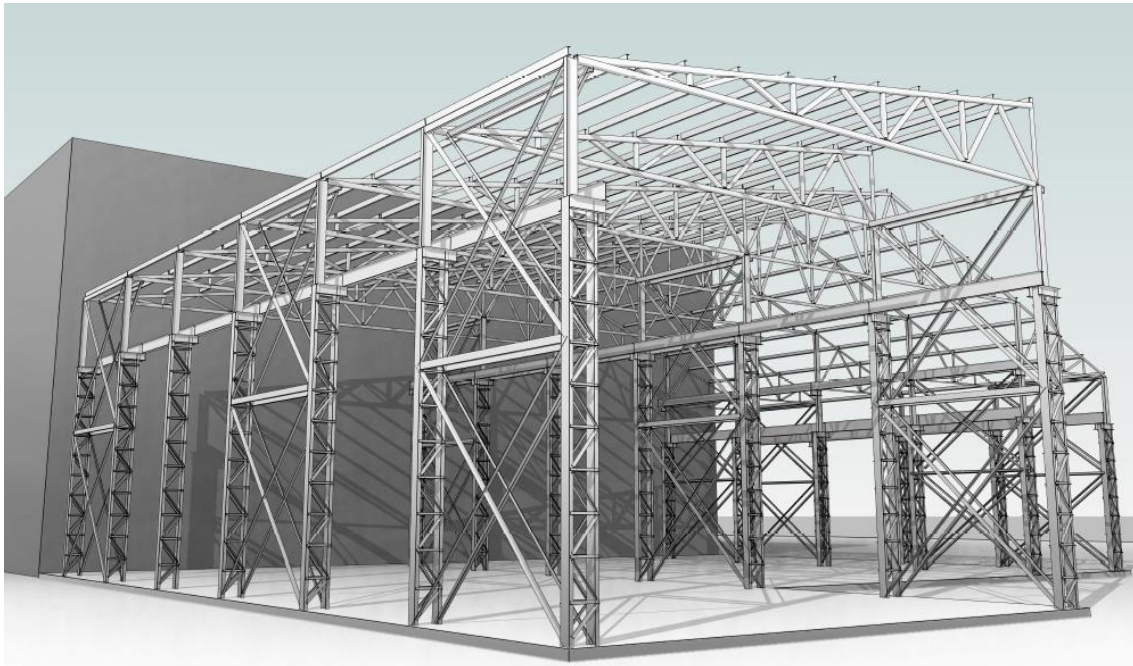
a*b*

Fig. 1. The object research – one-storey industrial building:
a – general view; *b* – design solution

Table 1

**Natural frequency spectrum of a one-storey
production building (Hz)**

Connection	Rigid						Hinge
Frame spacing	4				6	10	4
Section of truss members	square	square	circle	angles	square	square	square
	initial	Changed with reduced rigidity					
Element of building							
Truss	0.509	0.344	0.306	0.297	0.307	0.296	0.343
Column	2.787	1.978	1.867	1.881	1.961	1.847	1.977
Roof purlins	5.203	4.269	4.288	4.288	4.288	4.288	4.269
Crane beam	7.164	5.695	5.599	5.608	5.595	5.591	5.692
Struts	25.401	22.384	22.448	22.577	22.465	22.128	22.410

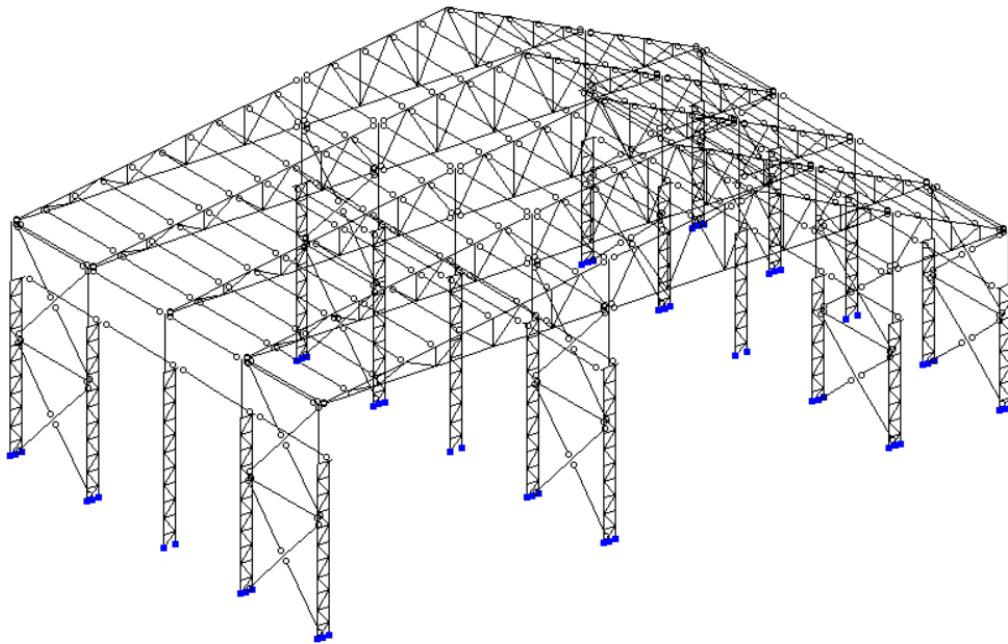


Fig. 2. Finite element model of industrial building

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

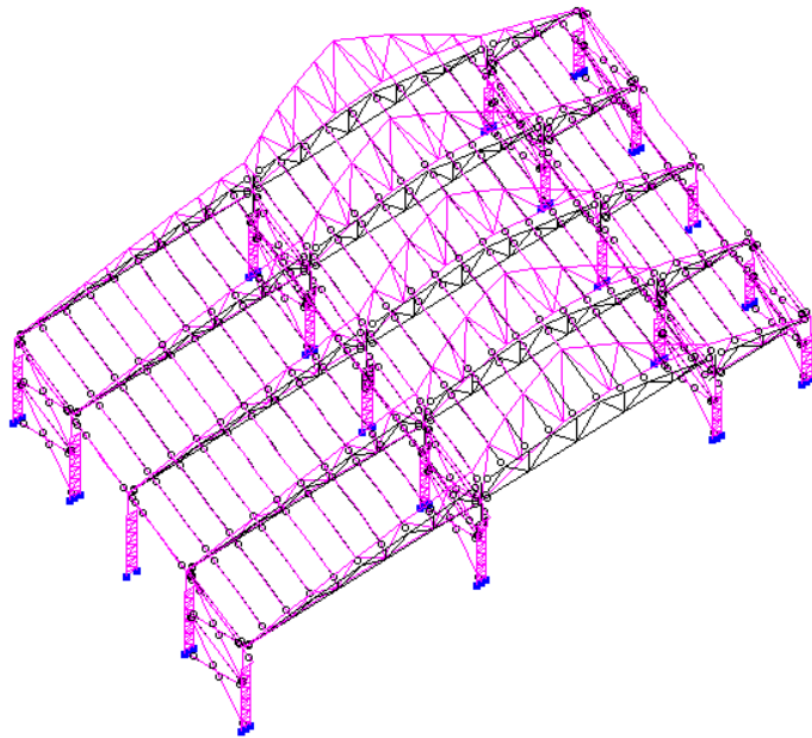


Fig. 3. The obtained lowest oscillation form of trusses of industrial building

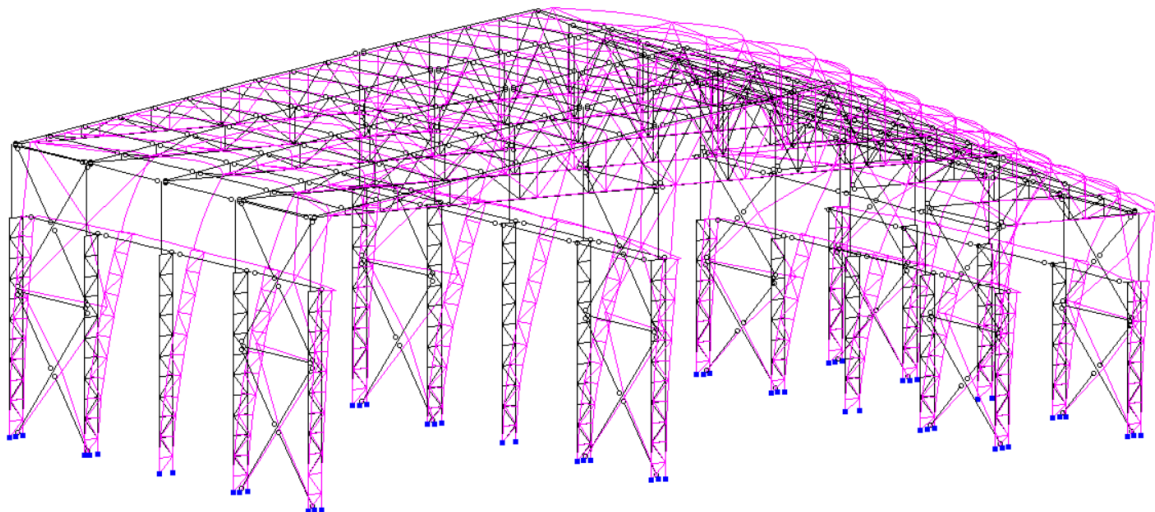


Fig. 4. The obtained lowest oscillation form of columns of industrial building

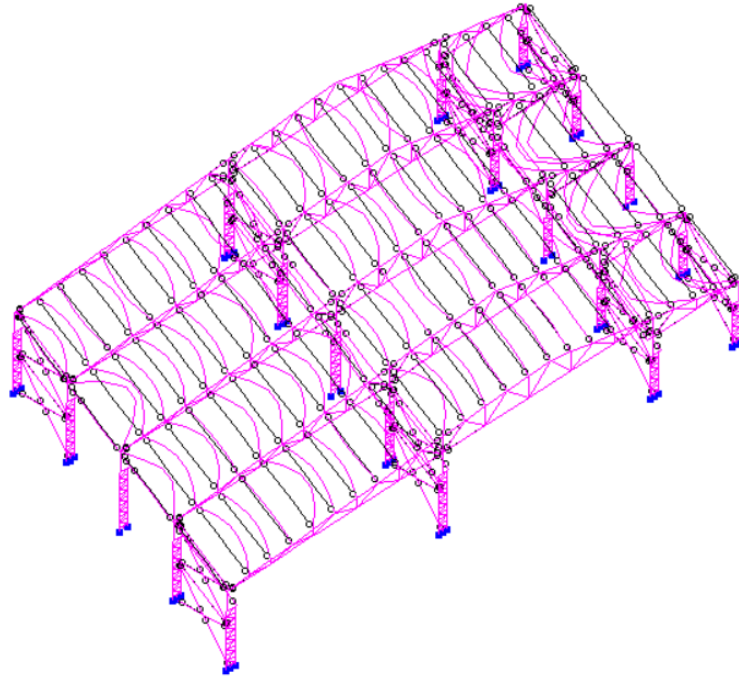


Fig. 5. The obtained lowest oscillation form of roof purlins of industrial building

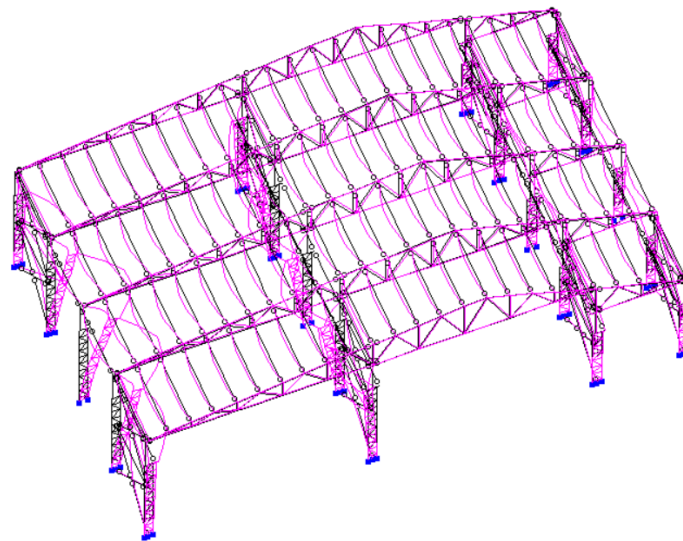


Fig. 6. The obtained lowest oscillation form of crane beams of industrial building

As can be seen from the obtained data, the frequency spectrum is in rather dangerous range for the human, which is presented in Table 2 according to the data of the work [8]. However, the impact on it of all the factors considered – the building length, the nature of connection to the foundation and the rigidity of the structural elements – is quite insignificant.

The most dangerous was the oscillation form of the columns of industrial building, which in fact involves the whole structural framework. The frequency of such oscillations is also the most dangerous. Therefore, at the *fourth stage* of the research the stabilization of this form was considered in more detail.

Table 2

Natural human frequency spectrum (Hz)

No.	Human organ	Resonant frequency
1	Vestibular apparatus	0.5–13
2	Stomach	2–3
3	Intestines	2–4
4	Body	2–5
5	Heart	4–6
6	Kidneys	6–8
7	Head	20–30
8	Eyebulbs	60–90

Of all the modern methods of stabilization in accordance with the work [7], the most effective for the conditions of the studied industrial building is the structural one. The authors have developed and tested a way to stabilize the «base» using the flexible ropes – Fig. 7.

In this case, the natural partial oscillation frequency increased to 5.136 Hz, which reduced its potential effect on human. The new form of oscillation for this case is shown in Fig. 8.

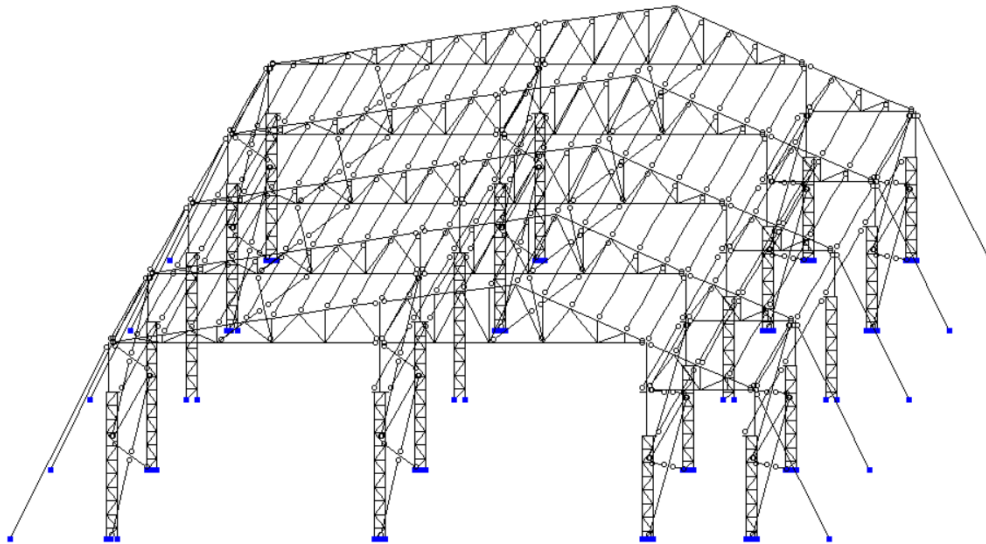


Fig. 7. Finite element model of industrial building with additional ropes to stabilize «on the base»

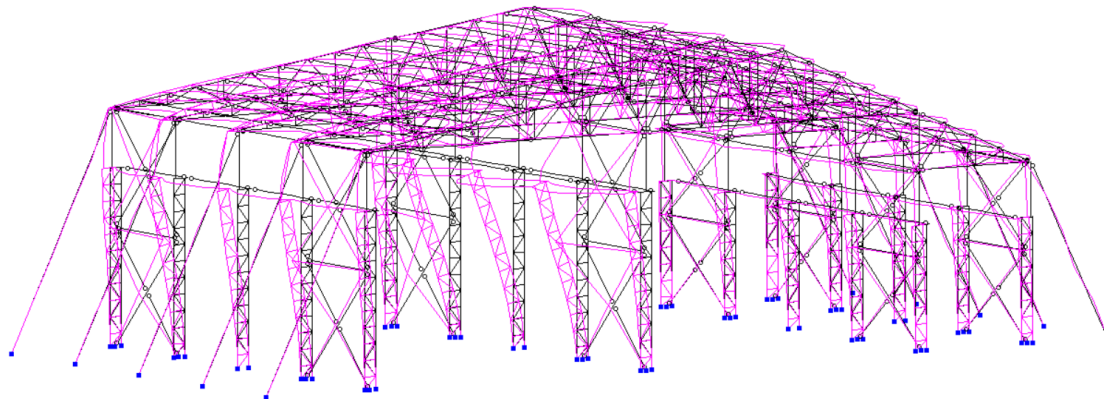


Fig. 8. The obtained oscillation form of the industrial building with additional ropes to stabilize the «base»

Originality and practical value

The results of the studies presented in the publication allow us to estimate the spectrum of natural dynamic characteristics of single-storey multi-purlined unheated industrial buildings with the traditional structural design of the steel frame. As the obtained range of natural dynamic characteristics of the industrial building of the investigated type is rather unsafe for human health, the authors have developed a way of shifting the frequency spectrum to a safer zone. It consists in applying the stabilization of the most unfavorable form of columns' oscillation in industrial building «on the base» by means of flexible ropes. The effectiveness of this decision was confirmed during the studies performed.

It should also be noted that this structural proposal is quite simple in terms of practical implementation and can be applied not only to industrial buildings with steel bearing frame, but also to other types of existing frame buildings, in particular for civilian or agricultural purposes.

Conclusions

Based on the material stated in the publication, we can draw the following conclusions:

1. The spectrum of natural dynamic characteristics of a single-storey non-heated industrial building with a bearing steel frame is quite dense and for the lower frequencies (up to 30 Hz) it is presented for all the basic structural elements. This is potentially hazardous to human health because the spectrum obtained is quite consistent with that of human resonance characteristics.

2. The influence on the own dynamic characteristics of industrial building of the type under consideration, such as the building length, the connection nature with the foundation, and the rigidity of the structural elements, are quite insignificant.

3. In order to stabilize the most unfavorable oscillation form of the frame of the industrial building under consideration, a method of stabilizing «on the base» using the flexible ropes was proposed and tested by numerical calculations. It also makes it possible to shift the appropriate frequency spectrum to a safer zone.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Банніков Д. О. Оцінка практичної збіжності результатів аналізу пластинчастих моделей в методі скінчених елементів. *Нові технології в будівництві*. 2017. № 32. С. 26–31.
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. Буга П. Г. *Гражданские, промышленные и сельскохозяйственные здания* : монография. Москва : Книга по требованию, 2013. 349 с.
4. ДБН В.1.1-12:2006. *Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівництво у сейсмічних районах України*. [Чинний від 2007-01-02]. Вид. офіц. Київ : Мін. буд-ва, арх-ри та ЖКГ України, 2006. 84 с.
5. ДБН В.1.2-2:2006 (зі змінами). *Система надійності та безпеки в будівництві. Навантаження і впливи. Норми проектування*. [Чинний від 2007-01-01]. Вид. офіц. Київ : Держбуд, 2007. 70 с.
6. ДБН В.2.6-198:2014. *Сталеві конструкції. Норми проектування*. [Чинний від 2015-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон, 2014. 205 с.
7. Казакевич М. И., Кулябко В. В. *Введение в виброэкологию зданий и сооружений* : монография. Днепропетровск : ПГАСА, 1996. 200 с.
8. Казакевич М. И. Проблемы стабилизации вант. *Металлические конструкции*. 2011. Т. 17. № 2. С. 63–84.
9. Редченко В. П. *Динамічні випробування мостів. Частина 1 : Загальні положення, спектральний аналіз, динамічні характеристики* : монография. Дніпро : Пороги, 2016. 216 с.
10. Редченко В. П. *Динамічні випробування мостів. Частина 2 : Вільні коливання, модальний контроль* : монография. Дніпро : Пороги, 2017. 216 с.
11. Стрелец–Стрелецкий Е. Б., Журавлев А. В., Водопьянов Р. Ю. *ЛИРА–САПР. Книга I : Основы* : монография / под ред. А. С. Городецкого. Киев : LIRALAND, 2019. 154 с.
12. Bofang Z. *The Finite Element Method. Fundamentals and Applications in Civil, Hydraulic, Mechanical and Aeronautical Engineering*. Singapore : John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd. 2018. 843 p.
DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119107323>

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

13. Johnson R. P. *Composite Structures of Steel and Concrete: Beams, Slabs, Columns and Frames for Buildings* : monograph. Wiley Blackwell, 2018. 265 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119401353>
14. Kruhlikova N. G., Bannikov D. O. Rational design of shot-span industrial building roof for reconstruction conditions. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 2 (80). P. 144–152.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/165853>
15. Neduzha L. O., Shvets A. O. Theoretical and experimental research of strength properties of spine beam of freight cars. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 1 (73). P. 131–147.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/123457>
16. Shames I. H. *Energy and Finite Element Methods In Structural Mechanics* : monograph. New York : Routledge, 2017. 776 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203757567>
17. Singiresu S. R. *The Finite Element Method in Engineering* : monograph. Elsevier Inc, 2018. 763 p.
DOI: <https://doi.org/10.1016/c2016-0-01493-6>

Д. В. РОЗУМЕНКО¹, Д. О. БАННИКОВ^{2*}

¹Фак. «Промислове та цивільне будівництво», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (099) 681 68 38, ел. пошта dmitriy.rozumenko.v@gmail.com, ORCID 0000-0001-6058-9417

^{2*}Каф. «Будівельне виробництво та геодезія», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 400 43 07, ел. пошта bdo2020@yahoo.com, ORCID 0000-0002-9019-9679

ДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ОДНОПОВЕРХОВОЇ ВИРОБНИЧОЇ БУДІВЛІ

Мета. Зараз в Україні зростає попит на повторне використання промислових будівель, які протягом певного часу не були в експлуатації. При цьому частими є випадки, коли нове технологічне обладнання передає на наявні конструкції значні динамічні навантаження протягом тривалого часу. Оскільки дані щодо динамічних властивостей виробничих будівель на сьогодні практично відсутні, основною метою нашого дослідження є оцінка власних динамічних характеристик одноповерхової виробничої будівлі. **Методика.** Для досягнення поставленої мети необхідно було спочатку обрати тип виробничої будівлі, який є доволі розповсюдженим для сформульованих умов можливості повторного використання. За таку будівлю було взято одноповерхову трипрогонову неопаловану виробничу будівлю (прогони 15 + 15 + 6 м) зі сталевим несучим каркасом. У ході досліджень варіювались перерізи основних несучих елементів, а також схеми їх з'єднання між собою. Розрахунки виконано методом скінченних елементів на базі проєктного комплексу Lira for Windows. **Результати.** Отримані частотні спектри власних динамічних характеристик основних несучих конструктивних елементів для виробничої будівлі розглядуваного типу перебувають у діапазоні до 30 Гц. Також у ході досліджень отримані залежності для зміни цього діапазону для різних випадків проєктно-конструкторських рішень будівлі. **Наукова новизна.** Представлені в публікації результати досліджень дозволяють оцінити спектр власних динамічних характеристик одноповерхових багатопрогонових неопалованих виробничих будівель із традиційним конструктивним рішенням сталевих каркасів. **Практична значимість.** Отриманий діапазон власних динамічних характеристик виробничої будівлі розглядуваного типу виявляється доволі небезпечним для здоров'я людини. Найбільш несприятливою є форма коливань колон, яка фактично залучає до роботи весь конструктивний каркас. Тому в ході досліджень було розроблено та перевірено спеціальний спосіб стабілізації таких коливань «на основу» за допомогою гнучких канатів.

Ключові слова: виробнича будівля; модальний аналіз; динамічні характеристики; метод скінченних елементів; комплекс Lira for Windows

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Д. В. РОЗУМЕНКО¹, Д. О. БАННИКОВ^{2*}¹ Фак. «Промышленное и гражданское строительство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (099) 681 68 38, эл. почта dmitriy.rozumenko.v@gmail.com, ORCID 0000-0001-6058-9417^{2*} Каф. «Строительное производство и геодезия», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (063) 400 43 07, эл. почта bdo2020@yahoo.com, ORCID 0000-0002-9019-9679**ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОДНОЭТАЖНОГО
ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЗДАНИЯ**

Цель. В последнее время в Украине растет спрос на повторное использование промышленных зданий, которые на протяжении определенного периода времени не пребывали в эксплуатации. При этом нередки случаи, когда новое технологическое оборудование передает на существующие конструкции значительные динамические нагрузки на протяжении длительного времени. Поскольку данные относительно динамических свойств производственных зданий на сегодня практически отсутствуют, основной целью нашего исследования является оценка собственных динамических характеристик одноэтажного производственного здания. **Методика.** Для достижения поставленной цели необходимо было сначала выбрать тип производственного здания, который является достаточно распространенным для сформулированных условий возможности повторного использования. В качестве такого здания было принято одноэтажное трехпролетное неотапливаемое производственное здание (пролеты 15 + 15 + 6 м) со стальным несущим каркасом. В ходе исследований варьировались сечения основных несущих элементов, а также схемы их соединения между собой. Расчеты выполнены методом конечных элементов на базе проектного комплекса Lira for Windows. **Результаты.** Полученные частотные спектры собственных динамических характеристик основных несущих конструктивных элементов для производственного здания рассматриваемого типа находятся в диапазоне до 30 Гц. Также в ходе исследований получены зависимости для изменения этого диапазона для различных случаев проектно-конструкторских решений здания. **Научная новизна.** Представленные в публикации результаты исследований позволяют оценить спектр собственных динамических характеристик одноэтажных многопролетных неотапливаемых производственных зданий с традиционным конструктивным решением стального каркаса. **Практическая значимость.** Полученный диапазон собственных динамических характеристик производственного здания рассматриваемого типа оказывается достаточно опасным для здоровья человека. Наиболее неблагоприятной является форма колебаний колонн, которая фактически вовлекает в работу весь конструктивный каркас. Поэтому в ходе исследований был разработан и проверен специальный способ стабилизации таких колебаний «на основание» с помощью гибких канатов.

Ключевые слова: производственное здание; модальный анализ; динамические характеристики; метод конечных элементов; комплекс Lira for Windows

REFERENCES

1. Bannikov, D. O. (2017). Ocinka praktychnoji zbzhnosti rezul'tativ analizu plastynchastykh modelej v metodi skinchenykh elementiv. *New Technologies in Construction*, 32, 26-31. (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. Buga, P. G. (2013). *Grazhdanskie, promyshlennye i selskokhozyaystvennye zdaniya: monografiya*. Moscow: Kniga po trebovaniyu. (in Russian)
4. Zakhyst vid nebezpechnykh gheologichnykh procesiv, shkidlyvykh ekspluatatsijnykh vplyviv, vid pozhezhi. *Budivnytstvo u sejsmichnykh rajonakh Ukraïny*, 84 DBN B. 1.1-12:2006 (2006). (in Ukrainian)
5. *Systema nadiinosti ta bezpeky v budivnytstvi. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia*, 70 DBN B.1.2-2:2006 (2007). (in Ukrainian)
6. *Stalevi konstruktsii. Normy proektuvannia*, 205 DBN B.2.6-198:2014 (2014). (in Ukrainian)
7. Kazakevitch, M. I., & Kuljabko, V. V. (1996). *Vvedenie v vibroekologiyu zdaniy i sooruzheniy: monografiya*. Dnepropetrovsk, PGASA. (in Russian)
8. Kazakevitch, M. I. (2011). Problems of cable stabilization. *Metall Structures*, 17(2), 63-84. (in Russian)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

9. Redchenko, V. P. (2016). *Dynamichni vyprobuвання mostiv. Zaghaljni polozhennja, spektralnyj analiz, dynamichni kharakterystyky: monohrafija. Part 1.* Dnipro, Porogi. (in Ukrainian)
10. Redchenko, V. P. (2017). *Dynamichni vyprobuвання mostiv. Viljni kolyvannja, modalnyj kontrolj: monohrafija. Part 2.* Dnipro, Porogi. (in Ukrainian)
11. Strelec-Streleckij, E. B., Zhuravlev, A. V., & Vodop'janov, R. Ju. (2019). *LIRA-SAPR. Kniga 1. Osnovy.* Kiev: LIRALAND. (in Russian)
12. Bofang, Z. (2018). *The Finite Element Method: Fundamentals and Applications in Civil, Hydraulic, Mechanical and Aeronautical Engineering.* Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd.
DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119107323> (in English)
13. Johnson, R. P. (2018). *Composite Structures of Steel and Concrete: Beams, Slabs, Columns and Frames for Buildings.* Wiley Blackwell. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119401353> (in English)
14. Kruhlikova, N. G., & Bannikov, D. O. (2019). Rational design of shot-span industrial building roof for reconstruction conditions. *Science and Transport Progress*, 2(80), 144-152.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/165853> (in English)
15. Neduzha, L. O., & Shvets, A. O. (2018). Theoretical and experimental research of strength properties of spine beam of freight cars. *Science and Transport Progress*, 1(73). 131-147.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/123457> (in English)
16. Shames, I. H. (2017). *Energy and Finite Element Methods In Structural Mechanics.* New York: Routledge.
DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203757567> (in English)
17. Singiresu, S. R. (2018). *The Finite Element Method in Engineering: 6th Edition.* Elsevier Inc.
DOI: <https://doi.org/10.1016/c2016-0-01493-6> (in English)

Received: September 18, 2019

Accepted: January 20, 2020

ЗМІСТ

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

**М. М. БІЛЯЄВ, О. В. БЕРЛОВ, А. В. КОЗАЧИНА,
І. В. КАЛАШНИКОВ, О. В. ШЕВЧЕНКО**
ОЦІНКА РИЗИКУ ТЕРМІЧНОГО УРАЖЕННЯ ЛЮДЕЙ
НА ПРОМИСЛОВОМУ ОБ'ЄКТІ В РАЗІ АВАРІЙНОГО
ГОРІННЯ ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ПАЛИВА 7

**В. Д. ПЕТРЕНКО, М. І. НЕТЕСА, О. Л. ТЮТЬКІН,
О. В. ГРОМОВА, В. А. КОЗАЧИНА**
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОЧИЩЕННЯ
ВОДИ У ФІЛЬТРІ 17

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

**О. А. ХОДОСКИНА, С. О. КІРПІЧЕВА,
А. О. САМСОНОВА, С. О. ШВЕЦОВА**
СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ В РОЗВИТКУ ТРАНСПОРТНО-
ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМ 25

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

В. В. БУРЧЕНКОВ
УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ РОБОТИ
СОРТУВАЛЬНИХ СТАНЦІЙ НА ОСНОВІ
ДИСТАНЦІЙНОГО
АКУСТИЧНОГО ЗОНДУВАННЯ 35

С. В. ВОЙТКІВ
МЕТОДИКА ОЦІНКИ РІВНЯ КОМФОРТАБЕЛЬНОСТІ
ПАСАЖИРСЬКИХ КУПЕЙНИХ СПАЛЬНИХ
ВАГОНІВ 44

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

В. В. СКАЛОЗУБ, Л. О. ПАНІК, О. Д. ПАНАРІН
УНІФІКОВАНИЙ ПАРАЛЕЛЬНИЙ АЛГОРИТМ
ТА ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС ОПТИМАЛЬНОГО
ПЛАНУВАННЯ НЕОДНОРІДНИХ ПОТОКІВ
У МЕРЕЖАХ 56

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

В. В. НЕТРЕБКО
ВПЛИВ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ЗНОСОСТІЙКОГО
ЧАВУНУ НА МІЖФАЗНЕ РОЗПОДІЛЕННЯ
МАРГАНЦЮ ПІСЛЯ ВІДПАЛУ ЗА 690 °С 68

С. О. ПЛІТЧЕНКО, М. М. ГРИЩЕНКО
ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ РОЗВИТКУ СТРУКТУРНИХ
ПЕРЕТВОРЕНЬ ПІД ЧАС ЗВАРЮВАННЯ ТЕРТЯМ
ІЗ ПЕРЕМІШУВАННЯМ БАГАТОФАЗОВОГО
АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ. 77

МАШИНОБУДУВАННЯ

Р. П. ПОГРЕБНЯК, М. Р. ПОГРЕБНЯК
КІНЕМАТИЧНИЙ СИНТЕЗ ПРЯМОЛІНІЙНО-
НАПРЯМНИХ ЦЕНТРАЛЬНИХ КРИВОШИПНО-
ПОВЗУНКОВИХ МЕХАНІЗМІВ ЗАХОПЛЮВАЛЬНОГО
ПРИСТРОЮ ЗА ЕНЕРГЕТИЧНИМ ІНДЕКСОМ
ПЕРЕДАЧІ РУХУ 88

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

В. Г. РАВЛЮК, І. М. АФАНАСЕНКО, М. Г. РАВЛЮК
ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
ГАЛЬМОВИХ КОЛОДОК ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ
ЗА ШКІДЛИВОГО ЗНОСУ 99

А. О. ШВЕЦЬ
СТІЙКІСТЬ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ У РАЗІ ДІЇ
СТИСНИХ ПОЗДОВЖНИХ СИЛ 119

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Д. В. РОЗУМЕНКО, Д. О. БАННИКОВ
ДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ОДНОПОВЕРХОВОЇ
ВИРОБНИЧОЇ БУДІВЛІ 138

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКОЛОГИЯ И ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

**Н. Н. БЕЛЯЕВ, А. В. БЕРЛОВ, В. А. КОЗАЧИНА,
И. В. КАЛАШНИКОВ, А. В. ШЕВЧЕНКО**
ОЦЕНКА РИСКА ТЕРМИЧЕСКОГО ПОРАЖЕНИЯ
ЛЮДЕЙ НА ПРОМЫШЛЕННОМ ОБЪЕКТЕ В СЛУЧАЕ
АВАРИЙНОГО ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО
ТОПЛИВА 7

**В. Д. ПЕТРЕНКО, Н. И. НЕТЕСА, А. Л. ТЮТЬКИН,
Е. В. ГРОВОВА, В. А. КОЗАЧИНА**
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЧИСТКИ
ВОДЫ В ФИЛЬТРЕ 17

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

**О. А. ХОДОСКИНА, С. А. КИРПИЧЕВА,
А. А. САМСОНОВА, Е. А. ШВЕЦОВА**
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ
ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ 25

ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА

В. В. БУРЧЕНКОВ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАБОТЫ
СОРТИРОВОЧНЫХ СТАНЦИЙ НА ОСНОВЕ
ДИСТАНЦИОННОГО АКУСТИЧЕСКОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ 35

С. В. ВОЙТКИВ
МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УРОВНЯ
КОМФОРТАБЕЛЬНОСТИ
ПАССАЖИРСКИХ КУПЕЙНЫХ СПАЛЬНЫХ
ВАГОНОВ 44

ИНФОРМАЦИОННО- КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В. В. СКАЛОЗУБ, Л. А. ПАНИК, А. Д. ПАНАРИН
УНИФИЦИРОВАННЫЙ ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ
И ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ОПТИМАЛЬНОГО
ПЛАНИРОВАНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ ПОТОКОВ
В СЕТЯХ 56

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

В. В. НЕТРЕБКО
ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА
ИЗНОСОСТОЙКОГО ЧУГУНА НА МЕЖФАЗНОЕ
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАРГАНЦА ПОСЛЕ ОТЖИГА
ПРИ 690 °С 68

С. А. ПЛИТЧЕНКО, Н. Н. ГРИЩЕНКО
ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ РАЗВИТИЯ
СТРУКТУРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ПРИ СВАРКЕ
ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ МНОГОФАЗНОГО
АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 77

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Р. П. ПОГРЕБНЯК, М. Р. ПОГРЕБНЯК
КИНЕМАТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ПРЯМОЛИНЕЙНО-
НАПРАВЛЯЮЩИХ ЦЕНТРАЛЬНЫХ КРИВОШИПНО-
ПОЛЗУННЫХ МЕХАНИЗМОВ ЗАХВАТЫВАЮЩЕГО
УСТРОЙСТВА ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ ИНДЕКСУ
ПЕРЕДАЧИ ДВИЖЕНИЯ 88

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА ПОЕЗДОВ

**В. Г. РАВЛЮК, И. М. АФАНАСЕНКО,
М. Г. РАВЛЮК**
ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ТОРМОЗНЫХ КОЛОДОК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ
ПРИ ВРЕДНОМ ИЗНОСЕ 99

А. А. ШВЕЦ
УСТОЙЧИВОСТЬ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ
ПРИ ДЕЙСТВИИ СЖИМАЮЩИХ ПРОДОЛЬНЫХ
СИЛ 119

ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Д. В. РОЗУМЕНКО, Д. О. БАННИКОВ
ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОДНОЭТАЖНОГО
ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЗДАНИЯ 138

CONTENTS

ECOLOGY AND INDUSTRIAL SAFETY

**M. M. BILIAIEV, O. V. BERLOV,
V. A. KOZACHYNA, I. V. KALASHNIKOV,
O. V. SHEVCHENKO**
RISK ASSESSMENT OF THERMAL DAMAGE TO
PEOPLE AT INDUSTRIAL SITES IN CASE OF
EMERGENCY BURNING SOLID PROPELLANT 7

**V. D. PETRENKO, M.I. NETESA, O.L. TIUTKIN,
O.V. GROMOVA, V. A. KOZACHYNA**
MATHEMATICAL MODELING OF WATER
PURIFICATION WITH FILTER 17

ECONOMICS AND MANAGEMENT

**O. A. HODOSKINA, S. A. KIRPICHEVA,
A. A. SAMSONOVA, E. A. SHVETSOVA**
MODERN TRENDS IN THE DEVELOPMENT
OF TRANSPORT AND LOGISTICS SYSTEMS 25

OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS

V. V. BURCHENKOV
IMPROVING THE TECHNOLOGY OF WORK OF
MARSHALLING YARDS BASED ON REMOTE
ACOUSTIC SOUNDING 35

S. V. VOYTKIV
ASSESSMENT METHODOLOGY OF COMFORT LEVEL
OF PASSENGER COMPARTMENT SLEEPING
CARS 44

INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL MODELLING

V. V. SKALOZUB, L. A. PANIK, A. D. PANARIN
UNIFIED PARALLEL ALGORITHM AND
PROGRAMMING COMPLEX OF OPTIMAL PLANNING
OF NON-UNIFORM FLOWS IN THE NETWORKS 56

MATERIAL SCIENCE

V. V. NETREBKO
THE INFLUENCE OF THE CHEMICAL COMPOSITION
OF WEAR-RESISTANT CAST IRON ON THE
INTERPHASE DISTRIBUTION OF MN AFTER
ANNEALING AT 690°C 68

S. O. PLITCHENKO, M. M. GRISCHENKO
RESEARCH OF DEVELOPMENT CONDITIONS OF
STRUCTURAL TRANSFORMATIONS DURING
FRICTION STIR WELDING
OF MULTIPHASE ALUMINUM ALLOY 77

MECHANICAL ENGINEERING

R. P. POGREBNIYAK, M. R. POHREBNIYAK
KINEMATIC SYNTHESIS OF THE GUIDE BEARING
CENTRAL SLIDE-CRANK MECHANISM OF THE
GRIPPING DEVICE BASED ON THE ENERGETIC
MOTION TRANSMISSION INDEX 88

ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION

**V. G. RAVLYUK, I. M. AFANASENKO,
M. G. RAVLIUK**
INVESTIGATION OF THE GEOMETRIC PARAMETERS
OF THE BRAKE PADS OF FREIGHT CARS UNDER
HAZARDOUS WEAR 99

A. O. SHVETS
STABILITY OF FREIGHT CARS UNDER THE ACTION
OF COMPRESSIVE LONGITUDINAL FORCES 119

TRANSPORT CONSTRUCTION

D. V. ROZUMENKO, D. O. BANNIKOV
DYNAMIC PROPERTIES OF ONE-STOREY
INDUSTRIAL BUILDING 138

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 A4, враховуючи таблиці, ілюстрації, список використаних джерел. Статті, більші за обсягом, можуть бути прийняті до розгляду на підставі рішення редколегії.

Для здачі статті до друку авторам необхідно надати наступні документи:

- 1) файл зі статтею та друкований примірник рукопису з підписами всіх співавторів на останньому аркуші роботи;
- 2) оригінал Ліцензійного договору з підписами всіх співавторів;
- 3) файл з відомостями про кожного з авторів – прізвище, ім'я, по-батькові повністю, посада, місце роботи, наукове звання, науковий ступінь, контактна інформація (телефон, адреса електронної пошти), код ORCID. Відомості про авторів подаються трьома мовами – українською, російською та англійською;
- 4) Оригінал експертного висновку.

Увага! Згідно з міжнародними стандартами якості наукових публікацій необхідним є: наявність авторських розширених (250-300 слів) і структурованих резюме (рефератів – abstracts), у т.ч. англійською мовою, рецензій, присланих 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**

№1 (85) 2020

(українською, російською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – О. В. Помінова

Комп'ютерне верстання – О. В. Помінова

Літературна обробка – С. П. Лагдан

Формат 60×84¹/₈. Ум. друк. арк. 17,90. Тираж 100 пр. Зам. №02/01

**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

Свідцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 397 від 03.04.2001 р.



Научное издание

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

№ 1 (85) 2020

(на українському, російському і англійському мов)

Ответственный за выпуск – О. В. Поминова

Компьютерная верстка – О. В. Поминова

Литературная обработка – С. П. Лагдан

Формат 60×84¹/₈. Ус. печат. лист. 17,90. Тираж 100 экз. Зак. №02/01

**Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна**

Адрес редакції, видавця:

ул. Лазаряна, 2, ком. 267, г. Дніпро, 49010, Украина

Тел.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

Печать:

Издательство «Герда», 49000, г. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 60

Свидетельство субъекта издательского дела серия ДК № 397 от 03.04.2001 г.



Scientific Edition

**NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU.
VİSNIK DNİPROPETROVS'KOGO NACİONAL'NOGO UNİVERSİTETU
ZALİZNIČNOGO TRANSPORTU**

=

SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

No. 1 (85) 2020

(in Ukrainian, Russian and English languages)

Responsible for issue – O. V. Pominova

Desktop publishing – O. V. Pominova

Redaction – S. P. Lahdan

Format 60×84¹/₈. Conventional printed sheet 17,90. Circulation 100. Order no. 02/01

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

