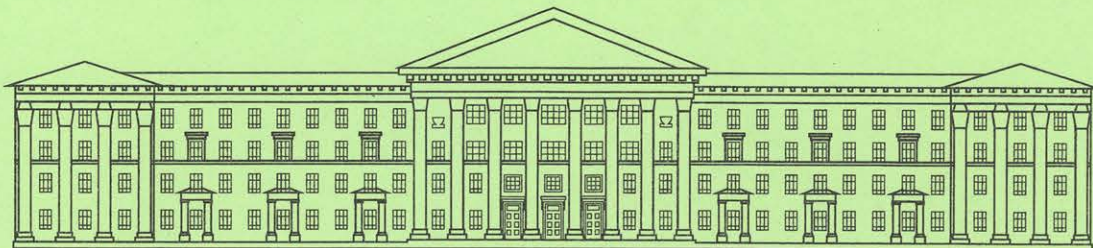




ISSN 2307-3489 (Print)  
ISSN 2307-6666 (Online)



---

# НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ  
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

4(64)

---

.. 2016 ..

*Есть в движенье сладость и тревога.  
Станция, внезапный поворот.  
Жизнь моя — железная дорога,  
Вечное стремление вперед.*

*Маргарита Алигер, 1938 г.*

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна

## НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Науковий журнал

№ 4 (64) 2016

Виходить 6 разів на рік ♦ ♦ ♦ ♦ ♦ Заснований у серпні 2003 р.

*Наука та прогрес транспорту*  
*Автоматизовані системи управління на транспорті*  
*Екологія на транспорті*  
*Економіка та управління*  
*Експлуатація та ремонт засобів транспорту*  
*Електричний транспорт*  
*Залізнична колія*  
*Інформаційно-комунікаційні технології та математичне моделювання*  
*Матеріалознавство*  
*Моделювання задач транспорту та економіки*  
*Нетрадиційні види транспорту. Машини та механізми*  
*Промисловий транспорт*  
*Рухомий склад залізниць і тяга поїздів*  
*Транспортне будівництво*  
*Розвиток вищої школи*

Дніпро

2016

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

ГОЛОВА РЕДАКЦІЙНОЇ РАДИ УНІВЕРСИТЕТУ  
ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛУ  
ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА  
ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР

Пішінко О. М., доктор технічних наук  
Мямлін С. В., доктор технічних наук  
Козаченко Д. М., доктор технічних наук  
Колесникова Т. О., кандидат наук  
із соціальних комунікацій

*ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ (УКРАЇНА):*

Афанасов А. М., Банніков Д. О., Бараш Ю. С., Біляєв М. М., Бобирь Д. В., Бобровський В. І., Боднар Б. Є., Босов А. А., Вакуленко І. О., Власова Т. І., Волкова В. Є., Габринєць В. О., Гаврилук В. І., Гетьман Г. К., Главацький К. Ц., Гненний О. М., Головкова Л. С., Гончаров К. В., Горобець В. Л., Доценко О. М., Дудкіна В. В., Ейтутіс Г. Д., Жуковицький І. В., Заблудовський В. О., Казакевич М. І., Капіца М. І., Копитко В. І., Костін М. О., Кравець В. В., Краснюк А. В., Кривчик Г. Г., Кузнецов В. Г., Курган М. Б., Муха А. М., Мухіна Н. А., Настечик М. П., Нетеса М. І., Оковитий С. І., Очкасов О. Б., Петренко В. Д., Пічугов С. О., Пічурін В. В., Полішко Т. В., Радкевич А. В., Радченко М. О., Ракша С. В., Скалозуб В. В., Сніжко Л. О., Урсуляк Л. В., Штапенко Е. П., Яришкіна Л. О.

*ІНОЗЕМНІ ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:*

Анісімов П. С. (Московський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація); Бялонь А. (Інститут залізничного транспорту, Варшава, Республіка Польща); Вайчунас Г. (Вільнюський технічний університет ім. Гедімінаса, Литва); Васяк І. (Інститут електроенергетики Лодзинської політехніки, Республіка Польща); Гусєв Б. В. (Московський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація); Долежел І. (Університет Західної Богемії, Чеська Республіка); Зіммер К. (Інститут Електротехніки Варшавської політехніки, Республіка Польща); Куанишев Б. М. (Казахська академія транспорту і комунікацій, Республіка Казахстан); Лінгайтис В. Л. (Вільнюський технічний університет ім. Гедімінаса, Литва); Манашкін Л. А. («ALGAE ENERGY SOLUTION, LLC», США); Сладковські А. (Сілезька політехніка, Республіка Польща); Стржелецькі Р. (Гданська морська академія, Республіка Польща); Тітова Т. С. (Петербурзький державний університет шляхів сполучення Імператора Олександра І, Російська Федерація); Худзікевич А. (Варшавський політехнічний університет, Республіка Польща); Шепонг Адам (Варшавський політехнічний університет, Республіка Польща).

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, Global Impact Factor, eLibrary.ru, DOAJ, Index Copernicus, DRJI.  
Друкується за рішенням вченої ради університету від 31.08.2016 р., протокол № 1

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

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

Видання публікується з 1936 р.:

- 1936–1993 рр. – «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»;
- 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

## НАУКА И ПРОГРЕСС ТРАНСПОРТА

ВЕСТНИК ДНЕПРОПЕТРОВСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ИМЕНИ АКАДЕМИКА В. ЛАЗАРЯНА

Научный журнал

№ 4 (64) 2016

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

*Наука и прогресс транспорта*  
*Автоматизированные системы управления на транспорте*  
*Экология на транспорте*  
*Экономика и управление*  
*Эксплуатация и ремонт средств транспорта*  
*Электрический транспорт*  
*Железнодорожный путь*  
*Информационно-коммуникационные технологии и математическое моделирование*  
*Материаловедение*  
*Моделирование задач транспорта и экономики*  
*Нетрадиционные виды транспорта. Машины и механизмы*  
*Промышленный транспорт*  
*Подвижной состав железных дорог и тяга поездов*  
*Транспортное строительство*  
*Развитие высшей школы*

Днепро

2016

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

*ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОГО  
СОВЕТА УНИВЕРСИТЕТА*

Пшинько А. Н., доктор технических наук

*ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛА*

Мямлин С. В., доктор технических наук

*ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА*

Козаченко Д. Н., доктор технических наук

*ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ*

Колесникова Т. А., кандидат наук  
по социальным коммуникациям

*ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ (УКРАИНА):*

Афанасов А. М., Банников Д. О., Бараш Ю. С., Беляев Н. Н., Бобырь Д. В., Бобровский В. И., Боднар Б. Е., Босов А. А., Вакуленко И. А., Власова Т. И., Волкова В. Е., Габринец В. А., Гаврилюк В. И., Гетьман Г. К., Главацкий К. Ц., Гненный О. Н., Головова Л. С., Гончаров К. В., Горобец В. Л., Доценко Е. Н., Дудкина В. В., Жукович И. В., Заблудовский В. А., Казакевич М. И., Капица М. И., Копытко В. И., Костин Н. А., Кравец В. В., Краснюк А. В., Кривчик Г. Г., Кузнецов В. Г., Курган Н. Б., Муха А. М., Мухина Н. А., Настечик М. П., Нетеса Н. И., Оковитый С. И., Очкасов А. Б., Петренко В. Д., Пичугов С. А., Пичурин В. В., Полишко Т. В., Радкевич А. В., Радченко Н. А., Ракша С. В., Скалозуб В. В., Снежко Л. А., Урсуляк Л. В., Штапенко Э. Ф., Эйтулис Г. Д., Яришкина Л. А.

*ИНОСТРАННЫЕ ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:*

Анисимов П. С. (Московский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация); Бялонь А. (Институт железнодорожного транспорта, Варшава, Республика Польша); Вайчунас Г. (Вильнюсский технический университет им. Гедиминаса, Литва); Васяк И. (Институт электроэнергетики Лодзинской политехники, Республика Польша); Гусев Б. В. (Московский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация); Долежел И. (Университет Западной Богемии, Чешская Республика); Зиммер К. (Институт Электротехники Варшавской политехники, Республика Польша); Куанышев Б. М. (Казахская академия транспорта и коммуникаций, Республика Казахстан); Лингайтис В. Л. (Вильнюсский технический университет им. Гедиминаса, Литва); Манашкин Л. А. («ALGAE ENERGY SOLUTION, LLC», США); Сладковски А. (Силезская политехника, Республика Польша); Стржелецки Р. (Гданьская морская академия, Республика Польша); Титова Т. С. (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация); Худзикевиц А. (Варшавский политехнический университет, Республика Польша); Шепонг Адам (Варшавский политехнический университет, Республика Польша).

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, Global Impact Factor, eLibrary.ru, DOAJ, Index Copernicus, DRJI.  
Печатается по решению ученого совета университета от 31.08.2016 г., протокол № 1

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

Адрес ул. Лазаряна, 2, ком. 267, Днепро, Украина, 49010, тел.: +38 (056) 371-51-05;  
учредителя 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»;  
с 2013 г. – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»

Dnipropetrovsk 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**  
**BULLETIN OF DNIPROPETROVSK NATIONAL UNIVERSITY OF RAILWAY**  
**TRANSPORT NAMED AFTER ACADEMICIAN V. LAZARYAN**

**Scientific journal**

**No. 4 (64) 2016**

Bi-Monthly ♦ ♦ ♦ ♦ ♦ Founded in August 2003

*Science and Transport Progress*  
*Transport Automated Control Systems*  
*Transport Ecology*  
*Economics and Management*  
*Operation and Repair of Transport Means*  
*Electric Transport*  
*Railway Track*  
*Information and Communication Technologies and Mathematical Modeling*  
*Material Science*  
*Transport and Economic Tasks Modeling*  
*Non-Traditional Transport Modes. Machines and Mechanisms*  
*Industrial Transport*  
*Rolling Stock and Train Traction*  
*Transport Construction*  
*High School Development*

Dnipro

2016

Founder:  
**DNIPROPETROVSK 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  
 Myamlin S. V., Doctor of Technical Sciences  
 Kozachenko D. M., Doctor of Technical Sciences  
 Kolesnykova T. O., PhD of Social Communications

**EDITORIAL BOARD MEMBERS (UKRAINE):**

Afanasov A. M., Bannikov D. O., Barash Yu. S., Biliaiev M. M., Bobrovskiy V. I., Bobyr D. V., Bodnar B. J., Bosov A. A., Crivchick G. G., Dotsenko O. M., Dudkina V. V., Eitutis H. D., Gabrync V. A., Gavrilyuk V. I., Getman G. K., Glavatskiy K. Ts., Hnennyi O. M., Golovkova L. S., Goncharov K. V., Gorobets V. L., Kapitsa M. I., Kazakevich M. I., Kopytko V. I., Kostin M. O., Krasnyuk A. V., Kravets V. V., Kurgan M. B., Kuznetsov V. G., Mukha A. M., Mukhina N. A., Nastechik N. P., Netesa N. I., Ochkasov O. B., Okovytyy S. I., Petrenko V. D., Pichugov S. O., Pichurin V. V., Polishko T. V., Radchenko N. A., Radkevych A. V., Raksha S. V., Shtapenko E. P., Skalozub V. V., Snizhko L. O., Ursulyak L. V., Vakulenko I. O., Vlasova T. I., Volkova V. Ye., Yarishkina L. O., Zabludovskiy V. O., Zhukovytsky I. V.

**FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:**

Anisimov P. (Moscow State University of Railway Engineering, Russian Federation); Bialon A. (Railway Institute, Warszawa, Republic of Poland); Chudzikiewicz A. (Transport Warsaw University of Technology, Republic of Poland); Dolezel I. (The University of West Bohemia, Czech Republic); Gusev B. (Moscow State University of Railway Engineering, Russian Federation); Kuanyshov B. M. (Kazakh Academy of Transport and Communications, Republic of Kazakhstan); Lingaitis V. L. (Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania); Manashkin L. («ALGAE ENERGY SOLUTION, LLC», USA); Sladkowski A. (Silesian University of Technology, Republic of Poland); Strzelecki R. (Gdynia Maritime Academy, Republic of Poland); Szelag Adam (Warsaw University of Technology, Republic of Poland); Titova T. S. (Petersburg State Transport University, Russian Federation); Vaiciunas G. (Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania); Wasiak I. (Institute of Electrical Power Engineering, Republic of Poland); Zymmer K. (Electrotechnical Institute, Republic of Poland)

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, Global Impact Factor, eLibrary.ru, DOAJ, Index Copernicus, DRJI.  
 Published according to the Academic Council decision of the University from 31.08.2016, Protocol no. 1

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



## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

UDC 628.334.5:519.6

V. A. KOZACHYNA<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail kozachynav@yandex.ua, ORCID 0000-0002-6894-5532

### INVESTIGATION OF ADMIXTURE SEDIMENTATION IN THE HORIZONTAL SETTLER

**Purpose.** Sedimentation by gravity is the most common and extensively applied treatment process for the removal of solids from water and wastewater and it has been used for over one hundred years. Sedimentation tanks are one of the major parts of a treatment plant especially in purification of turbid flows. Horizontal settlers are mainly used for purification of high quantity of water. In these tanks, the low speed turbid water will flow through the length of the tank and suspended particle have enough time to settle. Finding new and useful methods for calculating and increasing hydraulic efficiency of horizontal settlers is the objective of many theoretical, experimental and numerical studies. But currently used models and methods in Ukraine do not allow taking into account geometrical form and various design features. In this paper the numerical model was developed to evaluate the effectiveness of horizontal settler with modified structure. **Methodology.** Numerical model is based on: 1) equation of viscous fluid dynamics; 2) mass transfer equation. For numerical simulation the finite difference schemes are used. The numerical calculation is carried out on a rectangular grid. For the formation of the computational domain markers are used. **Findings.** The model allows obtaining the purification process in the settler with different form and different configuration of baffles. **Originality.** A new approach to investigate the mass transfer process in horizontal settler was proposed. This approach is based on the developed CFD model. The fluid dynamics model was used for the numerical investigation of flows and waste waters purification. To investigate influence of baffles on settler efficiency physical experiment was carried out. **Practical value.** The developed model has more capacity than the existing models in Ukraine. The developed model allows computing quickly the efficiency of water purification in settlers. The model is not computationally expensive. Calculation time of one variant of the problem takes few minutes.

**Keywords:** CFD model; settlers; mass transfer; water purification; physical experiment

#### Introduction

Horizontal settlers are essential hydraulic structures which have to be engineered, designed and constructed at all water treatment plants to remove most of suspended solids which enters the intake by polluted water. The bigger the settler, the best the settlement of pollutants, but the expenses are higher. Therefore, improvement of performance and increasing of removal efficiency of horizontal settlers by alternative method is necessary. Finding new and useful methods for calculating and increasing hydraulic efficiency of horizontal settlers

is the objective of many theoretical, experimental and numerical studies [1, 6, 8, 10, 11, 12, 13, 14]. An approach in present paper for increasing horizontal settler performance is to use system of baffles and plates.

To obtain the horizontal settler efficiency the empirical models are used in Ukraine [2, 3]. But these models don't allow calculating horizontal settlers with comprehensive geometrical form and different systems of baffles and plates. That's why it is important to develop CFD models having more capabilities to simulate the process of the

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

waste waters treatment in settlers and which do not need much computational time for running and allow taking into account the geometrical form of settlers [1, 8, 9].

### Purpose

The objective of this paper consists of two parts. The first part is the experimental investigation of flow in horizontal settlers. The second part is development of the effective computer model (CFD model) which is more effective than the employed in Ukraine models and which can be used for prediction of the horizontal settler efficiency.

### Methodology

*Experimental investigation.* The experiment was carried out in the hydraulics water channel, where the plates were established to form geometry of horizontal settler (Fig. 1). The main objective of the experiment was confirmation that plates influence on increasing of horizontal settler efficiency.

Physical experiments were carried out in horizontal settler (Fig. 1, Fig. 2) with dimensions 1:100 to real settler (height – 2 cm; length – 24 cm; width – 8 cm), which is in operating now at the coal mine «Stepova», Pavlograd region.

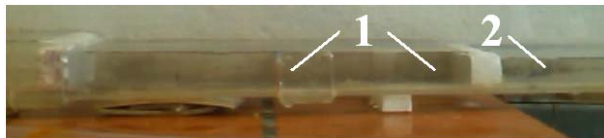


Fig. 1. Experimental model  
of horizontal settler without plates:  
1 – distribution of the sludge inside the horizontal settler;  
2 – distribution of the sludge outside the horizontal settler



Fig. 2. Experimental model  
of horizontal settler  
with plates (Γ-shaped, vertical and horizontal):  
1 – distribution of the sludge inside the horizontal settler  
in the first zone (in front of the Γ-shaped plate);  
2 – distribution of the sludge inside the horizontal settler  
in the second zone (in front of the vertical plate);  
3 – distribution of the sludge  
inside the horizontal settler in the third zone

Froude number was chosen as criterion

$$Fr = \frac{V^2}{gl} = idem$$

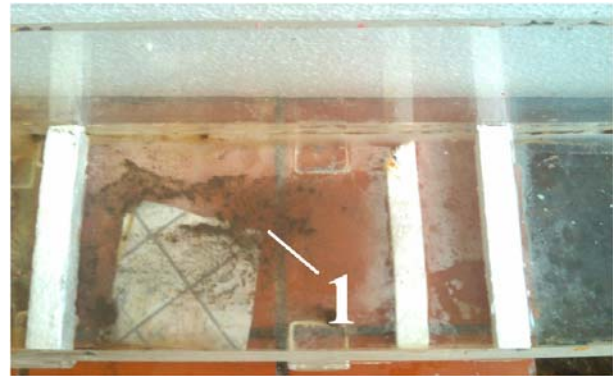


Fig. 3. Sludge (1) on the bottom  
of the classical horizontal settler (top view)

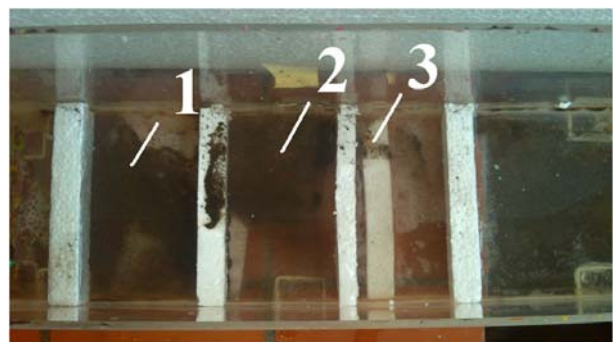


Fig. 4. Sludge on the bottom  
of the modified horizontal settler (top view):  
1 – zone before Γ – shaped plate; 2 – zone before vertical  
plate; 3 – zone after vertical plate

At Fig. 3, Fig. 4 results of physical experiments are shown. Table 1 presents mass of sludge, which was settled at the bottom of each horizontal settler. As we can see, mass of sludge at the bottom of modified settler is higher, than in classical one.

Table 1

### Results of the experimental investigation

Model of settler	settling velocity, cm/sec		
	0,75	0,90	1,05
classical horizontal settler, g	1,1	1,9	4,2
modified horizontal settler, g	1,8	2,5	5,1

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

**CFD model.** For numerical modeling of mass transfer process in horizontal settler CFD model was developed. It consists of two models: mass transfer model and model of viscous fluid flow.

**Mass transfer model.** To simulate the process of water purification in the horizontal settler the transport equation (1) is used [1, 5, 7, 9]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v-w)C}{\partial y} + \sigma C =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \quad (1)$$

where  $C$  is the concentration;  $u, v$  are the velocity components in  $x, y$  direction respectively;  $w$  – is the settling velocity;  $\sigma$  – is the parameter taking into account the process of flocculation and decay;  $\mu_x, \mu_y$  are the coefficients of turbulent diffusion in  $x, y$  direction respectively;  $x_i, y_i$  are the Cartesian coordinates;

The transport equation is used with the following boundary conditions [1, 5, 8, 9]:

– inlet boundary:  $C|_{inlet} = C_E$ , where  $C_E$  is the known concentration (in the case study of this paper it is dimensionless and equal to  $C_E = 100$ );

– outlet boundary: in numerical model the condition  $C(i+1, j) = C(i, j)$  is used. Here,  $C(i+1, j)$  is the concentration at the outlet boundary cell (this boundary condition means that we neglect the process of diffusion at this plane).  $C(i, j)$  is the concentration in the previous cell.

**Initial Condition:**

$$C=0, \text{ for } t=0 \text{ [12].}$$

**Fluid Dynamics Model.** To simulate the flow in the horizontal settler fluid dynamics model of viscous flow was used.

The governing equations of fluid dynamics model are equation (2) and equation (3).

Equation (2) is Poisson equation for flow function [4]:

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

Equation (3) describes vorticity transfer in fluid [4]:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u\omega}{\partial x} + \frac{\partial v\omega}{\partial y} = \frac{1}{\text{Re}} \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

where  $\text{Re} = \frac{V_0 L}{\nu}$  is Reynolds number.

Boundary and initial conditions of this fluid dynamics model are discussed in [7].

**Computation of settling velocity.** To compute the settling velocity the following model is used [11, 13]

$$w = w_0 (e^{-K_1(C-C_{\min})} - e^{-K_2(C-C_{\min})})$$

where  $K_1, K_2$  are experimental constants [11, 13].

**Numerical solver.** Numerical integration of governing equations is carried out using rectangular grid. The geometrical form of the horizontal settler in the numerical model is created using porosity technique (markers method) [5, 7].

To solve Poisson equation (2) the following difference scheme of splitting is used [7]:

– at the first step of splitting the difference equation is

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

– at the second step of splitting the difference equation is

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

– at the third step of splitting the difference equation is

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

– at the last step the difference equation is

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

where

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

Velocity components are calculated using the following expressions

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

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

To solve equation (3) the change triangle difference scheme is used [7]. First of all velocity components are written in the following form

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

$$v = v^+ + v^- = \frac{v + |v|}{2} + \frac{v - |v|}{2}. \quad (11)$$

After that the convective derivatives are approximated using the following expressions:

$$\frac{\partial u^+ \omega}{\partial x} \approx \Lambda_x^+ \omega = (u_{i+1,j}^+ \omega_{i,j} - u_{i,j}^+ \omega_{i-1,j}) / \Delta x,$$

$$\frac{\partial u^- \omega}{\partial x} \approx \Lambda_x^- \omega = (u_{i+1,j}^- \omega_{i+1,j} - u_{i,j}^- \omega_{i,j}) / \Delta x,$$

$$\frac{\partial v^+ \omega}{\partial y} \approx \Lambda_y^+ \omega = (v_{i,j+1}^+ \omega_{i,j} - v_{i,j}^+ \omega_{i,j-1}) / \Delta y,$$

$$\frac{\partial v^- \omega}{\partial y} \approx \Lambda_y^- \omega = (v_{i,j+1}^- \omega_{i,j+1} - v_{i,j}^- \omega_{i,j}) / \Delta y.$$

The second order derivatives are written as following:

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \approx L_{xx}^+ \omega - L_{xx}^- \omega =$$

$$= (-\omega_{i,j} + \omega_{i-1,j}) / \Delta x^2 + (\omega_{i+1,j} - \omega_{i,j}) / \Delta x^2,$$

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \approx L_{yy}^+ \omega - L_{yy}^- \omega =$$

$$= (\omega_{i,j-1} - \omega_{i,j}) / \Delta y^2 + (\omega_{i,j+1} - \omega_{i,j}) / \Delta y^2,$$

The difference approximation of the equation (3) can be written as follows

$$\frac{\omega_{i,j}^{n+1} - \omega_{i,j}^n}{\Delta t} +$$

$$+ (\Lambda_x^+ + \Lambda_x^- + \Lambda_y^+ + \Lambda_y^-) (\omega_{i,j}^{n+1} \xi + (1 - \xi) \omega^n) =$$

$$= \frac{1}{\text{Re}} (L_{xx}^+ + L_{xx}^- + L_{yy}^+ + L_{yy}^-) (\omega_{i,j}^{n+1} \xi + (1 - \xi) \omega^n)$$

or

$$(E + \Delta t \xi) (\Lambda_x^+ + \Lambda_x^- + \Lambda_y^+ + \Lambda_y^-) \omega^{n+1} -$$

$$- \frac{\Delta t}{\text{Re}} \xi (L_{xx}^+ + L_{xx}^- + L_{yy}^+ + L_{yy}^-) \omega^{n+1} =$$

$$= (E - \Delta t (1 - \xi) (\Lambda_x^+ + \Lambda_x^- + \Lambda_y^+ + \Lambda_y^-)) \omega^n +$$

$$+ \frac{\Delta t}{\text{Re}} (1 - \xi) (L_{xx}^+ + L_{xx}^- + L_{yy}^+ + L_{yy}^-) \omega^n.$$

where  $\xi$  is parameter.

If  $\xi = 1/2$  we have the difference scheme which has the second order of accuracy in time.

The change triangle difference scheme for equation of vorticity transfer is written as follows

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

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

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

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

Using these expressions the unknown meaning of vorticity is computed using «running calculation» [7].

To solve the mass conservation equation (1) the implicit difference scheme of splitting is used [1, 7]. At first step the physical splitting of equation (1) is carried out:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial u c}{\partial x} + \frac{\partial (v - w) c}{\partial x} + \sigma c = 0$$

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

At the second step the following approximation of the first order derivatives are used [5]:

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

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

$$\begin{aligned}\frac{\partial u C}{\partial x} &= \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x}, \\ \frac{\partial v C}{\partial y} &= \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y}, \\ \frac{\partial u^+ C}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{ij}^{n+1} - u_{ij}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial u^- C}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1}, \\ \frac{\partial v^+ C}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{ij}^{n+1} - v_{ij}^+ C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial v^- C}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}.\end{aligned}$$

The second order derivatives are approximated as following:

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) &\approx \mu_{x_1} \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta x^2} - \\ &- \mu_{x_2} \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) &\approx \mu_{y_1} \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta y^2} - \\ &- \mu_{y_2} \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}\end{aligned}$$

Here we use notation  $v=v-w$ . In these formulas  $L_x^+, L_x^-, L_y^+, L_y^-, L_z^+, L_z^-, M_{xx}^+, M_{xx}^-$ , etc. are the notations of the difference operators [7].

After the approximation the solution of the difference equation is splitted in 4 steps [1, 7]:

– at the first step  $k = \frac{1}{4}$  the difference equation

is:

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

– at the second step  $k = n + \frac{1}{2}; c = n + \frac{1}{4}$  the

difference equation is:

$$\frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} \left( L_x^- C^k + L_y^- C^k \right) + \frac{\sigma}{2} C_{ij}^k = 0;$$

– at the third step  $k = n + \frac{3}{4}; c = n + \frac{1}{2}$  the difference equation is:

$$\begin{aligned}\frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} &= \\ &= \frac{1}{2} \left( M_{xx}^- C^c + M_{xx}^+ C^k + M_{yy}^- C^c + M_{yy}^+ C^k \right);\end{aligned}$$

– at the fourth step  $k = n + 1; c = n + \frac{3}{4}$  the difference equation is:

$$\begin{aligned}\frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} &= \\ &= \frac{1}{2} \left( M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c \right)\end{aligned}$$

The developed numerical models were coded using FORTRAN.

## Findings

The developed computer model was used to compute water purification in the horizontal settler with two vertical plates (Fig. 5)



Fig. 5. Concentration field in the horizontal settler with two vertical plates

In Fig. 5 the concentration field in the settler is shown. The concentration is presented using «Integer» form of number. Every number shows the percentage of the concentration in the computa-

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

tional cell. The maximum concentration is at the inlet cell (it's equal to «99») and the smallest concentration is in the outlet cell. This concentration shows the efficiency of the settler.

The computational time was 5 min to solve the fluid dynamics problem and mass transfer using the developed numerical model.

### Originality and practical value

Results of physical experiments are presented in the paper. These results show the peculiarities of sludge sedimentation in horizontal settler with additional plates.

A new approach to investigate the mass transfer process in horizontal settler was proposed. This approach is based on the developed CFD model. The fluid dynamics model was used for the numerical investigation of flows in the settler. These models use the rectangular grid and porosity technique to create the form of the settler in the numerical model. The developed models have more capacity than the existing models in Ukraine. The developed models allow to compute quickly the efficiency of water purification in settlers. The models are not computationally expensive.

### Conclusions

The experiments which were carried out in hydraulic laboratory confirm the idea that the additional plates in the horizontal settler can increase the efficiency of water purification.

The CFD model was developed to compute the flow field in horizontal settler. This model is based on the equations of viscous flow. The process of mass transfer in the horizontal settlers is simulated using convection-diffusing equation. Numerical study based on the developed models was carried out. Results illustrate that the developed models can be used to simulate the process of water purification for settlers having comprehensive geometrical form.

### LIST OF REFERENCE LINKS

1. Беляев, Н. Н. Математическое моделирование массопереноса в отстойниках систем водоотведения / Н. Н. Беляев, Е. К. Нагорная. – Дніпропетровськ : Нова ідеологія, 2012. – 112 с.
2. Василенко, О. А. Водовідведення та очистка стічних вод міста. Курсове і дипломне проектування. Приклади та розрахунки : навч. посіб.

- / О. А. Василенко, С. М. Епоян. – Київ ; Харків : КНУБА : ХНУБА : ТО Ексклюзив, 2012. – 540 с.
3. Ласков, Ю. М. Примеры расчетов канализационных сооружений : учеб. пособие для вузов / Ю. М. Ласков, Ю. В. Воронов, В. И. Калицун. – Москва : Высш. шк., 1981. – 232 с.
4. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – Москва : Наука, 1978. – 735 с.
5. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – Москва : Наука, 1982. – 320 с.
6. Нагорная, Е. К. CFD-модель процесса массопереноса в вертикальном отстойнике / Е. К. Нагорная // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 1 (43). – С. 39–50. doi: 10.15802/stp20-13/9578.
7. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – Киев : Наук. думка, 1997. – 368 с.
8. Biliaiev, M. M. New codes for the CFD simulation of the water purification in the horizontal settler / M. M. Biliaiev, V. A. Kozachyna // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – 2014. – Вип. 24. – С. 16–23.
9. Biliaiev, M. M. Numerical determination of horizontal settlers performance / M. M. Biliaiev, V. A. Kozachyna // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 4. – С. 34–43. doi: 10.15802/stp2015/49201.
10. Critical modeling parameters identified for 3D CFD modeling of rectangular final settling tanks for New York City wastewater treatment plants / K. Ramalingam, S. Xanthos, M. Gong [et al.] // Water Science & Technology. – 2012. – Vol. 65. – Iss. 6. – P. 1087–1094. doi: 10.2166/wst.2012.944.
11. Griborio, A. Secondary Clarifier Modeling: A Multi-Process Approach / A. Griborio // Dissertation and Theses (for the degree of Doctor of Philosophy in The Engineering and Applied Sciences Program). – University of New Orleans : USA, 2004. – 440 p.
12. Kleine, D. Finite Element Analysis of Flows in Secondary Settling Tanks / D. Kleine, B. Reddy // Intern. J. for Numerical Methods in Engineering. – 2005. – Vol. 64. – Iss. 7. – P. 849–876. doi: 10.1002/nme.1373.
13. Takács, I. Experiments in Activated Sludge Modelling / I. Takács // PhD Thesis (for the degree of Doctor (Ph.D.) in Applied Biological Sciences), Ghent University : Belgium, 2008. – 267 p.

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

14. Tamayol, A. Determination of Settling Tanks Performance Using an Eulerian-Lagrangian Method / A. Tamayol, B. Firoozabadi, G. Ahmadi

// J. of Applied Fluid Mechanics. – 2008. – Vol. 1, № 1. – P. 43–54.

В. А. КОЗАЧИНА<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта kozachynav@yandex.ua, ORCID 0000-0002-6894-5532

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОСАДЖЕННЯ ДОМІШОК У ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ ВІДСТІЙНИКУ

**Мета.** Осадження домішок є найбільш простим та широковживаним методом механічної очистки природних або стічних вод. Цей процес реалізується, зокрема, в горизонтальних відстійниках, які є одним із найважливіших елементів у технологічній схемі очищення води. Їх застосування пов'язано з можливістю пропуску досить великих обсягів води. В цих спорудах вода, що очищується, рухається з невеликою швидкістю, що дозволяє домішки осісти. Пошук нових методів для розрахунку горизонтальних відстійників та підвищення їх ефективності є метою багатьох теоретичних, експериментальних та чисельних досліджень. Проте моделі та методики, які в даний час використовуються для розв'язання поставленої задачі, не дозволяють врахувати форму відстійника і різні конструктивні особливості. Метою роботи є побудова чисельної моделі для оцінки ефективності горизонтального відстійника з вертикальними пластинами і проведення експерименту для візуалізації процесу осадження домішки в горизонтальному відстійнику з набором пластин. **Методика.** Основою моделі є: 1) вихровий рух реальної рідини (рівняння Нав'є-Стокса); 2) рівняння масопереносу. Для чисельного розв'язку рівнянь використовуються різницеві схеми. Чисельний розрахунок здійснюється на прямокутній різницевій сітці. Для формування виду розрахункової області та виділення її особливостей застосовується метод маркування. **Результати.** Розроблена чисельна модель дозволяє розрахувати процес освітлення води в горизонтальних відстійниках різної форми і з різними конфігураціями пластин. **Наукова новизна.** Автором представлено новий підхід у дослідженні та розрахунку роботи горизонтальних відстійників різної конфігурації. Даний підхід ґрунтується на чисельному інтегруванні рівнянь руху рідини і масопереносу домішки. **Практична значимість.** Розроблена чисельна модель розрахунку роботи горизонтальних відстійників пред'являє невеликі вимоги до потужності комп'ютерної техніки. Час розрахунку одного варіанта завдання становить кілька хвилин.

**Ключові слова:** чисельна модель; горизонтальний відстійник; очистка води; фізичний експеримент

В. А. КОЗАЧИНА<sup>1\*</sup>

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

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСАЖДЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ОТСТОЙНИКЕ

**Цель.** Осаждение примесей является наиболее простым и широкоиспользуемым методом механической очистки природных или сточных вод. Этот процесс реализуется, в частности, в горизонтальных отстойниках, которые являются одним из важнейших элементов в технологической схеме очистки воды. Их использование связано с пропуском достаточно большого количества воды. В этих сооружениях очищаемая вода движется с небольшой скоростью, что позволяет примесям осесть. Поиск новых методов для расчета горизонтальных отстойников и повышения эффективности их работы является целью многих теоретических, экспериментальных и численных исследований. Но модели и методики, которые сейчас используются для решения поставленной задачи, не позволяют учесть форму отстойника и различные конструктивные особенности. Целью работы является построение численной модели для оценки эффективности горизонтального отстойника с вертикальными пластинами и проведение эксперимента для визуализации процесса осаждения примесей в горизонтальном отстойнике с набором пластин. **Методика.** В основу модели положено:

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

1) вихревое движение реальной жидкости (уравнения Навье-Стокса); 2) уравнение массопереноса. Для численного моделирования моделирующих уравнений используются разностные схемы. Численный расчет осуществляется на прямоугольной разностной сетке. Для формирования вида расчетной области и выделения ее особенностей применяется метод маркирования. **Результаты.** Разработанная численная модель позволяет рассчитать процесс осветления воды в горизонтальных отстойниках различной формы и с различными конфигурациями пластин. **Научная новизна.** Автором представлен новый подход в исследовании и расчете работы горизонтальных отстойников различной конфигурации. Данный подход основывается на численном интегрировании уравнений движения жидкости и массопереноса примеси. **Практическая ценность.** Разработанная численная модель расчета работы горизонтальных отстойников предъявляет небольшие требования к мощности компьютерной техники. Время расчета одного варианта задачи составляет несколько минут.

*Ключевые слова:* численная модель; горизонтальный отстойник; очистка воды; физический эксперимент

## REFERENCES

1. Belyaev N.N., Nagornaya Ye.K. *Matematicheskoye modelirovaniye massoperenosa v otstoynikakh sistem vodootvedeniya* [Mathematical modeling of mass transfer in settlers of waste water treatment plants]. Dnipropetrovsk, Nova ideolohiya Publ., 2012. 112 p.
2. Vasylenko O.A., Epoian S.M. *Vodovidvedennia ta ochystka stichnykh vod mista. Kursove i diplomne proektuvannia. Pryklady ta rozrakhunky* [Sewage and wastewater treatment. Course and diploma design. Examples and calculations]. Kyiv, Kharkiv, KNUBA, KhNUBA, TO Eksklyuzyv Publ., 2012. 540 p.
3. Laskov Yu.M., Voronov Yu.V., Kalitsun V.I. *Primery raschetov kanalizatsionnykh sooruzheniy* [Examples of calculation of sewer plants]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1981. 232 p.
4. Loytsyanskiy L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of liquid and gas]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 735 p.
5. Marchuk G.I. *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy* [Mathematical modeling in problem of environment]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 320 p.
6. Nagornaya Ye.K. CFD-model protsessa massoperenosa v vertikalnom otstoynike [CFD-model of the mass transfer in the vertical settler]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2013, no. 1, pp. 39-50. doi: 10.15802/stp20-13/9578.
7. Zgurovskiy M.Z., Skopetskiy V.V., Khrushch V.K., Belyayev N.N. *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede* [Numerical modeling pollutant transfer in environment]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1997. 368 p.
8. Biliaiev M.M., Kozachyna V.A. New codes for the CFD simulation of the water purification in the horizontal settler. *Problemy vodopostachannya, vodovidvedennya ta hidravliki* [The problems of water supply, drainage and hydraulics], 2014, issue 24, pp. 16-23.
9. Biliaiev M.M., Kozachyna V.A. Numerical determination of horizontal settlers performance. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no. 5, pp. 34-43. doi: 10.15802/STP2015/49201.
10. Ramalingam K., Xanthos S., Gong M., Fillos J., Beckmann K., Deur A., McCorquodale J. A. Critical modeling modeling parameters identified for 3D CFD modeling of rectangular final settling tanks for New York City wastewater treatment plants. *Water Science & Technology*, 2012, vol. 65, issue 6, pp. 1087-1094.
11. Griborio A. Secondary Clarifier Modeling: A Multi-Process Approach. Dissertation and Theses. USA, University of New Orleans Publ., 2004. 440 p.
12. Kleine D., Reddy B. Finite Element Analysis of Flows in Secondary Settling Tanks. *Intern. Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2005, vol. 64, issue 7, pp. 849-876. doi: 10.1002/nme.1373.
13. Takács I. Experiments in Activated Sludge Modelling. PhD Thesis. Belgium, 2010. 267 p.
14. Tamayol A., Firoozabadi B., Ahmadi G. Determination of Settling Tanks Performance Using an Eulerian-Lagrangian Method. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2008, vol. 1, no. 1, pp. 43-54.

*Prof. S. A. Pichugov, D. Sc. (Phys. and Math.) (Ukraine); Prof. S. Z. Polyshchuk D. Sc. (Tech.) (Ukraine) recommended this article to be published*

Accessed: May 9, 2016

Received: July 7, 2016



## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

УДК 625.032:656.082:343.148

Я. В. БОЛЖЕЛАРСЬКИЙ<sup>1\*</sup>, Ю. Г. СОБОЛЕВСЬКА<sup>2\*</sup>, С. С. ДОВГАНЮК<sup>3\*</sup>, А. В. БАТІГ<sup>4\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Локомотиви», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 776 59 47, ел. пошта jarik762145@gmail.com, ORCID 0000-0002-4787-1781

<sup>2\*</sup>Каф. «Фундаментальні дисципліни», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (Львівська філія), вул. І. Блажкевича, 12-а, Львів, Україна, 79052, тел. +38 (032) 267 99 74, ел. пошта sobolevskyy@gmail.com, ORCID 0000-0002-8087-2014

<sup>3\*</sup>Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (Львівська філія), вул. І. Блажкевича, 12-а, Львів, Україна, 79052, тел. +38 (032) 267 99 74, ел. пошта dovgyanyuk@ukr.net, ORCID 0000-0003-1320-3192

<sup>4\*</sup>Лаб. «Залізнично-транспортні дослідження», Львівський науково-дослідний інститут судових експертиз, вул. Липинського, 54, Львів, Україна, 79024, тел. +38 (032) 232 70 61, ел. пошта lndise@mail.lviv.ua, ORCID 0000-0003-1205-6004

### ВИЗНАЧЕННЯ ПОГЛИНАННЯ ЕНЕРГІЇ ГАСИТЕЛЕМ КОЛИВАНЬ ВАНТАЖНОГО ВАГОНА В АВАРІЙНОМУ РЕЖИМІ РУХУ

**Мета.** Незважаючи на заходи з підвищення безпеки руху поїздів, на залізницях України та світу трапляються сходи рухомого складу з рейок. У випадках заподіяння значних матеріальних збитків та людських жертв правоохоронними органами відкриваються кримінальні провадження, у рамках яких призначаються судові залізнично-транспортні експертизи. Під час проведення вказаних експертиз та службового розслідування залізнично-транспортних пригод, що їм передують, виникає потреба у розв'язанні диференціального рівняння руху поїзда. Складовою вказаного рівняння є величина питомого опору руху. В умовах залізнично-транспортних пригод виникають фактори, які сприяють виникненню додаткового опору руху, а методика його розрахунку на даний час знаходиться у стадії розробки. Відсутність науково-обґрунтованої методики його розрахунку у багатьох випадках унеможливує побудову механізму залізнично-транспортної пригоди і встановлення можливості її запобігання. Робота спрямована на визначення втрати енергії гасителями коливань вантажного вагона, колісна пара якого рухається у стані сходу рейко-шпальною решіткою, у залежності від осьового навантаження та конструктивних параметрів ресорного підвішування. **Методика.** На основі аналізу конструкції ресорного підвішування та принципу роботи фрикційного гасителя коливань візка вантажного вагона запропоновано спосіб визначення енергії, що ним поглинається. У розрахунках приймалися максимальні значення переміщень елементів гасителя та нормативні значення параметрів ресорного підвішування. **Результати.** Отримані розрахункові формули визначення енергії, що поглинається гасителем коливань, для передбачених нормативними документами схем монтажу пружних елементів візка у залежності від осьового навантаження. Вказані залежності є параболічними. **Наукова новизна.** Авторами розглянуто аварійний режим руху колісної пари рейко-шпальною решіткою після сходу її з рейок. Показано, що розсіювання енергії гасителем коливань є причиною збільшення опору руху рухомого складу. Отримано формули для розрахунку величини енергії, яка розсіюється гасителем коливань при максимальному переміщенні його елементів і залежить від осьового навантаження та конструктивних параметрів ресорного підвішування. **Практична значимість.** Запропонований метод дозволить встановити величину додаткового опору руху, який виникає в аварійному режимі, що дасть змогу підвищити точність тягових розрахунків.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

**Ключові слова:** схід з рейок; колісна пара; гаситель коливань; рейко-шпальна решітка; дисипація енергії; тягові розрахунки; судова залізнично-транспортна експертиза

### Вступ

Під час проведення судових експертиз та службового розслідування залізнично-транспортних пригод виникає потреба у розв'язанні диференціального рівняння руху поїзда [10]. Складовою вказаного рівняння є величина питомого опору руху [7]. Методи визначення опору руху при нормальних умовах експлуатації розроблені на достатньому рівні і увійшли до нормативно-технічної документації та довідкової літератури [4, 9]. Однак в умовах залізнично-транспортних пригод виникають фактори, які сприяють виникненню додаткового опору руху, а методика його розрахунку на даний час знаходиться у стадії розробки. Одним з таких випадків є рух колісної пари по рейко-шпальній решітці, який супроводжується низкою явищ, що спричиняють збільшення опору. Відсутність науково-обґрунтованої методики його розрахунку у багатьох випадках унеможлиблює побудову механізму залізнично-транспортної пригоди і встановлення можливості її запобігання.

Нестаціонарні коливання рухомого складу розглядаються у значній кількості праць, серед яких слід відзначити [2, 3, 5, 8]. Результати досліджень дисипації енергії у фрикційних гасителях коливань і її впливу на енергоефективність тяги поїздів наведені у [6, 13–17]. Відзначено, що енергія поїзда, який рухається, частково гаситься в баласті колії і поповнюється локомотивом для підтримання заданої швидкості руху, тобто дисипація (розсіяння) енергії призводить до збільшення опору руху поїзда.

Аналогічно збільшення опору руху поїзда буде спостерігатись і при збільшенні дисипації енергії гасителями коливань під час сходу колісної пари з рейок та її руху по рейко-шпальній решітці. При цьому слід очікувати максимальну амплітуду переміщень конструктивних елементів гасителя коливань.

### Мета

Метою роботи є визначення величини розсіювання енергії гасителями коливань вантажного вагона, колісна пара якого рухається рейко-шпальною решіткою у стані сходу, за-

лежно від осьового навантаження та конструктивних параметрів ресорного підвішування.

### Методика

**Постановка задачі.** Колісна пара вантажного вагона з тарою  $T$ , у якому міститься вантаж вагою  $P$ , рухається по рейко-шпальній решітці. Необхідно визначити величину енергії, яка розсіюється гасителями коливань при максимальному переміщенні гасителя, а також відшукати залежність цієї енергії від навантаження на вісь.

**Розв'язання задачі.** Гасителі коливань створюють дисипативні (розсіючі) сили, які необхідні для розсіювання енергії власних коливань та обмеження амплітуд коливань вагона чи його частин [1].

При цьому намагаються усю енергію, яка поступає в пружні елементи колівальної системи, витратити на тертя в гасителях коливань, щоб вона перетворювалась в теплову енергію і розсіювалась в навколишнє середовище.

У візках вантажних вагонів типу ЦНІІ-ХЗ-О застосовується клиновий гаситель коливань, який створює сили тертя, що пропорційні до переміщень, але різні по величині для руху вгору та вниз [11].

Клиновий гаситель коливань складається з двох фрикційних клинів, кожен з яких спирається на дворядну клинову пружину, опорних поверхонь надресорної балки, яка спирається на комплект основних пружин, що також є дворядними. Кількість основних пружин залежить від вантажопідйомності вагона і може бути 3, 4 або 5 [12]. Таким чином, з однієї сторони візка може бути встановлено 5, 6 або 7 дворядних пружин, дві з яких підтримують клин, а інші – надресорну балку.

Розрахункова схема клинового гасителя коливань, запозичена з [1], наведена на рис. 1.

Сила тертя, яка виникає у фрикційному гасителі коливань, визначається за узагальненою формулою [2]:

$$F_{\text{тр}} = -k \cdot \varphi_{\text{ТРС}} \cdot c_e \cdot z \cdot \text{sign } \dot{z}, \quad (1)$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорційності, що показує частку зусилля при стисканні пружного елеме-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

нта на одиницю переміщення, яку гаситель коливань перетворює в нормальний тиск між елементами, що труться;  $\varphi_{\text{ТСР}}$  – середній коефіцієнт відносного тертя;  $z$  – статичний прогин ресорного підвішування;  $c_e$  – еквівалентна жорсткість пружних елементів, паралельно до яких встановлений гаситель;  $\dot{z}$  – швидкість переміщення гасителя;  $\text{sign } \dot{z}$  – знак  $\dot{z}$ .

Залежність між навантаженням на гаситель коливань  $P$  та його переміщенням  $z$ , має вигляд, що показаний на рис. 2.

Енергія, що поглинається гасителем коливань, дорівнює площі петлі гістерезису і, як видно з рис. 2, визначається за формулою:

$$\Delta E_{\text{гас}} = k \cdot \varphi_{\text{ТСР}} \cdot c_e \cdot z^2. \quad (2)$$

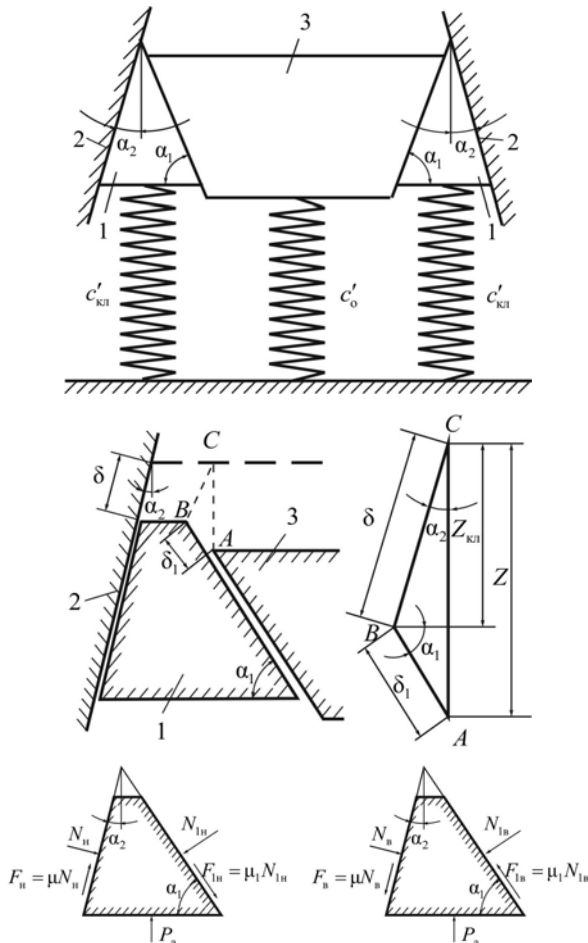


Рис. 1. Схема роботи фрикційного гасителя коливань:

1 – клин; 2 – фрикційна планка; 3 – надресорна балка

Fig. 1. Scheme of the friction shock absorber operation: 1 – wedge; 2 – friction plate; 3 – bolster

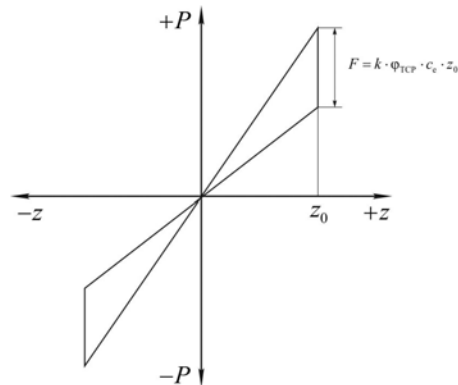


Рис. 2. Силовая характеристика фрикційного гасителя коливань

Fig. 2. Power characteristic of friction shock absorber

Виразимо цю енергію через силу натиснення, яка виникає при терті елементів фрикційного гасителя, схема якого наведена на рис. 1

$$\Delta E_{\text{гас}} = (N_{\text{IH}} + N_{\text{H}} + N_{\text{B1}} + N_{\text{B}}) \cdot \varphi_{\text{ТСР}} \cdot z, \quad (3)$$

де  $N_{\text{IH}}, N_{\text{H}}, N_{\text{B1}}, N_{\text{B}}$  – сили натиснення, які виникають при русі клинового гасителя коливань вгору та вниз, Н.

Для визначення складових, що входять до виразу (3) визначимо статичне навантаження на одну дворядну пружину:

$$P_{\text{ст}} = \frac{(m_{\text{ваг}} - m_{\text{к.п.}} \cdot n_{\text{к.п.}} - m_{\text{бок}} \cdot n_{\text{бок}}) \cdot g}{n_{\text{пр}}}, \quad (4)$$

де  $m_{\text{ваг}}$  – маса вагона;  $m_{\text{к.п.}}$  – маса колісної пари,  $n_{\text{к.п.}}$  – кількість колісних пар;  $m_{\text{бок}}$  – маса бокової рами візка,  $n_{\text{бок}}$  – кількість бокових рам візка у вагоні;  $n_{\text{пр}}$  – загальна кількість подвійних пружин у ресорному підвішуванні вагона;  $g$  – прискорення вільного падіння.

Осьове навантаження  $q_0$  та маса вагона пов'язані співвідношенням

$$m_{\text{ваг}} = q_0 \cdot n_{\text{кп}} / g. \quad (5)$$

Враховуючи, що пружини у ресорному комплекті подвійні і встановлені паралельно, сумарна жорсткість подвійної пружини буде дорівнювати сумі жорсткостей внутрішньої  $c_{\text{вн}}$  та зовнішньої  $c_3$  пружин

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

$$c' = c_{\text{вн}} + c_3. \quad (6)$$

Жорсткість однієї пружини (зовнішньої або внутрішньої) визначається за формулою

$$c_{3(\text{вн})} = \frac{G \cdot d_{3(\text{вн})}^4}{8 \cdot D_{3(\text{вн})}^3 \cdot n_{p3(\text{вн})}}, \quad (7)$$

де  $G$  – модуль зсуву для сталі;  $d_{3(\text{вн})}$  – діаметр прутка зовнішньої (внутрішньої) пружини;  $D_{3(\text{вн})}$  – діаметр зовнішньої (внутрішньої) пружини;  $n_{p3(\text{вн})}$  – кількість робочих витків зовнішньої (внутрішньої) пружини.

Прогин рессорного підвішування:

$$z = \frac{P_{\text{ст}}}{c'}. \quad (8)$$

Прогин підклинової пружини  $z_{\text{кл}}$  та переміщення поверхонь клина, які труться по фрикційній планці  $\delta$  та надресорній балці  $\delta_1$ , можуть бути визначені за формулами:

$$z_{\text{кл}} = \frac{z}{1 + \text{tg}\alpha_1 \cdot \text{tg}\alpha_2}, \quad (9)$$

$$\delta = \frac{z}{(1 + \text{tg}\alpha_1 \cdot \text{tg}\alpha_2) \cdot \cos\alpha_2}, \quad (10)$$

$$\delta_1 = \frac{z \cdot \text{tg}\alpha_2}{(1 + \text{tg}\alpha_1 \cdot \text{tg}\alpha_2) \cdot \cos\alpha_1}. \quad (11)$$

Реакція пружини, що підтримує клин:

$$P_a = c'_{\text{кл}} \cdot z_{\text{кл}}, \quad (12)$$

де  $c'_{\text{кл}} = c'$  – жорсткість подвійної пружини, яка підтримує клин.

Знайдемо значення сил, що діють на клин та надресорну балку, а також відповідних переміщень (рис. 1).

При русі клина вниз (див. рис. 1):

$$\Delta_{\text{Н}} = (1 + \mu \cdot \mu_1) \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + (\mu_1 - \mu) \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha_2); \quad (13)$$

$$N_{1\text{Н}} = P_a \cdot \frac{\cos\alpha_2 + \mu \cdot \sin\alpha_2}{\Delta_{\text{Н}}}; \quad (14)$$

$$N_{\text{Н}} = P_a \cdot \frac{\sin\alpha_1 - \mu_1 \cdot \cos\alpha_1}{\Delta_{\text{Н}}}; \quad (15)$$

$$F_{\text{Н}} = \mu N_{\text{Н}}; \quad (16)$$

$$F_{1\text{Н}} = \mu_1 N_{1\text{Н}}. \quad (17)$$

При русі клина вгору:

$$\Delta_{\text{В}} = (1 + \mu \cdot \mu_1) \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha_2) - (\mu_1 - \mu) \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha_2); \quad (18)$$

$$N_{1\text{В}} = P_a \cdot \frac{\cos\alpha_2 - \mu \cdot \sin\alpha_2}{\Delta_{\text{В}}}; \quad (19)$$

$$N_{\text{В}} = P_a \cdot \frac{\sin\alpha_1 + \mu_1 \cdot \cos\alpha_1}{\Delta_{\text{В}}}; \quad (20)$$

$$F_{\text{В}} = \mu N_{\text{В}}; \quad (21)$$

$$F_{1\text{В}} = \mu_1 N_{1\text{В}}. \quad (22)$$

Коефіцієнти відносного тертя клинового гасителя при русі вгору та вниз визначається за формулами:

$$\vartheta_{\text{ТН}} = \frac{2 \cdot (F_{\text{Н}} + F_{1\text{Н}})}{P_{\text{Н}}}, \quad (23)$$

де  $P_{\text{Н}}$  – навантаження на ресорний комплект при русі вниз, Н;

$$\vartheta_{\text{ТВ}} = \frac{2 \cdot (F_{\text{В}} + F_{1\text{В}})}{P_{\text{В}}}, \quad (24)$$

де  $P_{\text{В}}$  – навантаження на ресорний комплект при русі вгору, Н;

$$P_{\text{Н}} = \sum c'_o z + 2c'_{\text{кл}} z_{\text{кл}} + 2F_{\text{В}}, \quad (25)$$

$$P_{\text{В}} = \sum c'_o z + 2c'_{\text{кл}} z_{\text{кл}} - 2F_{\text{В}}, \quad (26)$$

де  $\sum c'_o$  – сумарна жорсткість основних пружин комплексу.

Коефіцієнт середнього тертя визначиться за формулою

$$\varphi_{\text{ТСР}} = \frac{P_{\text{Н}} - P_{\text{В}}}{P_{\text{Н}} + P_{\text{В}}}. \quad (27)$$

З аналізу формул (1–27) видно, що шукана залежність буде квадратичною, матиме вигляд

$$E = A \cdot q_o^2 + B \cdot q_o + C. \quad (28)$$

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

## Результати

Виконано розрахунок для наступних вихідних даних:  $m_{\text{кп}} = 1440$  кг;  $m_{\text{бок}} = 500$  кг;  $n_{\text{кп}} = 4$ ;  $n_{\text{бок}} = 4$ ;  $D_3 = 0,172$  м;  $D_{\text{вн}} = 0,105$  м;  $d_3 = 0,03$  м;  $d_{\text{вн}} = 0,019$  м;  $G = 8 \cdot 10^{10}$  Па;  $n_{p3} = 4,8$ ;  $n_{p_{\text{вн}}} = 7,6$ ;  $\alpha_1 = 0,8024$  рад;  $\alpha_2 = 0,0349$  рад;  $\mu = 0,25$ ;  $\mu_1 = 0,28$ .

Розрахунок виконано для трьох варіантів встановлення пружин, які передбачені [12]:  $n_{\text{пр}} = 20$  для вагонів вантажопідйомністю менше 50 т (тип 1);  $n_{\text{пр}} = 24$  для вагонів вантажопідйомністю 50–60 т (тип 2);  $n_{\text{пр}} = 28$  для вагонів вантажопідйомністю більше 60 т (тип 3). При цьому з однієї сторони візка встановлюється 5, 6 або 7 пружин відповідно, дві з яких – підклинові, а решта – основні.

Розрахунок виконаний для допустимого діапазону навантажень на вісь за умови, що вантажопідйомність вагона перевищена не буде. Результати розрахунку наведені у табл. 1, на рис. 3.

Залежності апроксимуються параболою (27), які мають вигляд:

– для вагонів вантажопідйомністю до 50 т (1 тип)

$$E = 0,043 \cdot q_0^2 - 1,6379 \cdot q_0 + 15,586;$$

– для вагонів вантажопідйомністю 50–60 т (2 тип)

$$E = 0,0248 \cdot q_0^2 - 0,9457 \cdot q_0 + 8,9986;$$

– для вагонів вантажопідйомністю більше 60 т (3 тип)

$$E = 0,0156 \cdot q_0^2 - 0,5945 \cdot q_0 + 5,6572.$$

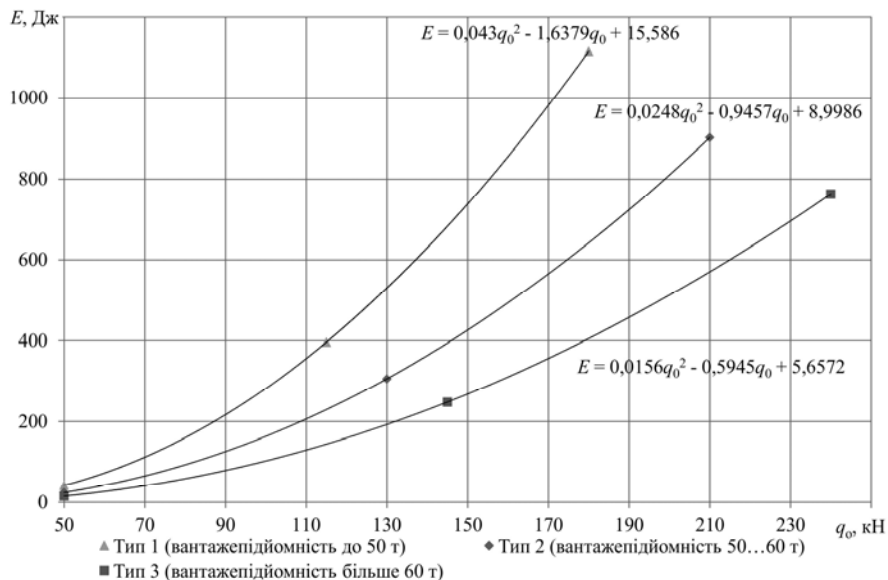
Таблиця 1

Енергія, що розсіюється гасителями коливань

Table 1

## The energy dissipated by the shock absorbers

Тип 1		Тип 2		Тип 3	
$q_0$ , кН	$E$ , Дж	$q_0$ , кН	$E$ , Дж	$q_0$ , кН	$E$ , Дж
50	41,3	50	23,8	50	15
115	396	130	306	145	248
180	1115	210	902	240	763

Рис. 3. Залежності  $E = f(q_0)$ Fig. 3. Dependencies  $E = f(q_0)$

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

**Наукова новизна та практична значимість**

Розглянуто аварійний режим руху колісної пари рейко-шпальною решіткою після сходу її з рейок. Показано, що розсіювання енергії гасителем коливань є причиною збільшення опору руху рухомого складу. Отримано формули для розрахунку величини енергії, яка розсіюється гасителем коливань при максимальному переміщенні його елементів і залежить від осевого навантаження та конструктивних параметрів ресорного підвішування. Це дозволить встановити величину додаткового опору руху, який виникає в аварійному режимі, що дасть змогу підвищити точність тягових розрахунків.

**Висновки**

1. У результаті досліджень отримані розрахункові формули визначення енергії, що поглинається гасителем коливань для різних схем пружного підвішування вагонів. Залежності можуть бути описані параболою вигляду  $E = A \cdot q_0^2 + B \cdot q_0 + C$ .

2. Розрахована енергія, що розсіюється гасителями коливань та поповнюється енергетичною установкою локомотива для підтримання заданої швидкості. Вказане розсіювання енергії є причиною виникнення додаткового опору руху поїзда.

3. Напрямами подальших досліджень є уточнення величини амплітуди коливань за різних умов руху та розробка методики визначення додаткового опору руху, що виникає внаслідок дисипації енергії гасителями коливань.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Вагони : учебник для вузов ж.-д. трансп. / Л. А. Шадур, И. И. Челноков, Л. Н. Никольский [и др.] ; под ред. Л. А. Шадура. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1980. – 439 с.
2. Вершинский, С. В. Динамика вагона : учебник для вузов ж.-д. трансп. / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, В. Д. Хусидов ; под ред. С. В. Вершинского. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1991. – 360 с.
3. Гарг, В. К. Динамика подвижного состава : [пер. с англ.] / В. К. Гарг, Р. В. Дуккипати ; под ред. Н. А. Панькина. – Москва : Транспорт, 1988. – 391 с.
4. Гребенюк, П. Т. Тяговые расчеты : справочник / П. Т. Гребенюк, А. Н. Долганов, А. И. Скворцов ; под ред. П. Т. Гребенюка. – Москва : Транспорт, 1987. – 272 с.
5. Дьомін, Ю. В. Основи динаміки вагонів : навч. посібник / Ю. В. Дьомін, Г. Ю. Черняк. – Київ : КУЕТТ, 2003. – 270 с.
6. Комарова, А. Н. Оценка энергоэффективности нетягового подвижного состава / А. Н. Комарова, Ю. П. Бороненко // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 1 (43). – С. 149–153. doi:10.15802/stp2013/9616.
7. Кузьмич, В. Д. Теория локомотивной тяги : учебник для вузов ж.-д. трансп. / В. Д. Кузьмич, В. С. Руднев, С. Я. Френкель ; под ред. В. Д. Кузьмича. – Москва : Маршрут, 2005. – 448 с.
8. Мямлин, С. В. Моделирование динамики рельсовых экипажей : монография / С. В. Мямлин. – Днепропетровск : Новая идеология, 2002. – 240 с.
9. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – Москва : Транспорт, 1985. – 287 с.
10. Сокол, Э. Н. Сходы с рельсов и столкновения подвижного состава (Судебная экспертиза. Элементы теории и практики) : монография / Э. Н. Сокол. – 2-е изд., доп. – Киев : Транспорт Украины, 2004. – 368 с.
11. Соколов, М. М. Гасители колебаний подвижного состава : справочник / М. М. Соколов, В. И. Варава, Г. М. Левит. – Москва : Транспорт, 1985. – 216 с.
12. Інструкція з технічного обслуговування вагонів в експлуатації : ЦВ-0043 : затв. 01.03.2009 р. Наказом Укрзалізниці №417-Ц від 25.09.2008 р. / М-во трансп. та зв'язку України. – Київ : ДП ПКТБЦВ Укрзалізниці, 2008. – 222 с.
13. Lindgreen, E. Driving resistance from railroad trains / E. Lindgreen, S. C. Sorenson. – Copenhagen : DTU, 2005. – 86 p.
14. Lukaszewicz, P. Energy consumption and running time for trains: modelling of running resistance and driver behaviour based on full scale testing : doct. ... thesis : Trita-FKT, 2001:25 / P. Lukaszewicz. – Stockholm : KTH, 2001. – 154 p.
15. López, I. Energy dissipation of a friction damper / I. López, J. M. Busturia, H. Nijmeijera // J. of Sound and Vibration. – 2004. – Vol. 278. – Iss. 3. – P. 539–561. doi:10.1016/j.jsv.2003.10.051.
16. Lopez, I. Prediction and validation of the energy dissipation of a friction damper / I. Lopez, H. Nijmeijer // J. of Sound and Vibration. – 2009.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

- Vol. 328. – Iss. 4–5. – P. 396–410. doi:10.1016/j.jsv.2009.08.022.
17. Theoretical prediction of the damping of a railway wheel with sandwich-type dampers / I. Meriden, J. Nietoa, N. Gil-Negrete [et al.] // J. of Sound and Vibration. – 2014. – Vol. 333. – Iss. 20. – P. 4897–4911. doi:10.1016/j.jsv.2014.05.034.

Я. В. БОЛЖЕЛАРСКИЙ<sup>1\*</sup>, Ю. Г. СОБОЛЕВСКАЯ<sup>2\*</sup>, С. С. ДОВГАНЮК<sup>3\*</sup>, А. В. БАТИГ<sup>4\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Локомотивы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 776 59 47, эл. почта jarik762145@gmail.com, ORCID 0000-0002-4787-1781

<sup>2\*</sup>Каф. «Фундаментальные дисциплины», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, (Львовский филиал), ул. И. Блажкевича, 12-а, Львов, Украина, 79052, тел. +38 (032) 267 99 74, эл. почта sobolevskyy@gmail.com, ORCID 0000-0002-8087-2014

<sup>3\*</sup>Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, (Львовский филиал), ул. И. Блажкевича, 12-а, Львов, Украина, 79052, тел. +38 (032) 267 99 74, эл. почта dovghanuk@ukr.net, ORCID 0000-0003-1320-3192

<sup>4\*</sup>Лаб. «Железнодорожно-транспортные исследования», Львовский научно-исследовательский институт судебных экспертиз, ул. Липинского, 54, Львов, Украина, 79024, тел. +38 (032) 232 70 61, эл. почта Indise@mail.lviv.ua, ORCID 0000-0003-1205-6004

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ ГАСИТЕЛЕМ КОЛЕБАНИЙ ГРУЗОВОГО ВАГОНА В АВАРИЙНОМ РЕЖИМЕ ДВИЖЕНИЯ

**Цель.** Несмотря на меры по повышению безопасности движения поездов, на железных дорогах Украины и мира случаются сходы подвижного состава с рельс. В случаях причинения значительного материального ущерба и человеческих жертв, правоохранительными органами открываются уголовные производства, в рамках которых назначаются судебные железнодорожно-транспортные экспертизы. При проведении указанных экспертиз и служебного расследования железнодорожно-транспортных происшествий, предшествующих им, возникает потребность в решении дифференциального уравнения движения поезда. Составной частью указанного уравнения является величина удельного сопротивления движению. В условиях железнодорожно-транспортных происшествий возникают факторы, способствующие возникновению дополнительного сопротивления движению, а методика его расчета в настоящее время находится в стадии разработки. Отсутствие научно обоснованной методики его расчета во многих случаях делает невозможным построение механизма железнодорожно-транспортного происшествия и установления возможности ее предотвращения. Работа направлена на определение потерь энергии в гасителях колебаний грузового вагона, колесная пара которого движется в состоянии схода по рельсошпальной решетке в зависимости от осевой нагрузки и конструктивных параметров рессорного подвешивания. **Методика.** На основании анализа конструкции рессорного подвешивания и принципа работы фрикционного гасителя колебаний тележки грузового вагона, предложен способ определения поглощаемой им энергии. В расчетах приняты максимальные значения перемещений элементов гасителя и нормативные значения параметров рессорного подвешивания. **Результаты.** Получены расчетные формулы определения энергии, поглощаемой гасителем колебаний, для предусмотренных нормативными документами схем монтажа упругих элементов тележки в зависимости от осевой нагрузки. Указанные зависимости являются параболическими. **Научная новизна.** Авторами рассмотрен аварийный режим движения колесной пары по рельсошпальной решетке после схода ее с рельс. Показано, что рассеивание энергии в гасителях колебаний является причиной увеличения сопротивления движению подвижного состава. Получены формулы для расчета величины энергии, рассеиваемой в гасителе колебаний при максимальном перемещении его элементов. Указанная энергия зависит от осевой нагрузки и конструктивных параметров рессорного подвешивания. **Практическая значимость.** Предложенный метод позволит установить значение дополнительного сопротивления движению, возникающего в аварийном режиме, что даст возможность повысить точность тяговых расчетов.

**Ключевые слова:** сход с рельсов; колесная пара; гаситель колебаний; рельсошпальная решетка; диссипация энергии; тяговые расчеты; судебная железнодорожно-транспортная экспертиза

Y. V. BOLZHELARSKIY<sup>1\*</sup>, YU. H. SOBOLEVSKA<sup>2\*</sup>, S. S. DOVGANYUK<sup>3\*</sup>, A. V. BATIG<sup>4\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Lokomotives», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 776 59 47, e-mail jarik762145@gmail.com, ORCID 0000-0002-4787-1781

<sup>2\*</sup>Dep. «Fundamental Disciplines», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (Lviv branch), Iv. Blazkevych St., 12-a, Lviv, Ukraine, 79052, tel. +38 (032) 267 99 74, e-mail sobolevskyu@gmail.com, ORCID 0000-0002-8087-2014

<sup>3\*</sup>Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (Lviv branch), Iv. Blazkevych St., 12-a, Lviv, Ukraine, 79052, tel. +38 (032) 267 99 74, e-mail dovganyuk@ukr.net, ORCID 0000-0003-1320-3192

<sup>4\*</sup>Lab. «Railway Transport Researches», Lviv Research Institute of Forensic Science, Lypynskiy St., 54, Lviv, Ukraine, 79024, tel. +38 (032) 232 70 61, e-mail lndise@mail.lviv.ua, ORCID 0000-0003-1205-6004

## DETERMINATION OF ENERGY LOSSES BY SHOCK ABSORBER IN A FREIGHT CAR AT CRASH MODE

**Purpose.** Despite measures to improve the safety of trains on Ukraine and worldwide railways there is derailment of rolling stock. In cases of significant property damage and human losses, law enforcement agencies open a criminal proceeding in which rail-transport expertise is called. In carrying out of these expertise and internal investigation of rail accidents, preceding them, there is a need in a solution of the differential equation of the train movement. A component of this equation is the value of the specific train resistance. In terms of railway accidents, factors occur that promote the appearance of additional resistance to movement, and its calculation method is currently under development. The lack of evidence-based methods of its calculation makes it impossible in many cases to build the mechanism of railway accident and the establishment of possibility to prevent it. The purpose of this work is to determine the energy losses in the shock absorber of the freight car whose wheel-set moves in the derailed state on the track panel depending on the axle load and structural parameters of spring suspension. **Methodology.** On the basis of spring suspension construction analysis and operating principle of the friction shock absorber of the freight car bogie the authors provide the method for determining the energy absorbed by it. The calculations take the maximum values of the absorber elements displacement and the regulatory values of spring suspension parameters. **Findings.** The calculated formulas for determining the energy, absorbed by shock absorber for regulation-set mounting schemes of elastic bogie elements depending on the axial load were obtained. The mentioned curves are parabolic. **Originality.** The authors considered the crash mode of the wheel-set movement on the track panels after its derailment. It is shown that the energy dissipation in the shock absorbers is the reason for increase in resistance to rolling stock movement. The formulas for calculating the amount of energy dissipated in the shock absorber with a maximum displacement of its elements are derived. This energy depends on the axle load and structural parameters of spring suspension. **Practical value.** The proposed method allows setting the value of the additional resistance to motion that occurs in crash mode which makes it possible to increase the accuracy of traction calculations.

**Keywords:** derailment; wheel-set; shock absorber; track panel; dissipation of energy; traction calculations; forensic science

### REFERENCES

1. Shadur L.A., Chelnokov I.I., Nikolskiy L.N., NikolskiyYe.N., Koturanov V.N., Proskurnev P.G., Kazanskiy G.A., Spivakovskiy A. L., Devyatkov V.F. *Vagony* [Cars]. Moscow, Transport Publ., 1980. 439 p.
2. Vershinskiy S.V., Danilov V.N., Khusidov V.D. *Dinamika vagona* [Dynamics of a car]. Moscow, Transport Publ., 1991. 360 p.
3. Garg V.K., Dukkipati R.V., Pankin N.A. *Dinamika podvizhnogo sostava* [Dynamics of rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1988. 391 p.
4. Grebenyuk P.T., Dolganov A.N., Skvortsov A.I. *Tyagovyie raschety* [Traction calculations]. Moscow, Transport Publ., 1987. 272 p.
5. Domin Yu.V., Cherniak H.Yu. *Osnovy dynamiky vagoniv* [Fundamentals of cars dynamics]. Kyiv, KUETT Publ., 2003. 270 p.
6. Komarova A.N., Boronenko Yu.P. Otsenka energoeffektivnosti netyagovogo podvizhnogo sostava [Estimation of energy efficiency of non-tractive rolling stock]. *Nauka ta progres transportu – Science and Transport Progress*, 2013, no. 1 (43), pp. 149-153. doi: 10.15802/stp2013/9616.



## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

7. Kuzmich V.D., Rudnev V.S., Frenkel S.Ya. *Teoriya lokomotivnoy tyagi* [The theory of locomotive traction]. Moscow, Marshrut Publ., 2005. 448 p.
8. Myamlin S.V. *Modelirovaniye dinamiki relsovykh ekipazhey* [Modeling the dynamics of railway vehicles]. Dnepropetrovsk, Novaya ideologiya Publ., 2002. 240 p.
9. *Pravila tyagovykh rasschetov dlya poyezdnoy raboty* [Rules of traction calculations for train operation]. Moscow, Transport Publ., 1985. 287 p.
10. Sokol E.N. *Skhody s relsov i stolknoveniya podvizhnogo sostava (Sudebnaya ekspertiza. Elementy teorii i praktiki)* [Derailment and collision of rolling stock (Forensics enquiry. Elements of theory and practice)]. Kiev, Transport Ukraini Publ., 2004. 368 p.
11. Sokolov M.M., Varava V.I., Levit G.M. *Gasiteli kolebaniy podvizhnogo sostava* [Shock absorbers of rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1985. 216 p.
12. *Instruktsiia z tekhnichnoho obsluhovuvannia vahoniv v ekspluatatsii: TsV-0043* [Manual maintenance of cars in operation]. Kyiv, DP PKTBTSV Ukrzaliznytsi Publ., 2008. 222 p.
13. Lindgreen E., Sorenson S.C. Driving resistance from railroad trains. Copenhagen, DTU Publ., 2005. 86 p.
14. Lukaszewicz P. Energy consumption and running time for trains: modelling of running resistance and driver behaviour based on full scale testing. Doct. Thesis. Stockholm, KTH Publ., 2001. 154 p.
15. López I., Busturia J.M., Nijmeijera H. Energy dissipation of a friction damper. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, vol. 278, issue 3, pp. 539-561. doi:10.1016/j.jsv.2003.10.051.
16. Lopez I., Nijmeijer H. Prediction and validation of the energy dissipation of a friction damper. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, vol. 328, issue 4-5, pp. 396-410. doi:10.1016/j.jsv.2009.08.022.
17. Merideno I., Nietoa J., Gil-Negrete N., Giménez Ortiz J.G., Landaberea A., Lartza J. Theoretical prediction of the damping of a railway wheel with sandwich-type dampers. *Journal of Sound and Vibration*, 2014, vol. 333, issue 20, pp. 4897-4911. doi:10.1016/j.jsv.2014.05.034.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Б. В. Герою (Україна); д.т.н., проф. М. Б. Кельріхом (Україна)

Надійшла до редколегії: 05.02.2016

Прийнята до друку: 02.06.2016

## УДК 656.225.039.3/4-028.27(476)

М. М. КОЛОС<sup>1\*</sup>, М. А. ГОНЧАР<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Управление грузовой и коммерческой работой», Белорусский государственный университет транспорта, ул. Кирова, 34, Гомель, Республика Беларусь, 246653, тел. +37 (529) 371 46 93, эл. почта maxim\_kolos@mail.ru, ORCID 0000-0002-4313-0142

<sup>2\*</sup>Каф. «Управление грузовой и коммерческой работой», Белорусский государственный университет транспорта, ул. Кирова, 34, Гомель, Республика Беларусь, 246653, тел. +73 (529) 712 82 17, эл. почта mara128@rambler.ru, ORCID 0000-0003-3485-2706

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАБОТЫ БЕЛОРУССКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ В УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ДОКУМЕНТОВ

**Цель.** В научной работе необходимо рассмотреть совершенствование технологии работы железнодорожного транспорта общего пользования Республики Беларусь в условиях применения электронных юридически значимых документов. **Методика.** При проведении данного исследования проводился сбор статистической информации по продолжительности выполнения отдельных технологических операций, оценке статистических данных и анализе их описательных характеристик. При определении эффективности предложенных мероприятий использовались методы экспертных оценок, методы оценки эффективности ИТ-инвестиций. **Результаты.** Рассмотрены технологические, аппаратные, программные, организационные и иные аспекты применения электронных юридически значимых документов в грузовой и коммерческой работе. Определены наиболее важные направления совершенствования технологии работы организаций Белорусской железной дороги и их взаимодействие с грузоотправителями и грузополучателями за счет применения электронных юридически значимых документов. Это: 1) упрощение ведения станционной коммерческой отчетности; 2) автоматизация выполнения технологических операций; 3) совершенствование взаимодействия железнодорожных путей общего пользования и станций примыкания; 4) упрощение процедуры планирования перевозок и учета выполнения заявок; 5) реализация единого информационного пространства для всех участников перевозочного процесса. Рассчитана прогнозная оценка эффективности внедрения электронных юридически значимых документов в грузовой и коммерческой работе Белорусской железной дороги. **Научная новизна.** Разработана двухвариантная модель применения электронной цифровой подписи как инструмента для автоматической фиксации момента выполнения технологической операции или для указания времени ее осуществления. Это позволяет перевести ряд технологических процессов на принципиально новый уровень, способствуя формированию единого информационного пространства грузовых перевозок. Предложена методика прогнозной оценки эффективности электронного документооборота для условий применения на железнодорожном транспорте. **Практическая значимость.** Полученные результаты используются для формирования перечня мероприятий, направленных на совершенствование технологии работы железнодорожного транспорта общего пользования в условиях применения электронных юридически значимых документов, оценки их значимости и этапности реализации на Белорусской железной дороге. Применение полученных результатов позволит: снизить издержки грузоотправителей, грузополучателей, железной дороги; повысить производительность труда, ценовую конкурентоспособность железнодорожного транспорта и качество предоставляемых услуг. Будет возможно создать единое информационное пространство и, как следствие, улучшить качество работы с информационными потоками и доступ к информации для всех участников перевозочного процесса.

**Ключевые слова:** электронный юридически значимый документ; электронная цифровая подпись; Белорусская железная дорога; грузовая и коммерческая работа; АС «Электронная перевозка»; технология работы

### Введение

Современные тенденции развития транспортного рынка свидетельствуют об усложнении грузовой и коммерческой работы на железнодорожном транспорте, что обусловлено по-

явлением операторов вагонных парков и конкурирующих перевозчиков, наличием достаточно сложной системы тарификации грузовых перевозок за счет многообразия повышающих и понижающих коэффициентов, обеспечением погрузки и выгрузки грузов преиму-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

щественно на железнодорожных путях необщего пользования, возросшими требованиями клиентов к сокращению сроков доставки и сроков согласования перевозок. Эти и многие другие факторы требуют наличия современных технологических решений, направленных как на оптимизацию взаимодействия железной дороги с грузоотправителями и грузополучателями, так и на совершенствование внутренних технологических процессов. Одним из наиболее прогрессивных методов совершенствования работы признается переход к использованию электронных юридически значимых документов.

Использование электронного документа и электронной цифровой подписи (далее – ЭЦП) регламентирует Закон Республики Беларусь № 113-З «Об электронном документе и электронной цифровой подписи» от 28 декабря 2009 г [2]. На Белорусской железной дороге приняты необходимые нормативные документы для организации и обеспечения грузовых перевозок по безбумажной технологии. С сопредельными железными дорогами заключены или находятся в стадии проработки соответствующие соглашения, регламентирующие организацию перевозок с использованием электронных юридически значимых документов.

Различные аспекты применения электронных юридических значимых документов на железнодорожном транспорте рассмотрены в статьях В. Л. Носевича [7–10], П. Е. Булавского и Д. С. Макарова [1], а также в статьях зарубежных авторов [15–17]. Условия трансграничного обмена электронной подписью отражены в статье Павловского А. А. [11]. Общие тенденции и перспективы развития электронного документооборота на железнодорожном транспорте изложены Левиным Д. Ю. в учебном пособии «Диспетчерские центры и технология управления перевозочным процессом» [4].

В вышеперечисленных источниках излагаются общие тенденции и проблемы организации электронного документооборота, при этом отсутствует информация об изменении технологических процессов работы с переходом к использованию электронных документов на железнодорожном транспорте общего пользования и методические рекомендации по расчету эффективности их применения.

Для практической реализации электронного оформления и сопровождения перевозок грузов с использованием ЭЦП с I квартала 2015 года действует Автоматизированная система «Электронная перевозка» (далее – АС «Электронная перевозка»). Система направлена на автоматизацию операций по планированию, оформлению перевозочных и иных документов, выполняемых грузоотправителями/грузополучателями во взаимодействии с автоматизированными системами Белорусской железной дороги по web-технологии или при взаимодействии автоматизированных систем по принципу «АСУ клиента – АСУ Белорусской железной дороги».

Переход к использованию электронных юридически значимых документов между железной дорогой и клиентами позволяет изменить подходы и к технологическому документообороту внутри самой железной дороги. Технологический документооборот железной дороги, являющийся основой анализа, контроля, оперативного управления и планирования эксплуатационной работы, в настоящее время осуществляется в основном на бумажных носителях. Несмотря на проверку ввода данных с использованием формальных и логических методов, возникают рассогласования между оформляемыми документами и сообщениями, поступающими в информационные системы. В результате возникают дополнительные расходы и у Белорусской железной дороги, и у грузовладельцев по поиску и исправлению ошибок. Требуется обеспечить эффективность управления документооборотом, минимизировать влияние человеческого фактора, сделать процесс управления более четким и прозрачным для контроля, обеспечить своевременность и качество предоставляемой информации. Достичь этого возможно за счет замены устаревшей системы бумажной технологии на автоматизированные системы, обеспечивающие работу с электронными документами.

### Цель

Целью статьи является совершенствование технологии работы железнодорожного транспорта общего пользования Республики Беларусь в условиях применения электронных юридически значимых документов.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

**Методика**

При проведенні данного дослідження проводився збір статистичної інформації по продовжителю виконання окремих технологічних операцій, оцінка статистичних даних і аналіз їх описательних характеристик.

Для окремих технологічних процесів проводився їх аналіз з декомпозицією по виконуваним операціям і виконавцям, що дозволило алгоритмізувати розглядавані процеси.

При оцінці ефективності запропонованих заходів використовувалися методи експертних оцінок, методи оцінки ефективності ІТ-інвестицій в класифікації Ремени, Б. Фарби, Т. Ренкема [5].

Розробка технології роботи залізничного транспорту загального користування Республіки Білорусь в умовах застосування електронних юридично значимих документів є комплексною проблемою і потребує детального розгляду технологічних, апаратних, програмних, організаційних і інших аспектів.

Аналіз основних тенденцій електронного документооборота і накопленого міжнародного досвіду застосування електронних юридично значимих документів і електронної цифрової підписи при перевезенні вантажів залізничним транспортом, а також дослідження умов застосування електронних документів на Білоруській залізничній дорозі з аналізом існуючих процесів вантажової і комерційної роботи, реалізованих з підтримкою АС «Електронна перевезення», дозволяє розробити заходи по вдосконаленню технології роботи залізничного транспорту загального користування Республіки Білорусь в умовах застосування електронних юридично значимих документів. Прогнозна оцінка ефективності впровадження електронних юридично значимих документів в вантажову і комерційну роботу Білоруської залізничної дороги є заключальним етапом дослідження.

**Результати**

Організація роботи з електронними документами і ЕЦП передбачає відповідність обладнання робочих місць необхідним технічним характеристикам. Перехід до автоматизованих систем, побудованих на веб-технологіях, в свою чергу, обумовлює високі вимоги до працездатності мережі передачі даних. В зв'язі з цим, для переходу до електронного документооборота, в першу чергу, потрібно виконання комплексу заходів, пов'язаних з забезпеченням і уніфікацією апаратних і програмних компонентів.

Другий блок заходів потрібно направити на спрощення ведення станційної комерційної звітності по вантажним перевезенням. В частині, відомість номерного обліку вантажів і вагонів, прийнятих до відправлення ГУ-3, книги прибуття вантажів ГУ-42, а також супровідні відомості форми ГУ-4 на прийняті до перевезення вантажі малими і контейнерними відправками цілесообразно вести тільки в електронному вигляді, без їх наступної роздрукування. Електронні версії книг вивантаження вантажу ГУ-44 і прийому вантажів до відправлення ГУ-34 необхідно допрацювати функціями фіксації ввозу і вивозу вантажу по частинам і також вести їх тільки в електронному вигляді [3].

Віддрукування перерахованої і іншої станційної комерційної звітності при її веденні в електронному вигляді обумовлено в даний час вимогами ревізійного апарату. Для рішення цієї проблеми необхідно регламентувати перелік станційної комерційної звітності, яка повинна вестися тільки в електронній формі, реалізувати підключення ревізорів до АС «Електронна перевезення», що дозволить здійснювати дистанційний контроль за правильністю оформлення і ведення звітності.

Після визначеної допрацювання і розширення функціонала, АС «Електронна перевезення» дозволить автоматизувати ряд технологічних операцій вантажової і комерційної роботи:

- візування перевізних документів;
- контроль проставлення підпису грузоотправителя о правильності розміщення і кріплення вантажу;

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

- оформление перевозки груза с проводниками;
- подача заявления на переадресовку и ее согласование;
- отказ от закрепления диапазонов номеров отправок за станциями, динамическая привязка номера из общей базы по запросу работника железной дороги.

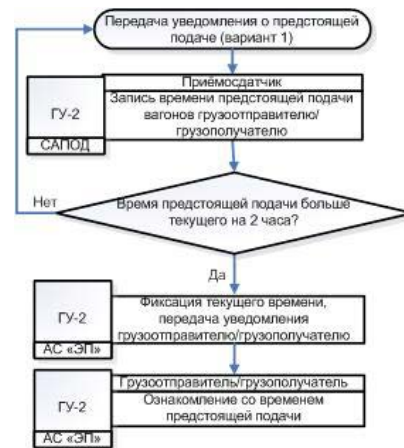
Следующий этап совершенствования работы предполагает проведение мероприятий, предусматривающих отказ от использования бланков строгой отчетности. Первоначальное назначение бланков строгой отчетности состоит в недопущении несанкционированного их использования. Применение электронных юридически значимых документов позволяет осуществить функции контроля посредством ЭЦП. Таким образом, целесообразно вывести коммерческие акты и пересылочные накладные ГУ-27 из перечня документов строгой отчетности. Перспективными направлениями совершенствования технологии работы с применением АС «Электронная перевозка» являются: отказ от оформления пересылочных накладных ГУ-27; пересмотр формы и наполненности вагонного листа исходя из его современных технологических задач.

Совершенствование технологии передачи уведомлений – еще одно из важнейших направлений применения электронного документооборота. Необходимость передачи уведомлений регламентирована Уставом железнодорожного транспорта общего пользования и Правилами перевозок грузов. Фиксация передачи уведомлений позволяет в последующем корректно рассчитать плату за пользование вагонами или за хранение груза. Значительной технологической проблемой является то, что для фиксации двух разных уведомлений (о прибытии груза на станцию, о предстоящей подаче на подъездной путь) используется одна книга ГУ-2. В качестве решения возможна передача уведомления о прибытии груза автоматически по факту представления в АС «Электронная перевозка» календарного штампа станции назначения.

Особенностью практического использования ЭЦП является то, что ЭЦП может применяться в качестве инструмента, позволяющего как подписать документ с указанным в нем временем, так и зафиксировать сам момент вы-

полнения любой технологической операции, что особенно критично для уведомлений [13]. Два варианта передачи уведомлений приемосдатчиком в Системе автоматизации подготовки и оформления документов станционной и коммерческой отчетности (далее – САПОД) и получением уведомления грузоотправителем/грузополучателем в АС «Электронная перевозка» представлены на рис. 1: вариант 1 с логическим контролем времени передачи уведомления и последующим ознакомлением грузоотправителя/грузополучателя с уведомлением, 2 вариант с подтверждением получения уведомления грузоотправителем/ грузополучателем с ЭЦП.

*a – a*



*б – б*

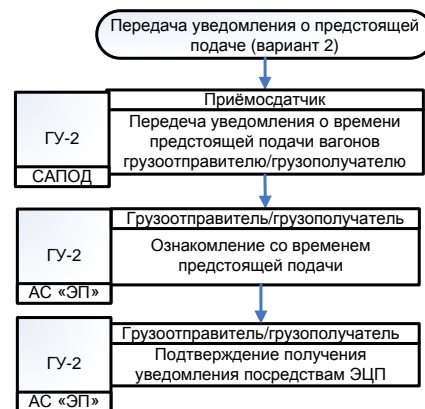


Рис. 1. Алгоритмы передачи уведомлений о предстоящей подаче:

*a* – с фиксацией момента передачи уведомления; *б* – с подписью документа с указанным временем уведомления

Fig. 1. Algorithms of reporting about the upcoming supply:

*a* – with fixing the reporting point; *b* – with signature and specified reporting time

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Передача уведомлений тесно связана с мероприятиями по совершенствованию взаимодействия железнодорожных путей необщего пользования и станций примыкания. С переходом к ведению памятки приемосдатчика в виде электронного документа невозможно обеспечить ее подписание непосредственно на местах выполнения приемосдаточных операций. Сложившаяся практика применения памятки приемосдатчика свидетельствует о попытке приспособить ее для фиксации максимального количества технологических операций, однако, учитывая ограниченное количество подписей сторон, это в принципе невозможно.

Анализ сложившейся ситуации позволил выявить следующие недостатки при ведении памятки ГУ-45 [14]:

- вразрез с положениями правил перевозок грузов, в памятке не отражается и не подтверждается подписью время выполнения приемосдаточных операций при обслуживании пути необщего пользования локомотивом перевозчика;

- в памятке используется некорректная терминология при фиксации времени выполнения приемосдаточных операций при обслуживании пути необщего пользования локомотивом,

не принадлежащим перевозчику: «передача на выставочный путь»; «возврат на выставочный путь»;

- в памятке отсутствует возможность записи времени уведомления о готовности к приемосдаточным операциям при обслуживании пути необщего пользования локомотивом, не принадлежащим перевозчику;

- подписывая памятку при возвращении вагонов с пути необщего пользования, приемосдатчик станции подтверждает своей подписью не момент выполнения приемосдаточных операций, а время уборки вагона для ведения статистической отчетности;

- «привязка» группы одновременно подаваемых вагонов к одной памятке вызывает избыточную бумажную работу по формированию новых памяток при осуществлении технологических операций с одним или несколькими вагонами из этой группы.

Существующая в нынешнем виде памятка ГУ-45 (как в бумажном, так и в электронном

виде) не выполняет функции учета выполнения приемосдаточных операций, предписанные ей Правилами перевозок грузов, а служит документом, удостоверяющим время, необходимое для дальнейшего расчета платы за пользование вагонами и формирования статистики по подаваемым и убраным вагонам.

Начисление платы за подачу и уборку вагонов на основании памяток ГУ-45 сегодня является достаточно сложной операцией и не в полной мере автоматизированной. Сложность расчета платы за подачу и уборку вагонов, обусловлена необходимостью ежедневного учета количества подаваемых и убраных вагонов в условиях наличия в одной подаче вагонов разных собственников; вагонов, подаваемых к разным фронтам; вагонов, подаваемых под двоянные операции и др.

Таким образом, для совершенствования взаимодействия железнодорожных путей необщего пользования и станций примыкания необходимо решить комплекс задач, охватывающих внесение изменений в нормативно-правовые акты, пересмотр формы памятки ГУ-45, упрощение порядка начисления платы за подачу и уборку вагонов, доработку САПОД и АС «Электронная перевозка».

Наряду с взаимодействием станции примыкания и железнодорожных путей необщего пользования, такой же комплексной проблемой является планирование перевозок и учет выполнения заявок. Ежемесячное планирование является избыточным и неудобным как для клиентов, так и для работников железной дороги. Грузоотправитель не может достоверно указать план отгрузки на месяц в силу меняющейся ситуации на рынке или неплатежей по контрактам, что вызывает необходимость подачи как дополнительных заявок на перевозку, так и дополнительных заявок в счет изменения основных.

Избыточная глубина планирования ведет к излишней бумажной работе как для перевозчика, так и для отправителя; потенциально подразумевает наличие неустойки, что негативно влияет на грузоотправителя и, в то же время, не повышает доходность Белорусской железной дороги.

Наличие программных продуктов: САПОД, Автоматизированной подсистемы «Месплан»

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

(далее – АП «Месплан») не решает проблему автоматизации ведения учетных карточек, поэтому на станциях необходимым является ведение их бумажных аналогов для того, чтобы позже правильно оформить учетную карточку в САПОД. Мероприятия по решению проблемы могут быть сведены к оперативному дополнению функционала АС «Электронная перевозка» или предусматривать комплексное решение, охватывающее: доработку АС «Электронная перевозка», АП «Месплан», САПОД на локальном уровне с учетом технологических особенностей планирования и учета планов погрузки; пересмотр процедуры планирования на основании проведения дополнительных исследований по необходимой глубине планирования для железной дороги с целью своевременной подачи вагонов под погрузку.

Значительным недостатком при переходе к безбумажному документообороту в настоящее время является необходимость распечатывания дорожных ведомостей, корешков дорожных ведомостей с последующей их пересылкой в Отделенческий расчетный центр (далее – ОРЦ) для проверки правильности начисления провозных платежей. Также в ОРЦ для проверки правильности начисления плат за дополнительные работы и услуги пересылаются бумажные экземпляры первичных документов [13].

Возможные варианты совершенствования работы по проверке правильности начисления провозных платежей, в том числе с применением функционала АС «Электронная перевозка», выбираются в зависимости от функций ОРЦ, передаваемых в структуру Центра транспортного обслуживания в рамках Программы развития грузового хозяйства Белорусской железной дороги до 2020 года. Полный отказ от проверки правильности провозных платежей может быть реализован в условиях своевременного ввода поправочных коэффициентов к тарифам в САПОД, перехода к ведению нормативно-справочной информации на качественно новом уровне и доработки существующего программного обеспечения, минимизирующего влияние «человеческого фактора».

Отказ от пересылки документов на бумажных носителях для контроля правильности начисления плат за дополнительные работы и услуги может быть реализован в условиях сокра-

щения перечня плат, упрощения методики начисления плат (в первую очередь, платы за подачу и уборку вагонов), ужесточения контроля (в т. ч. программными средствами) за правильностью оформления первичных документов на станционном уровне.

Посредством АС «Электронная перевозка» должно быть реализовано создание единого информационного пространства для всех участников перевозочного процесса, структурных подразделений перевозчика, обеспечивающее в первую очередь:

- взаимодействие перевозчика и грузоотправителя/грузополучателя при передаче платежных документов и отслеживании состояния лицевого счета, оперативном информировании о наличии дебиторской задолженности;
- взаимодействие перевозчика, грузоотправителя/грузополучателя и таможи при таможенном оформлении грузов;
- формирование единой базы данных по актам общей формы за счет их оформления всеми сотрудниками перевозчика в АС «Электронная перевозка»;
- формирование базы данных по запретам и ограничениям погрузки.

На базе АС «Электронная перевозка» должен поэтапно формироваться единый информационный портал, обеспечивающий договорную, маркетинговую и иную работу с клиентами на любом этапе взаимодействия. АС «Электронная перевозка» должна с одной стороны, выступать в качестве своеобразной «оболочки-справочника», аккумулирующей необходимую информацию из автоматизированных систем Белорусской железной дороги для дальнейшего ее представления клиенту; с другой стороны, АС «Электронная перевозка» должна обладать достаточным функционалом для выполнения клиентом полного объема юридически значимых действий при взаимодействии с железной дорогой.

Переход к безбумажной технологии перевозок затрагивает все этапы организации перевозочного процесса, поэтому мероприятия по ее совершенствованию должны затрагивать не только АС «Электронная перевозка», но и смежные, взаимодействующие с ней автоматизированные системы.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Дополнительно необходима реализация мероприятий, направленных на упрощение внедрения и обучения работе в АС «Электронная перевозка», повышение квалификации. Многообразие программных продуктов, используемых в коммерческой работе, возможность настройки их «под себя», предполагает наличие навыков работы и достаточно высокого уровня образования. Необходимо дополнение АС «Электронная перевозка» всплывающими подсказками, справочной информацией по разделам «Руководства пользователя», создание обучающего видео по отдельным аспектам работы с АС «Электронная перевозка». Для грузоотправителей и грузополучателей целесообразно предоставление услуг по обучению работе в АС «Электронная перевозка», для работников железной дороги – повышение эффективности работы групп внедрения.

Повышение квалификации работников может быть достигнуто за счет формирования в АС «Электронная перевозка» эталонной базы данных по оформлению определенных документов станционной коммерческой отчетности; создания необходимого справочного материала, направленного на обучение персонала при работе в нехарактерных случаях.

К специфическим особенностям оценки эффективности электронного документооборота, реализуемого посредством АС «Электронная перевозка», относятся [12]:

- сложность определения количественных параметров при обслуживании грузоотправителей, грузополучателей, когда чаще всего возможна только субъективная качественная оценка;
- невозможность одномоментного охвата электронным документооборотом всех задач грузовой и коммерческой работы, что обуславливает поэтапный рост эффективности с учетом последующего развития автоматизированных систем;
- неодновременность капитальных затрат (их поэтапность) на разработку расширяющегося функционала АС «Электронная перевозка»;
- взаимосвязь перевозочного процесса с торгово-закупочными процессами обслуживаемых предприятий и требованиями, карантинных, таможенных, налоговых и иных госу-

дарственных органов, которые обуславливают необходимость оригиналов документов на бумажных носителях и, таким образом, затрудняют оценку эффективности электронного документооборота;

- направленность на обеспечение безбумажного обмена между всеми участниками перевозочного процесса (грузоотправителем, перевозчиком, грузополучателем, таможенными органами) обеспечивающая эффект у каждой из сторон.

В соответствии с Методическими рекомендациями по обоснованию эффективности инноваций на железнодорожном транспорте [6], эффективность реализации инвестиционных проектов для железнодорожного транспорта следует оценивать комплексно: выявлять преимущества новой конструкции или технологии, а также определять эксплуатационно-качественные показатели. К числу эксплуатационно-качественных характеристик относятся:

- качественные измерители и нормы использования подвижного состава;
- дальность перевозки и сроки доставки грузов, время проезда пассажиров;
- сохранность и безопасность перевозок;
- качество и ассортимент продукции для предприятий, выпускающих промышленную продукцию.

С таких позиций АС «Электронная перевозка» не оказывает прямого влияния на эксплуатационно-качественные характеристики, но косвенно затрагивает важнейшие аспекты обеспечения безопасности перевозок, сроков доставки грузов и влияет на качество оказываемых клиентам услуг. С точки зрения технологических характеристик внедрение АС «Электронная перевозка» влияет на совершенствование и автоматизацию грузовой и коммерческой работы.

По аналогии с другими автоматизированными системами, эффект от внедрения АС «Электронная перевозка» может быть условно разделен на две большие группы: исчисляемый эффект – обеспечивается за счет факторов, влияющих на экономию средств и рабочего времени как железной дороги, так и обслуживаемых грузоотправителей, грузополучателей; неисчисляемый эффект – обеспечивается за счет факторов, влияющих системно на качество ра-



## ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

боты с информацией и совершенствование оказываемых услуг.

К исчисляемому эффекту относятся:

- экономия средств железной дороги на изготовление, приобретение и доставку бланков документов, использование бумаги, на закупку и обслуживание печатной и копировальной техники (принтеры, копировальные аппараты);
- экономия средств грузоотправителей, грузополучателей на оформление и доставку на станцию документов в бумажном виде, а также за счет уменьшения простоя погруженных вагонов, контейнеров;
- экономия времени работников перевозчика вследствие сокращения повторно вводимой информации, применения шаблонов, охвата одной операцией сразу нескольких однородных документов, возможности оперативной корректировки обнаруженных ошибок, отсутствия необходимости распечатывания документа, сокращения продолжительности формирования сводных отчетов, рабочих тетрадей и иных видов отчетности;
- экономия времени работников грузоотправителей, грузополучателей вследствие применения шаблонов, охвата одной операцией сразу нескольких документов, возможности оперативной корректировки обнаруженных ошибок, отсутствия необходимости посещения станции.

К неисчисляемому эффекту относятся: ускорение предоставления услуг, упрощение контроля и совершенствование грузовой и коммерческой работы, совершенствование технологических процессов и переход на новые технологии, а также совершенствование качества работы с информационными потоками.

Результаты расчетов суммарной ожидаемой годовой экономии от полного перехода на электронный документооборот при железнодорожных перевозках грузов сведены в табл. 1. На рис. 2 изображено распределение суммарной ожидаемой экономии от перехода к электронному документообороту, определенное на основании результатов табл. 1.

На основании диаграммы (рис. 2) очевидно, что наибольшую долю (68 %) от ожидаемой суммарной экономии составляет неисчисляемый эффект, который возможно оценить только косвенными способами. К составляющим неисчисляемого эффекта относятся: увеличение прибыли от прироста объемов грузовых перевозок, экономия от ускорения оборота грузового вагона, экономия от ускорения оборота средств, экономия за счет снижения себестоимости перевозок. На рис. 3 представлено распределение ожидаемой суммарной экономии при переходе к электронному документообороту, обеспечиваемой неисчисляемым эффектом.

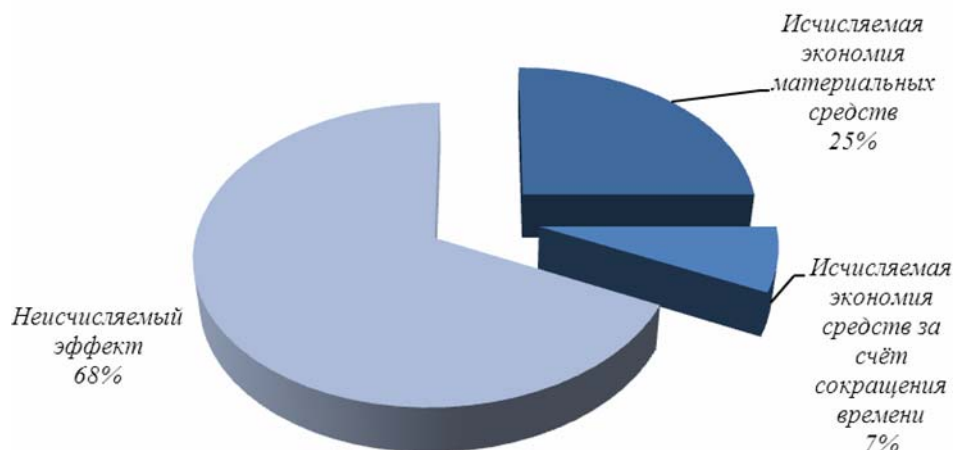


Рис. 2. Диаграмма распределения ожидаемой суммарной экономии от перехода к электронному документообороту

Fig. 2. The distribution diagram of the total expected savings from electronic workflow change-over

Таблица 1

Суммарная ожидаемая годовая экономия от перехода на электронный документооборот, бел. руб.

Table 1

The total expected annual savings from electronic workflow change-over, Belar. rub.

Наименование прогнозного эффекта		Сумма, млн	
		min	max
Исчисляемая экономия средств	перевозчика	14 898,70	
	клиентов	5 298,66	
Исчисляемая экономия средств за счет сокращения времени выполнения операций	перевозчика	1 642,18	6 568,70
	клиента	328,44	1 970,61
Неисчисляемый эффект	увеличение прибыли	24 203,62	
	ускорение оборота грузового вагона	1 978,95	
	ускорение оборота средств	8 121,71	
	снижение себестоимости перевозок	20 984, 48	
Итого		77 456,31	84 025,01

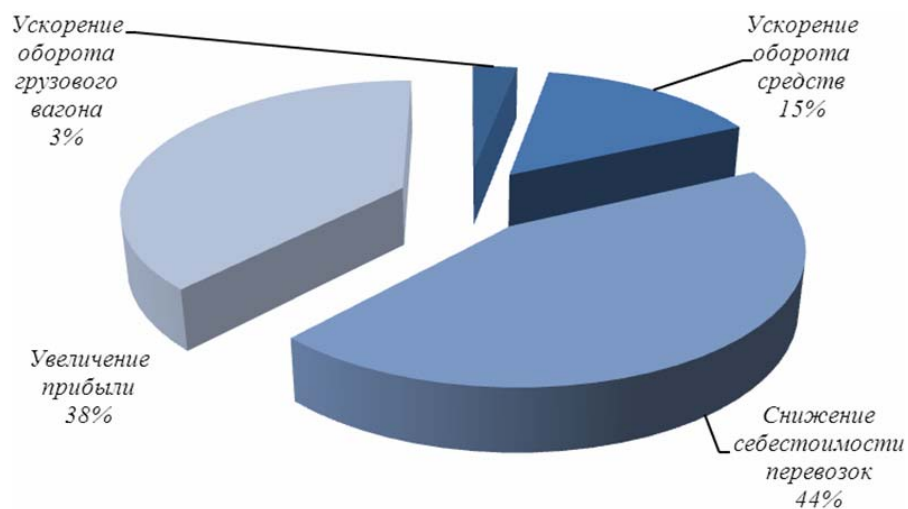


Рис. 3. Диаграмма распределения ожидаемой суммарной экономии от перехода к электронному документообороту за счет неисчисляемого эффекта

Fig. 3. The distribution diagram of the total expected savings from electronic workflow change-over by means of non-count effect

Диаграмма (рис. 3) позволяет сделать вывод о том, что около 80 % неисчисляемого эффекта составляют увеличение прибыли от прироста объемов грузовых перевозок и эффект от снижения себестоимости перевозок.

Таким образом, ожидаемая суммарная экономия при переходе к электронному докумен-

тообороту может составить от 77 456 млн бел. руб. до 84 025 млн бел. руб., при этом доля неисчисляемого эффекта составит 68 %, из них 82 % за счет снижения себестоимости перевозок и увеличения прибыли от прироста объемов грузовых перевозок [13].

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

**Научная новизна и практическая значимость**

Разработанная технология работы железнодорожного транспорта общего пользования учитывает использование АС «Электронная перевозка» как инструмента для фиксации момента выполнения технологической операции и/или заполнения документов посредством электронно-цифровой подписи, что позволяет перевести ряд технологических процессов на принципиально новый уровень, способствуя формированию единого информационного пространства грузовых перевозок.

Применение полученных результатов позволит: снизить издержки грузоотправителей, грузополучателей, железной дороги, повысить производительность труда, ценовую конкурентоспособность железнодорожного транспорта и качество предоставляемых услуг, создать единое информационное пространство и, как следствие, улучшить качество работы с информационными потоками и доступ к информации для всех участников перевозочного процесса.

**Выводы**

Наиболее важными направлениями совершенствования технологии работы организаций Белорусской железной дороги и их взаимодействия с грузоотправителями и грузополучателями за счет применения электронных юридически значимых документов являются: упрощение ведения станционной коммерческой отчетности по грузовым перевозкам; автоматизация выполнения ряда технологических операций; совершенствование взаимодействия железнодорожных путей необщего пользования и станций примыкания; упрощение процедуры планирования перевозок и учета выполнения заявок; реализация единого информационного пространства для всех участников перевозочного процесса, структурных подразделений перевозчика.

Переход к безбумажной технологии перевозок затрагивает все этапы организации перевозочного процесса, поэтому мероприятия по ее совершенствованию должны касаться не только АС «Электронная перевозка», но и смежных взаимодействующих с ней автоматизированных систем.

Ожидаемая суммарная экономия при переходе к электронному документообороту может составить до 84 025 млн бел. руб./год или 4 млн дол./год, при этом доля неисчисляемого эффекта составит 68 %, из которых 82 % обеспечиваются снижением себестоимости перевозок и увеличением прибыли от прироста объемов грузовых перевозок.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Булавский, П. Е. Электронный документооборот технической документации / П. Е. Булавский, Д. С. Макаров // Автоматика, связь, информатика. – 2012. – № 2. – С. 2–4.
2. Инструкция по ведению станционной коммерческой отчетности по грузовым перевозкам : утв. приказом Белорус. ж. д. №257Н от 26.07.2005. – Минск : Белорус. ж. д., 2005. – 63 с.
3. Левин, Д. Ю. Диспетчерские центры и технология управления перевозочным процессом : учеб. пособие / Д. Ю. Левин. – Москва : Маршрут, 2005. – 760 с.
4. Мазоль, О. И. Обоснование эффективности информационных технологий : монография / О. И. Мазоль. – Минск : Мисанта, 2011. – 192 с.
5. Методические рекомендации по обоснованию эффективности на железнодорожном транспорте. – Москва : М-во путей сообщ., 1999. – 120 с.
6. Носевич, В. Л. Внедрение электронного документооборота в гос. управлении Республики Беларусь: предыстория, состояние, перспективы / В. Л. Носевич // Архивы и делопроизводство. – 2013. – № 5. – С. 43–58.
7. Носевич, В. Л. Плюсы и минусы электронного документооборота / В. Л. Носевич // Архивы и делопроизводство. – 2013. – № 3. – С. 42–56.
8. Носевич, В. Л. Электронные архивы: на пути из будущего в настоящее / В. Л. Носевич // Архивы і справоводства. – 2011. – № 3. – С. 97–105.
9. Носевич, В. Л. Электронный документооборот: в процессе преодоления проблем и поиска решений / В. Л. Носевич // Архивы і справоводства. – 2007. – № 4. – С. 71–75.
10. Об электронном документе и электронной цифровой подписи [Электронный ресурс] : Закон Республики Беларусь от 28.12.2009 г. №113-З. – Режим доступа: [http://kodeksy-by.com/zakon\\_rb\\_ob\\_elektronnom\\_dokumente\\_i\\_](http://kodeksy-by.com/zakon_rb_ob_elektronnom_dokumente_i_)

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

- elektronnoj\_tsifrovoj\_podpisi.htm. – Загл. с экрана. – Проверено : 14.03.2016.
11. Павловский, А. А. Трансграничный электронный документооборот / А. А. Павловский, Ю. В. Подылов, А. А. Голдин // Ж.-д. трансп. – 2013. – № 2. – С. 45–47.
  12. Принципы оценки информационных технологий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://it-value.postach.io/link/printsipy-otsenki-effektivnosti-informatsionnykh-tehnologii>. – Загл. с экрана. – Проверено : 19.07.2016.
  13. Разработка технологии работы железнодорожного транспорта общего пользования Республики Беларусь в условиях применения электронных юридически значимых документов : отчёт о НИР № 9558 / Белорус. гос. ун-т трансп. ; рук. Еловой И. А. ; исполн. : Колос М. М. [и др.]. – Гомель, 2016. – 283 с.
  14. Сборник правил перевозок грузов железнодорожным транспортом общего пользования. В 2 ч. Ч. I. – Минск : Тесей, 2012. – 437 с.
  15. Anil Kumar, N. Two key signature scheme with application to Digital Certificates / N. Anil Kumar, C. Bhagvati // Recent Advances in Information Technology (RAIT) : Proc. of the 1<sup>st</sup> Intern. Conf. (15.04–17.04.2012). – Dhanbad, 2012. – P. 19–22. doi: 10.1109/RAIT.2012.6194472.
  16. Bakhtyar, S. Freight transport prediction using electronic waybills and machine learning / S. Bakhtyar, L. Henesey // Informative and Cybernetics for Computational Social Systems (ICSSS) : Proc. of Intern. Conf. (09.10–10.10.2014). – Qingdao, 2014. – P. 128–133. doi: 10.1109/ICSSS.2014.6961829.
  17. Gerić, S. XML digital signature and its role in information system security [Электронный ресурс] / S. Gerić, T. Vidačić // Mipro : Proc. – 2012. – P. 1844–1849. – Режим доступа: [http://mipro-proceedings.com/sites/mipro-proceedings.com/files/upload/iss/iss\\_008.pdf](http://mipro-proceedings.com/sites/mipro-proceedings.com/files/upload/iss/iss_008.pdf). – Загл. с экрана. – Проверено : 18.05.2016.

М. М. КОЛОС<sup>1\*</sup>, М. А. ГОНЧАР<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Управління вантажною та комерційною роботою», Білоруський державний університет транспорту, вул. Кірова, 34, Гомель, Республіка Білорусь, 246653, тел. +37 (529) 371 46 93, ел. пошта maxim\_kolos@mail.ru, ORCID 0000-0002-4313-0142

<sup>2\*</sup>Каф. «Управління вантажною та комерційною роботою», Білоруський державний університет транспорту, вул. Кірова, 34, Гомель, Республіка Білорусь, 246653, тел.+73 (529) 712 82 17, ел. пошта mara128@rambler.ru, ORCID 0000-0003-3485-2706

## УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ РОБОТИ БІЛОРУСЬКОЇ ЗАЛІЗНИЦІ В УМОВАХ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ ДОКУМЕНТІВ

**Мета.** В науковій роботі необхідно розглянути удосконалення технології роботи залізничного транспорту загального користування Республіки Білорусь в умовах застосування електронних юридично значущих документів. **Методика.** При проведенні даного дослідження проводився збір статистичної інформації щодо тривалості виконання окремих технологічних операцій, оцінки статичних даних та аналізу їх описових характеристик. При визначенні ефективності запропонованих заходів використовувалися методи експертних оцінок, методи оцінки ефективності ІТ-інвестицій. **Результати.** Розглянуто технологічні, апаратні, програмні, організаційні та інші аспекти застосування електронних юридично значущих документів у вантажній та комерційній роботі. Визначено найбільш важливі напрями вдосконалення технології роботи організацій Білоруської залізниці та їх взаємодія з вантажовідправниками і вантажоодержувачами за рахунок застосування електронних юридично значущих документів. Це: 1) спрощення ведення станційної комерційної звітності; 2) автоматизація виконання технологічних операцій; 3) удосконалення взаємодії залізничних колій незагального користування і станцій примикання; 4) спрощення процедури планування перевезень та обліку виконання заявок; 5) реалізація єдиного інформаційного простору для всіх учасників перевізного процесу. Розрахована прогнозна оцінка ефективності впровадження електронних юридично значущих документів у вантажній та комерційній роботі Білоруської залізниці. **Наукова новизна.** Розроблена двохваріантна модель застосування електронного цифрового підпису як інструменту для автоматичної фіксації моменту виконання технологічної операції або для вказівки часу її здійснення. Це дозволяє перевести ряд технологічних процесів на принципово новий рівень, сприяючи формуванню єдиного інформаційного простору вантажних перевезень. Запропонована методика прогнозування ефективності електронного документообігу для

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

умов застосування на залізничному транспорті. **Практична значимість.** Отримані результати використовуються для формування переліку заходів, спрямованих на удосконалення технології роботи залізничного транспорту загального користування в умовах застосування електронних юридично значущих документів, оцінки їх значимості та етапності реалізації на Білоруській залізниці. Застосування отриманих результатів дозволить знизити витрати вантажовідправників, вантажоодержувачів, залізниці; підвищити продуктивність праці, цінову конкурентоспроможність залізничного транспорту та якість наданих послуг. Буде можливо створити єдиний інформаційний простір і, як наслідок, поліпшити якість роботи з інформаційними потоками та доступ до інформації для всіх учасників перевізного процесу.

**Ключові слова:** електронний юридично значимий документ; електронний цифровий підпис; Білоруська залізниця; вантажна та комерційна робота; АС «Електронне перевезення»; технологія роботи

M. M. KOLOS<sup>1\*</sup>, M. A. GONCHAR<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Management of Freight and Commercial Work», Belarusian State University of Transport, Kirov St., 34, Gomel, Republic of Belarus, 246653, tel.+37 (529) 371 46 93, e-mail maxim\_kolos@mail.ru, ORCID 0000-0002-4313-0142

<sup>2\*</sup>Dep. «Management of Freight and Commercial Work», Belarusian State University of Transport, Kirov St., 34, Gomel, Republic of Belarus, 246653, tel. +73 (529) 712 82 17, e-mail mara128@rambler.ru, ORCID 0000-0003-3485-2706

## IMPROVING THE TECHNOLOGY OF BELORUSSIAN RAILWAY IN CONDITIONS OF ELECTRONIC DOCUMENTS USAGE

**Purpose.** The scientific paper highlights improving the technology of railway transport in the Republic of Belarus in conditions of electronic legally significant documents. **Methodology.** The study covered the collection of statistical data on the duration of separate technological operations performance, the evaluation of static data and the descriptive analysis of their characteristics. When assessing the effectiveness of the proposed measures we used methods of expert estimations, methods of evaluating the effectiveness of IT investments. **Findings.** Technology, hardware, software, organizational and other aspects of electronic legally significant documents used in freight and commercial work are determined. The work defines the most important directions of technology improvements at Belarusian Railway entities and their relations with shippers and consignees through the use of electronic legally significant documents. These directions are as follows: simplification of station commercial costs accounting, automation of technological operations, improving the interaction between the railway tracks and adjunction stations, simplification of transport planning and demand performance record, implementation of common information space for all participants of transportation process. The predictive estimate of efficiency for implementation of electronic legally significant documents in freight and commercial work of the Belarusian railway is calculated. **Originality.** This article presents a dual model of digital signature as a tool for the automatic fixation of technological operations or for specifying the time for its implementation, which allows converting a number of technological processes to a new level, helping to create a common information space of freight traffic. **Practical value.** The obtained results are used to form the list of the actions directed on perfection of railway transport technology in conditions of electronic legally significant documents, assessment of their significance and phasing of their implementation on Belarusian railway. The results of the project will allow: to reduce costs of shippers, consignees, railroads, to improve productivity, cost competitiveness of railway transportation and quality services, to create common information space and, as a consequence, to improve the quality of work with information flows and access to information for all participants of transportation process.

**Keywords:** electronic legally significant document; digital signature; Belarusian Railway; freight and commercial work; automated system «Electronnaya perevozka»; operation technology

### REFERENCES

1. Bulavskiy P.Ye., Makarov D.S. Elektronnyy dokumentooborot tekhnicheskoy dokumentatsii [Electronic document management of technical documentation]. *Avtomatika, svyaz, informatika – Automation, Communication, Informatics*, 2012, no 2, pp. 2-4.
2. *Instruktsiya po vedeniyu stantsionnoy kommercheskoy otchetnosti po gruzovym perevozkam. Prikaz Belorusskoy zheleznoy dorogi №257N ot 26.07.2005* [The Instruction on conducting commercial station reporting for freight]. Minsk, Belorusskaya zheleznaya doroga Publ., 2005. 63 p.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

3. Levin D.Yu. *Dispetcherskiye tseny i tekhnologiya upravleniya perevozochnym protsessom* [Dispatch centers and the technology of transportation management]. Moscow, Marshrut Publ., 2005. 760 p.
4. Mazol O.I. *Obosnovaniye effektivnosti informatsionnykh tekhnologiy* [Evaluation of the effectiveness of information technology]. Minsk, Misanta Publ., 2011. 192 p.
5. *Metodicheskiye rekomendatsii po obosnovaniyu effektivnosti na zheleznodorozhnom transporte* [Guidelines on rationale of effectiveness on railway transport]. Moscow, Ministerstvo putey soobshcheniya Publ., 1999. 120 p.
6. Nosevich V.L. *Vnedreniye elektronnoho dokumentooborota v gosudarstvennom upravlenii Respubliki Belarus: predystoriya, sostoyanie, perspektivy* [The Introduction of electronic document management in public administration of the Republic of Belarus: background, status and prospects]. *Arhivy i deloproizvodstvo – Archive and Records Management*, 2013, no. 5, pp.43-58.
7. Nosevich V.L. Plyusy i minusy elektronnoho dokumentooborota [The Pros and cons of the electronic document management]. *Arhivy i deloproizvodstvo – Archives and Records Management*, 2013, no. 3, pp.42-56.
8. Nosevich V.L. Elektronnyye arkhivy: na puti iz budushchego v nastoyashcheye [E-archives: on the way from the future to the present]. *Arhivy i spravavodstva – Archives and Records Management*, 2011, no. 3, pp. 97-105.
9. Nosevich, V. L. Elektronnyy dokumentooborot: v protsesse preodoleniya problem i poiska resheniy [Electronic document management: in the process of overcoming problems and finding solutions]. *Arhivy i spravavodstva – Archives and Records Management*, 2007, no. 4, pp. 71–75.
10. *Zakon Respubliki Belarus ot 28.12.2009. №113-Z « Ob elektronnom dokumente i elektronnoy tsifrovoy podpisi»* (The law of the Republic of Belarus 28.12.2009 №113-Z «About electronic document and electronic digital signature»). Available at: [http://kodeksy-by.com/zakon\\_rb\\_ob\\_elektronnom\\_dokumente\\_i\\_elektronnoj\\_tsifrovoj\\_podpisi.htm](http://kodeksy-by.com/zakon_rb_ob_elektronnom_dokumente_i_elektronnoj_tsifrovoj_podpisi.htm) (Accessed 14 March 2016).
11. Pavlovskiy A.A., Podylov Yu.V., Goldin A.A. Transgranichnyy elektronnyy dokumentooborot [Cross-border electronic document management]. *Zheleznodorozhnyy transport – Railway Transport*, 2013, February, pp.45-47.
12. *Printsipy otsenki informatsionnykh tekhnologiy* (Principles for information technology estimation). Available at: <http://it-value.postach.io/link/printsipy-otsenki-effektivnosti-informatsionnykh-tekhnologii> (Accessed 23 November 2015).
13. Yelovoy I.A., Kolos M. M. *Razrabotka tekhnologii raboty zheleznodorozhnogo transporta obshchego polzovaniya Respubliki Belarus v usloviyakh primeneniya elektronnykh yuridicheskikh znachimyykh dokumentov* [Development of technology of railway transport in the Republic of Belarus in the conditions of electronic legally significant documents]. Gomel, 2015. No. № 9558. 283 p.
14. *Sbornik pravil perevozok gruzov zheleznodorozhnym transportom obshchego polzovaniya* [A collection of rules of cargo transportation by railway transport for general use]. Minsk, Tesey Publ., 2012. In 2 parts, part 1. 437 p.
15. Anil Kumar N., Bhagvati C. Two key signature scheme with application to Digital Certificates. Recent Advances in Information Technology (RAIT) (15.04-17.04.2012): Proc. of the 1st Int. Conf., 2012, pp. 19-22. doi: 10.1109/RAIT.2012.6194472.
16. Bakhtyar S., Henesey L. Freight transport prediction using electronic waybills and machine learning. Informative and Cybernetics for Computational Social Systems (ICSS) (9.10-10.10.2014): Proc. of Int. Conf., 2014, pp. 128-133. doi: 10.1109/ICSS.2014.6961829.
17. Gerić S., Vidačić T. XML digital signature and its role in information system security. Mipro: Proc., 2012, pp. 1844–1849. Available at: [http://mipro-proceedings.com/sites/mipro-proceedings.com/files/upload/iss/-iss\\_008.pdf](http://mipro-proceedings.com/sites/mipro-proceedings.com/files/upload/iss/-iss_008.pdf) (Accessed 18 May 2016).

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. А. К. Головничом (Республика Беларусь);  
д.т.н., проф. Д. Н. Козаченко (Украина)

Поступила в редколлегию: 06.04.2016

Принята к печати: 11.07.2016

## УДК 656.212.5:625.156

Д. М. КОЗАЧЕНКО<sup>1\*</sup>, С. В. ГРЕВЦОВ<sup>2\*</sup>, Т. В. БОЛВАНОВСЬКА<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup> Науково-дослідна частина, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 51 09, ел. пошта kozachenko@upr.dit.edu.ua, ORCID 0000-0003-2611-1350

<sup>2\*</sup> Львівський коледж транспортної інфраструктури, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Снопковська, 47, Львів, Україна, 79011, тел. +38 (032) 276 14 90, ел. пошта Grevtsov@ukr.net, ORCID 0000-0003-2925-4293

<sup>3\*</sup> Каф. «Станції та вузли», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 51 03, ел. пошта valentinovna.upr@gmail.com, ORCID 0000-0001-6462-8524

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЛЬМОВИХ УПОВІЛЬНЮВАЧІВ НА ПЕРЕРОБНУ СПРОМОЖНІСТЬ СОРТУВАЛЬНИХ ГІРОК

**Мета.** Наукова робота має за мету розробку методів розрахунку переробної спроможності сортувальних гірок для умов втрати уповільнювачами гальмової потужності. **Методика.** Функціонування сортувальних гірок пов'язано з дією значної кількості випадкових факторів, таких як: характеристики відчепів, умови зовнішнього середовища, величина гальмової потужності, що реалізується уповільнювачами, та ін. У зв'язку з цим для дослідження поставлених задач використовуються методи імітаційного моделювання та математичної статистики. Визначення швидкості та часу руху відчепів по маршрутах здійснюється на підставі моделювання їх скочування з сортувальної гірки. **Результати.** У випадку, якщо гальмової потужності уповільнювачів спускної частини гірки недостатньо для зупинки ними відчепів, то під час розпуску повинні передбачатись перерви для звільнення попередніми відчепами маршрутів скочування. З використанням методів теорії ймовірності визначені залежності, що дозволяють встановлювати тривалість вказаних зупинок. У випадку, якщо гальмової потужності уповільнювачів на спускній частині гірки та на сортувальних коліях недостатньо для виконання вимог прицільного регулювання швидкості скочування відчепів, то необхідно використовувати додаткове башмачне гальмування. В дослідженні розроблені методи, які на підставі імітаційного моделювання сортувального процесу дозволяють встановлювати потрібну величину збільшення тривалості розпуску, що забезпечує безпеку руху при заданій кількості регулювальників швидкості руху вагонів. **Наукова новизна.** В роботі авторами вперше запропоновані удосконалені методи визначення переробної спроможності сортувальних гірок. Їх особливість у тому, що вони (на відміну від існуючих) дозволяють враховувати технологічні обмеження, що викликані вимогами безпеки сортувального процесу, і можуть застосовуватись для оцінки показників роботи гірок в умовах параметричних відмов уповільнювачів. **Практична значимість.** Застосування запропонованих методів дозволяє для існуючих обсягів роботи оцінювати вплив несправності уповільнювачів на погіршення показників роботи сортувальних гірок.

**Ключові слова:** сортувальна гірка; вагонний уповільнювач; безпека руху поїздів; сортувальний процес; переробна спроможність гірки

### Вступ

Сортувальні гірки є місцем підвищеної небезпеки на станціях. Тому цій проблемі присвячена значна кількість наукових праць. Переважна кількість порушень безпеки руху на гірках пов'язана з регулюванням швидкості скочування відчепів [11, 16]. Як основні заходи, що забезпечують підвищення безпеки сортувального процесу, на сьогодні розглядають удосконалення конструкції сортувальних гірок [1, 13], автоматизацію розформування составів

[18] та запровадження обмежень на умови розформування составів на сортувальних гірках [14, 16]. Для України характерним є утворення певних резервів переробної спроможності через різке падіння обсягів вагонопотоків з одного боку та незадовільний стан технічних засобів – з іншого. Експлуатація технічних засобів сортувальних гірок у значній кількості випадків відбувається в «захищеному» режимі [9], коли забезпечення безпеки руху здійснюється шляхом запровадження певних експлуатаційних

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

обмежень. Необхідно відмітити, що експлуатація технічних засобів в такому стані призводить до збільшення експлуатаційних. Тому актуальною задачею для залізничного транспорту України є встановлення зв'язків між станом технічних засобів сортувальних гірок та техніко-експлуатаційними показниками їх функціонування.

Однією із основних технічних характеристик сортувальних гірок є їх переробна спроможність [3, 6, 15]. Розрахунок переробної спроможності сортувальних гірок на залізницях України згідно з [6] виконується за формулою

$$N = \mu_{\text{пвт}} \sum_{i=1}^m n_{p,i} b_{p,i} + N_{\text{пост}}^{\text{гip}},$$

де  $n_{p,i}, b_{p,i}$  – відповідно, переробна спроможність гірки для поїздів з  $i$ -го підходу та середня кількість вагонів у них;  $m$  – кількість підходів, з яких поїзди надходять у розформування;  $\mu_{\text{пвт}}$  – коефіцієнт, що враховує повторне сортування частини вагонів у процесі закінчення формування з гірки і через недостатню кількість та довжину сортувальних колій;  $N_{\text{пост}}^{\text{гip}}$  – кількість місцевих вагонів з колій ремонту, кутових, вагонного депо та ін., які розпускаються за час  $\sum T_{\text{пост}}^{\text{гip}}$ ,  $\sum T_{\text{пост}}^{\text{гip}}$  – час займання гірки протягом доби виконання постійних операцій, кількість яких не змінюється пропорційно зі збільшенням обсягу переробки або кількість яких задається на розрахунковий період.

Згідно з [3] вказаний вираз може мати вигляд

$$N = \frac{1440 \alpha_{\text{гip}} - T_{\text{пост}}^{\text{гip}}}{t_{\text{гip}} \alpha_{\text{зал}} (1 + \rho_{\text{г}})} m_{\text{с}} + N_{\text{пост}}^{\text{гip}},$$

де  $m_{\text{с}}$  – середня кількість вагонів в составі;  $\alpha_{\text{зал}}$  – коефіцієнт, що враховує додаткові витрати часу, пов'язані з заняттям передгіркової горловини поїздами та маневровими пересуваннями, що залежать від обсягу переробки.

Величина  $t_{\text{гip}}$  для механізованих та немеханізованих сортувальних гірок, де працює один локомотив, розраховується за виразом

$$T_{\text{рф}} = t_{\text{з}} + t_{\text{н}} + t_{\text{р}} + t_{\text{ос}} + t_{\text{дод}},$$

де  $t_{\text{з}}, t_{\text{н}}, t_{\text{р}}, t_{\text{ос}}, t_{\text{дод}}$  – тривалість заїзду, тривалість насуву, розпуску, тривалість осаджування та додаткових операцій відповідно.

Для гірок, де працює декілька локомотивів, величина  $t_{\text{гip}}$  визначається за результатами побудови гіркового циклу, а саме: частина перелічених вище операцій виконується послідовно, а частина – паралельно.

Тривалість гіркових операцій визначається за [10] згідно з параметрами маршрутів руху та кількістю вагонів у составі. При цьому безпосередня тривалість розпуску состава визначається за формулою

$$t_{\text{р}} = \frac{0,06 m_{\text{р}} l_{\text{в}}}{v_{\text{р}}} \left( 1 - \frac{1}{2 g_{\text{р}}} \right) + b_{\text{ЗСГ}} t(K_{\text{ЗСГ}}), \quad (2)$$

де  $m_{\text{р}}, g_{\text{р}}$  – середня кількість вагонів та відцепів у составі, що розформовуються відповідно;  $l_{\text{р}}$  – середня довжина вагона;  $v_{\text{р}}$  – середня швидкість розпуску состава з гірки;  $b_{\text{ЗСГ}}$  – частка составів з вагонами, що заборонені до спуску з гірки без локомотива (ЗСГ), від загальної кількості составів, що розформовуються;  $t(K_{\text{ЗСГ}})$  – додатковий час на маневри з вагонами ЗСГ, що припадають на один состав залежно від середньої кількості груп таких вагонів у составі  $K_{\text{ЗСГ}}$ .

Принципи забезпечення безпеки розформування составів поїздів в умовах параметричної відмови уповільнювачів викладені у [16]. Дотримання вимог безпеки руху при цьому переважно досягається за рахунок зниження темпу розпуску та застосування башмачного регулювання швидкості скочування відцепів на сортувальних коліях.

Недоліком сучасних методів розрахунку переробної спроможності гірки є те, що в них не враховується стан технічних засобів сортувальної гірки і її функціонування в умовах технологічних обмежень для забезпечення вимог безпеки руху.

### Мета

Метою роботи є розробка методів розрахунку переробної спроможності сортувальних гірок для умов втрати уповільнювачами гальмової потужності.



## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

**Методика**

Технологічними обмеженнями, що накладаються на процес розформування-формування поїздів є обмеження швидкості розпуску составів, призупинення розпуску та організація скоочування наступного відчепа після звільнення маршруту попереднім, додаткове гальмування відцепів гальмовими башмаками, виконання маневрової роботи з осаджування, закриття окремих колій для розпуску [16]. Функціонування сортувальних гірок пов'язано із дією значної кількості випадкових факторів, таких як характеристики відцепів, умов зовнішнього середовища, величини гальмової потужності, що реалізується уповільнювачами та ін. У зв'язку з цим для дослідження поставлених задач використовуються методи імітаційного моделювання та математичної статистики. Визначення швидкості та часу руху відцепів по маршрутах здійснюється на підставі моделювання скоочування їх з сортувальної гірки.

**Результати**

Обмеження швидкості скоочування відцепів дозволяє забезпечити безпеку процесу розформування-формування при незначній втраті уповільнювачами гальмової потужності, в умовах, коли залишкової потужності уповільнювачів достатньо для виконання вимог прицільного регулювання швидкості скоочування відцепів та зупинки відцепів на другій гальмовій позиції. Розрахунок переробної спроможності сортувальної гірки в цьому випадку виконується для допустимої швидкості розпуску згідно з діючою методикою [6].

У випадку, коли потужності уповільнювачів на спускній частині гірки разом з уповільнювачами на сортувальних коліях достатньо для виконання вимог прицільного регулювання швидкості скоочування відцепів, але недостатньо для зупинки вагонів на другій гальмовій позиції, то виникають загрози для безпеки руху при зупинці відцепів на стрілочній зоні або при незакоочуванні їх за граничні стовпчики сортувальних колій. Для недопущення небезпечних ситуацій в такому випадку скоочування наступного відчепа повинно починатись лише тоді, коли попередніми відчепами повністю звільнено маршрут їх руху. Процес розформування

состава поїзда можна розглядати як сукупність процесів розформування окремих груп відцепів. Поділ составів на групи відбувається у зв'язку з наявністю у них вагонів, спуск яких через гірку без локомотива заборонений [5]. При цьому спуск до сортувального парку вказаних вагонів не потребує регулювання швидкості уповільнювачами і гальмовими башмаками. Крім того, при обслуговуванні таких відцепів на сортувальній гірці створюється інтервал, достатній для підготовки її технічних засобів та персоналу для безпечного скоочування наступного відчепа. Тому під час розформування составів зупинка відцепів гальмовими уповільнювачами на спускній частині гірки через зайнятість маршрутів скоочування здійснюється не для всіх відцепів. Технологічно виникнення небезпечних ситуацій, що вимагають такої зупинки, є неможливою для перших відцепів состава, відцепів з вагонами, що заборонено до спуску з гірки без локомотива, та відцепів, що слідують за ними. Також при скоочуванні відцепів у різні пучки сортувального парку між послідовними відчепами, як створюється достатній інтервал часу для парирування небезпечних ситуацій за рахунок переведення відцепів на відсівні колії.

Ймовірність розділення відцепів на стрілочній позиції за умови, що кожна стрілка має однакову кількість колій при відхиленні вліво та вправо, може бути визначена формулою [2]

$$P = 2S^2 / M(M - 1),$$

де  $S$  – кількість колій, що примикає до одного напрямку стрілочного переводу;  $M$  – кількість колій в сортувальному парку.

Тривалість заняття відчепами маршрутів скоочування може бути визначена за середньою швидкістю руху по окремих ділянках сортувальної гірки [4] за виразом

$$t_m = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{60v_i}, \quad \sum_{i=1}^n l_i = l_{зв} + l_{від},$$

де  $l_i$ ,  $v_i$  – довжина та середня швидкість руху відчепа на  $i$ -й ділянці скоочування відповідно;  $l_{зв}$  – відстань від вершини гірки до точки звільнення розділової стрілки;  $l_{від}$  – середня довжина відчепа.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Як приклад, у табл. 1 наведено характеристики маршрутів скочування відчепів на трьохпозиційній сортувальній гірці з 32 коліями у сортувальному парку. Пучкова гальмова позиція на вказаній гірці розташовується за другими стрілками по маршруту скочування. Середня кількості вагонів у відчепі состава складає 2,5.

Таблиця 1

## Характеристики маршрутів скочування

Table 1

## Rolling-down routes characteristics

№ стріло- чної по- зиції	Імовірність розділення відчепів	Довжина маршруту	Тривалість зайняття маршруту
1	0,516	—	—
2	0,258	—	—
3	0,129	219,15	0,75
4	0,065	243,12	0,83
5	0,032	291,37	1,00

Математичне очікування часу затримки розпуску перед скочуванням відчепа визначається за формулою

$$\bar{t}_3 = \sum_{i=1}^n P_i t_{mi}.$$

Залежність середньої кількості відчепів у составі, для яких повинна здійснюватися затримка розпуску, від середньої кількості відчепів у составі та середньої кількості відчепів, що заборонені до спуску з гірки без локомотива, наведена на рис. 1.

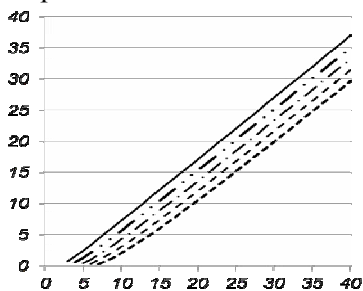


Рис. 1. Залежності кількості відчепів у составі, що вимагають затримки перед розпуском від середньої кількості відчепів у составі

Fig. 1. Dependences of the cuts number in the train that require a delay before breaking-up on the average number of cuts in the train

Збільшення тривалості розформування состава при цьому може бути визначено як

$$T_{zp} = n_3 \bar{t}_3,$$

де  $n_3$  – кількість зупинок розпуску состава.

Для розглянутої у прикладі гірки при середній кількості відчепів у составі 22 та при знаходженні в середньому у составів одного відчепа, що заборонений до спуску з гірки без локомотива, додатковий час на розпуск состава складає 3,5 хв.

У випадку, коли потужності гальмових позицій на спускній частині гірки та сортувальних коліях недостатньо для забезпечення вимог прицільного регулювання швидкості скочування відчепів на сортувальних коліях, необхідно застосовувати додаткове башмачне гальмування. При цьому потрібно відмітити, що механізовані сортувальні гірки не мають достатнього штату регулювальників для забезпечення гальмування відчепів. Тому інтенсивність надходження відчепів на сортувальні колії повинна бути знижена для того, щоб вона не перевищувала інтенсивності їх обслуговування регулювальниками швидкості руху вагонів. У разі потреби під час розпуску повинні створюватись перерви для того, щоб регулювальники переходили з однієї колії на іншу.

При дослідженні прицільного регулювання швидкості скочування відчепів група колій, що обслуговується одним регулювальником швидкості руху вагонів, може розглядатись як одноканальна система масового обслуговування (СМО). Вхідний потік цієї СМО створюють відчепа состава, що надходять на сортувальні колії. Апаратом обслуговування при цьому є регулювальник швидкості руху вагонів. Під обслуговуванням розуміється гальмування регулювальником відчепа гальмовими башмаками.

Дослідження інтенсивності надходження вагонів в обслуговування може бути виконано на підставі імітаційного моделювання процесу розформування составів. Тривалості скочування відчепів залежать від швидкості розпуску, режимів гальмування, ходових характеристик відчепів та колій їх призначення. Гістограми та функції щільності розподілу інтервалів між надходженням відчепів в обслуговування при чотирьох та восьми коліях у групі наведені на рис. 2.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

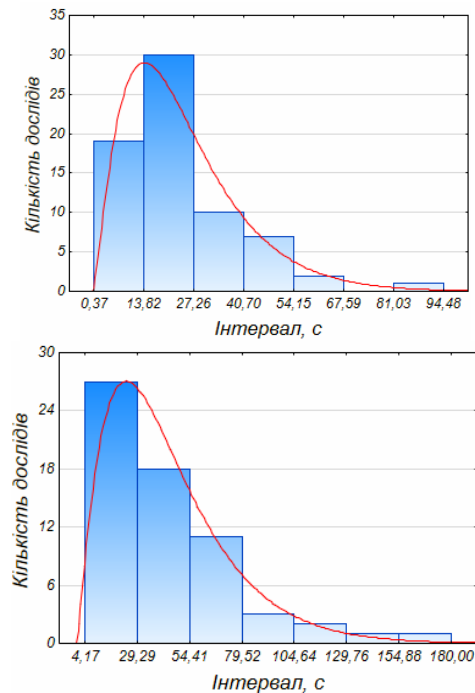


Рис. 2. Гістограми та функції щільності розподілу випадкової величини інтервалів між надходженням відчепів в обслуговування регулювальниками швидкості руху вагонів:

*a* – регулювальник обслуговує 8 колій;  
*b* – регулювальник обслуговує 4 колії

Fig. 2. Histograms and functions of density distribution of the random ranges of intervals between cuts delivery to the service by regulators of car motion speed:  
*a* – regulator serves 8 tracks; *b* – regulator serves 4 tracks

Статистична обробка результатів моделювання показує, що випадкова величина інтервалу між надходженням відчепів до регулювальника має показниковий розподіл.

Для визначення тривалості заняття регулювальника обслуговуванням одного відчепа виконано хронометраж відповідної технологічної

операції на станціях Львів та Клепарів. За результатами хронометражу встановлено, що середня тривалість заняття регулювальника гальмуванням відчепів на сортувальній колії може бути визначена за виразом

$$t_{\text{рш}} = 0,06 + 0,2m_{\text{від}},$$

де  $m_{\text{від}}$  – середня кількість вагонів у відчепі.

Інтервал між надходженням відчепів на колії, що обслуговуються одним регулювальником, є випадковою величиною, яка залежить від швидкості розпуску состава, розподілу відчепів за призначеннями, кількості регулювальників та розподілу сортувальних колій між ними, тривалості руху відчепів маршрутами скочування. Як приклад, на рис. 3 наведено графік надходження відчепів в обслуговування регулювальниками, коли состав складається з вагонів призначенням на колії 1-16, які обслуговуються чотирма регулювальниками.

Аналіз цього графіка показує, що при рівномірній швидкості розпуску будуть мати місце випадки одночасного надходження до регулювальників швидкості відчепів 6 та 8, 7 та 9, 16 та 17, а також 14 та 21. Для забезпечення безпечних умов розформування состава необхідно виконувати призупинку розпуску. Тривалість перерви у розпуску визначається потрібним часом для створення достатнього інтервалу між моментами надходження відчепів до регулювальників швидкості, а також часом, потрібним для надання команди на поновлення розпуску, сприйняття її машиністом та розгону состава.

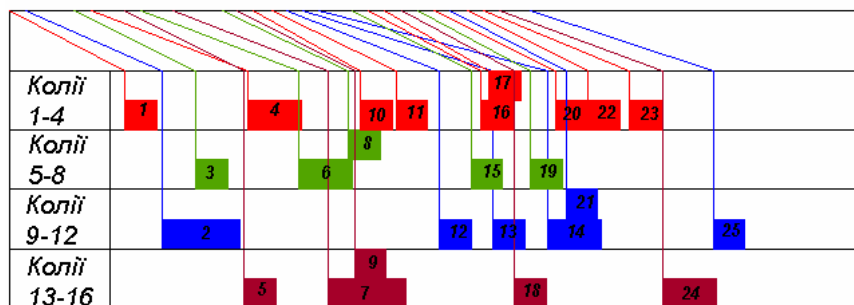


Рис. 3. Графік надходження відчепів в обслуговування регулювальниками швидкості вагонів

Fig. 3. The graph of cuts delivery to the service by regulators of car motion speed

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

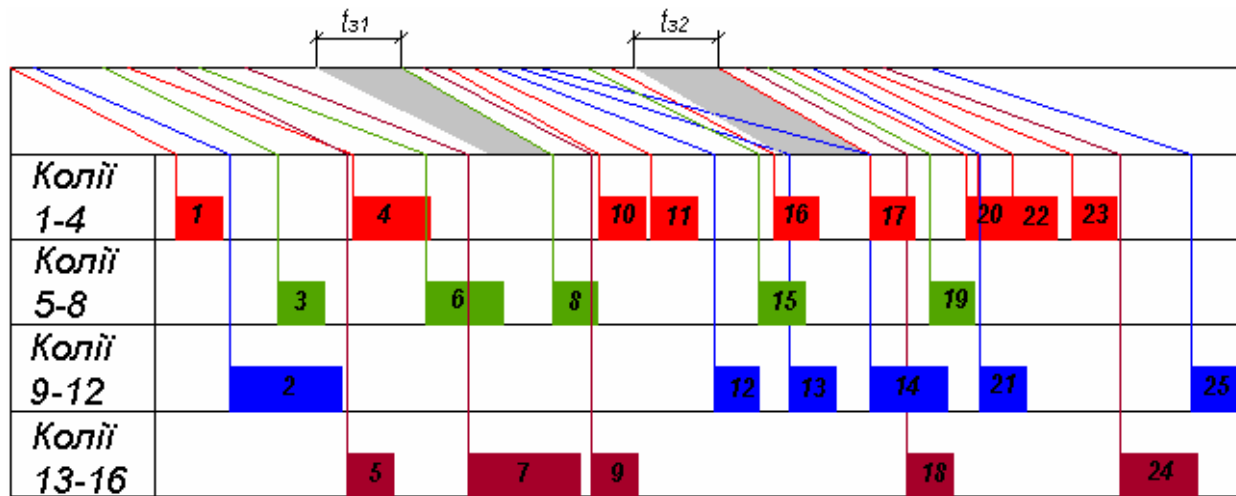


Рис. 4. Модифікований графік надходження відчепів в обслуговування регулювальниками швидкості вагонів

Fig. 4. The modified graph of cuts delivery to the service by regulators of car motion speed

Задача вибору моментів зупинки розпуску є багатоваріантною і повинна здійснюватися з умови мінімізації загальної величини затримок.

Модифікований графік надходження відчепів в обслуговування регулювальниками швидкості вагонів з перервами розпуску після відривів 7-го та 16-го відчепів наведено на рис. 4. При цьому прийнято, що мінімальна тривалість перерви у розпуску складає 0,5 хв.

У випадку, якщо кількість регулювальників буде зменшена до двох, то кількість зупинок повинна бути збільшена через одночасне надходження в обслуговування відчепів 4 та 6, 15 та 16, 14 та 18, 18 та 20.

Через наявність складних зв'язків між швидкістю розпуску состава, режимами гальмування відчепів та інтервалами між ними на гальмових позиціях величина затримок у розпуску повинна визначатись на підставі хронометражних спостережень за роботою гірки або за результатами імітаційного моделювання її функціонування.

Додатково необхідно відмітити, що застосування гальмових башмаків для регулювання швидкості скочування відчепів призводить до скорочення корисної довжини сортувальних колій і, як наслідок, до збільшення витрат часу на підготовку їх до розпуску.

У випадку, якщо потужності гальмових позицій недостатньо для забезпечення входу відчепів на башмачну гальмову позицію з допус-

тимою для неї швидкістю 3,5 м/с [4], спуск вагонів на неї може здійснюватися маневровим локомотивом. Методика врахування таких відчепів при нормуванні тривалості розпуску состава є аналогічною до методики нормування тривалості маневрів з вагонами, що заборонені до спуску з гірки без локомотива [10].

Альтернативним методом є закриття сортувальних колій для розпуску. В цьому випадку використовується ковзка спеціалізація сортувальних колій і збільшується частка повторного сортування. Методика оцінки впливу кількості колій у сортувальному парку на умови роботи технічних станцій наведена в [12].

### Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна роботи полягає у тому, що в ній запропоновані удосконалені методи визначення переробної спроможності сортувальних гірок, які, на відміну від існуючих, дозволяють враховувати технологічні обмеження, що викликані вимогами безпеки сортувального процесу і можуть застосовуватись для оцінки показників роботи гірок в умовах параметричних відмов уповільнювачів.

Застосування запропонованих методів дозволяє для існуючих обсягів роботи оцінювати вплив несправності уповільнювачів на погіршення показників роботи сортувальних гірок.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

**Висновки**

Виконані дослідження дозволяють зробити такі висновки.

1. Методи визначення переробної спроможності сортувальних гірок, що покладені в основу діючих на сьогодні нормативних документів, не враховують технічний стан уповільнювачів. Тому їх застосування не дозволяє оцінювати техніко-експлуатаційну ефективність ремонтних заходів, спрямованих на переведення функціонування сортувальних гірок із безпечного непрацездатного стану у працездатний.

2. У випадку, якщо гальмової потужності уповільнювачів спускної частини гірки недостатньо для зупинки відчепів під час розпуску, то повинні передбачатись перерви для звільнення попередніми відчепами маршрутів скочування. З використанням методів теорії імовірності визначені залежності, що дозволяють встановлювати тривалість вказаних зупинок.

3. У випадку, якщо гальмової потужності уповільнювачів на спускній частині гірки та на сортувальних коліях недостатньо для виконання вимог прицільного регулювання швидкості скочування відчепів, то необхідно використовувати додаткове башмачне гальмування. В роботі розроблені методи, які на підставі імітаційного моделювання сортувального процесу дозволяють встановлювати потрібну величину збільшення тривалості розпуску, що забезпечують безпеку руху при заданій кількості регулювальників швидкості руху вагонів.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

- Березовый, Н. И. Комплексное проектирование продольного и поперечного профиля сортировочных горок / Н. И. Березовый, В. В. Малашкин, Н. П. Божко // Транспортні системи та технології перевезень : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2014. – Вип. 7. – С. 5–9.
- Бобровский, В. И. Определение вероятностей разделения отцепов на стрелках сортировочной горки / В. И. Бобровский // Вопр. механизации и автоматизации сортиров. процесса на станциях : тр. ДИИТа. – Днепропетровск, 1976. – Вып. 181/10. – С. 56–63.
- Болвановська, Т. В. Розрахунок переробної спроможності сортувальних комплексів / Т. В. Болвановська // Транспортні системи та технології перевезень : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2014. – Вип. 8. – С. 27–34.
- ГБН В.2.3-37472062-1:2012. Споруди транспорту. Сортувальні пристрої залізниць. Норми проектування. – Київ : М-во інфраструктури України, 2012. – 112 с.
- Журавель, В. В. Вплив наявності вагонів, які заборонено спускати з гірки, на процес розпуску составів / В. В. Журавель // Восточно-Европ. журн. передовых технологий. – 2012. – 4/3 (58). – С. 38–44.
- Інструкція з розрахунку наявної пропускної спроможності залізниць України : ЦД-0036 : навч.-метод. посіб. / О. Ф. Вергун, Н. В. Липовець, В. М. Боголій. – Київ : Транспорт України, 2002. – 376 с.
- Козаченко, Д. М. Дослідження впливу швидкості розпуску составів на переробну спроможність сортувальних гірок / Д. М. Козаченко, І. Ю. Левицький, Т. В. Болвановська // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 41. – С. 61–63.
- Козаченко, Д. М. Оптимізація розподілу сортувальних колій між призначеннями плану формування / Д. М. Козаченко, М. І. Березовий, Р. Г. Коробйова // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 22. – С. 52–55.
- Лисенков, В. М. Статистическая теория безопасности движения поездов : учебник для вузов / В. М. Лисенков. – Москва : ВИНТИ РАН, 1999. – 332 с.
- Методичні вказівки з розрахунку норм часу на маневрові роботи, які виконуються на залізничному транспорті : затв. наказом Укрзалізниці 25.03.2003 р. № 0-72/ ЦЗ. – Київ, 2003. – 82 с.
- Модин, Н. К. Безопасность функционирования горочных устройств / Н. К. Модин. – Москва : Транспорт, 1995. – 173 с.
- Огар, О. М. Визначення інтенсивностей відмов та відновлення підсистем сортувальної гірки / О. М. Огар, О. В. Розсоха, О. М. Костенніков // Інформ.-керуючі системи на залізн. трансп. – 2012. – № 3. – С. 3–12.
- Негрей, В. Я. Обоснование уровня технического оснащения и оптимизация параметров конструкции сортировочных комплексов железнодорожных станций / В. Я. Негрей, С. А. Пожидаев, Е. А. Филатов // Транспортні системи та технології перевезень : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2014. – Вип. 8. – С. 110–119.
- Островский, А. М. Пропуск вагонов с опасными грузами через сортировочные горки /

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

- А. М. Островский, А. М. Лисютин // Науч. тр. SWorld. – Иваново, 2012. – Т. 2, № 1. – С. 38–41.
15. Controlling the speed of rolling cuts in condition of reduction of brake power of car retarders / D. M. Kozachenko, V. I. Bobrovskiy, S. V. Grevtsov, M. I. Berezoviy // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 3 (63). – С. 28–40. doi: 10.15802/stp2-016/74710.
  16. Pepevnik, A. The railway traffic shunting system / A. Pepevnik, B. Bogović. – Promet. – 2003. – Vol. 15, № 3. – P. 177–184.
  17. Zarecky, S. The newest trends in marshalling yards automation / S. Zarecky, J. Grun, J. Zilka // Transport Problems. – 2008. – Т. 3, vol. 4, pt. 1. – P. 87–95.
  18. Zhang, C. Analysis of Over-speed Coupling Accidents on Hump based on Fuzzy Petri Net / C. Zhang, Y. Li // Industrial Engineering and Engineering Management (IE&EM) : Proc. of 17th Intern. Conf. (29.10–31.10.2010). – Xiamen, 2010. – P. 1014–1018. doi: 10.1109/ICIEEM.2010.5646453.

Д. Н. КОЗАЧЕНКО<sup>1\*</sup>, С. В. ГРЕВЦОВ<sup>2\*</sup>, Т. В. БОЛВАНОВСКАЯ<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup> Научно-исследовательская часть, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 51 09, эл. почта kozachenko@upr.dit.edu.ua, ORCID 0000-0003-2611-1350

<sup>2\*</sup> Львовский колледж транспортной инфраструктуры, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Снопковская, 47, Львов, 79011, тел. +38 (032) 276 14 90, эл. почта Grevtsov@ukr.net, ORCID 0000-0003-2925-4293

<sup>3\*</sup> Каф. «Станции и узлы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 51 03, эл. почта valentinovna.upr@gmail.com, ORCID 0000-0001-6462-8524

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТОРМОЗНЫХ ЗАМЕДЛИТЕЛЕЙ НА ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРОК

**Цель.** Научная работа своей целью имеет разработку методов расчета перерабатывающей способности сортировочных горок для условий потери замедлителями тормозной мощности. **Методика.** Функционирование сортировочных горок связано с действием большого количества случайных факторов, таких как: характеристики отцепов, условия внешней среды, величина тормозной мощности, реализуемая замедлителями, и др. В связи с этим для исследования поставленных задач используются методы имитационного моделирования и математической статистики. Определение скорости и времени движения отцепов по маршрутам осуществляется на основании моделирования их скатывания с сортировочной горки. **Результаты.** В случае, если тормозной мощности замедлителей спускной части горки недостаточно для остановки ими отцепов, то во время роспуска должны предусматриваться перерывы для освобождения предварительными отцепами маршрутов скатывания. С использованием методов теории вероятности определены зависимости, позволяющие устанавливать продолжительность указанных остановок. В случае, если тормозной мощности замедлителей на спускной части горки и на сортировочных путях недостаточно для выполнения требований прицельного регулирования скорости скатывания отцепов, то необходимо использовать дополнительное башмачное торможение. В исследовании разработаны методы, которые на основании имитационного моделирования сортировочного процесса позволяют устанавливать нужную величину увеличения продолжительности роспуска, обеспечивающую безопасность движения при заданном количестве регуляторов скорости движения вагонов. **Научная новизна.** В работе авторами впервые предложены усовершенствованные методы определения перерабатывающей способности сортировочных горок. Их особенность в том, что они (в отличие от существующих) позволяют учитывать технологические ограничения, вызванные требованиями безопасности сортировочного процесса, и могут применяться для оценки показателей работы горок в условиях параметрических отказов замедлителей. **Практическая значимость.** Применение предложенных методов позволяет для существующих объемов работы оценивать влияние неисправности замедлителей на ухудшение показателей работы сортировочных горок.

**Ключевые слова:** сортировочная горка; вагонный замедлитель; безопасность движения поездов; сортировочный процесс; перерабатывающая способность горки

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

D. M. KOZACHENKO<sup>1\*</sup>, S. V. GREVTSOV<sup>2\*</sup>, T. V. BOLVANOVSKA<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Research Department, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 51 09, e-mail kozachenko@upp.diit.edu.ua, ORCID 0000-0003-2611-1350

<sup>2\*</sup>Lviv College of Transport Infrastructure at Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Snopkovska St., 47, Lviv, Ukraine, 79011, tel. +38 (032) 276 14 90, e-mail Grevtsov@ukr.net, ORCID 0000-0003-2925-4293

<sup>3\*</sup>Dep. «Stations and Nodes», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 51 03, e-mail valentinovna.upp@gmail.com, ORCID 0000-0001-6462-8524

## STUDY OF TECHNICAL STATE IMPACT OF BRAKE RETARDERS AT THE PROCESSING ABILITY OF HUMPS

**Purpose.** The research aims development of methods for calculating the estimated capacity humps for the loss conditions of brake power retarders. **Methodology.** The operation of humps is connected with large number of random factors, such as the characteristics of cuts, environmental conditions, the value of braking power implemented by retardants and others. In this regard, to research the set tasks the methods of simulation modeling and mathematical statistics are used. Determination of speed and motion time of cuts on the routes is carried out on the basis of rolling down modeling of their rolling down from the humps. **Findings.** If the brake power of retarders of the rolling down part of humps is not enough to stop the cuts, it should be provided the intervals during break-up to release the rolling routes from the preliminary cuts. The dependencies allowing to set the duration of these intervals were determined using the methods of the probability theory. If the brake power of retarders at the rolling down part of humps and at the classification tracks is not enough to meet the requirements of the aimed regulation of the cuts rolling speed, it is necessary the use the additional brake shoes. The work develops the methods that on the basis of simulation modeling of the humping process allow one to set the desired value of the break-up duration increase. They ensure the traffic safety at the given number of car motion speed regulators. **Originality.** Authors firstly proposed the improved methods for determining the estimated capacity of humps. Unlike the existing ones, allow taking into account the technological limitations caused by the requirements of the humping process safety and can be used to assess the performance of the humps in the conditions of parametric failures of the retarders. **Practical value.** The use of the proposed methods allows assessing the influence of the retarders' disrepair on the performance degradation of humps for the existing volumes of work.

**Keywords:** hump; car retarder; train traffic safety; humping process; estimated capacity of a hump

### REFERENCES

1. Berezovyy N.I., Malashkin V.V., Bozhko N.P. Kompleksnoye proyektirovaniye prodolnogo i poperechnogo profilya sortirovochnykh gorok [Integrated design of longitudinal and transverse profile of marshalling yards]. *Transportni systemy ta tekhnologii perevezen* [Transport systems and transportations technologies], 2014, vol. 7, pp. 5-9.
2. Bobrovskiy V.I. Opredeleniye veroyatnostey razdeleniya ottsepov na strelkakh sortirovochnoy gorki [Definition of cuts separation probabilities at the the switches of marshalling yard]. *Voprosy mekhanizatsii i avtomatizatsii sortirovochnogo protsessa na stantsiyakh* [Problems of mechanization and automation of the marshalling process at the stations], 1976, vol. 181/10, pp. 56-63.
3. Bolvanovska T.V. Rozrakhunok pererobnoi spromozhnosti sortuvalnykh kompleksiv [Calculation of the estimated capacity of the marshalling complexes]. *Transportni systemy ta tekhnologii perevezen* [Transport systems and transportations technologies], 2014, vol. 8, pp. 27-34.
4. HBN V.2.3-37472062-1:2012. Haluzevi budivelni normy Ukrainy. Sporudy transportu. Sortuvalni prystroi zaliznyts. Normy proektuvannya [Design codes HBN V.2.3-37472062-1:2012. Branch building norms of Ukraine. Transport facilities. Sorting devices of railways. design standards]. Kyiv, Ministerstvo infrastruktury Ukrainy Publ., 2012. 112 p.
5. Zhuravel V.V. Vplyv naiavnosti vahoniv, yaki zaboroneno spuskaty z hirky, na protses rozpusku sostaviv [The influence of the occurrence of the cars which are forbidden to break-up on the hump on the breaking-up process]. *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy – East-European Journal of Advanced Technologies*, 2012, no. 4/3 (58), pp. 38-44.



## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

6. Verhun O.F., Lypovets N.V., Boholii V.M. *Instruktsiia z rozrakhunku naiavnoi propusknoi spromozhnosti zaliznyts Ukrainy TsD-0036* [Instructions for calculating the available capacity of railways of Ukraine TsD-0036]. Kyiv, Transport Ukrainy Publ., 2002. 376 p.
7. Kozachenko D.M., Levytskyi I.Yu., Bolvanovska T.V. Doslidzhennia vplyvu shvydkosti rozpusku sostaviv na pererobnu spromozhnist sortuvalnykh hirok [Investigation of influence of rate of breaking up of train sets on processing capacity of marshalling hump yards]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, vol. 41, pp. 61-63.
8. Kozachenko D.M., Berezovyi M.I., Korobiova R.H. Optymizatsiia rozpodilu sortuvalnykh kolii mizh pryznachenniamy planu formuvannia [The optimization of distribution sorting tracks between the assignment plan formation]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2008, vol. 22, pp. 52-55.
9. Lisenkov V.M. *Statisticheskaya teoriya bezopasnosti dvizheniya poyezdov* [Statistical theory of train traffic safety]. Moscow, VINITI RAN Publ., 1999. 332 p.
10. Metodichni vказivky z rozrakhunku norm chasu na manevrovi roboty, yaki vykonuiutsia na zaliznychnomu transporti: nakaz Ukrzaliznytsi 25.03.2003 r. № 0-72/ TsZ [Guidelines for the calculation of standard time for shunting work performed on railway transport: UZ order 25.03.2003. 0-72/TsZ]. Kyiv, 2003. 82 p.
11. Modin N.K. *Bezopasnost funktsionirovaniya gorochnykh ustroystv* [Functioning safety of marshalling devices]. Moscow, Transport Publ., 1995. 173 p.
12. Ohar O.M., Rozsokha O.V., Kostiennikov O.M. Vyznachennia intensyvnostei vidmov ta vidnovlennia pidsystem sortuvalnoi hirky [Defining of the failure rate and recovery of marshalling yard subsystems]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti – Information and Control Systems on Railway Transport*, 2012, no. 3, pp. 3-12.
13. Negrey V.Ya., Pozhidayev S.A., Filatov Ye.A. Obosnovaniye urovnya tekhnicheskogo osnashcheniya i optimizatsiya parametrov konstruksii sortirovochnykh kompleksov zheleznodorozhnykh stantsiy [Justification of the level of technical equipment and optimization of the design parameters of sorting complexes for railway stations]. *Transportni systemy ta tekhnologii perevezhen* [Transport sytems and transportations technologies], 2014, vol. 8, pp. 110-119.
14. Ostrovskiy A.M., Lisutyn A.M. Propusk vagonov s opasnymi gruzami cherez sortirovochnyye gorki [Pass of cars with dangerous freights through the marshalling yards]. *Sbornik nauchnykh trudov SWorld* [Proc. SWorld], 2012, vol. 2, no. 1, pp. 38-41.
15. Kozachenko D.M., Bobrovskiy V.I., Grevtsov S.V., Berezovyi M.I. Controlling the speed of rolling cuts in condition of reduction of brake power of car retarders. *Nauka ta prohres Transportu – Science and Transport Progress*, 2016, no. 3 (63), pp. 28-40. doi: 10.15802/stp2016/74710.
16. Pepevnik A., Bogović B. The railway traffic shunting system. *Promet*, 2003, vol. 15, no. 3, pp. 177-184.
17. Zarecky S., Grun J., Zilka J. The newest trends in marshalling yards automation. *Transport Problems*, 2008, tom 3, vol. 4, part 1, pp. 87-95.
18. Zhang C., Li Y. Analysis of Over-speed Coupling Accidents on Hump based on Fuzzy Petri Net. Proc. of 2010 IEEE the 17th Intern. Conf. on Industrial Engineering and Engineering Management, 2010, pp. 1014-1018. doi: 10.1109/ICIEEM.2010.5646453.

Стаття рекомендована до друку д.т.н., проф. В. І. Бобровським (Україна), д.т.н., проф. О. М. Огарем (Україна)

Надійшла до редколегії: 04.04.2016

Прийнята до друку: 06.07.2016



## УДК 656.212.5:629.46

О. А. НАЗАРОВ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup> Каф. «Станції та вузли», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел./факс +38 (067) 636 43 22, ел. пошта lyo8771@mail.ru, ORCID 0000-0001-8837-2041

## ЗНИЖЕННЯ ШВИДКОСТІ ВІДЧЕПІВ НА ПОЧАТКУ СОРТУВАЛЬНИХ КОЛІЙ, ОСНАЩЕНИХ СИСТЕМОЮ РОЗПОДІЛЕНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ

**Мета.** Чітка та безперебійна робота сортувальних гірок залежить від якості технічних засобів та технології регулювання швидкості відчепів. На більшості сортувальних гірок використовується технологія інтервально-прицільного регулювання швидкості відчепів. У статті необхідно проаналізувати способи зниження швидкості скочування відчепів до безпечного рівня на початку сортувальних колій, оснащених системою розподіленого регулювання швидкості. **Методика.** Запропоновано три принципово різні способи зниження швидкості скочування відчепів на початку сортувальних колій. За допомогою моделювання процесу скочування відчепів із гірки, оснащеної системою розподіленого регулювання швидкості, проведений аналіз способів зниження швидкості скочування відчепів до безпечного рівня на початку сортувальних колій. **Результати.** За результатами аналізу встановлено недоцільність використання протиухилу на спускній частині гірки за останнім розділовим стрілочним переводом. Точкові регулятори швидкості вагонів можна використовувати для зниження швидкості скочування відчепів на початку сортувальних колій, але це приводить до погіршення умов розділення на останніх розділових стрілочних переводах довгих відчепів із наступними за ними короткими відчепами. Зниження швидкості скочування відчепів на початку сортувальних колій можна здійснювати за допомогою балкових вагонних уповільнювачів на стаціонарній парковій гальмовій позиції. Алгоритм керування парковою гальмовою позицією доволі простий. Всі відчепи треба випускати з неї із безпечною швидкістю. Якщо точність реалізації заданої швидкості виходу відчепів із паркової гальмової позиції невисока, то є можливість ліквідувати погіршеність точковими регуляторами швидкості вагонів. **Наукова новизна.** Автором виявлена суперечлива взаємозалежність між показниками якості розділення відчепів на розділових стрілочних переводах спускної частини гірки та якістю заповнення сортувальних колій вагонами в умовах обладнання сортувальної гірки системою розподіленого регулювання швидкості відчепів. **Практична значимість.** Результати дослідження можуть бути використані в разі оснащення сортувальної гірки системою розподіленого регулювання швидкості відчепів.

**Ключові слова:** сортувальна гірка; сортувальна колія; ухил колії; відчеп; точкові вагонні уповільнювачі; гальмова позиція; система розподіленого регулювання швидкості

### Вступ

Проблемою регулювання швидкості відчепів займаються багато вчених у світі [2, 3, 7–9, 12]. Актуальним для залізничного транспорту України залишається питання впровадження інноваційних технологій, які підвищують якість і зменшують вплив людського та інших факторів на процес розпуску составів з гірки в цілому, та на процес накопичення вагонів на сортувальних коліях зокрема [1, 11, 13]. На сортувальних гірках, оснащених системою розподіленого регулювання швидкості, за допомогою точкових регуляторів швидкості вагонів забезпечують або інтервальне і прицільне регулювання швидкості відчепів, або лише прицільне

регулювання [5]. Використання точкових регуляторів швидкості вагонів у сортувальному парку теоретично дозволяє накопичувати состави без вікон і без осаджувань маневровим локомотивом з боку гірки, а також забезпечує підхід відчепів до вагонів, які накопичуються на сортувальній колії, з безпечною швидкістю [4, 13]. Є досвід використання точкових регуляторів швидкості вагонів і на спускній частині гірки [10]. Точкові регулятори швидкості вагонів на спускній частині гірки налаштовують на утримання максимально можливого рівня швидкості всіх відчепів в межах стрілочної зони. У залежності від конструкції сортувальної гірки та точкових регуляторів швидкості вагонів цей

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

рівень коливається в межах 3–5 м/с. На сортувальних коліях точкові регулятори швидкості вагонів налаштовують на швидкість спрацьовування від 1 до 1,4 м/с.

### Мета

Метою дослідження є аналіз та оцінка впливу способів зниження швидкості скочування відцепів до безпечного рівня на початку сортувальних колій на показники якості розділення відцепів на розділових стрілочних переводах спускної частини гірки та якості заповнення сортувальних колій вагонами в умовах обладнання сортувальної гірки системою розподіленого регулювання швидкості відцепів.

### Методика

Технологію забезпечення якісного заповнення вагонами сортувальної колії з використанням точкових регуляторів швидкості вагонів можна розділити на два етапи, пов'язані з розв'язанням таких задач:

1) знизити швидкість скочування відцепів до безпечного рівня швидкості підходу відцепів до вагонів на сортувальній колії;

2) підтримувати цей рівень швидкості протягом усього шляху скочування відчепа до точки прицілювання.

Другу задачу розв'язують за допомогою системи розподіленого регулювання швидкості відцепів. Система являє собою низку точкових регуляторів швидкості вагонів, розташованих на сортувальній колії після паркової гальмової позиції. Щільність розташування точкових регуляторів швидкості вагонів на сортувальній колії та ухил сортувальної колії визначаються шляхом пошуку раціонального співвідношення між цими величинами [6].

Як точкові регулятори швидкості вагонів використовують або точкові вагонні уповільнювачі, або точкові вагонні прискорювачі-уповільнювачі. Але точкові прискорювачі-уповільнювачі не працюють автономно, вони потребують живлення від зовнішнього джерела енергії, тому більш поширене використання точкових вагонних уповільнювачів.

Що стосується першої задачі, то її можна розв'язувати різними способами:

1) за допомогою влаштування на початку сортувальних колій паркової гальмової позиції,

обладнаної балковими вагонними уповільнювачами;

2) за допомогою точкових вагонних уповільнювачів, які налаштовані на контрольну швидкість спрацьовування, що поступово падає до рівня безпечної, починаючи від граничного стовпчика за останнім розділовим стрілочним переводом до початку зони накопичення вагонів;

3) за допомогою протиухили на початку сортувальних колій (природної гальмової позиції).

Аналіз доцільності використання кожного з трьох способів зниження швидкості вагонів на сортувальних коліях до безпечного рівня дозволяє виявити переваги й недоліки кожного з них порівняно з традиційною технологією з використанням стаціонарної паркової гальмової позиції, обладнаної балковими вагонними уповільнювачами.

Порівняно з сортувальними гірками, не оснащеними системою розподіленого регулювання швидкості, алгоритм керування парковою гальмовою позицією значно спрощується, тому що всі відчепи можна випускати з гальмової позиції з однаковою швидкістю. Якщо точність реалізації заданої швидкості виходу відцепів із паркової гальмової позиції невисока, є можливість ліквідувати погрішність точковими регуляторами швидкості вагонів, розташованими на сортувальній колії.

Дослідження виконано за допомогою моделювання процесу скочування відцепів з гірки, оснащеної системою розподіленого регулювання швидкості.

### Результати

У результаті дослідження другого способу зниження швидкості відцепів з використанням точкових вагонних уповільнювачів виявлене збільшення ризику нерозділення відцепів на останніх розділових стрілочних переводах спускної частини гірки під час послідовного скочування довгого легкого відчепа й наступного за ним короткого відчепа.

На рис. 1 зображено, як змінюється з часом положення відцепів, що скочуються з гірки в послідовності: одновагонний (короткий) відчеп – восьмивагонний (довгий) відчеп – одновагонний відчеп. Причому положення відцепів позначено координатами першого й останнього

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

автозчепних пристроїв відповідних відчепів.

На фрагменті *a* рис. 1 зображено графіки скочування з гірки послідовності відчепів: короткий – довгий – короткий. Одновагонний відчеп, який скочується після восьмивагонного,

наздоганяє його на останньому розділовому стрілочному переводі. Відбувається нерозділення відчепів. У результаті одновагонний відчеп прямує на чужу колію.

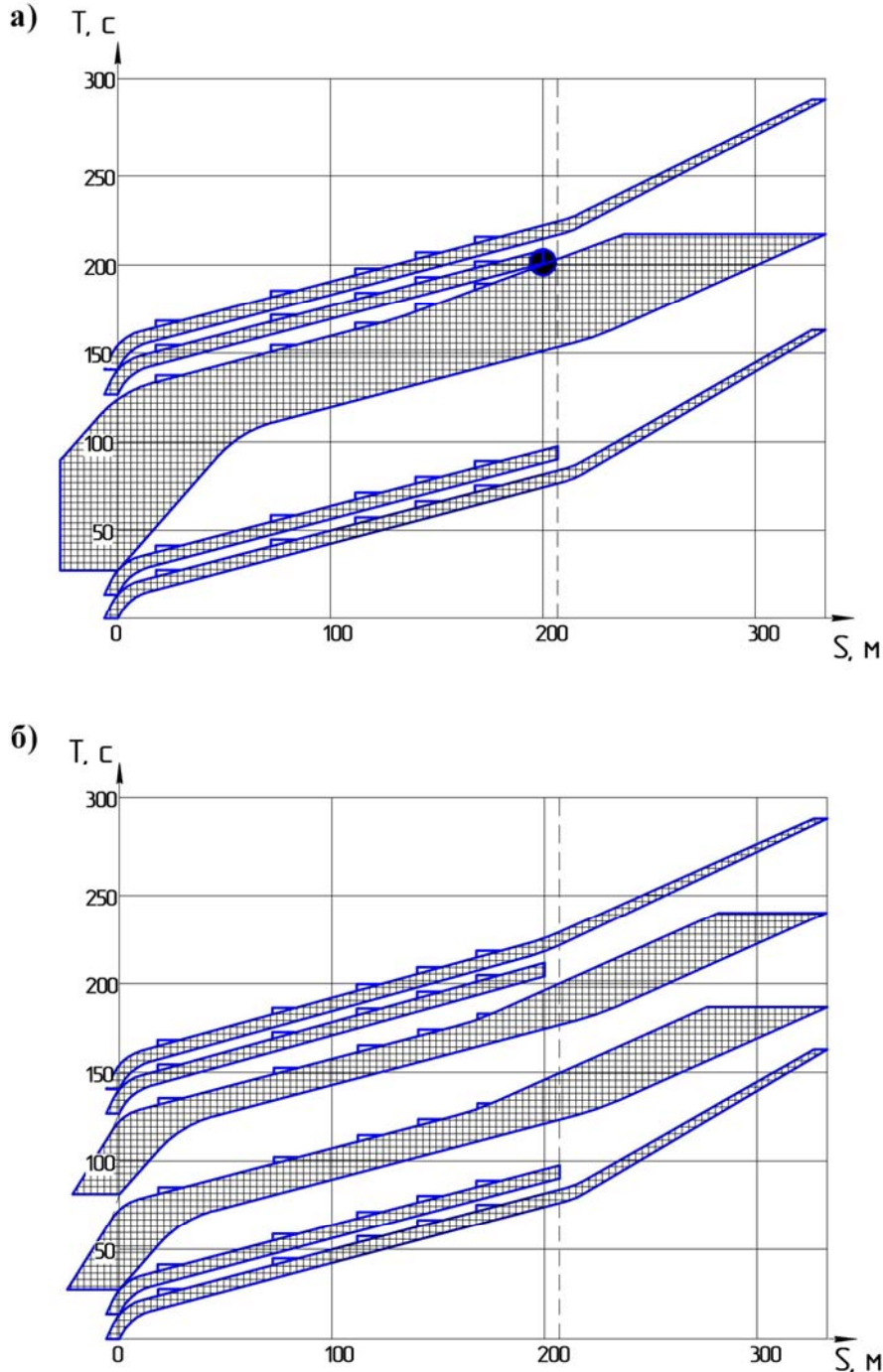


Рис. 1. Графіки залежності тривалості скочування з гірки відчепів від їхнього положення в послідовності: *a* – одновагонний – восьмивагонний – одновагонний; *b* – те саме, але восьмивагонний відчеп розділений навпіл

Fig. 1. Dependency graph of rolling down duration of cuts from humps from their position in the sequence: *a* – single-car – octagon-car – single-car, *b* – it is the same, but octagoh-car is bisected

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Таке відбувається тому, що, коли перші осі довгого відчепа вже гальмуються точковими вагонними уповільнювачами, налаштованими на меншу швидкість спрацьовування, останні осі ще перебувають у стрілочній зоні. Це призводить до того, що наступний короткий відчеп, осі якого гальмуються точковими вагонними уповільнювачами, налаштованими на більшу контрольну швидкість спрацьовування, може наздогнати попередній довгий відчеп.

Швидкість довгого відчепа падає через гальмування його перших осей точковими вагонними уповільнювачами, налаштованими на меншу контрольну швидкість спрацьовування, ніж ті, які розташовані в стрілочній зоні спускної частини гірки.

Цю проблему можна вирішити технічно або технологічно.

Як технічне рішення пропонується відсунути далі від стрілочної зони початок зони установлення точкових вагонних уповільнювачів з меншою контрольною швидкістю спрацьовування, ніж на спускній частині гірки. Але це може призвести до того, що ми не встигнемо знизити швидкість розрахункового відчепа з хорошими ходовими властивостями до безпечного рівня у випадку, коли сортувальна колія майже повністю заповнена вагонами й координата точки прицілювання розташована на початку сортувальної колії. У такому разі збільшиться ризик пошкодження вагонів і вантажів через перевищення безпечної швидкості підходу відцепів до вагонів на сортувальній колії.

Як технологічне рішення пропонується додатково розчіплювати довгі відчепа на більш короткі складачем на гірці. На фрагменті б рис. 1 зображені графіки скочування з гірки восьмивагонного відчепа, розділеного на два чотиривагонні відчепа. Таким чином вирішують проблему нерозділення відцепів, але це призводить до небажаного додаткового навантаження на складача на сортувальній гірці.

Третій спосіб зниження швидкості відцепів на початку колій накопичення запропонований як альтернативний для зменшення кількості точкових регуляторів швидкості вагонів на сортувальних коліях.

Для зниження швидкості скочування відцепів до безпечного рівня на спускній частині гірки за останнім розділовим стрілочним пере-

водом може бути запроєктований протиухил, крутість якого має обмеження по максимально можливій різниці ухилів суміжних ділянок профілю 25 %. Довжина протиухилу розраховується таким чином, щоб за несприятливих умов наприкінці протиухилу швидкість розрахункового відчепа з поганими ходовими властивостями була на рівні 1,4 м/с.

Дослідження показало, що недоліки цього способу такі ж, як і у випадку використання точкових вагонних уповільнювачів для зниження швидкості відцепів на сортувальних коліях до безпечного рівня. До того ж є ще й ризик зупинки розпуску состава через неподолання протиухилу відчепом з поганими ходовими властивостями. Таке може трапитися у випадку зниження швидкості насуву состава на гірку або через перегальмування відцепів із поганими ходовими властивостями на гальмових позиціях спускної частини гірки в разі оснащення лише сортувальних колій системою розподіленого регулювання швидкості відцепів.

### Наукова новизна та практична значимість

Запропоновано три альтернативні способи зниження швидкості відцепів до безпечного рівня на початку сортувальних колій, проаналізовано вплив кожного способу на показники якості розділення відцепів на спускній частині гірки та показники якості заповнення сортувальних колій вагонами в умовах обладнання сортувальної гірки системою розподіленого регулювання швидкості відцепів.

### Висновки

1. Виконаний аналіз способів зниження швидкості скочування відцепів до безпечного рівня на початку сортувальних колій доводить недоцільність використання протиухилу на спускній частині гірки за останнім розділовим стрілочним переводом. Точкові регулятори швидкості вагонів можна використовувати для зниження швидкості скочування відцепів на початку сортувальних колій, але це призводить до погіршення умов розділення на останніх розділових стрілочних переводах довгих відцепів із наступними за ними короткими відчепами. Для усунення цієї проблеми рекомендується додатково розчіплювати довгі відчепа, особливо

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

у випадках, коли за ними прямують короткі відчепи, з розділенням на останніх розділових стрілочних переводах.

2. Недоцільно відсовувати зону розташування точкових вагонних уповільнювачів для зниження швидкості відчепів до безпечного рівня у бік зони накопичення вагонів на сортувальних коліях, тому що тоді збільшується ризик не встигнути загальмувати важкі відчепи з гарними ходовими властивостями до безпечної швидкості підходу до вагонів на сортувальній колії. Питання, де починати зону розташування точкових вагонних уповільнювачів для зниження рівня швидкості відчепів, потребує додаткових досліджень.

3. Зниження швидкості скочування відчепів на початку сортувальних колій можна здійснювати за допомогою балкових вагонних уповільнювачів на стаціонарній парковій гальмовій позиції. Алгоритм керування парковою гальмовою позицією доволі простий. Всі відчепи треба випускати з неї з безпечною швидкістю. Якщо точність реалізації заданої швидкості виходу відчепів із паркової гальмової позиції не висока, то є можливість ліквідувати погіршеність точковими регуляторами швидкості вагонів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Бобровский, В. И. Анализ влияния параметров продольного профиля сортировочной горки на динамику скатывания отцепов / В. И. Бобровский, А. И. Колесник // Транспортні системи та технології перевезень : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 3. – С. 10–14.
- Бобровский, В. И. Регулирование швидкості скочування відчепів на автоматизованих сортувальних гірках / В. И. Бобровский, А. С. Дорош // Развитие научной и инновационной деятельности на транспорте : тезисы доп. 77 междунар. науч.-практ. конф. (21.04–23.04.2015) / Укр. держ. акад. залізн. трансп. – Харьков, 2015. – С. 281–282.
- Козаченко, Д. М. Дослідження допустимих режимів гальмування відчепів на сортувальних гірках / Д. М. Козаченко // Восточно-Европ. журн. передовых технологий. – 2013. – № 4/3 (64). – С. 25–28.
- Назаров, А. А. Анализ возможности применения систем квазинепрерывного регулирования скорости отцепов типа DOWTY на сортировочных горках / А. А. Назаров // Зб. наук. пр. Київ. ун-ту економіки і технологій трансп. Серія: «Транспортні системи і технології». – Київ, 2003. – Вип. 4. – С. 61–66.
- Назаров, О. А. Ефективність систем розподіленого регулювання швидкості вагонів на сортувальних коліях / О. А. Назаров // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 34. – С. 193–198.
- Назаров, А. А. Определение рационального соотношения между уклоном сортировочного пути и плотностью расстановки точечных регуляторов скорости отцепов / А. А. Назаров // Транспортні системи та технології перевезень : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 3. – С. 77–80.
- Огар, О. М. Дослідження ефективності застосування технології гравітаційно-прицільного гальмування відчепів / О. М. Огар, К. В. Таратунка // Транспортні системи та технології перевезень : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2015. – Вип. 9. – С. 49–56. doi: 10.15802/tstt2015/49354.
- Analysis of Hump Automation in China / C. Zhang, Y. Wei, G. Xiao [et al.] // Traffic and Transportation Studies : Proc. of Second Intern. Conf. (31.07–02.08.2000). – Beijing, China, 2000. – P. 285–290. doi: 10.1061/40503(277)45.
- Dorosh, A. S. Determination of Braking Optimal Mode of Controlled Cut of Design Group / A. S. Dorosh // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 3 (57). – С. 36–44. doi: 10.15802/stp-2015/46044.
- Dreyer, A. I. Sentrarand Marshalling Yard: the mechanical engineering involvement / A. I. Dreyer, J. S. F. Marais, H. J. Steyn // Die siviele ingenieur in Suid-Afrika. – 1982. – Nov. – P. 608–611, 613–614.
- Lanchin, W. Speed Control and Braking System Automation of Wagon Parking System / W. Lanchin, M. M. Santos, A. B. Lugli // Industry Applications (Induscon) : 11th IEEE/IAS Intern. Conf. (7.12–10.12.2014). – Juiz de Fora, 2014. – P. 1–6. doi: 10.1109/INDUSCON.2014.7059395.
- Probabilistic Approach for the Determination of Cuts Permissible Braking Modes on the Gravity Humps / V. Bobrovskyi, D. Kozachenko, A. Dorosh [et al.] // Transport problems. Problemy transportu. – 2016. – Vol. 11. – Iss. 1. – P. 147–155. doi: 10.20858/tp.2016.11.1.14.
- Zhang, C. Analysis of Over-speed Coupling Accidents on Hump based on Fuzzy Petri Net /

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

C. Zhang, Y. Li // Industrial Engineering and Engineering Management (IE&EM) : 17th Intern. Conf. (29.10–31.10.2010). – Xiamen, 2010. –

P. 1014–1018. doi: 10.1109/ICIEEM.2010.564-6453.

А. А. НАЗАРОВ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Станции и узлы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел./факс +38 (067) 636 43 22, эл. почта lyo8771@mail.ru, ORCID 0000-0001-8837-2041

## СНИЖЕНИЕ СКОРОСТИ ОТЦЕПОВ В НАЧАЛЕ СОРТИРОВОЧНЫХ ПУТЕЙ, ОСНАЩЕННЫХ СИСТЕМОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ

**Цель.** Четкая и бесперебойная работа сортировочных горок зависит от качества технических средств и технологии регулирования скорости отцепов. На большинстве сортировочных горок используется технология интервально-прицельного регулирования скорости отцепов. В статье необходимо проанализировать способы снижения скорости скатывания отцепов до безопасного уровня в начале сортировочных путей, оснащенных системой распределенного регулирования скорости. **Методика.** Предложены три принципиально разных способов снижения скорости скатывания отцепов в начале сортировочных путей. С помощью моделирования процесса скатывания отцепов с горки, оснащенной системой распределенного регулирования скорости, проведен анализ способов снижения скорости скатывания отцепов до безопасного уровня в начале сортировочных путей. **Результаты.** По результатам анализа установлена нецелесообразность использования противоуклона на спускной части горки за последним разделительным стрелочным переводом. Точечные регуляторы скорости вагонов можно использовать для снижения скорости скатывания отцепов в начале сортировочных путей, но это приводит к ухудшению условий разделения на последних разделительных стрелочных переводах длинных отцепов со следующими за ними короткими отцепами. Снижение скорости скатывания отцепов в начале сортировочных путей можно осуществлять с помощью балочных вагонных замедлителей на стационарной парковой тормозной позиции. Алгоритм управления парковой тормозной позицией довольно прост. Все отцепы надо выпускать из нее с безопасной скоростью. Если точность реализации заданной скорости выхода отцепов с парковой тормозной позиции невысокая, то есть возможность ликвидировать погрешность точечными регуляторами скорости вагонов. **Научная новизна.** Автором выявлена противоречивая взаимосвязь между показателями качества разделения отцепов на разделительных стрелочных переводах спускной части горки и качеством заполнения сортировочных путей вагонами в условиях оборудования сортировочной горки системой распределенного регулирования скорости отцепов. **Практическая значимость.** Результаты исследования могут быть использованы в случае оснащения сортировочной горки системой распределенного регулирования скорости отцепов.

**Ключевые слова:** сортировочная горка; сортировочный путь; уклон пути; отцеп; точечные вагонные замедлители; тормозная позиция; система распределенного регулирования скорости

O. A. NAZAROV<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Stations and Junctions», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel./fax +38 (067) 636 43 22, e-mail lyo8771@mail.ru, ORCID 0000-0001-8837-2041

## REDUCTION IN CUTS SPEED AT THE BEGINNING OF A SORTING SIDINGS, EQUIPPED WITH QUASI-CONTINUOUS SPEED CONTROL SYSTEM

**Purpose.** Clear and uninterrupted operation of humps depends on the quality of technical equipment and control technology of cuts speed. Technology of interval and purposive regulation of cuts speed is used at most humps. The article discusses ways to reduce the cuts rolling speed to a safe level at the beginning of the sorting sidings equipped with quasi-continuous speed control system. **Methodology.** It proposed three fundamentally different ways to reduce the cuts rolling speed at the beginning of the sorting sidings. The analysis of the ways to reduce cuts rolling speed to a safe level at the beginning of the sorting sidings was conducted using simulation the process of cuts rolling from humps equipped with quasi-continuous speed control. **Findings.** As a result of analysis, the inappropriateness of opposite elevation using on the roll-out part of the hump after the last separation switch point was established. Point regulators of cars speed can be used to reduce the cuts rolling speed at the beginning of the sorting sidings, but this leads to a division conditions deterioration on the last separating switch points of long cuts with the following after them short cuts. Reducing the cuts rolling speed at the beginning of the sorting sidings can be carried out using the beam retarders on the stationary park retarder position. Control algorithm of park retarder position is quite simple. All cuts should be released from it with a safe speed. If the implementation accuracy of the given speed when release of cuts from the park retarder position is low, it is possible to eliminate the error with point regulators of cars speed. **Originality.** The author has detected a contradictory relationship between the quality indicators of cuts division on the separation switch points of hump lowering section and loading quality of sorting sidings with cars in conditions of equipping the humps by quasi-continuous speed control system of cuts speed. **Practical value.** Results of the study can be used in case of equipping the hump with quasi-continuous speed control system of cuts speed.

**Keywords:** hump; sorting siding; slope of siding; cut; point car retarders; retarder position; quasi-continuous speed control system

### REFERENCES

1. Bobrovskiy V.I., Kolesnik A.I. Analiz vliyaniya parametrov prodolnogo profilya sortirovochnoy gorki na dinamiku skatyvaniya ottsepov [Analysis of the effect of the parameters of longitudinal profile hump on the dynamics of rolling unhook]. *Zbirnyk naukovykh prats Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana «Transportni sistemi ta tekhnologii perevezhen»* [Proc. «Transport systems and transportation technologies»], 2012, issue 3, pp. 10-14.
2. Bobrovskiy V.I., Dorosh A.S. Rehulivannia shvydkosti skochuvannia vidchepiv na avtomatyzovanykh sortuvalnykh hirkakh [Rolling-down speed control of cuts on automated humps]. *Tezy dopovidei 77-yi mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Rozvytok naukovoi ta innovatsiinoi diialnosti na transporti» (21.04-23.04.2015)* [Proc. of 77<sup>th</sup> Int. Sci. and Practical. Conf. «Development of Scientific and innovative activity at transport»]. Kharkiv, 2015, pp. 281-282.
3. Kozachenko D.M. Doslidzhennia dopustymykh rezhymiv halmuvannia vidchepiv na sortuvalnykh hirkakh [Research of permissible braking modes of cuts on humps]. *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy – East European Journal of Advanced Technologies*, 2013, no. 3 (64), vol. 4, pp. 25-28.
4. Nazarov A.A. Analiz vozmozhnosti primeneniya sistem kvazinepreryvnogo regulirovaniya skorosti ottsepov tipa DOWTY na sortirovochnykh gorkakh [Application possibility analysis of systems of quasi-continuous speed control of cuts, type DOWTY on humps]. *Zbirnyk naukovykh prats Kyivskoho univversytetu ekonomiky i tekhnologii transportu. Seriya «Transportni systemy i tekhnologii»* [Proc. of Kyiv University of Economy and Transport Technology. Series «Transport systems and transportation technologies»]. Kyiv, 2004, issue 4, pp. 61-66.
5. Nazarov O.A. Efektyvnist system rozpodilenoho rehulivannia shvydkosti vahoniv na sortuvalnykh koliiakh [The effectiveness of the systems of distributed control the speed of the car at the sorting path]. *Visnyk*

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

- Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 34, pp. 193-198.
6. Nazarov A.A. Opredeleniye ratsionalnogo sootnosheniya mezhdu uklonom sortirovochnogo puti i plotnostyu rasstanovki tochechnykh regulyatorov skorosti ottsepov [Determination of rational betweenness by slope of sorting siding and dencity of placing of point cut speed regulators]. *Zbirnyk naukovykh prats Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana «Transportni sistemi ta tekhnologii perevezen»* [Proc. «Transport systems and transportation technologies»], 2012, issue 3, pp. 77-80.
  7. Ohar O.M., Taratushka K.V. Doslidzhennia efektyvnosti zastosuvannya tekhnologii hravitatsiino-prysilnoho halmuvannya vidchepiv [Research of efficiency of application of technology of gravitational-targeted inhibition of cuts]. *Zbirnyk naukovykh prats Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana «Transportni sistemi ta tekhnologii perevezen»* [Proc. «Transport systems and transportation technologies»], 2015, issue 9, pp. 49-56. doi: 10.15802/tstt2015/49354.
  8. Zhang C., Wei Y., Xiao G., Wang Z., Fu J. Analysis of Hump Automation in China. *Traffic and Transportation Studies*, 2000, pp. 285–290. doi: 10.1061/40503(277)45.
  9. Dorosh A.S. Determination of Braking Optimal Mode of Controlled Cut of Design Group. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no. 3 (57), pp. 3644. doi: 10.15802/stp2015/46044.
  10. Dreyer A.I., Marais J.S.F., Steyn H.J. Sentrand Marshalling Yard: the mechanical engineering involvement. *Die siviele ingenieur in Suid-Afrika*, 1982, November, pp. 608-611, 613-614.
  11. Lanchin W., Santos M.M., Lugli A.B. Speed Control and Braking System Automation of Wagon Parking System. *Industry Applications (Induscon): 11th IEEE/IAS Intern. Conf. (7.12–10.12.2014)*. Juiz de Fora, 2014, pp. 1-6. doi: 10.1109/INDUSCON.2014.7059395.
  12. Bobrovskiy V., Kozachenko D., Dorosh A., Demchenko E., Bolvanovska T., Kolesnik A. Probabilistic Approach for the Determination of Cuts Permissible Braking Modes on the Gravity Humps. *Transport problems – Problemy transportu*, 2016, vol. 11, issue 1, pp. 147-155. doi: 10.20858/tp.2016.11.1.14.
  13. Zhang C., Li Y. Analys is of Over-speed Coupling Accidents on Hump based on Fuzzy Petri Net. *Industrial Engineering and Engineering Management (IE&EM): 17Th Intern. Conference on (29.10-31.10.2010)*. Xiamen, IEEE, 2010, pp. 1014-1018. doi: 10.1109/ICIEEM.2010.5646453.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. І. Бобровським (Україна); д.т.н., проф. О. М. Огарем (Україна)

Надійшла до редколегії: 21.03.2016

Прийнята до друку: 04.07.2016



## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.439

В. А. ПОЛЯКОВ<sup>1</sup>, Н. М. ХАЧАПУРИДЗЕ<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Институт транспортных систем и технологий НАН Украины, ул. Писаржевского, 5, Днепропетровск, Украина, 49005, тел. +38 (056) 232 30 55, эл. почта p\_v\_a\_725@mail.ru, ORCID 0000-0002-4957-8028

<sup>2\*</sup>Институт транспортных систем и технологий НАН Украины, ул. Писаржевского, 5, Днепропетровск, Украина, 49005, тел. +38 (056) 370 21 86, эл. почта itst@westa-inter.com, ORCID 0000-0003-0682-6068

### МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РЕАЛИЗАЦИИ ТЯГОВОЙ СИЛЫ ДВИГАТЕЛЯ МАГНИТОЛЕВИТИРУЮЩЕГО ПОЕЗДА

**Цель.** Реализация тяги (РТ) двигателем магнитолевитирующего поезда (МЛП) происходит в процессе преобразования подводимой электрической энергии в кинетическую при взаимодействии магнитных полей индуктора и якоря. Исходя из этого, целью настоящего исследования является получение корректного описания такого энергопреобразования. **Методика.** На современном этапе основным и наиболее универсальным инструментом анализа и синтеза процессов и систем является их математическое и, в частности, компьютерное моделирование. В то же время, радикальные преимущества этого инструмента делают еще более важной прецизионность выбора конкретной методики проведения исследования. Особую актуальность это имеет по отношению к столь большим и сложным системам, какими являются МЛП. По этой причине в работе особое внимание уделено аргументированному обоснованию выбора селективных особенностей исследовательской парадигмы. **Результаты.** Данные, полученные в результате анализа существующих версий модели процесса РТ, свидетельствуют о том, что каждая из них, наряду с преимуществами, обладает и существенными недостатками. В связи с этим, одним из основных результатов исследования было построение математической модели указанного процесса, сохраняющей преимущества упомянутых версий, но свободной от их недостатков. В работе аргументированно обоснована рациональность применения (для целей исследования РТ двигателя поезда) интегративной холистической парадигмы, ассимилирующей преимущества теорий электрических цепей и магнитного поля. **Научная новизна.** Приоритетность создания такой парадигмы, а также соответствующей версии модели РТ составляют научную новизну исследования. **Практическая значимость.** Основным проявлением практической значимости работы является возможность, в случае использования ее результатов, существенного повышения эффективности динамических исследований МЛП при одновременном неповышении их ресурсоёмкости.

**Ключевые слова:** магнитолевитирующий поезд; линейный синхронный двигатель; реализация тяги; интегративная парадигма исследования; математическая модель

#### Введение

Во многих случаях для целей тяги магнитолевитирующих поездов (МЛП) целесообразно использовать линейные синхронные двигатели (ЛСД) [3, 12, 13, 14, 16]. Процессы, протекающие в их различных элементах, взаимосвязаны и являются частями единого суперпроцесса электромагнитно-механического энергопреоб-

разования. Существенная сложность таких процессов побуждает исследователей к поиску путей сепаратного изучения их отдельных компонентов, ключевым из которых является электромагнитный. Его составляющие порознь с успехом могут изучаться [4, 15, 17] в рамках теорий электрических цепей либо электромагнитного поля. Поэтому, различные версии ма-

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

тематической модели (ММ) процесса тяги (ПТ) ЛСД МЛП строились [8, 9, 19] исходя из указанных автономных парадигм его моделирования.

Анализ свойств имеющихся версий ММ ПТ ЛСД МЛП свидетельствует о том, что каждая из них обладает как преимуществами, так и недостатками. Версии модели, исходящие из теории электрических цепей, достаточно функциональны. Но основным недостатком их уравнений является нестационарность коэффициентов, вызываемая переменностью значений взаимных индуктивностей контуров фаз якоря как между собой, так и с контурами возбуждения, при изменении положения муфтера (подвижных частей ЛСД). Это снижает ценность версий, поскольку затрудняет моделирование [11]. Версии же модели, базирующиеся на теории поля, менее ресурсоемки, однако и менее практичны – вследствие ограниченности их общности, вызываемой недостаточной адекватностью предположений построения этих версий.

**Задача исследования.** Изложенное свидетельствует об актуальности создания ММ ПТ ЛСД МЛП, ассимилирующей достоинства имеющихся версий такой модели, но свободной от их недостатков [5, 11, 18, 20]. Синтез такой модели является основной задачей настоящей работы.

**Методика исследования.** Тяга ЛСД является результатом взаимодействия неподвижных друг относительно друга магнитных полей токов его индуктора и якоря. Поэтому, при построении искомой ММ ПТ, в качестве его паттерна должен быть принят элементарный акт такого взаимодействия, который может быть описан выражением закона Ампера [1]:

$$f_{\lambda\chi} = l_{\lambda\chi} \cdot i^{\lambda} \cdot B_{\lambda\chi} \cdot \sin \alpha_{\lambda\chi},$$

где  $f_{\lambda\chi}$  – сила взаимодействия полей, создаваемых токами, текущими в цепях  $\chi$ -го прямолинейного элемента  $\lambda$ -го контура индуктора двигателя и его якоря;  $l_{\lambda\chi}$ ,  $i^{\lambda}$ ,  $B_{\lambda\chi}$ ,  $\alpha_{\lambda\chi}$  – длина упомянутого элемента, ток в нем, индукция (условно однородного – в пределах элемента) магнитного поля, в котором элемент находится, а также угол между  $i^{\lambda}$  и  $B_{\lambda\chi}$ .

Расчетные схемы обмоток возбуждения и якоря двигателя приняты, соответственно, в виде набора гальванически не связанных токопроводящих прямоугольных рамок, соответствующих контурам криомодулей, и трехфазной электрической сети, каждой фазе которой соответствует отдельный контур. Тогда, в произвольный момент времени тяга двигателя определима как векторная сумма величин  $\overline{f}_{\lambda\chi}$   $\forall \lambda \in [\overline{1, N}]$ ,  $\chi \in [\overline{1, 4}]$ , каждая из которых – это результат взаимодействия поля тока в одном из упомянутых прямолинейных элементов контуров возбуждения с полем, создаваемым токами якорной обмотки. В последнем выражении  $N$  – число контуров возбуждения двигателя.

Электродинамика двигателя может быть описана уравнениями второго закона Кирхгофа [1]. Подсистема «контур возбуждения – якорная обмотка», как правило, вырождена [7] – емкостные показатели ее элементов пренебрежимо низки. Поэтому, в инерциальной системе отсчета  $Qi^v \forall v \in [A, B, C, M]$  указанным уравнениям может быть придан вид [1]:

$$u_p = L_p \cdot \frac{d}{dt} i^p + L_{p\mu} \cdot \frac{d}{dt} i^{\mu} + r_p \cdot i^p$$

$$\forall p, \mu \in [A, B, C, M], \quad (1)$$

где  $u_p, L_p, L_{p\mu}, r_p \forall p, \mu \in [A, B, C, M]$  – электродвижущие силы (э. д. с.) источников, собственные и взаимные индуктивности, а также омические сопротивления элементов описываемой парциальной подсистемы;  $i^p \forall p \in [A, B, C, M]$  – токи в контурах якоря и возбуждения;  $A, B, C, M$  – индексы, соответствующие этим контурам;  $t$  – текущее время.

Поскольку муфтер ЛСД движется относительно его статора, то многие из величин  $L_{p\mu} \forall p, \mu \in [A, B, C, M]$  имеют переменные во времени значения. Это, в свою очередь, приводит к нестационарности коэффициентов уравнений (1) и, как отмечено, существенно снижает практическую ценность версии модели. С целью устранения указанного недостатка, ПТ ЛСД следует рассматривать относительно координатной системы, в которой обмотки двигателя условно взаимно неподвижны. В таком качестве

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

ве удобнее всего принять [11] отсчетную систему  $C_\alpha \eta^\lambda \forall \lambda \in [\overline{1,3}]$ , жестко связанную с  $\alpha$ -тым контуром обмотки возбуждения двигателя. Инерциальной  $C_\alpha \eta^\lambda \forall \lambda \in [\overline{1,3}]$ , в общем случае, не является. В то же время, весьма желательно [6], чтобы уравнения, описывающие динамику электрической подсистемы ЛСД в координатах  $\eta^\lambda \forall \lambda \in [\overline{1,3}]$ , имели тензорный характер. Такие уравнения могут быть получены [10], из равенств типа (1), путем замены в них локальных производных  $\frac{d}{dt}$  абсолютными  $\frac{D}{dt}$ , а также перехода в этих равенствах к координатам  $\eta^\lambda \forall \lambda \in [\overline{1,3}]$ . По отношению к произвольному вектору  $\eta^\beta$ , соотношение между упомянутыми производными, как известно, имеет вид [10]:

$$\frac{D}{dt} \eta^\beta = \frac{d}{dt} \eta^\beta + e_{\beta\kappa\nu} \cdot \omega_\kappa \cdot \eta^\nu,$$

где  $e_{\beta\kappa\nu}$ ,  $\omega_\kappa$  – символ Леви-Чивита, а также вектор угловой скорости вращения  $C_\alpha \eta^\lambda \forall \lambda \in [\overline{1,3}]$ .

После осуществления указанной замены производных, соотношения, полученные из (1), приобретают тензорный характер. Поэтому, в частности, их форма становится инвариантной по отношению к координатам, в которых они записаны. Переход же к координатам  $\eta^\lambda \forall \lambda \in [\overline{1,3}]$  выполняется согласно выражениям:

$$\eta^\lambda = \mathfrak{g}_\rho^\lambda \cdot i^\rho \forall \rho \in [A, B, C, M]; \lambda \in [\overline{1,3}],$$

где  $\mathfrak{g}_\rho^\lambda$  – матрица преобразования координат:

$$\mathfrak{g}_\rho^\lambda = \frac{\partial \eta^\lambda}{\partial i^\rho} \forall \rho \in [A, B, C, M]; \lambda \in [\overline{1,3}].$$

В свою очередь, выражения для связей вида

$$\eta^\lambda = \eta^\lambda(i^\rho) \forall \rho \in [A, B, C, M]; \lambda \in [\overline{1,3}]$$

могут быть получены исходя из того, что в процессе описываемого координатного преобразования [11] одним из его инвариантов являются, в частности, амплитудные значения токов, протекающих в рассматриваемых контурах.

С помощью же матрицы

$$\mathfrak{g}_\lambda^\rho = \frac{\partial i^\rho}{\partial \eta^\lambda} = (\mathfrak{g}_\rho^\lambda)^T$$

$$\forall \rho \in [A, B, C, M]; \lambda \in [\overline{1,3}],$$

осуществимо обратное преобразование

$$i^\rho = \mathfrak{g}_\lambda^\rho \cdot \eta^\lambda \forall \rho \in [A, B, C, M]; \lambda \in [\overline{1,3}]. \quad (2)$$

После описанных преобразований, уравнения (1) приобретают вид

$$\begin{aligned} u_\lambda = L_\lambda \cdot \left( \frac{d}{dt} \eta^\lambda + e_{\lambda\alpha\nu} \cdot \omega_\alpha \cdot \eta^\nu \right) + \\ + L_{\lambda\zeta} \cdot \left( \frac{d}{dt} \eta^\zeta + e_{\zeta\alpha\sigma} \cdot \omega_\alpha \cdot \eta^\sigma \right) + r_\lambda \cdot \eta^\lambda \\ \forall \lambda, \nu, \zeta, \sigma \in [\overline{1,3}]. \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, уравнения (3) имеют постоянные коэффициенты, являются тензорными и описывают электродинамику ЛСД в координатах  $\eta^\lambda \forall \lambda \in [\overline{1,3}]$ . После их (как правило – численного) разрешения относительно переменных  $\eta^\lambda \forall \lambda \in [\overline{1,3}]$  последние с использованием соотношений (2) могут быть преобразованы в координаты  $i^\rho \forall \rho \in [A, B, C, M]$ , значения которых определяют реальные токи в контурах двигателя.

Магнитная цепь ЛСД предполагается ненасыщенной [9]. Поэтому она может считаться условно-линейной подсистемой и, следовательно, к ней применим принцип аддитивности. Исходя из этого, результирующее поле фазы якорной обмотки двигателя в любой точке геометрического пространства  $O\Xi_\chi \forall \chi \in [\overline{1,3}]$ , в котором реально движется муфтер относительно статора, может описываться как сумма полей, создаваемых в этой точке отдельными катушками такой фазы:

$$\begin{aligned} B_{\alpha q} = B_{\alpha\kappa q} \cdot e^\kappa; e^\kappa = 1 \\ \forall \kappa \in [\overline{1, n_p}], q \in [\overline{1, 3}], \end{aligned} \quad (4)$$

где  $n_p$  – число прямоугольных катушек [3],

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

включенных в каждую из фаз якоря;  $B_{\alpha q}, B_{\alpha \kappa q} \forall \kappa \in [1, n_p]; q \in [1, 3]$  – пространственные компоненты индукции поля, создаваемого всей обмоткой фазы  $\alpha$  якоря, а также ее отдельными катушками в рассматриваемой точке этого пространства.

В свою очередь, значения величин  $B_{\alpha \kappa q} \forall \kappa \in [1, n_p]; q \in [1, 3]$  определимы согласно выражениям [2]:

$$B_{\alpha \kappa 1} = -\frac{i^*}{4 \cdot \pi} \times$$

$$\times \left\{ \left[ F_{12}(k_1', \varphi', \eta) + F_{12}(k_3', \varphi', \eta) \right]_{\varphi_1' = x_0 - l}^{\varphi_2' = x_0 - l - d} - \right.$$

$$\left. - \left[ F_{12}(k_2', \psi', \eta) + F_{12}(k_4', \psi', \eta) \right]_{\psi_1' = x_0 + l}^{\psi_2' = x_0 + l + d} \right\}_{\eta_1 = z_0 + h}^{\eta_2 = z_0 - h};$$

$$B_{\alpha \kappa 2} = -\frac{i^*}{4 \cdot \pi} \times$$

$$\times \left\{ \left[ F_{12}(k_1, \varphi, \eta) + F_{12}(k_4, \varphi, \eta) \right]_{\psi_1' = x_0 + l}^{\varphi_2' = x_0 + l + d} - \right.$$

$$\left. - \left[ F_{12}(k_2, \psi, \eta) + F_{12}(k_3, \psi, \eta) \right]_{\psi_1 = y_0 + a}^{\psi_2 = y_0 + a + d} \right\}_{\eta_1 = z_0 + h}^{\eta_2 = z_0 - h};$$

$$\left\{ F_{12}(k, \varphi, \eta) \right\}_{\eta_1 = z_0 + h}^{\eta_2 = z_0 - h} =$$

$$= \left\{ \eta \cdot \operatorname{arctg} \frac{k \cdot \varphi - \eta^2}{\eta \cdot \sqrt{(k + \varphi)^2 + \varphi^2 + \eta^2}} - \right.$$

$$\left. - \varphi \cdot \operatorname{arsh} \frac{k + \varphi}{\sqrt{\varphi^2 + \eta^2}} - \frac{k}{\sqrt{2}} \cdot \operatorname{arsh} \frac{k + 2 \cdot \varphi}{\sqrt{k^2 + 2 \cdot \eta^2}} \right\}_{\eta_1 = z_0 + h}^{\eta_2 = z_0 - h};$$

$$B_{\alpha \kappa 3} = -\frac{i^*}{4 \cdot \pi} \times$$

$$\times \left\{ \left[ f_3^0(k_1, \varphi, \eta) + f_3^0(k_4, \varphi, \eta) \right]_{\varphi_1 = y_0 - a}^{\varphi_2 = y_0 - a - d} - \right.$$

$$\left. - \left[ f_3^0(k_2, \psi, \eta) + f_3^0(k_3, \psi, \eta) \right]_{\psi_1 = y_0 + a}^{\psi_2 = y_0 + a + d} \right\}_{\eta_1 = z_0 + h}^{\eta_2 = z_0 - h};$$

$$+ \left[ f_{31}(k_1', \varphi', \eta) + f_{31}(k_3', \varphi', \eta) \right]_{\varphi_1' = x_0 - l}^{\varphi_2' = x_0 - l - d} -$$

$$- \left[ f_{31}(k_2', \psi', \eta) + f_{31}(k_4', \psi', \eta) \right]_{\psi_1' = x_0 + l}^{\psi_2' = x_0 + l + d} \right\}_{\eta_1 = z_0 + h}^{\eta_2 = z_0 - h}$$

$$\forall \kappa \in [1, n_p];$$

$$f_{31}(k, \varphi, \eta) = -\eta \cdot \operatorname{arsh} \frac{k + \varphi}{\sqrt{\varphi^2 + \eta^2}} +$$

$$+ \varphi \cdot \operatorname{arctg} \frac{(k + \varphi) \cdot \eta}{\varphi \cdot \sqrt{(k + \varphi)^2 + \varphi^2 + \eta^2}};$$

$$f_{32}(k, \varphi, \eta) = \sqrt{2} \cdot \eta \cdot \operatorname{arsh} \frac{k + 2 \cdot \varphi}{\sqrt{k^2 + 2 \cdot \eta^2}} -$$

$$- k \cdot \operatorname{arctg} \frac{(k + 2 \cdot \varphi) \cdot \eta}{k \cdot \sqrt{(k + \varphi)^2 + \varphi^2 + \eta^2}};$$

$$f_3^0(k, \varphi, \eta) = f_{31}(k, \varphi, \eta) + f_{32}(k, \varphi, \eta);$$

$$k_1' = -k_1 = [(y_0 - a) - (x_0 - l)];$$

$$k_2' = -k_2 = [(y_0 + a) - (x_0 + l)];$$

$$k_3' = k_3 = -[(y_0 + a) + (x_0 - l)];$$

$$k_4' = k_4 = -[(y_0 - a) + (x_0 + l)], \quad (5)$$

где  $i^*$  – плотность тока на единицу площади сечения обмотки катушки;  $2 \cdot h, d$  – высота и толщина ее обмотки;  $2 \cdot l, 2 \cdot a$  – размеры ее же внутреннего пространства;  $x_0, y_0, z_0$  – координаты точки пространства, в которой описывается поле.

В выражениях (5), кроме того:

$$i^* = 0,5 \cdot i \cdot w \cdot (h \cdot d)^{(-1)}, \quad (6)$$

где  $w$  – число витков катушки.

Далее, в (6), вместо  $i$ , последовательно подставляются значения фазовых токов якоря  $i^p \forall p \in [A, B, C]$  и, согласно (5) и (4), находятся компоненты  $B_{\rho q} \forall \rho \in [A, B, C], q \in [1, 3]$  индукции поля, создаваемого каждым из них.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Пространство системы  $O\Xi_\chi \forall \chi \in [1,3]$  – евклидово. Поэтому мгновенное значение модуля вектора полной индукции поля, создаваемого током  $p$ -ой фазы якоря, может быть определено выражением

$$B_p = \sqrt{B_{pq}^{(2)} \cdot e^q}; e^q = 1$$

$$\forall p \in [A, B, C], q \in [1, 3].$$

Каждое из значений  $B_\alpha$  пропорционально порождающему его  $i^\alpha$ , изменяющемуся косинусоидально. Поэтому индукция полного поля якоря в целом изменяется [11] согласно закону

$$B_{res} = 1,5 \cdot B_{max} \cdot \exp(-j \cdot \omega \cdot t);$$

$$j^{(2)} = -1,$$

где  $B_{max}, \omega$  – амплитуда и частота изменения индукции поля одного из токов  $i^p \forall p \in [A, B, C]$ .

*Результат исследования, верифицирующий его корректность.* На основании синтезированной ММ ПТ ЛСД МЛП была построена соответствующая компьютерная модель. В качестве примера результатов функционирования последней, на рис. 1 приведена полученная осциллограмма силы тяги двигателя в режиме разгона МЛП. Анализ этого результата свидетельствует о работоспособности моделей, а поэтому – об их пригодности, после верификации и необходимой адаптации к нуждам конкретных практических задач, к использованию в процессе исследований динамики МЛП, оснащенных ЛСД.

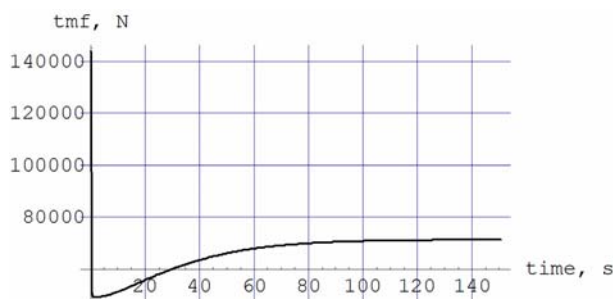


Рис. 1. Сила тяги ЛСД МЛП

Fig. 1. Tractive effort of LSM MLT

### Научная новизна и практическая значимость

Научная новизна исследования усматривается в приоритетности создания интегративной холистической парадигмы, ассимилирующей преимущества теорий электрических цепей и магнитного поля, а также соответствующей версии модели РТ двигателя.

Практическая значимость создания указанных парадигмы и модели состоит, очевидно, в возможности существенного повышения эффективности динамических исследований МЛП, на фоне неповышения их ресурсоемкости, при использовании в их процессе созданных парадигмы и модели.

### Выводы

Создана версия ММ ПТ ЛСД МЛП, ассимилирующая достоинства версий модели, созданных в рамках автономных парадигм теорий цепей и поля, но свободная от недостатков таких версий. Этим исчерпывающе решена задача настоящей части исследования.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – Москва : Высш. шк., 1996. – 578 с.
2. Бирюков, В. А. Магнитное поле прямоугольной катушки с током / В. А. Бирюков, В. А. Данилов // Журн. техн. физики. – 1961. – Т. XXXI, № 4. – С. 428–435.
3. Вольдек, А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. – Ленинград : Энергия, 1984. – 832 с.
4. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией / В. А. Дзензерский, В. И. Омеляненко, С. В. Васильев [и др.]. – Киев : Наук. думка, 2001. – 479 с.
5. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов. – Москва : Высш. шк., 2001. – 327 с.
6. Крон, Г. Применение тензорного анализа в электротехнике / Г. Крон. – Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1955. – 275 с.
7. Львович, А. Ю. Электромеханические системы / А. Ю. Львович. – Ленинград : Изд-во ЛГУ, 1989. – 296 с.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

8. Поляков, В. А. Динамика тяговой подсистемы магнитолевитирующего поезда (полевая парадигма исследования) / В. А. Поляков, Н. М. Хачапуридзе // Наук. вісн. Херсон. морс. акад. – 2013. – № 1 (8). – С. 258–266.
9. Поляков, В. А. Динамика тяговой электромагнитной подсистемы магнитолевитирующего поезда / В. А. Поляков, Н. М. Хачапуридзе // Вісн. Харк. нац. ун-ту ім. В. Н. Каразіна. Серія: «Математичне моделювання. Інформ. технології. Автоматиз. системи управління». – Харків, 2012. – Вип. 19. – С. 268–273.
10. Рашевский, П. К. Риманова геометрия и тензорный анализ / П. К. Рашевский. – Москва : Наука, 1967. – 644 с.
11. Сипайлов, Г. А. Электрические машины (специальный курс) / Г. А. Сипайлов, Е. В. Кононенко, К. А. Хорьков. – Москва : Высш. шк., 1987. – 287 с.
12. Azukizava, T. Optimum linear synchronous motor design for high speed ground transportation / T. Azukizava // IEEE Power Engineering and Review. – 1983. – Vol. PER-3. – Iss. 10. – P. 29. doi: 10.1109/MPER.1983.5520073.
13. Chong, Y. Maglev train's development prospects in China / Y. Chong, W. Kane // Maglev Train in China J. – 2016. – № 2. – P. 75–90.
14. Fujiwara, S. Superconducting maglev and its electromagnetic characteristics / S. Fujiwara // SAE Technical Paper Series. – 1995. – SAE 95-1922. – P. 1–6. doi:10.4271/951922.
15. Lakhavani, S. T. Study of a liner synchronous motor for high speed transport applications / S. T. Lakhavani, G. E. Dawson // Vehicular Technology Conf. 34<sup>th</sup> IEEE (21.05–23.05.1984). – Pittsburg, 1984. – P. 220–225. doi: 10.1109/VTC-1984.1623266.
16. Lee, K. B. Study on Energy Efficiency Analysis by Maglev Trains / K. B. Lee, J. C. Kim // Electrical and Electronic Engineering. Advanced Science and Technology Letters. – 2015. – Vol. 118. – P. 48–53.
17. Matsuoka, K. Multi-phase current-fed inverter-driven linear motor and its application to the guided ground transportation system / K. Matsuoka // The Proc. IPEC. – Tokyo, 1990. – Vol. 1. – P. 604–611.
18. Russell, J. List of maglev trains proposals / J. Russell, R. Cohn. – Johannesburg : Book on demand, 2013. – 135 p.
19. Xudong, W. Three Dimensional Electromagnetic Field Equations and General Problems with Definitive Solution in Linear Motor Anisotropic Media / W. Xudong, Y. Shiyang, W. Zhaoan // Transact. of China Electrotechn. – 2006. – Vol. 21, № 6. – P. 59–64.
20. Zhigang, L. Maglev Trains / L. Zhigang, L. Zhiqiang, L. Xiaolong. – Berlin : Springer, 2015. – 215 p. doi: 10.1007/978-3-662-45673-6.

В. О. ПОЛЯКОВ<sup>1</sup>, М. М. ХАЧАПУРИДЗЕ<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Інститут транспортних систем і технологій НАН України, вул. Пісаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 232 30 55, ел. пошта p\_v\_a\_725@mail.ru, ORCID 0000-0002-4957-8028

<sup>2\*</sup>Інститут транспортних систем і технологій НАН України, вул. Пісаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 370 21 86, ел. пошта itst@westa-inter.com, ORCID 0000-0003-0682-6068

## МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ РЕАЛІЗАЦІЇ ТЯГОВОЇ СИЛИ ДВИГУНА МАГНІТОЛЕВІТУЮЧОГО ПОЇЗДА

**Мета.** Реалізація тяги (РТ) двигуном магнитолевітуючого поїзда (МЛП) відбувається у процесі перетворення електричної енергії, що подається, в кінетичну при взаємодії магнітних полів індуктора і якоря. Виходячи з цього, метою дослідження є одержання коректного опису такого енергоперетворення. **Методика.** На сучасному етапі основним і найбільш універсальним інструментом аналізу й синтезу процесів та систем є їх математичне й, зокрема, комп'ютерне моделювання. У той же час, радикальні переваги цього інструмента роблять ще більш важливою прецизійність вибору конкретної методики проведення дослідження. Особливу актуальність це має стосовно настільки великих і складних систем, якими є МЛП. Із цієї причини у роботі особлива увага приділена аргументованому обґрунтуванню вибору селективних особливостей дослідницької парадигми. **Результати.** Результати аналізу існуючих версій моделі процесу РТ свідчать про те, що кожна з них, поряд із перевагами, має й істотні недоліки. У зв'язку з цим, одним із основних результатів цього дослідження стала побудова математичної моделі зазначеного процесу, що зберігає переваги згаданих версій, але вільної від їх недоліків. У роботі аргументовано обґрунтована раціональність застосування (для цілей дослідження РТ двигуна поїзда) інтегративної холистичної парадигми, що асимілює переваги теорій електричних ланцюгів і магнітного поля. **Наукова новизна.** Пріоритетність створення такої парадигми,

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

а також відповідної версії моделі РТ становлять наукову новизну дослідження. **Практична значимість.** Основним проявом практичної значимості роботи є можливість, у випадку використання її результатів, істотного підвищення ефективності динамічних досліджень МЛП при одночасному непідвищенні їх ресурсоемності.

**Ключові слова:** магнітолевітуючий поїзд; лінійний синхронний двигун; реалізація тяги; інтегративна парадигма дослідження; математична модель

V. O. POLYAKOV<sup>1</sup>, M. M. KHACHAPURIDZE<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of Transport Systems and Technologies of Ukraine's NAS, Pisarzhevsky St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 232 30 55, e-mail p\_v\_a\_725@mail.ru, ORCID 0000-0002-4957-8028

<sup>2\*</sup>Institute of Transport Systems and Technologies of Ukraine's NAS, Pisarzhevsky St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 370 21 86, e-mail itst@westa-inter.com, ORCID 0000-0003-0682-6068

## IMPLEMENTATION MODEL OF MOTOR TRACTION FORCE OF MAGLEV TRAIN

**Purpose.** Traction force implementation (TFI) by the motor of magnetic levitation train (MLT) occurs in the process of electric-to-kinetic energy transformation at interaction of inductor and armature magnetic fields. Accordingly, the aim of this study is to obtain a correct description of such energy transformation. **Methodology.** At the present stage, a mathematical and, in particular, computer simulation is the main and most universal tool for analysis and synthesis of processes and systems. At the same time, radical advantages of this tool make the precision of selection of a particular research methodology even more important. It is especially important for such a large and complex system as MLT. Therefore the special attention in the work is given to the rationale for choosing the research paradigm selective features. **Findings.** The analysis results of existing TFI process model versions indicate that each of them has both advantages and disadvantages. Therefore, one of the main results of this study was the creation of a mathematical model for such process that would preserve the advantages of previous versions, but would be free from their disadvantages. The work provides rationale for application (for the purposes of research of train motor TFI) of the integrative holistic paradigm, which assimilates the advantages of the theory of electric circuit and magnetic field. **Originality.** The priority of creation of such paradigm and corresponding version of FI model constitute the originality of the research. **Practical value.** The main manifestation of practical value of this research in the opportunity, in case of use of its results, for significant increase in efficiency of MLT dynamic studies, on the condition that their generalized costs will not rise.

**Keywords:** magnetic levitation (maglev) train; linear synchronous motor; traction force implementation; integrative research paradigm; mathematical model

### REFERENCES

1. Bessonov L.A. *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki: Elektricheskkiye tsepi* [Theoretical foundations of electrical engineering: Electrical circuits]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1996. 578 p.
2. Biryukov V.A., Danilov V.A. Magnitnoye pole pryamougolnoy katushki s tokom [Magnetic field of the square coil with a current]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki – Journal of Technical Physics*, 1961, vol. XXXI, no. 4, pp. 428-435.
3. Voldek A.I. *Elektricheskkiye mashiny* [Electric machines]. Saint-Petersburg, Energiya Publ., 1984. 832 p.
4. Dzenzerskiy V.A., Omelyanenko V.I., Vasilyev S.V., Matin V.I., Sergeyev S.A. *Vysokoskorostnoy magnitnyy transport s elektrodinamicheskoy levitatsiey* [High-speed magnetic transport with electrodynamic levitation]. Kiev, Naukova dumka Publ., 2001. 479 p.
5. Kopylov I.P. *Matematicheskoye modelirovaniye elektricheskikh mashin* [Mathematical modeling of electrical machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001. 327 p.
6. Kron G. *Primeneniye tenzornogo analiza v elektrotekhnike* [Application of tensor analysis in electrical engineering]. Moscow, Saint-Petersburg, Gosenergoizdat Publ., 1955. 275 p.
7. Lvovich A.Yu. *Elektromekhanicheskkiye sistemy* [Electromechanical systems]. Saint-Petersburg, LGU Publ., 1989. 296 p.
8. Polyakov V.A., Khachapuridze N.M. Dinamika tyagovoy podsistemy magnitolevitiruyushchego poyezda (polevaya paradigma issledovaniya) [Dynamics of traction subsystem in the magnetic levitation (maglev) train]



## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

- (field research paradigm]. *Naukovyi visnyk Khersonskoi morskoi akademii – Bulletin of Kherson Maritime Academy*, 2013, no. 1 (8), pp. 258-266.
9. Polyakov V.A., Khachapuridze N.M. Dinamika tyagovoy elektromagnitnoy podsistemy magnitolevitiruyushchego poyezda [Dynamics of traction of electromagnetic subsystem in the magnetic levitation (maglev) train]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V. N. Karazina. Seriya: «Matematychni modeliuvannia. Informatsiini tekhnolohii. Avtomatyzovani systemy upravlinnia* [Bulletin of Kharkiv National named after University V. N. Karazin. Series: «Mathematical modeling. Information Technology. Automated control systems»], 2012, vol. 19, no. 1015, pp. 268-273.
  10. Rashevskiy P.K. *Rimanova geometriya i tenzornyy analiz* [Riemann geometry and tensor analysis]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 644 p.
  11. Sipaylov G.A., Kononenko Ye.V., Khorkov K.A. *Elektricheskiye mashiny (spetsialnyy kurs)* [Electric machines (special course)]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1987. 287 p.
  12. Azukizava T. Optimum linear synchronous motor design for high speed ground transportation. *IEEE Power Engineering and Review*, 1983, vol. PER-3, issue 10, p. 29. doi: 10.1109/MPER.1983.5520073.
  13. Chong Y., Kane W. Maglev train's development prospects in China. *Maglev Train in China Journal*, 2016, no. 2, pp. 75-90.
  14. Fujiwara S. Superconducting maglev and its electromagnetic characteristics. *SAE Technical Paper Series*, 1995, SAE 95-1922, pp. 1-6. doi:10.4271/951922.
  15. Lakhavani S.T., Dawson G.E. Study of a liner synchronous motor for high speed transport applications. *Vehicle Technology Conf. 34<sup>th</sup> IEEE* (21.05-23.05.1984). Pittsburg, 1984. pp. 220-225. doi: 10.1109/VTC.1984.1623266.
  16. Lee K.B., Kim J.C. Study on Energy Efficiency Analysis by Maglev Trains. *Electrical and Electronic Engineering. Advanced Science and Technology Letters*, 2015, vol. 118, pp. 48-53.
  17. Matsuoka K. Multi-phase current-fed inverter-driven linear motor and its application to the guided ground transportation system. *The Proc. IPEC. Tokyo*, 1990, vol. 1, pp. 604-611.
  18. Russell J., Cohn R. List of maglev trains proposals. Johannesburg, Book on demand Publ., 2013. 135 p.
  19. Xudong W., Shiying Y., Zhaoan W. Three Dimensional Electromagnetic Field Equations and General Problems with Definitive Solution in Linear Motor Anisotropic Media. *Transact of China Electrotechn*, 2006, vol. 21, no. 6, pp. 59-64.
  20. Zhigang L., Zhiqiang L., Xiaolong L. *Maglev Trains*. Berlin, Springer Publ., 2015, 215 p. doi: 10.1007/978-3-662-45673-6.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., ст. науч. сотр. Н. А. Радченко (Украина); д.т.н., проф. А. М. Афанасовым (Украина)

Поступила в редколлегию: 03.03.2016

Принята к печати: 02.06.2016



## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

УДК 691.3:625.142.42

В. В. КОВАЛЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Безпека життєдіяльності», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 489 07 72, ел. пошта kovalekovv@upr.dit.edu.ua, ORCID 0000-0002-1196-7730

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕДЧАСНОГО РУЙНУВАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ШПАЛ НА МАГІСТРАЛЬНИХ КОЛІЯХ ПАТ «УКРЗАЛІЗНИЦЯ»

**Мета.** В роботі необхідно виявити причини передчасного руйнування бетону шпал українського виробника. **Методика.** Застосовані мікроструктурний, фрактографічний, мікрорентгеноспектральний аналізи дозволили виявити причини швидкоплинних корозійних процесів у бетоні. **Результати.** В даній роботі предметом дослідження є цементний камінь і структура бетону передчасно зруйнованої залізобетонної шпали. Чергове передчасне руйнування залізобетонної шпали досліджувалося за традиційною для Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (ДНУЗТ) методикою, що запатентована у 2009 році. Проведені в роботі дослідження показали: 1) наявність у цементному камені поблизу пісочних часток підвищеної концентрації хлору та лужних металів, що перевищують допустимі норми за діючими стандартами; 2) різнозеренність кристалів цементного каменю вказує на надлишок води затворювання в бетонній суміші; 3) наявність у структурі цементного каменю волокон деревини, які за рахунок додаткового всмоктування вологи пришвидшують хімічні реакції у бетоні шпал, що експлуатується; 4) швидкість лужно-кремнієвокислої реакції у бетоні шпал складає 5 мкм на рік; 5) наявність волокон деревини вказує на незадовільну чистоту розсіву заповнювачів, зокрема щебеню; 6) хлор-іони додатково пришвидшують реакції структурного перетворення цементного каменю. **Наукова новизна.** В роботі виявлено швидкість корозійних процесів у бетоні шпал українського виробника. Показано вплив на швидкість корозії забрудненості крупних заповнювачів органічними речовинами, зокрема волокнами деревини. Показані характерні ознаки пришвидшення корозійних процесів внаслідок надлишку води і хлор-іонів у структурі цементного каменю. **Практична значимість.** Виявлення характерних ознак передчасного руйнування бетону підрейкових основ дозволяє попередити масовий вихід із ладу залізничних шпал, який негативно впливає на безпеку руху залізницею. Запропонована ДНУЗТ безпропарювальна технологія виробництва залізобетонних шпал із застосуванням вітчизняних полікарбонатних добавок до бетонів (у комплексі з застосуванням для просівання щебеню просіваючих поверхонь нового покоління виробництва ПП «Логія») дасть змогу вивести українських виробників залізобетонних шпал на європейський рівень. Контроль мікроструктурних характеристик під час виробничого процесу дозволить попереджати масові передчасні руйнування бетону шпал і продавати продукцію українських заводів залізобетонних шпал європейським споживачам. При цьому пропонується метод контролю якості бетону є неруйнівним і не потребує виведення з ладу щойно виготовлених залізобетонних шпал.

**Ключові слова:** бетон; мікроструктура цементного каменю; залізобетонні шпали; передчасне руйнування; морфологія структурних складових; спектральний аналіз

## Вступ

Передчасні масові руйнування підрейкових основ в Україні та інших країнах бувшого СРСР – звичне явище в експлуатації залізничних колій протягом останнього десятиліття. На цю проблему, що супроводжується значними втратами ресурсів, в країнах Євросоюзу звернули увагу науковці, виробники залізобетону та експлуатаційники ще наприкінці минулого, на початку нинішнього тисячоліття [11]. Вчені багатьох країн світу з огляду на процеси структуроутворення цементного каменю в бетонах різного призначення виявили вплив на структуроутворення як внутрішніх (хімічний склад цементного каменю, що реструктуризується у зрілому віці), так і зовнішніх факторів (наявності агресивного середовища, хімічних і органічних забруднень) [1–4, 8, 11–13]. Як підсумок здобутих наукових знань в цій галузі, у 2009 р. 28 країнами Євросоюзу було прийнято новий стандарт, який передбачає застосування мікроструктурних досліджень з контролю якості бетону і цементного каменю. На жаль, зусилля Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна з впровадження положення Європейського стандарту EN 1504 «Матеріали і системи для ремонту і захисту бетонних конструкцій» [7] в новий український стандарт з виробництва залізобетонних шпал не знайшли підтримки в керівництва ні Укрзалізниці, ні в Міністерстві регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, на відміну від країн митного союзу, де норми європейських стандартів вже впроваджено в нинішньому 2016 році.

Міністерством регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України було впроваджено в український стандарт нові оригінальні випробування, які не дозволяють визначити довговічність бетону, а пропонований нашим університетом європейський підхід до цієї проблеми Міністерством в офіційній відповіді на початку 2016 року визнано передчасним. Вірогідно, з тієї причини так вдало гальмуються в нашій країні євроінтеграційні процеси, навіть за рахунок щорічного масового передчасного руйнування залізобетонних шпал.

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту з 2010 р. досліджує причини масових передчасних руйнувань підрейкових основ. Останньою роботою було виявлення причин передчасного, після трьох років експлуатації, руйнування бетону шпали, що виготовлена в 2013 р. одним з державних підприємств ПАТ «Укрзалізниця».

## Мета

З'ясування причин передчасного руйнування наданих зразків бетону залізобетонної шпали на магістральних коліях України.

*Об'єктом дослідження* був зразок бетону, зруйнований після трьох років експлуатації на магістральній колії Укрзалізниці.

## Методика

В роботі застосовано макро- та мікроскопічні, фрактографічні та мікрорентгеноспектральні методи дослідження структури цементного каменю.

## Результати

Дослідження мікроструктури зразків бетону зруйнованої залізобетонної шпали показали наявність різнозеренної структури компактних кристалів цементного каменю (рис. 1). Бетон шпал вміщає багато пор, середній розмір яких складає близько 1 мкм (рис. 1, а, б). Пори не кольматовані та мають схильність до поглинання води з оточуючого середовища – з ґрунту, баластного щебеню та насиченого вологою повітря.

Значна різнозеренність цементного каменю вказує на надмірну кількість води в бетонній суміші (рис. 2).

Оцінка макроструктурних характеристик бетону показує, що його руйнування прискорено наявністю целюлозних волокон з деревини, які в структурі бетону виглядають як дерев'яні тріски діаметром до 3 мм (рис. 3).

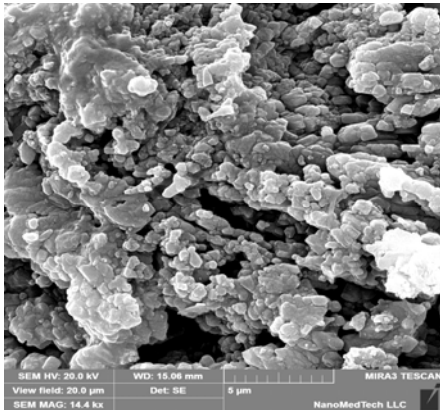
Поблизу пісочних часток спостерігаються нові фазові утворення, що мають структуру плескатих розтрісканих аморфно-кристалічних утворень, які містять підвищену концентрацію лужних металів та хлору (рис 4). Товщина шару продукту лужно-кремнієвої реакції навкруги пісочних часток дорівнює до 15 мкм

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

(рис. 6). Таким чином, завдяки структурним особливостям – наявності великої кількості пор та додаткового всмоктування вологи по дерев'яних волокнах, швидкість реакції з формуванням нової фази складала 5 мкм на рік.

Надмірна водонасиченість бетонної суміші сприяє утворенню великих еtringітних кристалів, які містять підвищену кількість лужних елементів, магнію, алюмінію та сірки (рис. 5). Зазначені кристали структурно нестабільні та розкладаються або перетворюються в процесі експлуатації на фази, що мають інший об'ємний коефіцієнт. Особливо швидко ці перетворення здійснюються при надлишковій водонасиченості бетону та наявності в структурі атомів хлору [11].

*a–a*



*б–b*

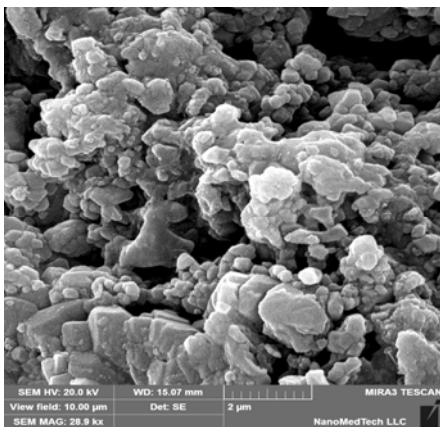


Рис. 1. Мікроструктура цементного каменю в зруйнованому бетоні шпал:  
*a* –  $\times 14\,400$ , *б* –  $\times 28\,900$

Fig. 1. Microstructure of cement rock in destroyed concrete of sleepers:  
*a* –  $\times 14\,400$ , *b* –  $\times 28\,900$

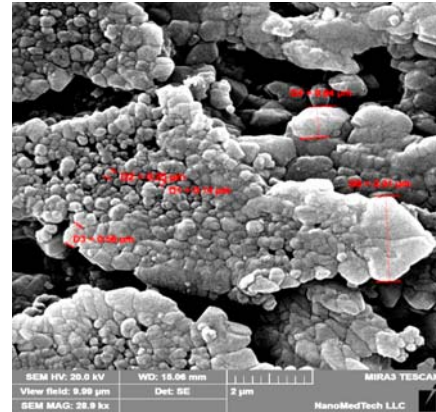


Рис. 2. Розмірні характеристики кристалів цементного каменю в зруйнованому бетоні шпал

Fig. 2. Dimensional characteristics of cement stone crystals in ruined concrete of sleepers

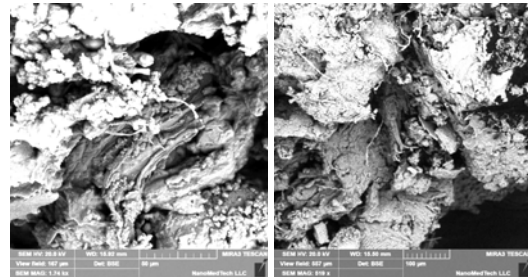
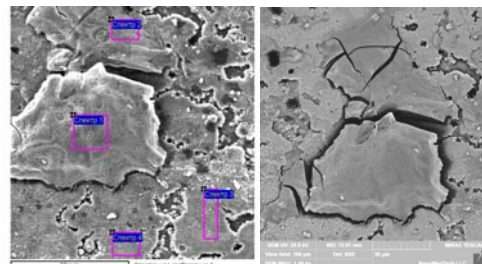


Рис. 3. Волокна деревини в зруйнованому бетоні шпал

Fig. 3. Wood fibers in the destroyed concrete of sleepers



Спектр	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe
Спектр 1	41.67	48.07	0.92	0.00	0.77	1.27	1.04	2.72	2.85	0.68
Спектр 2	34.50	29.97	0.00	0.00	2.09	0.00	1.81	5.69	25.95	0.00
Спектр 3	47.17	0.00	0.00	0.00	0.42	0.00	0.00	0.18	51.86	0.38
Спектр 4	45.26	0.35	0.00	0.15	0.41	0.00	0.00	0.21	53.63	0.00

Рис. 4. Хімічний склад продуктів корозії цементного каменю

Fig. 4. Chemical composition of the corrosion products of cement rock

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

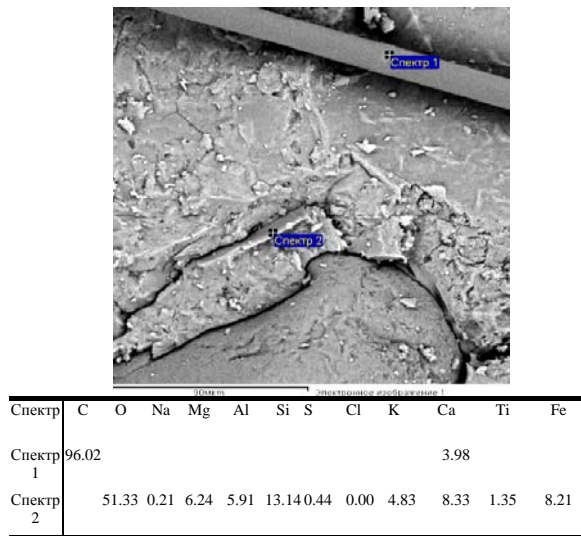


Рис. 5. Хімічний склад волокон деревини і великих еtringітних кристалів в структурі зруйнованого бетону

Fig. 5. Chemical composition of wood fibers and large ettringite crystals in the structure of the destroyed concrete

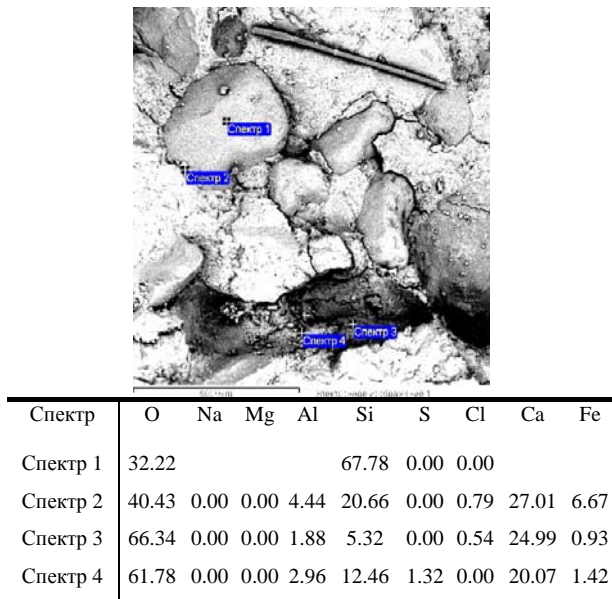


Рис. 6. Хімічний склад продуктів корозії цементного каменю поблизу пісочних часток

Fig. 6. Chemical composition of corrosion products of cement rock near the sand particles

Структурні перетворення нестабільних фаз та утворення продукту лужно-кремнієвокислої реакції сприяє виникненню значних внутрішніх напружень та розтріскуванню бетону по всьому об'єму залізобетонних виробів (див. рис. 6).

Наявність атомів хлору також провокує виведення зі складу цементних кристалогідратів комплексів  $(OH)^-$  по всьому об'єму цементного каменю бетону з утворенням вільної води в бетоні та вимивання кальцію, що сприяє утворенню кальцієвого молочка, зниженню міцності та додатковому руйнуванню бетону.

Від відповідності характеристик цементу нормам стандарту ДСТУ Б.В 2.7-46:2010 [6] залежить структуроутворення цементного каменю, фізико-механічні характеристики та довговічність залізобетонних виробів. При підвищеній лужності цементу (відносний коефіцієнт лужності  $(Na_2O + 0.658 K_2O)$  більше ніж 0,6 % (мас) [5]) в процесі гідратації та під час експлуатації залізобетонних підрейкових основ та інших інфраструктурних деталей та споруд відбувається реакція хімічної взаємодії луг цементу з кислими заповнювачами, які відповідно до стандартів не повинні містити більше ніж 50 ммоль/л діоксиду кремнію, розчинного в лугах [5].

Згідно з державним стандартам [5] в портландцементі співвідношення за масою кальцій оксиду до силіцій діоксиду повинно становити не менше ніж 2,0, а масова частка магній оксиду не повинна перевищувати 5 %, вміст сірки у перерахунку на  $SO_3$  не повинен перевищувати 3,5 %, але бути більше ніж 1 % (мас.), глини не більше 1,2 % (мас.), вміст хлорид-іонів не повинен перевищувати 0,1 % (мас) [5]. Трикальцієвий алюмінат у складі цементу не повинен перевищувати 8 % за масою [6].

Вказані вище характеристики цементу не відповідають нормативним показникам лише в локальних областях поблизу пісочних часток в новій гелеподібній фазі, що формується як продукт лужно-кремнієвокислої реакції.

Малий стосовно інших атомів діаметр іонів натрію та хлору дозволяє їм легко мігрувати в зону активної реакції, що відбувається в гелеподібній фазі навкруги пісочних часток. При чому іони хлору сприяють виведенню гідрат-іонів зі сформованих кристалогідратів цементного каменю в бетоні, який експлуатується, що додатково розріджує продукт лужно-кремнієвокислої реакції, пришвидшує реакцію структурного перетворення цементного каменю.

Забрудненість крупних заповнювачів трісками деревини не відповідає діючим стандар-

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

там. А тому необхідно на кар'єрах постачальників щебеню впроваджувати нові технології, що сприяють значному підвищенню чистоти розсіву, зменшенню енергоємності, матеріалоємності виробництва та витратам праці.

Нові технології впроваджує фірма ПП «Логія». Як просіваючі поверхні вона пропонує зносостійкі поверхні нового покоління з підвищеними динамічними характеристиками [10].

Для підвищення довговічності бетону пропонується впровадження у виробництво залізобетонних шпал гіперпластифікаторів полікарбонатного типу, виробництва ПП «Логія».

Крім того, необхідно зауважити, що добавка українського виробництва меншою мірою залежить від курсових стрибків іноземних валют і менша, ніж ціна іноземних аналогів. Вітчизняне виробництво може гнучко реагувати на потреби виробників залізобетону, які змінюються залежно від нестабільних характеристик в'язучих та заповнювачів.

#### Наукова новизна та практична значимість

В роботі виявлено швидкість корозійних процесів в бетоні шпал українського виробника. Показано вплив на швидкість корозії забрудненості крупних заповнювачів органічними речовинами, зокрема волокнами деревини. Показані характерні ознаки пришвидшення корозійних процесів у випадку надлишку води, луг і хлор-іонів в структурі цементного каменю.

Пропонований метод контролю якості бетону є неруйнівним і не потребує виведення з ладу щойно виготовлених залізобетонних шпал [9].

Для попередження передчасного руйнування залізобетонних шпал пропонується використовувати безпропарювальну технологію їх виробництва.

Технологія ґрунтується на застосуванні нових гіперпластифікаторів полікарбонатного типу ПЛКП виробництва ПП «Логія». Впровадження нової комплексної хімічної вітчизняної добавки ПЛКП дозволить економити 150 кг цементу на м<sup>3</sup> бетону шпал, знизити водоцементне співвідношення, значно знизити температуру термовологої обробки (до 30 °С), або виключити з виробничого циклу цю операцію, що сприятиме підвищенню щільності, міцності

на стиск і вигін у 1,5 разу та довговічності бетону шпал.

Від виробників щебеню потрібно вимагати підвищення чистоти розсіву. Це можна досягнути, застосовуючи нові технології виготовлення просіваючих поверхонь виробництва ПП «Логія», які додатково дозволяють економити електричну енергію, матеріали, витрати праці більш ніж на 60 % [10].

#### Висновки

Виконані в роботі дослідження виявили наявність в цементному камені поблизу пісочних часток підвищеної концентрації хлору та лужних металів, концентрації яких перевищують допустимі в діючих стандартах.

Різноманітність кристалів цементного каменю вказує на надлишок води затворювання в бетонній суміші.

В структурі цементного каменю присутні волокна деревини, які за рахунок додаткового всмоктування вологи пришвидшують хімічні реакції в бетоні, що експлуатується.

Швидкість лужно-кремнієвокислої реакції в бетоні шпал складає 5 мкм в рік.

Наявність волокон деревини вказує на незадовільну чистоту розсіву заповнювачів бетону, зокрема щебеню.

Хлор-іони додатково пришвидшують реакції структурного перетворення цементного каменю. В структуру бетону з'єднання хлору можуть поступати внаслідок їх навмисного внесення для протидії заморожування дрібних заповнювачів, а також природному вмісту цього елементу в структурі заповнювачів.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Деякі аспекти технологічних прийомів виробництва та контролю експлуатаційного ресурсу залізобетонних шпал в Україні та світі / В. В. Рибкін, В. В. Коваленко, Ю. Л. Заяць [та ін.] // Заліз. трансп. України. – 2012. – № 3/4. – С. 76–81.
2. Дослідження експлуатаційної стійкості залізобетонних шпал та основні технологічні прийоми її покращення / В. В. Рибкін, В. В. Коваленко, Ю. Л. Заяць [та ін.] // Буд-во України. – 2011. – № 4. – С. 19–23.
3. Дослідження фізико-хімічних властивостей дрібних заповнювачів для виробництва залізобетонних шпал / В. В. Рибкін, В. В. Коваленко,



## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

- Ю. Л. Заяць [та ін.] // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 40 – С. 140–145.
4. Дослідження фізико-хімічних характеристик крупних заповнювачів бетону для виробництва залізобетонних шпал / В. В. Рибкін, В. В. Коваленко, Ю. Л. Заяць [та ін.] // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 42. – С. 242–245.
  5. ДСТУ Б В.2.6-145:2010 (ГОСТ 31384:2008, NEQ). Захист бетонних і залізобетонних конструкцій від корозії. Загальні технічні вимоги. – Київ : Укрархбудінформ, 2010. – 56 с.
  6. ДСТУ Б В.2.7-46:2010. Будівельні матеріали. Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови / Державний комітет з будівництва, архітектури та житлової політики України. – Київ : Вид-во стандартів, 2010. – 20 с.
  7. Европейский стандарт EN 1504. Материалы и системы для защиты и ремонта железобетонных конструкций [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://emaco26.ru/d/180619-/d/evropeyskiy\\_standart\\_en\\_1504.pdf](http://emaco26.ru/d/180619-/d/evropeyskiy_standart_en_1504.pdf). – Назва з екрана. – Перевірено : 04.07.2016.
  8. Коваленко, В. В. Дослідження причин передчасного руйнування залізобетонних шпал на Знам'янській дистанції колії ПЧ 10 Одеської залізниці / В. В. Коваленко, Ю. Л. Заяць, П. О. Пшінько // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 6 (60). – С. 149–163. doi: 10.15802/stp2015/57100.
  9. Методика дослідження структуроутворення в бетонах та будівельних розчинах : свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір / О. М. Пшінько, В. В. Коваленко, Ю. Л. Заяць, С. В. Коваленко, П. О. Пшінько ; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. – № 29586 ; заявл. 27.07.09. – 1 с.
  10. Пат. 97424 Україна, МПК В 07 В 1/12, В 07 В 1/46. Просіваюча поверхня грохота / Харченко В. А., Коваленко С. В., Коваленко В. В. – № 20100667 ; заявл. 31.05.10 ; опубл. 10.02.2012, Бюл. № 3. – 5 с.
  11. Штарк, Й. Долговечность бетона / Й. Штарк, В. Бернд. – Киев : Оранта, 2004. – 301 с.
  12. Recent durability studies on concrete structure / S. W. Tang, Y. Yao, C. Andrade, Z. J. Li // Cement and Concrete Research Keynote. – 2015. – Vol. 78. – P. 143–154. doi: doi:10.1016/j.cemconres.2015.05.021.
  13. Scrivener, K. L. Advances in understanding hydration of Portland cement / K. L. Scrivener, P. Juilland, P. J. M. Monteiro // Cement and Concrete Research. – 2015. – Vol. 78. – P. 38–56. doi: 10.1016/j.cemconres.2015.05.025.

В. В. КОВАЛЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Безопасность жизнедеятельности», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (050) 489 07 72, эл. почта kovalekovv@upr.dnuit.edu.ua, ORCID 0000-0002-1196-7730

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕЖДЕВРЕМЕННОГО РАЗРУШЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ШПАЛ НА МАГИСТРАЛЬНЫХ ПУТЯХ ПАО «УКРЗАЛИЗНИЦЯ»

**Цель.** В работе необходимо выявить причины преждевременного разрушения бетона шпал одного из украинских производителей. **Методика.** Примененные микроструктурный, фрактографический, микрорентгеноспектральный анализы позволили выявить причины ускоренных коррозионных процессов в бетоне. **Результаты.** В данной работе предметом исследования является цементный камень и структура бетона преждевременно разрушенной железобетонной шпалы. Очередное преждевременное разрушение железобетонной шпалы исследовалось по традиционной для Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна (ДНУЖТ) методике, запатентованной в 2009 году. Проведенные в работе исследования показали: 1) наличие в цементном камне вблизи песчаных частиц повышенной концентрации хлора и щелочных металлов, превышающих допустимые нормы за действующими стандартами; 2) разнорзерность кристаллов цементного камня указывает на избыток воды затворения в бетонной смеси; 3) наличие в структуре цементного камня волокон древесины, которые за счет дополнительного впитывания влаги ускоряют химические реакции в бетоне эксплуатируемых шпал; 4) скорость щелочно-кремниевой реакции в бетоне шпал составляет 5 мкм в год; 5) наличие волокон древесины указывает на неудовлетворительную чистоту отсева заполнителей, в частности щебня; 6) хлор-ионы дополни-

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

тельно ускоряют реакции структурного преобразования цементного камня. **Научная новизна.** В работе выявлена скорость коррозионных процессов в бетоне шпал украинского производителя. Показано влияние на скорость коррозии загрязненности крупных заполнителей органическими веществами, в частности волокнами древесины. Показаны характерные признаки ускорения коррозионных процессов вследствие избытка воды и хлор-ионов в структуре цементного камня. **Практическая значимость.** Выявление характерных признаков преждевременного разрушения бетона подрельсовых оснований позволяет предупредить массовый выход из строя железнодорожных шпал, который негативно влияет на безопасность движения по железной дороге. Предложенная ДНУЖТ безпропарочная технология производства железобетонных шпал с применением отечественных поликарбоксилатных добавок к бетонам (в комплексе с применением для просеивания щебня просеивающих поверхностей нового поколения производства ЧП «Логия») даст возможность вывести украинских производителей железобетонных шпал на европейский уровень. Контроль микроструктурных характеристик во время производственного процесса позволит предупреждать массовые преждевременные разрушения бетона шпал и продавать продукцию украинских заводов железобетонных шпал европейским потребителям. При этом предлагаемый метод контроля качества бетона является неразрушающим и не требует вывода из строя только что изготовленных железобетонных шпал.

**Ключевые слова:** бетон; микроструктура цементного камня; железобетонные шпалы; преждевременное разрушение; морфология структурных составляющих; спектральный анализ

V. V. KOVALENKO<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Life Safety», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 489 07 72, e-mail kovalekovv@upp.dit.edu.ua, ORCID 0000-0002-1196-7730

## RESEARCH PREMATURE DESTRUCTION OF CONCRETE SLEEPERS ON THE MAIN LINES OF PUBLIC COMPANY «UZ»

**Purpose.** The study aims to identify the causes of premature destruction of concrete sleepers of one of Ukrainian producers. **Methodology.** Applied microstructural, fractographic, X-ray microanalysis revealed causes of transient corrosion processes in concrete. **Findings.** Subject of study in this work is a cement rock and concrete structure of prematurely shattered concrete sleepers. Another premature destruction of concrete sleepers was studied using the traditional method for Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (DNURT) that was patented in 2009. The conducted research showed: 1) a cement rock near the sand particles of high concentration of chlorine and alkali metals exceeding permissible in existing standards; 2) different grained cement crystals indicates excess of water in the concrete mixture; 3) the presence in the cement rock structure of wood fibers, which are due to the additional moisture absorption accelerate chemical reactions in the operated concrete sleepers; 4) speed of alkaline-silicic-acidic reaction in concrete sleepers is 5 microns per year; 5) availability of wood fibers indicates unsatisfactory purity of aggregates screening, including crushed stone; 6) chlorine ions further accelerate structural transformation reaction of cement. **Originality.** The paper found the rate of corrosion processes in concrete sleepers of Ukrainian producer. The influence on the corrosion rate of contamination of large aggregates of organic substances, including wood fibers was shown in the article. There were presented characteristic signs of accelerating corrosion processes as a result of excess of water and chlorine ions in the structure of cement rock. **Practical value.** Identifying the typical signs of premature destruction of concrete under rail foundations prevents massive failure of railway sleepers, which affects negatively the railway traffic safety. The proposed by DNURT without steaming technology of concrete sleepers production using domestic polycarboxylate concrete additives in combination with the use for screening of gravel the screening surface of new generation produced by PE «Logiya», will bring concrete sleepers of Ukrainian producers on the European level. Control of microstructural characteristics during the production process will prevent the mass premature destruction of concrete sleepers and sell products of Ukrainian concrete sleeper production plants to the European consumers. At this the proposed method of quality control of concrete is non-destructive and does not require disabling the newly made concrete sleepers.

**Keywords:** concrete; microstructure of cement rock; concrete sleepers; premature destruction; structural components morphology; spectral analysis

## REFERENCES

1. V.V. Rybkin, Kovalenko V.V., Yu. L. Zaiats, Pshinko P.O., Kovalenko S.V., Yakovliev V.O. Deiaki aspekty tekhnologichnykh priyomiv vyrobnytstva ta kontroliu ekspluatatsiinoho resursu zalizobetonnykh shpal v Ukraini ta sviti [Some aspects of technological methods of production and control of operational lifetime of concrete sleepers in Ukraine and abroad]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway Transport of Ukraine*, 2012, no. 3/4, pp. 76-81.
2. Rybkin V.V., Kovalenko V.V., Zaiats Yu.L., Pshinko P.O., Kovalenko S.V., Yakovliev V.O. Doslidzhennia ekspluatatsiinoi stiiakosti zalizobetonnykh shpal ta osnovni tekhnologichni priyomy yii pokrashchennia [Research of the operational stability of the concrete sleepers and basic technological methods of its improvement]. *Budivnytstvo Ukrainy – Construction in Ukraine*, 2011, no. 4, pp. 19-23.
3. Rybkin V.V., Kovalenko V.V., Zaiats Yu.L., Pshinko P.O., Lysniak V.P., Yaryshkina L.O., Vasylieva S.V. Doslidzhennia fizyko-khimichnykh vlastyvostei drobnykh zapovniuvachiv dlia vyrobnytstva zalizobetonnykh shpal [Research of physical and chemical properties of small fillers for production of ferro-concrete sleepers]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, vol. 40, pp. 140-145.
4. Rybkin V.V., Kovalenko V.V., Zaiats Yu.L., Pshinko P.O., Lysniak V.P., Yaryshkina L.O., Vasylieva S.V., Kovalenko S.V. Doslidzhennia fizyko-khimichnykh kharakterystyk krupnykh zapovniuvachiv betonu dlia vyrobnytstva zalizobetonnykh shpal [Research of physical and chemical characteristics of large fillers for production of ferro-concrete sleepers]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 42, pp. 242-245.
5. DSTU B V.2.6-145:2010 (HOST 31384:2008, NEQ) Zakhyst betonnykh i zalizobetonnykh konstruksii vid korozii. Zahalni tekhnichni vymohy [State Standard B V.2.6-145:2010 (State Standard 31384:2008, NEQ) Protection of concrete and reinforced concrete structures from corrosion. General specifications]. Kyiv, Ukrarkhbuildinform Publ., 2010. 56 p.
6. DSTU B V.2.7-46:2010 Budivelni materialy. Tsementy zahalnobudivelnoho pryznachennia. Tekhnichni umovy. Derzhavnyi komitet z budivnytstva, arkhitektury ta zhytlovoi polityky Ukrainy [State Standard B V.2.7-46:2010. Building materials. Cements for general purposes. Specifications. State Committee for Construction, Architecture and Housing Policy of Ukraine]. Kyiv, Vydavnytstvo standartiv Publ., 2010. 20 p.
7. *Yevropeyskyi standart EN 1504 Materialy i systemy dlia remontu i zakhystu betonnykh konstruksii* (European Standard EN 1504 Materials and systems for the protection and repair of concrete structures). Available at: [http://emaco26.ru/d/180619/d/evropeyskyi\\_standart\\_en\\_1504.pdf](http://emaco26.ru/d/180619/d/evropeyskyi_standart_en_1504.pdf) (Accessed 04 July 16).
8. Kovalenko V.V., Zaiats Yu.L., Pshinko P.O. Doslidzhennia prychyn peredchasnoho ruinovannia zalizobetonnykh shpal na Znamianskii dystantsii kolii PCh 10 Odeskoi zaliznytsi [The causes study of the premature destruction of the concrete sleepers on the Znamenka track of the IF10 of the Odessa railway]. *Nauka ta Prohres Transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no. 6 (60), pp. 149-163. doi: 10.15802/stp2015/57100.
9. Pshinko O.M., Kovalenko V.V., Zaiats Yu.L., Kovalenko S.V., Pshinko P.O. Metodyka doslidzhennia strukturoutvorennia v betonakh ta budivelnnykh rozchynakh. Svidotstvo DNUZT pro reiestratsiiu avtorskoho prava na tvir № 29586. 27.07.2009 [Research Methodology of structure formation in concretes and mortars. Copyright Registration Certificate. No. 29586. 27.07.2009]. 1 p.
10. Kharchenko V.A., Kovalenko S.V., Kovalenko V.V. *Prosvaiucha poverkhnia hrokhota* [Screening surface of separation screen]. Patent UA, no. 20100667, 2012.
11. Shtark Y., Bernd V. *Dolgovechnost betona* [Concrete durability]. Kyiv, Oranta Publ., 2004. 301 p.
12. Tang S.W., Yao Y., Andrade C., Li Z.J. Recent durability studies on concrete structure. *Cement and Concrete Research Keynote*, 2015, vol. 78, pp. 143-154. doi: 10.1016/j.cemconres.2015.05.021.
13. Scrivener K.L., Juilland P., Monteiro P.J.M. Advances in understanding hydration of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 2015, vol. 78, pp. 38-56. doi: 10.1016/j.cemconres.2015.05.025.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. М. І. Нетесою (Україна); д.т.н., проф. М. В. Савицьким (Україна)

Надійшла до редколегії: 21.03.2016

Прийнята до друку: 04.07.2016



## UDC 625.141.54:625.172

M. P. NASTECHIK<sup>1</sup>, R. V. MARCUL<sup>2\*</sup><sup>1</sup>Dep. «Track and Track Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 31, e-mail nastechik\_mp@mail.ru, ORCID 0000-0002-4178-6092<sup>2\*</sup>Dep. «Track and Track Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 31, e-mail guaranga\_mr@mail.ru, ORCID 0000-0002-7630-8963PROSPECTS FOR LAYING THE FASTENING OF THE TYPE CKД65 – Б  
IN THE CURVED TRACK SECTIONS WITH SMALL RADIUS

**Purpose.** To date, there is a tendency concerning complete transition of main tracks to concrete sleepers. The reason for this is the lack of wooden sleepers, their high cost and low lifetime that in the curved track sections with the radius  $R \leq 300$  m is only 5-7 years (this is 5 times less than the lifetime of concrete sleepers). After introduction of fastening type CKД65-Б it is possible to smoothly expand the track from 0 mm to 14 mm, and to narrow from 0 mm to 28 mm with a step 1 mm. At the increased train load on the track of 75...130 kN in a horizontal plane, which is characteristic for the curved track sections  $R \leq 300$  m the violations in terms of track geometry often take place. It results in the frequent surfacings, periodicity of which at the fastening type CKД65-Б is absent for today. Therefore the purpose of the article is the development of recommendations concerning maintenance of the track in a plan with the fastening type CKД65-Б. **Methodology.** The methodology of research is based on the comparative estimation of influence of the track width change dynamics on the periodicity of surfacing in the plan in the case of the use of fastening type ДО and CKД65-Б. **Findings.** With the help of the developed research methodology it was established that the first implementation of adjusting the track width at fastening type ДО is necessary to be executed on the 14<sup>th</sup> month and at the fastening type CKД65-Б on the 28<sup>th</sup> month of operation. **Originality.** It was first described and expressed using the empiric dependence the process of the track width change, and periodicity of its adjusting in the case of the fastening type CKД65-Б use. **Practical value.** The developed recommendations will allow in time to execute adjusting of the track width at fastening type CKД65-Б and ensuring the safety of train motion at the same time.

**Keywords:** fastening type CKД65-Б; track width; adjusting of track width; maintenance of track in plan

## Introduction

Increase in the train speeds, axial loading at the Ukrainian railways requires increase in the strength and stability of the railway track. Today, in the vast majority of cases in small radius curves, especially in the areas of Lviv railway it is operated the track with wooden sleepers and fastening type ДО.

In the initial stages of operation the track on wooden sleepers has little stiffness that provides three-dimensional elasticity of the track superstructure (hereinafter TS) elements at the simultaneous perception of both vertical and horizontal dynamic forces from the rolling stock. During the maintenance work wooden sleeper, unlike the concrete sleepers, undergoes rapid replacement with the new one without significant labor costs.

Despite the advantages, wooden sleepers have several disadvantages that make economically unprofitable their use. The reason for this is the lack of wooden sleepers, their high cost and low life-

time that in the curved track sections with the radius  $R \leq 300$  m is only 5-7 years. This is 5 times less than the lifetime of concrete sleepers [10].

During operation of the railway track in the curved sections of small radius with wooden sleepers and fastening type ДО the rail thread thrust occurs. It leads to the deviations from the tolerances of rail track width [6, 12]. When the track width exceeds the tolerances it is necessary to carry out regaging, which largely affects the life of wooden sleepers.

Production of sleepers of softwood species also results in the fact that in the short term the metal baseplate, which is the element of the fastening type ДО, cuts into the wood fibers [3-6, 10, 12-15]. During production of wooden sleepers their manufacturing technology based on insufficient seepage is violated. This leads to sleeper rotting and reduction in its operating lifetime in the track [12].

To date, according to the order of Ukrzaliznytsia it was decided to fully transit the main tracks to the concrete sleepers.

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

To date, according to the order of Ukrzaliznytsia there is a tendency to transition to the concrete sleepers in curves of small radius, in connection with the increased speed of trains, axial loads and freight traffic on the railway. At the same time the increase in strength and stability of railway track is required.

With the fastening type СКД65-Б (Fig. 1) [1, 7], there is a possibility to use the concrete sleepers in curved track sections of small radius without construction modification of the sleeper type of ШІ-1. The use of concrete sleepers and fastening type СКД65-Б makes it possible to avoid many of the problems arising in the railway track on wooden sleepers with the fastening type ДО.

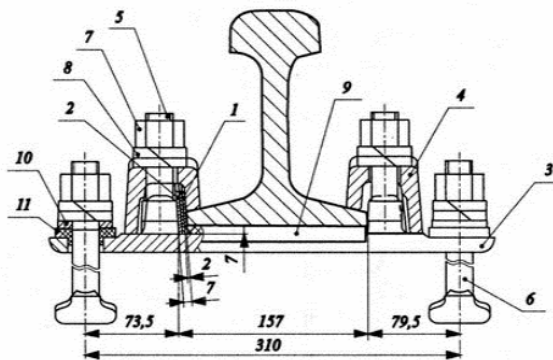


Fig. 1. The СКД65-Б type of fastening:  
1 – adjusting card, 2 mm width (two items);  
2 – adjusting card, 3 mm width (one item);  
3 – plate 2КБЛ65; 4 – terminal ПКЛ; 5 – terminal bolt;  
6 – insert bolt; 7 – screw nut; 8 – double coil washer;  
9 – plate ПРБ-4; 10 – plain washer ШІІ-1.1;  
11 – insulating sleeve

At the fastening type СКД65-Б it is allowed to build into the curves of radius between 450 m to 200 m concrete sleepers with distribution diagram of sleeper laying 1.840 units/km. At this the fastening СКД65-Б ensures a smooth transition of width in the transition curves for expansion from 0 mm to 14 mm and narrowing from 0 mm to 28 mm. In a circular curve using the fastening type СКД65-Б one can set the pattern 1534 mm using the concrete sleepers of type ШІ-1 according to the works [1, 7, 16].

At the increased train load on the track of 75...130 kN in a horizontal plane, which is characteristic for the curved track sections  $R \leq 300$  m the violations in terms of track geometry often take place [9]. It results in the frequent surfacings, the

periodicity of which at the fastening type СКД65-Б is absent for today. Therefore the purpose of the article is the development of recommendations concerning maintenance of the track in a plan with the fastening type СКД65-Б.

### Purpose

Therefore the purpose of the article is the development of methods and recommendations concerning maintenance of the track in a plan with the fastening type СКД65-Б.

### Methodology

The methodology of research is based on the comparative estimation of influence of the track width change dynamics on the periodicity of surfacing in the plan and adjusting of its width at the fastening type ДО and СКД65-Б.

In 2015, on one of the Ukrainian railways two curved track sections with the radius of 350 m were chosen. At the one track section was laid the track panel (further TP) with wooden sleepers and fastening ДО, and the second TP with the concrete sleepers and fastening СКД65-Б. The width measurements were executed after laying of two TP for five months, every 10 meters along the length of the curve.

When performing the measurements on each of the sections there were studied various additional factors, the probability of which can affect the process of changing the width of the rail track.

At TP with wooden sleepers it was observed the influence of such factors as side wear of the outer railway line, sloping caused by indentation of metal baseplate into the wooden sleeper. At TP with concrete sleepers it was mainly observed the change of track width due to the side wear of the outer railway line.

Using the obtained statistics there were determined the average values of track width change at the type fastening ДО and СКД65-Б in the curve with radius of 350 m over five months, which are presented in the Table 1.

Mean values of the track width change at the two track sections with the fastening type ДО and СКД65-Б during five months of operation are shown in the Fig. 2-3.

Table 1

Mean values of track width for each month

Fastening type in the curve	Mean value of the track width, mm				
	November	December	January	February	March
1	2	3	4	5	6
ДО	1 529.35	1 529.76	1 530.35	1 531.06	1 531.71
СКД65-Б	1 531	1 531.24	1 531.47	1 531.71	1 531.94

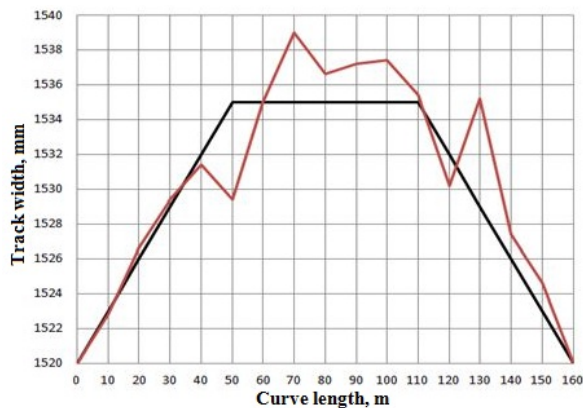


Fig. 2. Change of track width at fastening of type ДО for five months

According to the two-factor dispersion analysis [8] taking into account the above mentioned impacts, it was established the criterion of influence «F» on the track width change:

- for track panel with wooden sleepers and fastening of type ДО-  $F = 0.6824$ ;
- for track panel with concrete sleepers and fastening of type СКД65-Б –  $F = 0.3311$ .

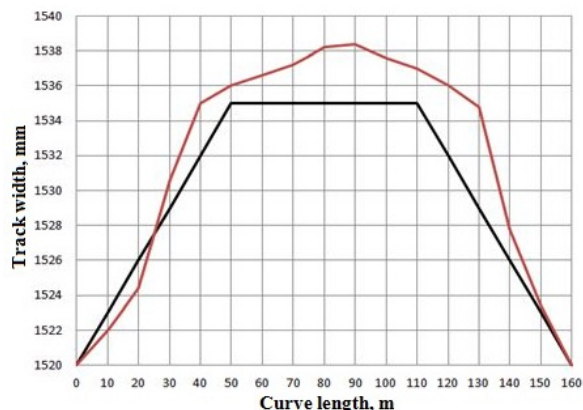


Fig. 3. Change of track width at fastening of type СКД65-Б for five months

Observation results of the track width change at the track sections with the fastening type ДО and СКД65-Б, depending on the time parameter, presented as coordinate pair «x» and «y» were approximated [8] (Fig. 4-5).

According to the approximation results in the Fig. 4-5 one can clearly see that the change of the track width with the fastening type ДО and СКД65-Б is linear, which can be described by the function:

$$y = ax + b \quad (1)$$

where  $a$ ,  $b$  – are the constant parameters.

Function parameters (1) using the method of least squares [8] can be described by the following set of equations:

$$\begin{aligned} a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i &= \sum_{i=1}^n x_i y_i, \\ a \sum_{i=1}^n x_i + nb &= \sum_{i=1}^n y_i \end{aligned} \quad (2)$$

where  $x_i$ ,  $y_i$  – are the measured coordinates of the  $i$ -th point;  $n$  – is the number of points with measured coordinates.

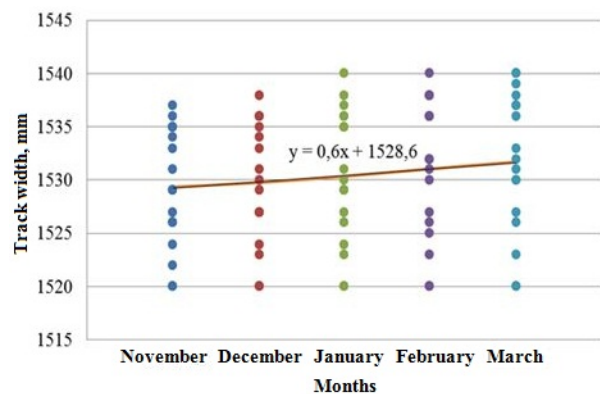


Fig. 4. Change of track width at fastening of type ДО

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

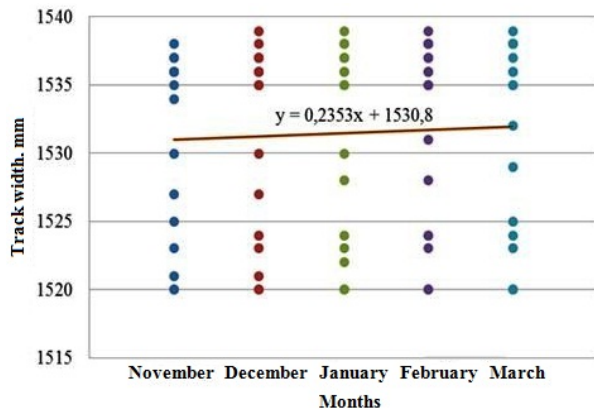


Fig. 5. Change of track width at fastening of type СКД65-Б

*Recommendations concerning the frequency of track width adjustment.* On the basis of the work [11] the state of track upon the condition of its expansion according to the tape of track measurement car is evaluated in points. According to our case for the studied track sections with radius  $R = 350$  m, the track state according to the width based on evaluation scores will be fined:

- with TP on wooden sleepers with fastening type ДО at the V-th degree;
- with TP on concrete sleepers with fastening type СКД65-Б at the V-th degree (according to [11]).

According to the obtained function (1) it was determined the time, when the track regaging (with the fastening type ДО) and track width adjusting (with the fastening type СКД65-Б) should be carried out. For clarity the frequency diagram of track width adjustment in the curve radius of 350 m with two types of fastening was constructed (Fig. 6).

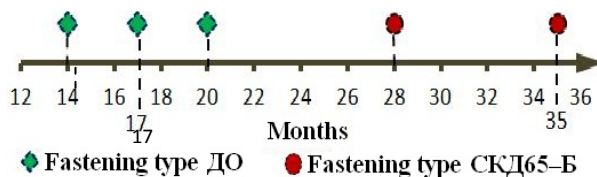


Fig. 6. Frequency of adjusting the track width of in the curve of  $R=350$  m at fastenings of type ДО and СКД65-Б

This diagram shows that after the first track width adjustment at the section with fastening type ДО, the next adjustment is carried out every three months and at the curve with fastening type СКД65-Б every 7 months.

According to the papers [7, 8] at the TP with wooden sleepers the spike fastening holes already broken after the third regaging this almost eliminates a tight pressing of rail to the rail seat using the spikes.

The proposed methodology of periodicity of the track width adjusting upon the condition of its widening at the fastening type ДО and СКД65-Б was based not on the complete elimination of widening but on the bringing to the appropriate state of retreat from the existing state, where the evaluation in points, at which the section will be fined that was the part of the range «good».

Based on the above mentioned data, and methodology track maintenance upon the condition of its widening, it is proposed to adjust the width of the track when using the intermediate rail fastening of type ДО and СКД65-Б under the schemes presented in the Figures 7-8.

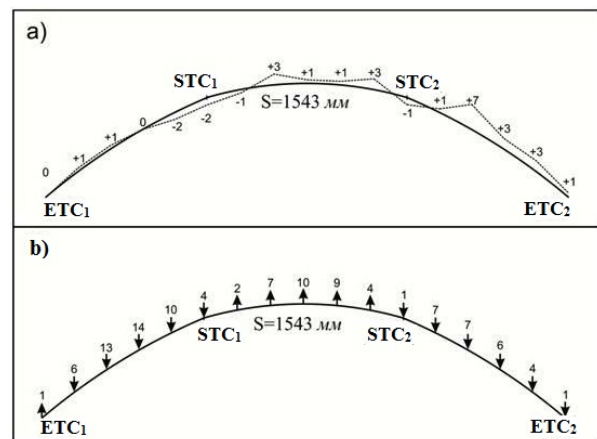


Fig. 7. Adjusting of track width in the studied curve with fastening of type ДО

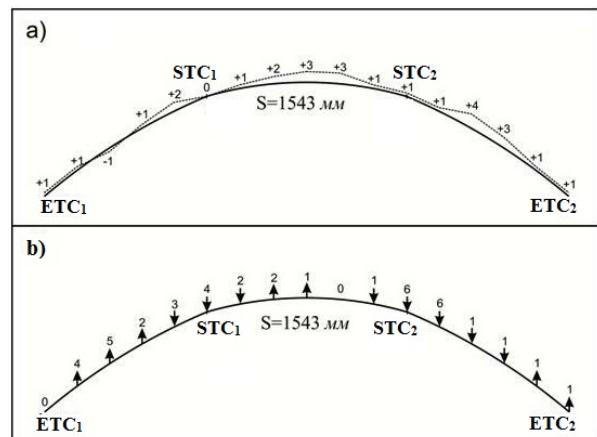


Fig. 8. Adjusting of track width in the studied curve with fastening of type СКД65-Б

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

The Figures 7a and 8a show the existing condition dashed line of the track width in curves with the dashed line, and the project condition with the solid line. The numbers show by how many millimeters the existing track width is greater (+) or less (-) than the project one. The arrows up or down in the Figures 7b and 8b show how it is necessary to expand or narrow the track (in mm) during operation of the railway track with the fastening type ДО and СКД65-Б.

*Technical and economic efficiency of the proposed recommendations.* A separate challenge was to determine the technical and economic efficiency from laying the railway track construction with concrete sleepers in curves of small radius with fastening type СКД65-Б, as compared to the railway track with wooden sleepers and fastening of type ДО.

During the studies it was used a methodology, which allows to analyze the cost-effectiveness of TS variant throughout the repair interval of operation [2]. This methodology is based on the analysis of total reduced costs:

$$\Pi_i = K_i + \sum_{t=1}^{t_{kp}} E_{ti} \eta_i + \sum_{t=0}^{t_{kp}} C_{ti} \eta_t \quad (3)$$

where  $K_i$  – are the capital investments for laying of  $i$ -th variant of track design, UAH/km (the cost for capital repairs of the track);  $E_{ti}$  – is the annual operating costs of the  $i$ -th variant, UAH/km per year;  $C_i$  – is the simultaneous costs (for complex and recreational medium and other repairs) on the  $i$ -th in each year  $t_i$ , UAH/km;  $t_i$  – is the year, in which the costs are determined;  $t_{kp}$  – is the lifetime of the most long-term variant of the track construction;  $\eta_t$  – is the cost reduction coefficient of (discount coefficient).

The cost reduction coefficient is determined by the following formula:

$$\eta_t = \frac{1}{(1 + E_{un})^t} \quad (4)$$

The calculation methodology was based on the calculation of one kilometer of track consisting of curves and straight sections. During calculations the most optimal variants of the track construction from the following ones were accepted (Fig. 9):

– is the straight (fastening type КБ) and curved track sections (fastening type СКД65-Б) – is the jointed track (Fig. 9a);

– is the straight (fastening type КБ) and curved track sections (fastening type ДО) – is the jointed track (Fig. 9b).

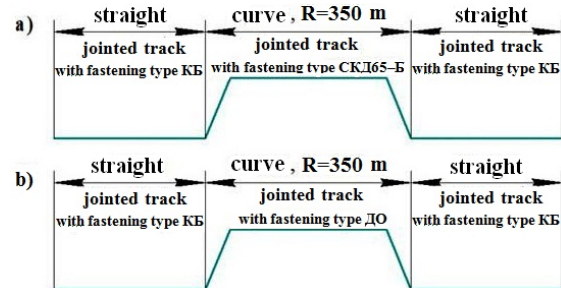


Fig. 9 Possible variants of track construction replacement:  
a – variant 1; b – variant 2

Labor costs are determined by the expression:

$$\Delta C_{on_i} = P_{IV} \cdot (\sum N_i \cdot t_{hi}) \quad (5)$$

where  $P_{IV}$  – is the hourly tariff rate corresponding to the fourth category;  $\sum N_i$  – is the total number of elements that are changed at different current repairs and maintenance;  $t_{hi}$  – is the time required for replacement of the  $i$ -th element of TS.

The cost of materials is determined by the expression:

$$\Delta C_{mam_i} = \sum N_i \cdot C_i \quad (6)$$

where  $C_i$  is and cost of the  $i$ -th element of the TS.

Chart of the total reduced costs that makes it possible to determine the payback period of laying the track construction with the fastening type СКД65-Б as compared to the construction of the track with the fastening type ДО is shown in the Fig. 10.

From the graph of total reduced costs (Fig. 10) it was established that the savings for 1 km railway track when laying the concrete sleepers in the curve of radius 350 m with the fastening type СКД65-Б is 31.5%. This is mainly due to the reduction of the time required to perform the works at the current maintenance and material savings of TS.

At the current maintenance of one kilometer of railway track with intermediate rail fastening of the type СКД65-Б the annual saving is 72.6% of the costs for existing regulations of maintenance (wooden sleepers, fastening type ДО), which is shown in the Fig. 11.



## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

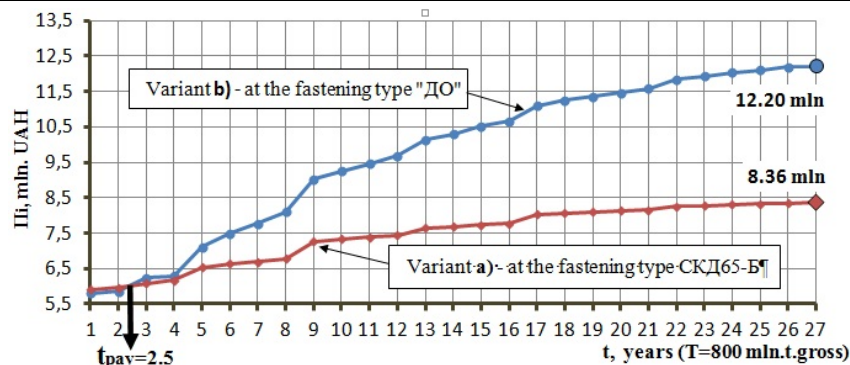


Fig. 10 Chart of the total reduced maintenance costs of railway track with fastening of type ДО and СКД65-Б

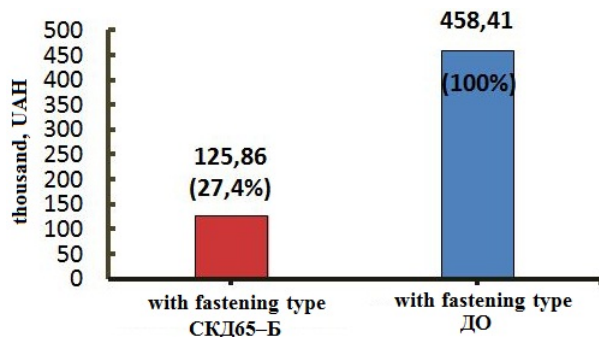


Fig. 11 The economic effect of the current maintenance of 1 km of railway track

When laying the concrete sleepers in curves with radius less than 350 m with the fastening of the type СКД65-Б according to the above mentioned studies it is reduced the number regagings and adjustings of the rail track width.

Thus, the number of regagings for the entire turnaround time (27 years, 800 mln. tons gross) is approximately:

- with wooden sleepers and fastening type ДО is 100 times;
- with concrete sleepers and fastening of type СКД65-Б is 41 times.

### Findings

Using the above mentioned studies it was found that the frequency of rail track width adjustment in the curve with radius of 350 m at the intermediate rail fastening СКД65-Б is twofold reduced as opposed to the fastening type ДО. The railway track width adjustment with the fastening type ДО is required on the 14th month and with the fastening of СКД65-Б type on the 28th month of the railway track operation.

### Originality and practical value

For the first time it was comprehensively studied, described and expressed by the empirical dependence the process of changing the track width and the frequency of its adjustment in the case of fastening type СКД65-Б.

Presented preliminary studies and recommendations make it possible to perform rail track width adjustment with the fastening of type СКД65-Б in time. This will partly prevent and eliminate further development defects of the rail track in plan occurring during its operation with simultaneous ensuring the safety of train motion.

### Conclusions

The work represents the studies, which are based on comparative assessment of the influence of the track width change on the periodicity of correction and adjusting its width at the fastening of type ДО, and СКД65-Б. It was chosen two curved sections of track with curve radius of 350 m. On the one section was laid the TP on wooden sleepers with the fastening type ДО, on the second section was the TP on concrete sleepers with the fastening type СКД65-Б.

The track width change at the above mentioned railway sections was investigated within five months of operation. Using the above mentioned data of the field tests it was for the first time established the frequency of rail track width adjustment with the fastening of СКД65-Б type during operation.

The first adjustment of track width in the curve radius of 350 m with the fastening of type СКД65-Б should be performed at the 28th month of operation.

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

tion (then every 7 months), and with the fastening of type ДО on wooden sleepers on the 14th month (then every 3 months).

Using the technical and economic calculations it was established that, unlike the track structures on wooden sleepers with the fastening type ДО, in case of laying the concrete sleepers with the fastening type СКД65-Б the economy for 1 km of railway track for the entire repair interval is 31.5%. At the current maintenance for 1 km of railway track the annual economy is 72.6%.

It was established possible number of the track for width adjustment for the entire turnaround time (800 mln. tn. gross) with concrete sleepers and the fastening type СКД65-Б decreased in 59 times.

## LIST OF REFERENCE LINKS

1. Губар, О. В. Конструкція скріплення типу СКД65-Б, можливості його застосування та визначення ділянки відводу розширення в межах перехідної кривої / О. В. Губар, М. П. Настечик // Проблеми та перспективи розвитку залізн. трансп. : тези доп. 69 Міжнар. наук.-практ. конф. / Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. – Дніпропетровськ, 2009. – С. 155.
2. Даніленко, Е. І. Залізнична колія : підруч. для вищ. навч. закл. : у 2 т. / Е. І. Даніленко. – Київ : Інпрес, 2010. – Т. 1. – 528 с.
3. Каменский, В. Б. Содержание железнодорожного пути в кривых / В. Б. Каменский, Э. Я. Шац. – Москва : Транспорт, 1987. – 189 с.
4. Лысюк, В. С. Износ деревянных шпал и борьба с ним / В. С. Лысюк // Тр. ЦНИИ МПС. – Москва : Транспорт, 1971. – Вып. 445. – С. 3–220.
5. Лысюк, В. С. Экспериментальные исследования сопротивления рельсовой нити распуру в условиях обращения тяжеловесных поездов / В. С. Лысюк, А. В. Переслечин, Е. В. Суворов // Скорости движения поездов в кривых : сб. науч. тр. / ВНИИЖТ. – Москва : Транспорт, 1988. – С. 50–60.
6. Пат. 31032 Україна, МПК<sup>7</sup> Е 01 В 9/44 Рейкове скріплення / О. В. Губар М. П. Настечик, П. В. Рагулін, В. В. Рибкін, К. В. Корноухова, В. О. Яковлев. – № 200712086 ; заявл. 01.11.2007 ; опубл. 25.03.2008, Бюл. № 6. – 3 с.
7. Рибкін, В. В. Надійність залізничної колії : навч. посіб. / В. В. Рибкін, І. О. Бондаренко, Д. М. Курган. – Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2013. – 154 с.
8. Рибкін, В. В. Оцінка впливу величини бічної-горизонтальної сили, що передається на вузол проміжного рейкового скріплення типу КБ та КПП-5 / В. В. Рибкін, І. О. Бондаренко, Р. В. Маркуль / Проблеми взаємодії колії та рухомого складу : пр. Міжнар. наук.-практ. конф., присв. 100-річчю проф. М. А. Фрішмана / Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. – Дніпропетровськ, 2013. – С. 38–39.
9. Рыбкин, В. В. Исследование вопросов внедрения конструкции бесстыкового пути на железобетонных шпалах в кривых радиусом  $R \leq 350$  м / В. В. Рыбкин, Н. П. Настечик, Р. В. Маркуль // Тр. X-ой науч.-техн. конф. с междунар. участием / Моск. гос. ун-т путей сообщ. – Москва, 2013. – С. 198–201.
10. Технічні вказівки щодо оцінки стану рейкової колії за показниками колієвимірювальних вагонів та забезпечення безпеки руху поїздів при відступах від норм утримання рейкової колії : затв. наказом Укрзалізниці № 033 Ц від 01.02.2012. – Київ : М-во інфраструктури України, 2012. – 48 с.
11. Фришман, М. А. Как работает путь под поездами / М. А. Фришман. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1987. – 189 с.
12. Яхов, М. С. Особенности перешивки колеи на старогодных шпалах при проведении унификации ширины колеи / М. С. Яхов, О. П. Ершков // Тр. ВНИИЖТа. – Москва, 1960. – Вып. 192 : Ершков О. П. Расчеты железнодорожного пути в кривых и нормы его устройства / О. П. Ершков, Л. П. Мелентьев, М. С. Яхов. – С. 146–149.
13. Ahlf, R. Matching M/W practice to require use of track / R. Ahlf // J. RT & S (Railway Track & Structures). – New York, 2016. – Vol. 10. – P. 2–3.
14. Baluch, H. Diagnostyka nawierzchni kolejowej / H. Baluch. – Warszawa : Wydawnictwa komunikacji i łączności, 1978. – 415 p.
15. Lichtberger, B. Track Compendium. Formation, Permanent Way, Maintenance, Economic / B. Lichtberger. – Hamburg : Eurailpress, 2005. – 634 p.
16. Rybkin, V. V. Stability issues of the continuous welded rail track on the concrete sleepers on the curves with radius  $R \leq 300$  m / V. V. Rybkin N. P. Nastechik, R. V. Markul // Sciences in Cold and Arid Region. – 2013. – Vol. 5. – Iss. 5. – P. 654–658. doi: 10.3724/SP.J.1226.2013.00654.

М. П. НАСТЕЧИК<sup>1</sup>, Р. В. МАРКУЛЬ<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, ел. пошта nastechik\_mp@mail.ru, ORCID 0000-0002-4178-6092

<sup>2\*</sup>Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, ел. пошта guaranga\_mr@mail.ru, ORCID 0000-0002-7630-8963

## ПЕРСПЕКТИВИ УКЛАДАННЯ СКРІПЛЕННЯ ТИПУ СКД 65-Б В КРИВИХ ДІЛЯНКАХ КОЛІЇ МАЛОГО РАДІУСА

**Мета.** На сьогоднішній день існує тенденція щодо повного переходу головних колій на залізобетонні шпали. Причиною цього є дефіцит дерев'яних шпал, їх висока вартість та низький термін служби, що в кривих ділянках колії радіусом  $R \leq 300$  м складає всього 5–7 років (це у 5 разів менше строку служби залізобетонних шпал). Із впровадженням скріплення типу СКД65-Б з'явилась можливість плавно розширювати колію від 0 мм до 14 мм та звужити – від 0 мм до 28 мм із кроком 1 мм. При збільшеному поїзному навантаженні на колію 75...130 кН в горизонтальній площині, що характерно для кривих ділянок колії  $R \leq 300$  м, часто відбуваються порушення геометрії колії у плані. Це призводить до частих виправок, періодичність проведення яких при скріпленні типу СКД65-Б на сьогоднішній день відсутня. Тому метою статті є розробка рекомендацій щодо утримання рейкової колії у плані зі скріпленням типу СКД65-Б. **Методика.** В основі методики проведення досліджень лежить порівняльна оцінка впливу динаміки зміни ширини рейкової колії на періодичність виконання виправки її в плані у випадку використання скріплення типу ДО та СКД65-Б. **Результати.** За допомогою розробленої методики досліджень було встановлено, що перше регулювання ширини рейкової колії при скріпленні типу ДО необхідно виконувати уже на 14-ий місяць, а при скріпленні типу СКД65-Б – на 28-ий місяць експлуатації. **Наукова новизна.** Вперше було описано та виражено емпіричною залежністю процес зміни ширини рейкової колії та періодичність виконання її регулювання у випадку використання скріплення типу СКД65-Б. **Практична значимість.** Розроблені авторами рекомендації дозволять вчасно виконувати регулювання ширини рейкової колії при скріпленні типу СКД65-Б і одночасно забезпечують безпеку руху поїздів.

**Ключові слова:** скріплення типу СКД65-Б; ширина колії; регулювання ширини колії, утримання колії у плані

Н. П. НАСТЕЧИК<sup>1</sup>, Р. В. МАРКУЛЬ<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, эл. почта nastechik\_mp@mail.ru, ORCID 0000-0002-4178-6092

<sup>2\*</sup>Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, эл. почта guaranga\_mr@mail.ru, ORCID 0000-0002-7630-8963

## ПЕРСПЕКТИВЫ УКЛАДКИ СКРЕПЛЕНИЯ ТИПА СКД 65-Б В КРИВЫХ УЧАСТКАХ ПУТИ МАЛОГО РАДИУСА

**Цель.** На сегодняшний день существует тенденция полного перехода главных путей на железобетонные шпалы. Причиной этого является дефицит деревянных шпал, их высокая стоимость и низкий срок службы, который в кривых участках пути радиусом  $R \leq 300$  м составляет всего 5–7 лет (что в 5 раз меньше срока службы железобетонных шпал). С внедрением скрепления типа СКД65-Б появилась возможность плавно расширять колею от 0 мм до 14 мм и сузить – от 0 мм до 28 мм с шагом 1 мм. При увеличенной поездной нагрузки на путь 75...130 кН в горизонтальной плоскости, что характерно для кривых участков пути  $R \leq 300$  м, часто происходят нарушения геометрии пути в плане. Это приводит к частым выправкам, периодичность проведения которых при скреплении типа СКД65-Б на сегодняшний день отсутствует. Поэтому целью статьи является разработка рекомендаций по содержанию рельсовой колеи в плане со связыванием типа СКД65-Б. **Методика.** В основе методики проведения исследований лежит сравнительная оценка влияния



## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

динамики изменения ширины рельсовой колеи на периодичность выполнения выправки ее в плане в случае использования скрепления типа ДО и СКД65-Б. **Результаты.** С помощью разработанной методики исследований было установлено, что первое регулирование ширины рельсовой колеи при скреплении типа ДО необходимо выполнять уже на 14-ый месяц, а при скреплении типа СКД65-Б – на двадцать восьмой месяц эксплуатации. **Научная новизна.** Впервые было описано и выражено эмпирической зависимостью процесс изменения ширины рельсовой колеи и периодичность выполнения ее регулирования в случае использования скрепления типа СКД65-Б. **Практическая значимость.** Разработанные авторами рекомендации позволяют своевременно выполнять регулировку ширины рельсовой колеи при скреплении типа СКД65-Б и одновременно обеспечивают безопасность движения поездов.

**Ключевые слова:** скрепление типа СКД65-Б; ширина колеи; регулирование ширины колеи; содержание пути в плане

## REFERENCES

1. Hubar O.V., Nastechyk M.P. Konstruktsiia skriplennia typu SKD65-B, mozhlyvosti yoho zastosuvannia ta vyznachennia diliansky vidvodu rozshyrennia v mezhakh perekhidnoi kryvoi [Fastening construction СКД65-Б, possibilities of its application and determination of area of taking of expansion within the limits of transitional curve]. *Tezy dopovidei 69 Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Problemy ta perspektyvy rozvytku zaliznychnoho transportu»* [Proc. of the 69 Int. Scientific and Practical Conf. «Problems and prospects of railway transport development»]. Dnipropetrovsk, 2009, p. 155.
2. Danilenko E.I. *Zaliznychna koliia. Tom 1* [Railway track. Vol. 1]. Kyiv, Inpres Publ., 2010. 528 p.
3. Kamensky V.B., Shats E.Ya. *Soderzhaniye zhelezнодорожного пути v krivyykh* [Maintenance of railway track in curves]. Moscow, Transport Publ., 1987. 189 p.
4. Lysyuk V.S. Iznos derevyannykh shpal i borba s nim [Wear of wooden sleepers and preventing it]. *Trudy TsNII MPS* [Proc. of the Central Research Institute of Communication Lines Ministry], 1971, vol. 445, pp. 3-220.
5. Lysyuk V.S., Pereslechin A.V., Suvorov Ye.V. Eksperimentalnyye issledovaniya soprotivleniya relsovoy niti rasporu v usloviyakh obrashcheniya tyazhelovesnykh poyezdov [Experimental research of resistance of the rail thread spacers under conditions of heavy trains]. *Skorosti dvizheniya poyezdov v krivyykh* [Rates of movement of trains in curves]. Moscow, 1988, pp. 50-60.
6. Hubar O.V., Nastechyk M.P., Rahulin P.V., Rybkin V.V., Kornoukhova K.V., Yakovlev V.O. *Reikove skriplennia* [Rail fastening]. Patent UA, no. 200712086, 2007.
7. Rybkin V.V., Bondarenko I.O., Kurhan D.M. *Nadiinist zaliznychnoi kolii* [Reliability railway line]. Dnipropetrovsk, DNURT Publ., 2013. 154 p.
8. Rybkin V.V., Bondarenko I.O., Markul R.V. Otsinka vplyvu velychyny bichnoi-horyzontalnoi syly, shcho peredaetsia na vuzol promizhnoho reikovooho skriplennia typu KB ta KPP-5 [Evaluation of the influence of the horizontal lateral-force transferred to the intermediate node of the fastening type KB and КПП-5]. *Pratsi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, prysviachenoj 100-richchiu profesora M. A. Frishmana «Problemy vzaiemodii kolii ta rukhomoho skladu»* [Proc. of Int. Scientific-Practical Conf. «Problems of interaction between the track and rolling stock», dedicated to the 100th anniversary of Professor M. A. Frishman]. Dnipropetrovsk, 2013, pp. 38-39.
9. Rybkin V.V., Nastechik N.P., Markul R.V. Issledovaniye voprosov vnedreniya konstruktsii besstykovogo puti na zhelezobetonnykh shpalakh v krivyykh radiusom  $R \leq 350$  m [Study on the introduction of design welded rails on concrete sleepers in a curve with a radius of less than 300 m]. *Trudy X-oy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* [Proc. of the X-th Sci. Conference with international participation]. Moscow, 2013, pp. 198-201.
10. *Tekhnichni vказivky shchodo otsinky stanu reikovoї kolii za pokaznykamy kolievymiriuvalnykh vahoniv ta zabezpechennia bezpeky rukhu poizdiv pry vidstupakh vid norm utrymannia reikovoї kolii* [Technical guidelines for assessment of rail track by track measuring performance cars and ensuring traffic safety in deviation from the norms of rail track maintenance]. Kyiv, M-vo infrastruktury Ukrainy Publ., 2012. 48 p.
11. Frishman M.A. *Kak rabotayet put pod poyezdami* [How works the track under trains]. Moscow, Transport Publ., 1987. 189 p.
12. Yakhov M.S., Yershkov O.P., Melentyev L.P. Osobennosti pereshivki kolei na starogodnykh shpalakh pri provedenii unifikatsii shirini kolei [Peculiarities of regaging the track on the used sleepers during the unification of track width]. *Raschety zhelezнодорожного пути v krivyykh i normy yego ustroystva* [Calculations of railway track in curves and norms of its devices]. Moscow, Transport Publ., 1960, pp. 146-149.

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

13. Ahlf R. Matching M/W practice to require use of track. *Journal RT & S (Railway Track & Structures)*, 2016, vol. 10, pp. 2-3.
14. Baluch H. Diagnostyka nawierzchni kolejowej. Warszawa, Wydawnictwa komunikacji i łączności Publ., 1978. 415 p.
15. Lichtberger B. Track Compendium. Formation, Permanent Way, Maintenance, Economic. Hamburg, Eurailpress Publ., 2005. 634 p.
16. Rybkin V.V., Nastechik N.P., Markul R.V. Stability issues of the continuous welded rail track on the concrete sleepers on the curves with radius  $R \leq 300$  m. *Sciences in Cold and Arid Region*, 2013, vol. 5, issue 5, pp. 654-658. doi: 10.3724/SP.J.1226.2013.00654.

*Prof. V. D. Petrenko, Sc. Tech. (Ukraine); Head of Dnipropetrovsk track distance (FC-9): Regional branch of «Prydniprovsk Railways» O. O. Saldyha (Ukraine) recommended this article to be published*

Accessed: Feb. 05, 2016

Received: June 02, 2016

# ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 504.81:004.94

T. M. VASETSKA<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Computer and Information Technologies», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport  
named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (098) 237 05 21,  
e-mail tetyana@vasetsky.com, ORCID 0000-0001-7008-2839

## MODELLING THE MODIFIED METHOD OF ANALYTIC HIERARCHY PROCESS BY MEANS OF CONSTRUCTIVE AND PRODUCTIVE STRUCTURES

**Purpose.** In the study it is supposed: 1) to extend the classical method of analytic hierarchy process (AHP) for a great number of alternatives and criteria; 2) to build a model of constructive decision making process using a modified method of analytic hierarchy process with sorting (AHPS). **Methodology.** To achieve this purpose the mechanism of constructive and productive structures (CPS) was used; the refining transformations of the generalized constructive-productive structure (GCPS) were fulfilled. **Findings.** The developed model of the constructive process is the interaction between the three structures: the general CPS of AHPS, which allows to set criteria and alternatives and performs the decomposition of task hierarchical structure; CPS of grouping and sorting, which divides alternatives (criteria) into groups and implements the classic single-level AHP for each group, as well as calculates estimates of paired comparisons based on the input data; CPS of single-level classic AHP, which allows to fill the matrix of paired comparisons and calculates the ranks of alternatives. All three structures interact at different levels of transformations: by data conformity at the level of concretization and using of implementations. The proposed model allowed moving to the more abstract level in presentation of decision making problem solving for a great number of criteria and alternatives. **Originality.** The paper proposes to use CPS mechanism for formalizing modifications of AHP with sorting for decision making problem solving with a great number of criteria and alternatives. **Practical value.** The formalization of the presentation of the analytic hierarchy process and its modifications allows extending the range of applications of this method, as well as unifying the description of various AHP modifications. Such presentation provides the possibility for developing the programs to implement the method hybrid modifications. Using different interpretations presented in the article of CPS will allow for other approaches in determining the coherence of pairwise comparison matrices, estimate calculation and ranks of alternatives and criteria.

**Keywords:** modelling; constructive and productive structure; constructive process; analytic hierarchy process; modification

### Introduction

Analytic Hierarchy Process (AHP) [4, 11], proposed by Saaty, received worldwide recognition and is used to solve the decision-making problems in different areas. There are many versions of this method, which take into account the specificity of the tasks, can reduce the existing restrictions on the

use of this method [1–3, 13, 14], or use AHP in combination with other decision-making methods (mathematical methods of multi-criteria analysis, statistical methods etc.) [10, 12]. There are a lot of developed software tools, which implement both the method itself and its modifications [2, 9, 14, 15].

[14] presents the modification of AHP with sorting (AHPS) which may be used while ranking a large number of alternatives. The essence of this method is that all alternatives are divided into groups in threes (fours) and for each group the classical AHP is applied. If the position of alternatives in groups changes, the rearrangement is performed. Some estimates not yet identified by the expert are calculated on the basis of already determined ones at each step. This greatly facilitates the work of an expert.

### Purpose

The purpose of this work is to extend the classical AHP for a great number of alternatives and criteria. To do this, it is proposed to present the AHPS-based constructive decision-making process by the constructive and productive structures (CPS) [6]. In [8] CPS tools formalize the alternatives ranking process using the classical AHP.

To represent AHPS there was developed a system of three interacting CPS: directly AHPS, grouping and sorting CPS and CPS of single-level classical AHP.

### Methodology

To achieve this purpose, the mechanism of constructive and productive structures is used. CPS is a powerful device for formalization and modelling of processes [5–8]. By performing different transformations of the generalized constructive and productive structure (GCPS) [6], namely, specialization, interpretation, specification and implementation, the different models are developed [7]. GCPS is called a triple [6]:

$$C_G = \langle M, \Sigma, \Lambda \rangle,$$

where  $M$  – heterogeneous structure medium  $\Sigma$  – signature; consisting of sets of the binding operations, substitution and output operations; operations on attributes and substitutive relations;  $\Lambda$  – constructive axiomatics [6].

CPS purpose is to form the sets of structures using binding, substitution and other operations defined by axiomatic rules.

### Findings

This paper presents a modified AHPS model [14] on the basis of CPS with unconstrained number of criteria and alternatives.

All three CPS interact at the specification level: data coherence connection and at the implementation level: CPS AHPS uses implementation of grouping and sorting CPS for the criteria and for a set of alternatives for each criterion, the grouping and sorting CPS uses the implementation for each CPS group of a single-level AHP.

*Constructive and productive structure of AHPS.* Let us determine the GCPS specialization [6] to represent the analytic hierarchy process with sorting:

$$C = \langle M, \Sigma, \Lambda \rangle \xrightarrow{s} C_{AHPS} \langle M_{AHPS}, \Sigma_{AHPS}, \Lambda_{AHPS} \rangle$$

where  $C$  – OKIIC,  $M$  – heterogeneous medium,  $\Sigma$  – signature,  $\Lambda$  – axiomatics,  $\xrightarrow{s}$  – specialization operation,  $\Lambda_{AHPS} = \Lambda \cup \Lambda_1$ ,  $\Lambda_1 = \{M_{AHPS} \supset T_1 \cup N_1, \Sigma_{AHPS} = \{\Xi, \Theta, \Phi, \Pi\}, \Theta = \{\Rightarrow, \models, \Vdash\}, \Pi = \{\rightarrow\}, \Phi = \{\div, *, :=, <, \nabla\}, \Xi = \{\cdot, \circ, \diamond\}, \Xi$  – binding operations,  $\Theta$  – output operations,  $\Pi$  – substitution operations,  $\Phi$  – operation on attributes.

Partial axiomatics  $\Lambda_1$  contains the following definitions, additions and constraints that specify alphabet, medium attributes, substitutive relations, set the features of substitution and output operations.

Terminal alphabet contains a set of alternatives  $\{_{name,v}x_i\}$  and criteria  $\{_{name,v}k_p\}$  with their attributes:  $x_i$  – alternative identifier,  $name$  – semantics,  $v$  – global priority (weight);  $k_p$  – criterion identifier.

Alternatives and criteria, valid assessment values are contained in a heterogeneous medium  $M_{AHPS}$ .

The following operations on attributes are introduced:

$\div(c;n;L)$  – conditional  $n$  operations from the list  $L$ , if  $c = true$ ,  $L = (j_1, j_2, \dots, j_n)$ , operations are presented in the prefix form;

$*$  – vector-number multiplication operation;

$:=$  – assignment operation;

$<$  – less-than comparison;

$\nabla$  – attribute value seek operation, by an external server.

The substitution rules are written as  $\Psi_{r,i,j} : \langle s_{r,i,j}, g_{r,i,j} \rangle \in \Psi$ , where  $s_{r,i,j}$  – substitu-

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

tive relation,  $g_{r,i,j}$  – a set of operations on attributes,  $r$  – rule number,  $i, j$  – numbers of the first and the second pair of alternatives. Three-level indexing is used for ordering the substitution rules.

Binary partial output operation [6]  $l^* = (\Rightarrow(\Psi, l))$  (here  $l, l^*$  – forms before and after the substitution operation), consists of:

1) selecting one of the substitution rules  $\Psi_r : \langle s_{r,i,j}, g_{r,i,j} \rangle \in \Psi$ , with substitutive relations  $s_{r,i,j}$  and performing the substitution operation on its basis. Availability of substitutive relation  $s_{r,i,j}$  is determined by the availability attribute value  $d_{r,i,j} \leftarrow s_{r,i,j}$ : if  $d_{r,i,j} \leftarrow s_{r,i,j} = 1$  the relation is available,  $d_{r,i,j} \leftarrow s_{r,i,j} = 0$  – not available; the availability of rules is regulated by operations on attributes or is given by axiomatics;

2) carrying out operations on attributes  $g_{r,i,j}$ .

The order of the operation on attributes in the process of performing partial output operation is given by the attribute  $\tau_j$ , where  $\tau_j \in I$ ,  $I = \{\tau_0, \tau_1\}$ ,  $I \subset M_{AHPS}$ ,  $\tau_0$  – the operation on attribute is performed before the substitution operation,  $\tau_1$  – after the substitution operation.

Complete output (or output) operation is the sequential partial output operation, starting from the initial nonterminal and finishing with the construction that satisfies the output completion condition. The result of the complete output operation is the construct containing the ordered sequence of alternatives.

The output completion condition is the absence of non-terminals in the form.

Suppose we have the following basic algorithmic structure (BAS) [6], which comprises the steps of performing operations by condition, matrix operations, as well as the launch of AHPS for criteria and alternatives:

$$C_{A,AHPS} = \langle M_{A,AHPS}, \Sigma_{A,AHPS}, \Lambda_{A,AHPS} \rangle,$$

where  $M_{A,AHPS}$  – heterogeneous medium that contains  $V_{A,AHPS}$ ,  $\Sigma_{A,AHPS}$  – signature and  $\Lambda_{A,AHPS}$  – axiomatics,  $V_{A,AHPS} \supset \{A_1^0 |_{A_i, A_j}^{A_i \cdot A_j}, A_{22}^0 |_{a,b}^{a \odot b}, A_{23}^0 |_{\alpha, b}^{\alpha \odot b}\}$  – a set of forming algorithms for a particular server,

and  $\{A_2 |_{l_h, l_q, f_i}^{f_j}, A_3 |_{f_i, \Psi}^{f_j}, A_4 |_{f_i, \Psi}^{f_j}\} \cup V_w$  – a set of constructed algorithms,  $\{A_5 |_{c,n,L}^L, A_6^0 |_{a,b}^P,$

$A_7^0 |_{a,b}^a, A_8^0 |_{a,b}^c, A_9^0 |_a^b, A_{18}^0 |_{a,b}^c, A_{10}^0 |_{a,b}^c, A_{11}^0 |_{a,b}^c, A_{12}^0 |_{a,b}^c,$   
 $A_{13}^0 |_{a,b}^a, A_{14}^0 |_{a,b}^c, A_{15}^0 |_{N\gamma}^{is}, A_{16}^0 |_{N\gamma}^{\bar{r}}, A_{17}^0 |_a^c, A_{18}^0 |_{a,b}^c,$

$A_{19}^0 |_{a,b}^c, A_{20}^0 |_{a,b}^c, A_{21}^0 |_{x_i, x_j, k_p}^{a,h}\} \in V_w$  – algorithms for operations  $\Phi$  on attributes.

The above algorithms execute the following operations:

- $A_1^0 |_{A_i, A_j}^{A_i \cdot A_j}$  – algorithm concatenation (sequential algorithm  $A_i$  after  $A_j$ );
- $A_2 |_{l_h, l_q, f_i}^{f_j}$  – substitution;
- $A_3 |_{f_i, \Psi}^{f_j}, A_4 |_{\sigma, \Psi}^{\bar{\Omega}}$  – partial and complete output. Here  $f_i, f_j$  – forms,  $\sigma$  – initial nonterminal,  $\bar{\Omega}$  – a set of formed constructs;
- $A_5 |_{c,n,L}^L$  – execution of  $n$  algorithms from the list  $L$ , if  $c = true$ ;
- $A_6^0 |_{a,b}^c$  – calculation of the product  $a * b$ ,  $a$  and  $b$  can be matrices or numbers;
- $A_7^0 |_{a,b}^a$  – assigning a value to a variable  $a = b$ ;
- $A_9 |_a^b$  – determining the value of  $a$  by an external server;
- $A_{10}^0 |_{a,b}^c$  – calculation of the quotient of  $a$  by  $b$ ;
- $A_{11}^0 |_{a,b}^c$  – calculation of the remainder on dividing  $a$  by  $b$ ;
- $A_8^0 |_{a,b}^c, A_{12}^0 |_{a,b}^c, A_{13}^0 |_{a,b}^c, A_{19}^0 |_{a,b}^c, A_{20}^0 |_{a,b}^c$  – comparison of numbers  $a$  and  $b$ , if the condition is satisfied ( $a \leq b, a \neq b, a = b, a > b, a < b$ ), then  $c = true$ , otherwise  $c = false$ ;
- $A_{13}^0 |_{a,b}^a$  – assigning the value  $b$  to the variable  $a$ , the values  $a$  and  $b$  can be vectors, matrices, or numbers;
- $A_{14}^0 |_{a,b}^c$  – logical AND of the two conditions  $a$  and  $b$ , true, if both conditions are true;
- $A_{15}^0 |_{N\gamma}^{is}$  – calculation of the conformity relation of the pairwise comparison matrix (PCM)  $_N \bar{\gamma}$ ;

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

–  $A_{16}^0 |_{N\gamma}^{\bar{r}}$  – calculation of the alternative priority vector by PCM  $N\gamma$ ;

–  $A_{17}^0 |_{a,b}^c$  – calculation of integral part of the real number  $a$ ;

–  $A_{18}^0 |_{a,b}^c$  – calculation of the sum  $a+b$ ,  $a$  and  $b$  can be matrices or numbers;

–  $A_{21}^0 |_{x_i, x_j, k_p}^{a,h}$  – determination of the link weight of  $i$  and  $j$  alternatives by the criterion  $k_p$  by an external server ( $h=1$ );

–  $A_{22}^0 |_{a,b}^{a \circ b}$  – binding alternatives and criteria, where  $a, b$  – identifiers of alternatives or criteria or links between them;

–  $A_{23}^0 |_{a,b}^{\alpha \delta b}$  – binding  $b$  implementation result to non-terminal of CPS implementation use  $\alpha$ .

Interpretation of the main CPS for the modified analytic hierarchy process:

$$\begin{aligned} \langle C_{AHPS} = \langle M_{AHPS}, \Sigma_{AHPS}, \Lambda_{AHPS} \rangle, \\ C_{A,AHPS} = \langle M_{A,AHPS}, \Sigma_{A,AHPS}, \Lambda_{A,AHPS} \rangle \rangle_I \mapsto \\ I \mapsto C_{AHPS} = \langle M_{AHPS}, \Sigma_{AHPS}, \Lambda_{I,AHPS}, Z \rangle, \end{aligned}$$

where  $I \mapsto$  – interpretation operation;  $Z$  – a set of servers that can use all BAS algorithms;  $C_{A,AHPS}$

$$\begin{aligned} \Lambda_{I,AHPS} &= \Lambda_{AHPS} \cup \Lambda_3, \\ \Lambda_3 &= \{ (A_1^0 |_{A_i, A_j}^{A_i \cdot A_j} \lhd \cdot), (A_2^0 |_{l_h, l_q, f_i}^{f_j} \lhd \Rightarrow), (A_3^0 |_{f_i, \Psi}^{f_j} \lhd \Rightarrow), \\ & (A_4^0 |_{\sigma, \Psi}^{\bar{\sigma}} \lhd \Rightarrow), (A_6^0 |_{a,b}^c \lhd *), (A_7^0 |_{a,b}^a \lhd :=), \\ & (A_8^0 |_{a,b}^c \lhd <), (A_5^0 |_{c,n,L}^L \lhd \div), (A_{23}^0 |_{a,b}^{\alpha \delta b} \lhd \Diamond) \}. \end{aligned}$$

Let us represent CPS specification for the analytic hierarchy process with sorting:

$$\begin{aligned} I C_{AHPS} &= \langle M_{AHPS}, \Sigma_{AHPS}, \Lambda_{I,AHPS}, Z \rangle \quad K \mapsto \\ K \mapsto C_{K,AHPS} &= \langle M_{AHPS}, \Sigma_{K,AHPS}, \Lambda_{I,AHPS} \cup \Lambda_4 \cup \\ & \cup \Lambda_5, Z \rangle, \end{aligned}$$

where

$$\Lambda_4 = \{T_1 = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_N, k_1, \dots, k_P\},$$

$$N_1 = \{ {}_{P,N} \sigma, {}_Q \bar{\lambda}, \alpha_1, \dots, \alpha_P, {}_Q \bar{\phi}_1, \dots, {}_Q \bar{\phi}_P, \chi \},$$

$U = \{ {}_{P,N} \sigma \}, \quad \Psi_K = \{ \Psi_r : \langle s_{r,i,j}, g_{r,i,j} \rangle \}, \quad r = \overline{1,6},$   
 $r$  – rule number,  $i$  – number of the first alternative,  $j$  – the number of the second alternative of the pair,  $x_i$  – terminal for identifier of the  $i$ -th alternative,  $k_l$  – terminal for identifier of the  $l$ -th criterion,  $U$  – a set of initial non-terminals,  $\alpha_l$  – non-terminal for processing alternatives by the  $l$ -th criterion,  $\chi$  – non-terminal for implementation of the grouping and sorting CPS for criteria,  ${}_Q \bar{\lambda}$  – non-terminal of CPS criteria (where  $Q = \{ \bar{r}, is, N \}$  – a set of attributes:  $\bar{r}$  – vector of PCM priorities,  $is$  – matrix conformity relation,  $N$  – matrix dimension),  ${}_Q \bar{\phi}_l$  – PCM alternatives by  $l$ -th criterion.

Partial axiomatic  $\Lambda_5$  is as follows.

The number of criteria  $P$  and the number of alternatives  $N$ , as well as the semantics of alternatives and criteria are given at the stage of execution by an external server.

The record of the sequential concatenation of several terminals, non-terminals and sequential operations on attributes will be represented as follows:

$$x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n = \prod_{i=1}^n x_i.$$

The record  $\prod_{i=1}^N \prod_{j=i+1}^N (\alpha \quad d_{r,i,j} \rightarrow \beta)$  means that

the rule consists of a sequence of substitutive relations with a given availability attribute. If the substitutive relation is available, then it is performed and the availability of the next relation in the sequence is determined, otherwise this relation is omitted, and the availability of the next one in the sequence is determined.

The rules that do not change the current construct have void substitutive relation.

It is assumed that  $d_{r,i,j} \lhd s_{r,i,j} = 1$ , for each  $r = \overline{1,5}$ , so this attribute in these rules is omitted. Here are the rules and their brief description.

The substitutive relation  $s_{1,0,0}$  is used to enter the processing sequence of criteria and alternatives by criteria. Operations on attributes determine the

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

quantity and the semantics of criteria and alternatives:

$$s_{1,0,0} = \left\langle \left\langle P, N \right\rangle \sigma \rightarrow \chi \left| \frac{\bar{q}\bar{\lambda}}{p\bar{k}, 0, p\bar{k}} \diamond \bar{q}\bar{\lambda} \cdot \prod_{p=1}^P (\alpha_p) \right\rangle, \right.$$

$$\tau_0 g_{1,0,0} = \left\langle \left\langle N := \nabla(N), P := \nabla(P), \prod_{i=1}^P (k_i := \nabla(k_i)); \right. \right.$$

$$\left. \left. \prod_{i=1}^N (x_i := \nabla(x_i)) \right\rangle \right.$$

The relation  $s_{2,0,0}$  uses implementation of the grouping and sorting CPS for the alternatives for each criterion, and  $s_{3,0,0}$  is used to get the implementation results of the sorting and grouping CPS for criteria:

$$s_{2,0,0} = \left\langle \prod_{p=1}^P (\alpha_p \rightarrow \chi \left| \frac{\bar{q}\bar{\phi}_p}{N\bar{x}, p, p\bar{k}} \diamond \bar{q}\bar{\phi}_p \right\rangle) \right.$$

$$s_{3,0,0} = \left\langle \chi \left| \frac{\bar{q}\bar{\lambda}}{p\bar{k}, 0, \varepsilon} \diamond \bar{q}\bar{\lambda} \rightarrow \bar{q}\bar{\lambda} \right\rangle \right.$$

The relation  $s_{4,0,0}$  is used to obtain the implementation result of the grouping and sorting CPS for alternatives:

$$s_{4,0,0} = \left\langle \prod_{p=1}^P (\chi \left| \frac{\bar{q}\bar{\phi}_p}{N\bar{x}, p, p\bar{k}} \diamond \bar{q}\bar{\phi}_p \rightarrow \bar{q}\bar{\phi}_p \right\rangle) \right.$$

The following substitutive relation is aimed to enter a set of alternatives into the construct. Operations on attributes contain the calculation of global alternative priorities:

$$s_{5,0,0} = \left\langle \bar{q}\bar{\lambda} \cdot \prod_{p=1}^P (\bar{q}\bar{\phi}_p) \rightarrow \prod_{i=1}^N ({}_v x_i) \right\rangle,$$

$$\tau_0 g_{5,0,0} = \left\langle \prod_{i=1}^N ({}_v \lambda_i := (\bar{r}_p \cdot \lambda) * r_i \cdot \phi_p) \right\rangle.$$

The set of substitutive relations  $s_{6,0,0}$  allows ordering the alternatives into constructs according to their ranks:

$$s_{6,0,0} = \left\langle \prod_{i=1}^{N-1} \prod_{j=i+1}^N ({}_v x_i \cdot {}_v x_j \xrightarrow{d_{6,i,j}} {}_v x_j \cdot {}_v x_i) \right\rangle,$$

$$\tau_0 g_{6,0,0} = \left\langle \prod_{i=1}^{N-1} \prod_{j=i+1}^N (\div ({}_v \lambda_i < {}_v \lambda_j; 1; d_{6,i,j} := 1)) \right\rangle.$$

The implementation of this CPS is the set of alternatives ordered in accordance with the calculated ranks.

*Constructive and productive structure of alternatives grouping and sorting (CPS of AGS).* Let us determine the GCPs specialization to represent the grouping and sorting subsystem for AHPS:

$$C = \langle M, \Sigma, \Lambda \rangle \xrightarrow{s} C_{GSA} \langle M_{GSA}, \Sigma_{GSA}, \Lambda_{GSA} \rangle$$

where  $\Lambda_{GSA} = \Lambda \cup \Lambda_6$ ,  $\Lambda_6 = \{M_{GSA} \supset T_2 \cup N_2$ ,  $\Sigma_{GSA} = \{\Xi, \Theta, \Phi, \Pi\}$ ,  $\Pi = \{\rightarrow\}$ ,  $\Theta = \{\Rightarrow, \models, \Vdash\}$ ,  $\Xi = \{\cdot, \circ, \diamond\}$ ,  $\Phi = \{\div, *, :=, >, \leq, \%, +, \backslash, =, \neq, \&, \hbar, \lambda, []\}$ ,  $\Xi$  – binding operation,  $\Theta$  – output operations,  $\Phi$  – operations on attributes,  $\Pi$  – substitution operations.

Partial axiomatics  $\Lambda_6$  is presented below.

Terminal alphabet contains many alternatives and criteria with their attributes.

The substitution rules include a substitutive relation and a set of operations on attributes. The substitutive relations contain the available attribute  $d_r$ , where  $r$  – the rule number that takes the value 1 – the relation is available and 0 – not available. For the rules with a constant availability attribute ( $d_r=1$ ) this attribute is omitted for record simplicity.

To interpret the CPS of alternative grouping and sorting let us use БАС  $C_{A,AHPS}$ , described above:

$$\langle C_{GSA} = \langle M_{GSA}, \Sigma_{GSA}, \Lambda_{GSA} \rangle,$$

$$C_{A,AHPS} = \langle M_{A,AHPS}, \Sigma_{A,AHPS}, \Lambda_{A,AHPS} \rangle \xrightarrow{I} \mapsto$$

$$I \mapsto_I C_{GSA} = \langle M_{GSA}, \Sigma_{GSA}, \Lambda_{I,GSA}, Z_{GSA} \rangle,$$

where

$$\Lambda_{I,GSA} = \Lambda_{GSA} \cup \Lambda_7, \Lambda_7 = \{(A_1^0 |_{A_i, A_j}^{A_i, A_j} \cdot \cdot),$$

$$(A_2^f |_{f_i, f_j}^{f_j} \cdot \cdot \Rightarrow), (A_3^f |_{f_i, \Psi}^{f_j} \cdot \cdot \Rightarrow), A_4^{\bar{\Omega}} |_{\sigma, \Psi}^{\bar{\Omega}} \cdot \cdot \Rightarrow),$$

$$(A_6^0 |_{a,b}^c \cdot \cdot *), (A_7^0 |_{a,b}^a \cdot \cdot :=), (A_8^0 |_{a,b}^c \cdot \cdot \leq),$$

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

$$\begin{aligned} & (A_5^0 |_{c,n,L}^L \dashv \div), (A_{10}^0 |_{a,b}^c \dashv /), (A_{11}^0 |_{a,b}^c \dashv \%), \\ & (A_{12}^0 |_{a,b}^c \dashv \neq), (A_{13}^0 |_{a,b}^c \dashv =), (A_{14}^0 |_{a,b}^c \dashv \&), \\ & (A_{15}^0 |_{N,\gamma}^{is} \dashv \hbar), (A_{16}^0 |_{N,\gamma}^{\bar{r}} \dashv \lambda), (A_{17}^0 |_{a,b}^c \dashv \square), \\ & (A_{18}^0 |_{a,b}^c \dashv +), (A_{19}^0 |_{a,b}^c \dashv >), (A_{23}^0 |_{\alpha,b}^{\alpha\delta} \dashv \diamond). \end{aligned}$$

We concretize CPS of alternative grouping and sorting:

$$\begin{aligned} {}_I C_{GSA} &= \langle M_{GSA}, \Sigma_{GSA}, \Lambda_{I,GSA}, Z_{GSA} \rangle \quad K \mapsto \\ K \mapsto C_{K,GSA} &= \langle M_{GSA}, \Sigma_{K,GSA}, \Lambda_{I,GSA} \cup \Lambda_7 \cup \\ & \quad \cup \Lambda_8, Z_{GSA} \rangle, \end{aligned}$$

where

$$\begin{aligned} \Lambda_7 &= \{T_2 = T_1 \cup \{\bar{q} y_{m,j}\} \cup \{\bar{q} y'_{m,j}\} \cup \{\bar{q} z_{m,j}\}, \\ m = \overline{1, M} \text{ и } j = \overline{1, 4}, N_2 &= \{ {}_{P,N} \chi, {}_{N,p} \gamma, {}_{p,n} \bar{\beta}, {}_Q \lambda, \\ & \quad \cup | {}_{p,n} \bar{\beta}_m \cdot \prod_{i=1}^n (\bar{q} y_{m,i}), {}_{p,k_p} \bar{\beta}_m \cdot \prod_{i=1}^n (\bar{q} y_{m,i}), {}_{p,k_p} \bar{\beta}_m \cdot \prod_{i=1}^n (\bar{q} y_{m,i}) \}, \\ & \quad k_{3,k_4,M} \alpha, \{\chi_m\} \cup \{\chi_{ch,n} \Psi_m, \chi_{ch,n} \Psi'_m\}, \\ m = \overline{1, M}, U &= \{ {}_{P,N} \chi \}, \Psi_K = \{\Psi_r : \langle s_r, g_r \rangle\}, \end{aligned}$$

$r = \overline{1, 14}$ ,  $r$  – rule number,  $k_{3,k_4,M} \alpha$  – is responsible for determining the number of groups with four and three alternatives ( $k_3, k_4$  – number of groups with three or four alternatives in the group, respectively,  $M$  – total number of groups);  $ch, n \Psi_m$ ,  $ch, n \Psi'_m$  – non-terminals of  $m$ -th group of alternatives, with attributes  $ch$  – flag indicating the alternative position changes in the group (1 – alternatives changed their position after ranking in the group, 0 – did not change);  ${}_{N,p} \gamma$  – PCM for  $N$  alternatives according to the criterion  $p$ , matrix elements, non-terminals  ${}_{a,h} \gamma_{i,j}$  with attributes:  $a$  – evaluation of comparison of  $i$  and  $j$  alternatives,  $h$  – evaluation process tool, ( $h=1$  – filled according to the evaluation by an external server, expert,  $h=0$  – without the involvement of an external expert on the basis of substitution rules);

${}_{p,n} \bar{\beta}_m$  – PCM by criterion  $p$  for the group  $m$ , consisting of  $n$  – alternatives, this matrix elements are non-terminals  ${}_{p,a,h} \beta_{m,i,j}$ , where the attributes  $a$  and  $h$  – the same as for  ${}_{a,h} \gamma_{i,j}$ ;  $\cup | {}_{p,n} \bar{\beta}_m \cdot \prod_{i=1}^n (\bar{q} y_{m,i}), {}_{p,k_p} \bar{\beta}_m \cdot \prod_{i=1}^n (\bar{q} y_{m,i})$  – non-terminal of CPS implementation of the single-level classical AHP for the group alternatives:  $\prod_{i=1}^n \bar{q} y_{m,i}$  – set of alternatives for AHP ranking,  $p$  – ranking criterion number,  ${}_{p,k} \bar{\beta}$  – criterion vector,  ${}_{Q} \lambda$  – PCM of alternatives of the group with calculated ranks and conformity relation,  ${}_n L'$  – list of alternatives ordered according to the ranks,  ${}_{p,n} \bar{\beta}_m$  – PCM of alternatives in the group  $n$ ;  $\chi_m$  – non-terminal to prepare  $m$ -th group alternatives for ranking;  $all \eta$  – non-terminal to calculate the parameters of the general PCM of alternatives (missing evaluations of paired comparisons, conformity relation and matrix completion control);  $\{\bar{q} y_{m,i}\}$ ,  $\{\bar{q} y'_{m,i}\}$ ,  $\{\bar{q} z_{m,i}\}$  – set of alternatives in the group  $m$ ,  $y$ ,  $y'$ ,  $z$  – alternative identifier,  $\bar{q} = [name, v, u, \bar{r}, l]$  – set of attributes where  $name$  – alternative semantics,  $v$  – global priority (weight) of an alternative,  $u$  – global number of alternative,  $\bar{r}$  – alternative weight vector by criteria,  $l$  – criterion number.

The first rule with the substitutive relation, which enters into the construct the sequence of alternatives, PCM by  $p$ -th criterion and non-terminal with attributes to work with groups. The operations on attributes calculate the number of groups from 3 and 4 alternatives and the total number of groups. The alternative paired comparison evaluations are completed with default values:

$$\begin{aligned} s_1 &= \left\langle \chi | {}_{N \times p, p, k} \bar{\lambda} \rightarrow \prod_{u=1}^N ({}_{name,v} x_u) \cdot {}_{p,N} \bar{\gamma} \cdot k_{3,k_4,M} \alpha \right\rangle, \\ {}_{\tau_0} g_1 &= \langle flag := 0, \div (N \% 4 = 0; 3; (k_4 \dashv \alpha := N / 4), \\ & (k_3 \dashv \alpha := 0), (flag := 1)), \div (N = 3; 3; (k_4 \dashv \alpha := 0), \\ & (k_3 \dashv \alpha := 1), (flag := 1)), \div (N = 5; 3; (k_4 \dashv \alpha := 0), \end{aligned}$$



## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

$$(k_3 \downarrow \alpha := 2), (flag := 1)), \div (flag = 0; 2;$$

$$(k_4 \downarrow \alpha := N / 4 - (3 - N \% 4)),$$

$$(k_3 \downarrow \alpha := (N - k_4 \downarrow \alpha * 4) / 3)),$$

$$M \downarrow \alpha := k_3 \downarrow \alpha + k_4 \downarrow \alpha;$$

$$\prod_{i=1}^N (\prod_{j=i+1}^N (a \downarrow_p \gamma_{i,j} := 0; a \downarrow_p \gamma_{j,i} := 0; h \downarrow_p \gamma_{i,j} := 0;$$

$$h \downarrow_p \gamma_{j,i} := 0; a \downarrow_p \gamma_{i,i} := 1; h \downarrow_p \gamma_{i,i} := 0;)) \rangle.$$

The following relation is applied for breakdown of the alternatives into the groups. The operations on attributes get the conformity between the general list of alternatives and alternatives in groups:

$$s_2 = \left\langle \prod_{u=1}^N (\bar{q} x_u) \cdot k_3, k_4, M \alpha \rightarrow \prod_{m=1}^{M \downarrow \alpha} (\psi_{ch,n} \cdot \prod_{i=1}^{n \downarrow \psi_m} \bar{q} y_{m,i}) \right\rangle$$

$$\tau_0 g_2 = \left\langle \prod_{i=1}^{k_3} (n \downarrow \psi_m = 3;$$

$$\prod_{j=1}^{n \downarrow \psi_m} (name \downarrow y_{i,j} := name \downarrow x_{i^*j};$$

$$u \downarrow y_{i,j} := u \downarrow x_{i^*j}); \prod_{i=k_3+1}^M (n \downarrow \psi_m = 4;$$

$$\prod_{j=1}^{n \downarrow \psi_m} (name \downarrow y_{i,j} := name \downarrow x_{i^*j}; u \downarrow y_{i,j} := u \downarrow x_{i^*j})) \rangle.$$

The operations on attributes of  $s_3$  relation determine the attribute values for PCM elements of the alternatives:

$$s_3 = \left\langle \prod_{m=1}^{M \downarrow \alpha} (\psi_{ch,n} \cdot \prod_{i=1}^{n \downarrow \psi_m} \bar{q} y_{m,i}) \cdot p, N \gamma \right\rangle \rightarrow$$

$$\rightarrow \prod_{m=1}^{M \downarrow \alpha} (\psi_{ch,n} \cdot \prod_{i=1}^{n \downarrow \psi_m} \bar{q} y_{m,i} \cdot p, n \downarrow \psi_m \bar{\beta}_m \cdot \rho_m) \cdot p, N \gamma \rangle,$$

$$\tau_0 g_3 = \left\langle \prod_{m=1}^M (\prod_{i=1}^{n \downarrow \psi_m} (\prod_{j=1}^{n \downarrow \psi_m} (a \downarrow \beta_{m,i,j} := a \downarrow \gamma_{u \downarrow y_{m,i}, u \downarrow y_{m,j}};$$

$$h \downarrow \beta_{m,i,j} := h \downarrow \gamma_{u \downarrow y_{m,i}, u \downarrow y_{m,j}}))) \rangle.$$

The following substitutive relation is used for

CPS implementation of the classic single-level AHP for each alternative group:

$$s_4 = \left\langle \prod_{m=1}^{M \downarrow \alpha} (\psi_{ch,n} \cdot \prod_{i=1}^{n \downarrow \psi_m} \bar{q} y_{m,i} \cdot p, n \downarrow \psi_m \bar{\beta}_m \cdot \rho_m) \right\rangle \rightarrow$$

$$\rightarrow \prod_{m=1}^M (\psi_{ch,n} \cdot \prod_{i=1}^{n \downarrow \psi_m} (\bar{q} y_{m,i}) \cdot \nu | \prod_{i=1}^{n \downarrow \psi_m} (\bar{q} z_{m,i})_{Q \lambda_m} \cdot p, n \downarrow \psi_m \bar{\beta}_m \cdot \prod_{i=1}^{n \downarrow \psi_m} (\bar{q} y_{m,i})_{P, k_p} \rangle.$$

The operations on attributes of the following rule supplement the general PCM with new evaluations:

$$s_5 = \left\langle \prod_{m=1}^M (\nu | \prod_{i=1}^{n \downarrow \psi_m} (\bar{q} z_{m,i})_{Q \lambda_m} \cdot p, n \downarrow \psi_m \bar{\beta}_m \cdot \prod_{i=1}^{n \downarrow \psi_m} (\bar{q} y_{m,i})_{P, k_p}) \cdot p, N \gamma \right\rangle \rightarrow$$

$$\rightarrow \prod_{m=1}^M (\prod_{i=1}^{n \downarrow \psi_m} \bar{q} z_{m,i} \cdot p, N \gamma \cdot all \eta) \rangle,$$

$$\tau_1 g_5 = \left\langle \prod_{m=1}^M (\prod_{i=1}^{n \downarrow \psi_m} (\prod_{j=1}^{n \downarrow \psi_m} (a \downarrow \gamma_{u \downarrow z_{m,i}, u \downarrow z_{m,j}} := a \downarrow \beta_{m,i,j};$$

$$h \downarrow \gamma_{u \downarrow z_{m,i}, u \downarrow z_{m,j}} := h \downarrow \beta_{m,i,j}))) \rangle.$$

The substitutive relation is used to calculate the general PCM elements by transitiveness and to count the uncompleted elements:

$$s_6 = \langle \rangle,$$

$$\tau_1 g_6 = \left\langle all \downarrow \eta := 0; \prod_{i=1}^N \prod_{j=i+1}^N (\prod_{c=1}^N (\div (h \downarrow \gamma_{i,j} = 0;$$

$$4; (\div ((a \downarrow \gamma_{c,j} \neq 0) \& (a \downarrow \gamma_{i,c} \neq 0); 2;$$

$$(sum := sum + a \downarrow \gamma_{i,c} * a \downarrow \gamma_{c,j}; q := q + 1));$$

$$a \downarrow \gamma_{i,j} := sum / q; h \downarrow \gamma_{i,j} := 0; h \downarrow \gamma_{j,i} :=$$

$$= 0; a \downarrow \gamma_{j,i} := \frac{1}{a \downarrow \gamma_{i,j}}); \div$$

$$(\div (a \downarrow \gamma_{i,j} = 0; 1; all \downarrow \eta := all \downarrow \eta + 1)) \rangle.$$

$s_7$  – substitutive relation for comparison of the alternatives in groups after AHP application. If the order of the alternatives in the group is changed, the corresponding attribute is set to one:

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

$$\begin{aligned}
s_7 = & \left\langle \prod_{m=1}^M (ch, n \Psi \cdot \prod_{i=1}^{n \downarrow \Psi_m} (\bar{q} y_{m,i}) \cdot \prod_{i=1}^{n \downarrow \Psi_m} (\bar{q} z_{m,i})_{,Q} \bar{\lambda}_m) \rightarrow \right. \\
& \times_{all} \eta_{d_8} \rightarrow \prod_{m=1}^{M-1} (ch, n \Psi'_m \cdot \prod_{i=1}^{n \downarrow \Psi'_m} (\bar{q} y_{m,i}) \times \\
& \times_{p, n \downarrow \Psi'_m} \bar{\beta}_m \cdot \rho_m) \cdot \left. \right\rangle_{p, N \bar{\gamma}}; \\
& \rightarrow \prod_{m=1}^M (ch, n \Psi \cdot \prod_{i=1}^{n \downarrow \Psi_m} (\bar{q} y_{m,i}) \cdot \prod_{i=1}^{n \downarrow \Psi_m} (\bar{q} z_{m,i})_{,Q} \bar{\lambda}_m); \\
\tau_0 g_7 = & \left\langle \prod_{m=1}^M (ch \downarrow \Psi_m := 0; \right. \\
& \prod_{i=1}^{n \downarrow \Psi_m} (\div (name \downarrow y_{m,i} = name \downarrow z_{m,i}; \\
& 3; (v \downarrow y_{m,i} := v \downarrow z_{m,i}; name \downarrow y_{m,i} = name \downarrow z_{m,i}; \\
& u \downarrow y_{m,i} = u \downarrow z_{m,i})); \div (name \downarrow y_{m,i} \neq name \downarrow z_{m,i}; \\
& \left. 1; ch \downarrow \Psi_m := 1) \right\rangle.
\end{aligned}$$

The relation  $s_8$  is used to calculate the priority vector and the conformity relation for general matrix, if the position of the alternatives in the groups has not changed:

$$\begin{aligned}
s_8 = & \left\langle \prod_{m=1}^M (ch, n \Psi \cdot \prod_{i=1}^{n \downarrow \Psi_m} (\bar{q} y_{m,i}) \cdot \prod_{i=1}^{n \downarrow \Psi_m} (\bar{q} z_{m,i})_{,Q} \bar{\lambda}_m) \times \right. \\
& \times_{p, N \bar{\gamma}} \left. \right\rangle_{all \eta_{d_8} \rightarrow Q \bar{\lambda}}; \\
\tau_0 g_8 = & \left\langle f := 0; \prod_{m=1}^M (\div (ch \downarrow \Psi_m = 1; 1; f := 1)); \right. \\
& \div (f = 1; 1; d_9 := 1); \\
& \div (((f = 0) \& (all \downarrow \eta = 0); 1; d_8 := 1); \left. \right\rangle \\
\tau_1 g_8 = & \left\langle is \downarrow \bar{\lambda} := h(\bar{p}, N \bar{\gamma}); \bar{r} \downarrow \bar{\lambda} := \bar{\lambda}(\bar{p}, N \bar{\gamma}) \right\rangle.
\end{aligned}$$

The substitutive relation  $s_9$  is used to regroup the alternatives. Operations on attributes allow setting the alternative attributes in the new groups:

$$\begin{aligned}
s_9 = & \left\langle \prod_{m=1}^M (ch, n \Psi \cdot \prod_{i=1}^{n \downarrow \Psi_m} (\bar{q} y_{m,i}) \times \right. \\
& \times \prod_{i=1}^{n \downarrow \Psi_m} (\bar{q} z_{m,i})_{,Q} \bar{\lambda}_m) \cdot \left. \right\rangle_{p, N \bar{\gamma}} \times
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\tau_0 g_9 = & \left\langle \prod_{m=1}^{M-1} (l := \lfloor \frac{n \downarrow \Psi'_m}{2} \rfloor; n \downarrow \Psi'_m := l + 2; \right. \\
& \prod_{i=1}^l (name \downarrow y'_{m,i} := name \downarrow z_{m,l+i}; \\
& p \downarrow y'_{m,i} := p \downarrow z_{m,l+i}; v \downarrow y'_{m,i} := v \downarrow z_{m,l+i}; \\
& u \downarrow y'_{m,i} := u \downarrow z_{m,l+i}); \prod_{i=1}^2 (name \downarrow y'_{m,i+l} := name \downarrow z_{m+1,i}; \\
& p \downarrow y'_{m,i+l} := p \downarrow z_{m+1,i}; v \downarrow y'_{m,i+l} := v \downarrow z_{m+1,i}; \\
& u \downarrow y'_{m,i+l} := u \downarrow z_{m+1,i}); \\
\tau_1 g_9 = & \left\langle \prod_{m=1}^{M-1} (\prod_{i=1}^{n \downarrow \Psi'_m} (\prod_{j=1}^{n \downarrow \Psi'_m} (a \downarrow \beta_{m,i,j} := a \downarrow \gamma_{u \downarrow y_{m,i}, u \downarrow y_{m,j}}; \right. \\
& h \downarrow \beta_{m,i,j} := h \downarrow \gamma_{u \downarrow y_{m,i}, u \downarrow y_{m,j}}))) \left. \right\rangle.
\end{aligned}$$

The substitutive relation  $s_{10}$  is for implementation of classic AHP for new alternative groups:

$$\begin{aligned}
s_{10} = & \left\langle \prod_{m=1}^{M-1} (ch, n \Psi'_m \cdot \prod_{i=1}^{n \downarrow \Psi'_m} (\bar{q} y'_{m,i}) \cdot \right. \\
& \times_{p, n \downarrow \Psi'_m} \bar{\beta}_m \cdot \rho_m) \rightarrow \\
& \rightarrow \prod_{m=1}^{M-1} \times \\
& \times \left( ch, n \Psi' \cdot \prod_{i=1}^{n \downarrow \Psi'_m} (\bar{q} y'_{m,i}) \cdot \bigvee \prod_{i=1}^{n \downarrow \Psi'_m} (\bar{q} z_{m,i})_{,Q} \bar{\lambda}_m \right. \\
& \left. \times_{p, n \downarrow \Psi'_m} \bar{\beta}_m \cdot \prod_{i=1}^{n \downarrow \Psi'_m} (\bar{q} y'_{m,i})_{,P, k_p} \right).
\end{aligned}$$

The following rule contains the substitutive relation to get the AHP ranking result in each group and to save the evaluation entered into the general PCM by the expert:

$$\begin{aligned}
s_{11} = & \left\langle \prod_{m=1}^{M-1} (\bigvee \prod_{i=1}^{n \downarrow \Psi'_m} (\bar{q} z_{m,i})_{,Q} \bar{\lambda}_m) \cdot \right. \\
& \times_{p, N \bar{\gamma}} \left. \right\rangle_{all \eta} \rightarrow \\
& \rightarrow \prod_{m=1}^{M-1} (\prod_{i=1}^{n \downarrow \Psi'_m} (\bar{q} z_{m,i})_{,Q} \bar{\lambda}_m) \cdot \left. \right\rangle_{p, N \bar{\gamma}} \times
\end{aligned}$$

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

$$\tau_1 g_{11} = \left\langle \prod_{m=1}^{M-1} \left( \prod_{i=1}^{n \downarrow \Psi'_m} \left( \prod_{j=1}^{n \downarrow \Psi'_m} (a \downarrow \gamma_{u \downarrow z_{m,i}, u \downarrow z_{m,j}} := a \downarrow \beta_{m,i,j}; \right. \right. \right.$$

$$\left. h \downarrow \gamma_{u \downarrow z_{m,i}, u \downarrow z_{m,j}} := h \downarrow \beta_{m,i,j} \right) \right); d_6 := 1; d_{12} := 1 \rangle.$$

Operations on attributes of the following rule allow determining the changes in the positions of alternatives in the groups after AHP application:

$$s_{12} = \langle \rangle, \tau_0 g_{12} = \left\langle \prod_{m=1}^{M-1} (ch \downarrow \Psi'_m := 0;$$

$$\prod_{i=1}^{n \downarrow \Psi'_m} (\div (name \downarrow y'_{m,i} = name \downarrow z_{m,i}; 1; v \downarrow y'_{m,i} := v \downarrow z_{m,i}),$$

$$\div (name \downarrow y'_{m,i} \neq name \downarrow z_{m,i}; 1; ch \downarrow \Psi'_m := 1) \rangle.$$

The substitutive relation  $s_{13}$  is used to calculate the priority vector and the conformity relation for general matrix, if the position of the alternatives in the groups has not changed:

$$s_{13} = \left\langle \prod_{m=1}^{M-1} (ch, n \Psi' \cdot \prod_{i=1}^{n \downarrow \Psi'_m} (\bar{q} y'_{m,i}) \cdot \prod_{i=1}^{n \downarrow \Psi'_m} (\bar{q} z_{m,i}), \bar{q} \bar{\lambda}_m) \times \right.$$

$$\left. \times_{p,N} \bar{\gamma} \cdot \text{all } \eta_{d_{13}} \rightarrow \bar{q} \bar{\lambda} \right\rangle,$$

$$\tau_0 g_{13} = \left\langle f := 0; \prod_{m=1}^{M-1} (\div (ch \downarrow \Psi'_m = 1; 1; f := 1)); \right.$$

$$\div (f = 1; 1; d_{13} := 1);$$

$$\div (((f = 0) \& (\text{all } \downarrow \eta = 0)); 1; d_{14} := 1) \rangle.$$

$$\tau_1 g_{13} = \left\langle is \downarrow \lambda := \bar{h}(\bar{p}, N \bar{\gamma}); \bar{r} \downarrow \lambda := \bar{\lambda}(\bar{p}, N \bar{\gamma}) \right\rangle.$$

The following substitutive relation is used to restore alternatives in the groups, if their position has changed:

$$s_{14} = \left\langle \prod_{m=1}^M (ch, n \Psi' \cdot \prod_{i=1}^{n \downarrow \Psi'_m} (\bar{q} y'_{m,i})) \cdot \left( \prod_{m=1}^{M-1} (ch, n \Psi'_m \times \right. \right.$$

$$\left. \times \prod_{i=1}^{n \downarrow \Psi'_m} (\bar{q} y'_{m,i}) \cdot \prod_{i=1}^{n \downarrow \Psi'_m} (\bar{q} z_{m,i}), \bar{q} \bar{\lambda}_m \right)_{d_{14}} \rightarrow$$

$$\rightarrow \prod_{m=1}^M (ch, n \Psi' \cdot \prod_{i=1}^{n \downarrow \Psi'_m} \bar{q} y'_{m,i}) \rangle,$$

$$\tau_0 g_{14} = \left\langle \prod_{m=1}^{M-1} (l := \lfloor \frac{n \downarrow \Psi'_m}{2} \rfloor;$$

$$\prod_{i=1}^l (name \downarrow y_{m,l+i} := name \downarrow z_{m,i};$$

$$p \downarrow y_{m,l+i} := p \downarrow z_{m,i}; v \downarrow y_{m,l+i} := v \downarrow z_{m,i};$$

$$u \downarrow y_{m,l+i} := u \downarrow z_{m,i}); \prod_{i=1}^2 (name \downarrow y_{m+1,i} := name \downarrow z_{m,i+l};$$

$$p \downarrow y_{m+1,i} := p \downarrow z_{m,i+l}; v \downarrow y_{m+1,i} :=$$

$$v \downarrow z_{m,i+l}; u \downarrow y_{m+1,i} := u \downarrow z_{m,i+l})$$

$$\tau_1 g_{14} = \langle d_3 := 1; d_{14} := 0 \rangle.$$

Implementation of CPS of alternative grouping and sorting is the non-terminal with calculated alternative rank attributes and the conformity relation for PCM of the alternatives.

*Constructive and productive structure for classical single-level AHP.* CPS of classical single-level AHP implements completing by an external expert of some paired comparison evaluations, finding the proper number of the matrix, conformity relation of PCM and alternative ranks.

Let us determine GCPC specialization to represent classical single-level AHP:

$$C = \langle M, \Sigma, \Lambda \rangle_S \mapsto C_{AHP} \langle M_{AHP}, \Sigma_{AHP}, \Lambda_{AHP} \rangle,$$

where  $\Lambda_{AHP} = \Lambda \cup \Lambda_9$ ,  $\Lambda_9 = \{M_{AHP} \supset T_3 \cup N_3$ ,  $\Sigma_{AHP} = \{\Xi, \Theta, \Phi\}$ ,  $\Theta = \{\Rightarrow, \mid \Rightarrow, \parallel \Rightarrow, \rightarrow\}$ ,  $\Xi = \{\cdot, \circ\}$ ,  $\Phi = \{\div, :=, /, \leq, >, =, \bar{h}, \bar{\lambda}, \triangleright\}$ .

The operation  $\triangleright(x_i, x_j, k_p)$  allows setting a value of the link weight between  $i$  and  $j$  alternatives (criteria) by  $k_p$  criterion,  $\triangleright(x_i, x_j, \varepsilon)$  allows setting a value of the link weight between criteria. These operations are executed by an external server.

Terminal alphabet contains many alternatives and criteria with their attributes.

The output process forms the construct that will include the following forms:  $a, h(x_i \circ x_j \circ k_p)$  – link of  $i$  and  $j$  alternatives by criterion  $k_p$ ,  $a$  – link weight,  $h$  – attribute, responsible for the weight value derivation process ( $h=1$  – filled according

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

to the assessment by an external server expert,  $h=0$  – without the involvement of an external expert on the basis of substitution rules);  $_{a,h}(x_i \circ x_j \circ \varepsilon)$  – link of  $i$  and  $j$  alternative (criterion) if a comparison criterion is not given;  $_{\varrho}\bar{\lambda}$  – pairwise comparison matrix for alternatives;  $\prod_{i=1}^N ({}_r x_i)$  – sorted alternative sequence.

For interpretation of this CPS we use the BAS  $C_{A,AHPS}$  described above:

$$\begin{aligned} \langle C_{AHP} = \langle M_{AHP}, \Sigma_{AHP}, \Lambda_{AHP} \rangle, C_{A,AHPS} = \\ = \langle M_{A,AHPS}, \Sigma_{A,AHPS}, \Lambda_{A,AHPS} \rangle \rangle_I \mapsto \\ I \mapsto {}_{I,C_{A,AHPS}} C_{AHP} = \langle M_{AHP}, \Sigma_{AHP}, \Lambda_{I,AHP}, Z \rangle, \end{aligned}$$

where

$$\begin{aligned} \Lambda_{I,AHP} &= \Lambda_{AHP} \cup \Lambda_{11}, \Lambda_{11} = \{(A_1^0 |_{A_i, A_j}^{\bar{A}_i \cdot \bar{A}_j} \bar{\downarrow}), \\ (A_2^0 |_{l_h, l_q, f_i}^{\bar{f}_j} \bar{\downarrow} \Rightarrow), (A_3^0 |_{f_i, \Psi}^{\bar{f}_j} \bar{\downarrow} \Rightarrow), (A_4^0 |_{\sigma, \Psi}^{\bar{\Omega}} \bar{\downarrow} || \Rightarrow), \\ (A_7^0 |_{a,b}^{\bar{a}} \bar{\downarrow} :=), (A_8^0 |_{a,b}^{\bar{c}} \bar{\downarrow} \leq), (A_5^0 |_{c,n,L}^{\bar{L}} \bar{\downarrow} \div), \\ (A_{10}^0 |_{a,b}^{\bar{c}} \bar{\downarrow} /), (A_{12}^0 |_{a,b}^{\bar{c}} \bar{\downarrow} \neq), (A_{13}^0 |_{a,b}^{\bar{c}} \bar{\downarrow} =), \\ (A_{19}^0 |_{a,b}^{\bar{c}} \bar{\downarrow} >), \\ (A_{15}^0 |_{N^1}^{\bar{is}} \bar{\downarrow} \bar{h}), (A_{16}^0 |_{N^1}^{\bar{r}} \bar{\downarrow} \bar{\lambda}), (A_{21}^0 |_{a,b}^{\bar{c}} \bar{\downarrow} \triangleright), \\ (A_{22}^0 |_{a,b}^{\bar{a} \circ \bar{b}} \bar{\downarrow} \circ) \}. \end{aligned}$$

Let us perform specification of the interpreted CPS for a single-level AHP:

$$\begin{aligned} {}_{I,C_{A,AHP}} C_{AHP} &= \langle M_{AHP}, \Sigma_{AHP}, \Lambda_{I,AHP}, Z \rangle_K \mapsto \\ C_{K,AHP} &= \langle M_{AHP}, \Sigma_{K,AHP}, \Lambda_{I,AHP} \cup \Lambda_9 \cup \Lambda_{10}, Z \rangle, \end{aligned}$$

where

$$\begin{aligned} \Lambda_4 &= \{T_3 = T_1, N_3 = \{{}_N \xi, {}_p \rho, \delta, \mu, {}_{p,N} \nu, {}_{\varrho} \bar{\lambda}, {}_{p,N} \bar{\beta}\}, \\ U &= \{{}_{p,N} \nu\}, \Psi_K = \{\psi_r : \langle s_{r,i,j}, g_{r,i,j} \rangle\}, r = \overline{1,12}, \end{aligned}$$

$r$  – rule number,  $i$  and  $j$  – number of the first and second pairs of alternatives,  $U$  – set of initial non-terminals,  ${}_N \xi$  – non-terminal to indicate al-

ternative links,  ${}_p \rho$  – non-terminal to indicate criteria links,  $\beta_{p,i,j}$  – non-terminals to indicate links between alternatives  $i, j$  by  $p$ -th criterion (for simplicity indicated as matrix  ${}_{p,N} \bar{\beta}$ ),  $_{\varrho} \bar{\lambda}$  – pairwise comparison matrix for alternatives (where  $Q = [\bar{\nu}, is, N]$  – vector of attributes:  $\bar{\nu}$  – vector of PCM priorities,  $is$  – matrix conformity relation,  $N$  – the number of alternatives).

The substitutive relation  $s_{1,0,0}$  serves to change PCM completion and ranking of alternatives  $x_i$  by criterion  $k_p$ . All axiom input parameters are added to the medium.

$$s_{1,0,0} = \langle \nu |_{\substack{{}_{p,N} \bar{\beta} \\ {}_{p,N} \bar{\beta}, {}_{N,N} x, {}_{p,p} \bar{k}}}^{\substack{{}_{p,N} \bar{\beta}, \prod_{i=1}^N ({}_q x_i) \\ {}_{p,N} \bar{\beta}}} \rightarrow {}_{p,N} \bar{\beta} \cdot \delta \cdot \mu \rangle.$$

The following substitutive relation is used, if a ranking criterion is specified:

$$\begin{aligned} s_{2,0,0} &= \langle {}_{p,N} \bar{\beta} \cdot \delta \rightarrow \prod_{i=1}^N \prod_{j=1}^N ({}_p \beta_{i,j} \cdot {}_{k_p} \rho) \rangle, \\ {}_{\tau_0} g_{2,0,0} &= \langle \div ({}_p \bar{\beta} > 0; 1; d_{2,0,0} := 1), \\ &\div ({}_p \bar{\beta} = 0; 1; d_{3,0,0} := 1) \rangle. \end{aligned}$$

The substitutive relation  $s_{3,0,0}$  is used to form PCM alternatives, if a criterion is not specified:

$$s_{3,0,0} = \langle {}_{p,N} \bar{\beta} \cdot \delta \rightarrow \prod_{i=1}^N \prod_{j=1}^N ({}_p \beta_{i,j}) \rangle.$$

The following rule contains the substitutive relation to determine a connection between the alternatives. Operations on attributes determine the evaluation of alternatives links:

$$\begin{aligned} s_{4,0,0} &= \langle \prod_{i=1}^N \prod_{j=1}^N (\beta_{i,j} \rightarrow (x_i \circ x_j \circ \varepsilon) \cdot \beta_{i,j}) \rangle, \\ {}_{\tau_1} g_{4,0,0} &= \langle a \bar{\downarrow} (x_i \circ x_j \circ \varepsilon) := a \bar{\downarrow} \beta_{i,j}, \\ &h \bar{\downarrow} (x_i \circ x_j \circ \varepsilon) := h \bar{\downarrow} \beta_{i,j} \rangle. \end{aligned}$$

The rules for setting the alternative pairwise comparison values by an expert, where  $i = \overline{1, N}$

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

and  $j = \overline{1+i, N}$ :

$$s_{5,i,j} = \langle \rangle, \tau_1 g_{5,i,j} = \langle a \downarrow (x_i \circ x_j \circ \varepsilon) := \triangleright (x_i, x_j, \varepsilon),$$

$$a \downarrow \beta_{i,j} := h \downarrow (x_i \circ x_j \circ \varepsilon); h \downarrow (x_j \circ x_i \circ \varepsilon) := 1,$$

$$a \downarrow (x_j \circ x_i \circ \varepsilon) := 1 / (a \downarrow (x_i \circ x_j \circ \varepsilon)),$$

$$a \downarrow \beta_{j,i} := a \downarrow (x_j \circ x_i \circ \varepsilon); h \downarrow \beta_{i,j} := h \downarrow (x_j \circ x_i \circ \varepsilon) \rangle.$$

The relation for PCM completion check. If the matrix is completed, then based on the operations on attributes we calculate the conformity relation and fill the alternative priority vector:

$$s_{6,0,0} = \left\langle \prod_{i=1}^N \prod_{j=1}^N (x_i \circ x_j \circ \varepsilon) \xrightarrow{d_{6,0,0}} \rightarrow \prod_{i=1}^N \prod_{j=1}^N (x_i \circ x_j \circ \varepsilon) \cdot \varrho \bar{\lambda} \right\rangle$$

$$\tau_0 g_{6,0,0} = \langle d_{6,0,0} := 1, full := 1,$$

$$\prod_{i=1}^N \prod_{j=i+1}^N (\div(a \downarrow (x_i \circ x_j \circ \varepsilon) \leq 0; 1;$$

$$full := 0)), \div(full = 0; 1; d_{6,0,0} := 0) \rangle,$$

$$\tau_1 g_{6,0,0} = \langle is \downarrow \bar{\lambda} := h(\bar{p}, \bar{N} \bar{\beta}); \bar{r} \downarrow \bar{\lambda} := \bar{\lambda}(\bar{p}, \bar{N} \bar{\beta}) \rangle.$$

The relation  $s_{7,0,0}$  enters the sequence of alternatives with the weights into the construct, if PCM conformity relation is valid:

$$s_{7,0,0} = \left\langle \prod_{i=1}^N \prod_{j=1}^N (x_i \circ x_j \circ \varepsilon) \times \times \varrho \bar{\lambda} \cdot \mu \xrightarrow{d_7} \prod_{i=1}^N (\bar{q} x_i) \cdot \varrho \bar{\lambda} \right\rangle$$

$$\tau_0 g_{7,0,0} = \langle \div((is \downarrow \bar{\lambda}) \leq 0, 011; 1; d_{7,0,0} := 1) \rangle,$$

$$\tau_1 g_{7,0,0} = \langle \prod_{i=1}^N (v \downarrow x_i := r_i \downarrow \bar{\lambda}); d_{7,0,0} := 0 \rangle.$$

The following set of rules ( $i = \overline{1, N-1}$ ,  $j = \overline{i+1, N}$ ) defines the relations for descending ordering of alternatives according to their weights:

$$s_{8,i,j} = \langle (v x_i \cdot v x_j) \xrightarrow{d_{8,i,j}} (v x_j \cdot v x_i) \rangle,$$

$$\tau_0 g_{8,i,j} = \langle \div(v \downarrow x_j > v \downarrow x_i; 1; d_{8,i,j} := 1) \rangle.$$

The substitutive relation  $s_{9,0,0}$  is used to establish the link between the alternatives by the given criteria:

$$s_{9,0,0} = \left\langle \prod_{i=1}^N \prod_{j=1}^N (\beta_{i,j} \cdot k_p \rightarrow (x_i \circ x_j \circ k_p) \cdot \beta_{i,j}) \right\rangle,$$

$$\tau_1 g_{9,0,0} = \langle a \downarrow (x_i \circ x_j \circ k_p) := a \downarrow \beta_{i,j},$$

$$h \downarrow (x_i \circ x_j \circ k_p) := h \downarrow \beta_{i,j} \rangle.$$

The rules for setting the alternative pairwise comparison values by an expert by  $p$ -th criterion, where  $i = \overline{1, N}$  and  $j = \overline{1+i, N}$ :

$$s_{10,i,j} = \langle \rangle,$$

$$\tau_1 g_{10,i,j} = \langle a \downarrow (x_i \circ x_j \circ k_p) := \triangleright (x_i, x_j, k_p),$$

$$a \downarrow \beta_{i,j} := a \downarrow (x_i \circ x_j \circ k_p); h \downarrow (x_i \circ x_j \circ k_p) := 1,$$

$$h \downarrow \beta_{i,j} := h \downarrow (x_i \circ x_j \circ k_p); a \downarrow \beta_{j,i} := a \downarrow (x_j \circ x_i \circ k_p);$$

$$a \downarrow (x_j \circ x_i \circ k_p) := 1 / a \downarrow (x_i \circ x_j \circ k_p)$$

$$h \downarrow (x_j \circ x_i \circ k_p) := 1; h \downarrow \beta_{j,i} := h \downarrow (x_j \circ x_i \circ k_p) \rangle.$$

The operations on attributes of the next rule check the PCM completion of alternatives by  $p$ -th criterion. If everything is completed, then the conformity is calculated and the alternative priority vector is filled, otherwise the rule does not apply:

$$s_{11,0,0} = \left\langle \prod_{i=1}^N \prod_{j=1}^N (x_i \circ x_j \circ k_p) \xrightarrow{d_{11,0,0}} \rightarrow \prod_{i=1}^N \prod_{j=1}^N (x_i \circ x_j \circ k_p) \cdot \overline{\varrho \bar{\lambda}} \right\rangle,$$

$$\tau_0 g_{11} = \langle full := 1, d_{11,0,0} := 1,$$

$$\prod_{i=1}^N \prod_{j=1}^N (\div(a \downarrow (x_i \circ x_j \circ k_p) \leq 0;$$

$$1; full := 0)), \div(full = 0; 1; d_{11,0,0} := 0) \rangle,$$

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

$$\tau_1 g_{11,0,0} = \left\langle is \downarrow \bar{\lambda} := \bar{\lambda}(\bar{\beta}_{p,N}); \bar{r} \downarrow \bar{\lambda} := \bar{\lambda}(\bar{\beta}_{p,N}) \right\rangle.$$

The relation  $s_{12,0,0}$  is used to generate a sequence of alternatives, if the PCM of alternatives has a valid conformity level. After the substitution on the basis of operations on attributes, the ranks of alternatives are determined:

$$s_{12,0,0} = \left\langle \prod_{i=1}^N \prod_{j=1}^N (x_i \circ x_j \circ k_p) \cdot \bar{\beta}_{p,N} \cdot \bar{\lambda} \cdot \mu_{d_{12,0,0}} \rightarrow \right. \\ \left. \rightarrow \bar{\beta}_{p,N} \cdot \prod_{i=1}^N (\bar{x}_i) \cdot \bar{\lambda} \right\rangle,$$

$$\tau_0 g_{12,0,0} = \left\langle \div((is \downarrow \bar{\lambda}) \leq 0,011; 1; d_{12,0,0} := 1) \right\rangle,$$

$$\tau_1 g_{12,0,0} = \left\langle \prod_{i=1}^N (v \downarrow x_i := r_i \downarrow \bar{\lambda}); d_{12,0,0} := 0 \right\rangle.$$

Implementation of CPS for a single-level AHP is the ranked list of alternatives, the completed PCM and the calculated conformity relation values for the formed matrix.

### Originality and practical value

The developed model of constructive process for alternative ranking by modified AHPS can solve the problem with a large number of criteria and alternatives (more than ten), and can also be used under conditions of incomplete information, as part of evaluations is entered by an expert, and the part is calculated based on the input. This method can improve the conformity of expert judgments. CPS-modeling opens wide possibilities for automated hybridization of AHP modifications taking into account the specifics of the tasks.

### Conclusions

The developed modeling system for constructive alternatives ranking process consists of three CPS, interacting at different levels of refinement transformations. Disaggregation of process components makes it possible to independently change some models, change their interpretation, which allows applying this approach to solve more specific tasks.

CPS-formalization allows moving to a higher level of abstraction when describing a method for decision making problem solving, which in turn

provides an opportunity for the development of programs that implement the hybrid modification of the decision-making methods, in particular the various modifications of AHP.

### LIST OF REFERENCE LINKS

1. Колесникова, С. И. Модификация метода анализа иерархий для динамических наборов альтернатив / С. И. Колесникова // Прикладная дискретная математика. – 2009. – № 4 (6). – С. 102–109.
2. Миронова, Н. А. Интеграция модификаций метода анализа иерархий для систем поддержки принятия групповых решений / Н. А. Миронова // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2011. – № 2 (25) – С. 47–54.
3. Саати, Т. Л. Об измерении неосозанного. Подход к относительным измерениям на основе главного собственного вектора матрицы парных сравнений [Electronic resource] / Т. Л. Саати // Cloud of Science. – 2015. – Т. 2, № 1. – С. 5–40. – Available at: [https://cloud-ofscience.ru/sites/default/files/pdf/CoS\\_2\\_1.pdf](https://cloud-ofscience.ru/sites/default/files/pdf/CoS_2_1.pdf). – Title from the screen. – Accessed : 17.06.2016.
4. Саати, Т. Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети / Т. Л. Саати. – Москва : Изд-во ЛКИ, 2008. – 360 с.
5. Шинкаренко, В. И. Конструктивная модель адаптации структур данных в оперативной памяти: Часть I. Конструирование текстов программ / В. И. Шинкаренко, Г. В. Забула // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 1 (61). – С. 109–121. doi: 10.15802/stp2016/60998.
6. Шинкаренко, В. И. Конструктивно-продукционные структуры и их грамматические интерпретации. I. Обобщенная формальная конструктивно-продукционная структура / В. И. Шинкаренко, В. М. Ильман // Кибернетика и системный анализ. – 2014. – № 5. – С. 8–16.
7. Шинкаренко, В. И. Конструктивно-продукционные структуры и их грамматические интерпретации. II. Уточняющие преобразования / В. И. Шинкаренко, В. М. Ильман // Кибернетика и системный анализ. – 2014. – № 6. – С. 15–28.
8. Шинкаренко, В. И. Моделирование процессу ранжирования альтернатив методом аналізу ієрархій засобами конструкційно-продукційних структур / В. И. Шинкаренко, Т. М. Васецька // Математичні машини і системи. – 2016. – № 1. – С. 39–47.
9. Expert Choice for Collaborative Decision Making [Electronic resource]. – Available at: <http://expertchoice.com/>. – Title from the screen. – Accessed : 17.06.2016.

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

10. Saaty, T. L. Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process / T. L. Saaty, L. G. Vargas. – New York : Springer Science & Business Media, 2012. – 345 p.
11. Saaty, T. L. Relative Measurement and Its Generalization in Decision Making Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors The Analytic Hierarchy/Network Process / T. L. Saaty // Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Fisicas y Naturales. Serie A: Matematicas. – 2008. – Vol. 102. – Iss. 2. – P. 251–318. doi: 10.1007/B-F03191825.
12. Saaty, T. L. The possibility of group choice: pairwise comparisons and merging functions / T. L. Saaty, L. G. Vargas // Social Choice and Welfare. – 2012. – Vol. 38. – Iss. 3. – P. 481–496. doi: 10.1007/s00355-011-0541-6.
13. The Group Decision Support System to Evaluate the ICT Project Performance Using the Hybrid Method of AHP, TOPSIS and Copeland Score / H. Setiawan, J. E. Istiyanto, R. Wardoyo, P. Santoso // Intern. J. of Advanced Computer Science and Applications. – 2016. – № 7 (4). – P. 334–341. doi: 10.14569/IJACSA.2016.070444.
14. Shynkarenko, V. I. Reducing the number of expert judgments in analytic hierarchy process by sorting and survey management / V. I. Shynkarenko, T. M. Vasetska, E. Y. Boiko // Системні технології: регіон. міжвуз. зб. наук. пр. – Дніпропетровськ, 2016. – Вип. 2 (103). – С. 16–31.
15. Super Decisions Software [Electronic resource]. – Available at: <http://www.super-decisions.com/>. – Title from the screen. – Accessed : 17.06.2016.

Т. М. ВАСЕЦЬКА<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел./факс +38 (098) 237 05 21, ел. пошта tetyana@vasetsky.com, ORCID 0000-0001-7008-2839

## МОДЕЛЮВАННЯ МОДИФІКОВАНОГО МЕТОДУ АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЙ ЗАСОБАМИ КОНСТРУКТИВНО-ПРОДУКЦІЙНИХ СТРУКТУР

**Мета.** У дослідженні передбачається: 1) розширити можливості класичного методу аналізу ієрархій (МАІ) для великої кількості альтернатив та критеріїв; 2) побудувати модель конструктивного процесу прийняття рішень із використанням модифікованого методу аналізу ієрархій із сортуванням (МАІС). **Методика.** Для досягнення поставленої мети використовується механізм конструктивно-продукційних структур (КПС). Виконано уточнюючі перетворення узагальнюючої конструктивно-продукційної структури (УКПС). **Результати.** Розроблена модель конструктивного процесу представляє собою взаємодію трьох структур: 1) загальної структури КПС МАІС, яка дозволяє задати альтернативи та критерії, виконуючи декомпозицію ієрархічної структури задачі; 2) КПС групування та сортування, яка розбиває альтернативи (критерії) на групи та реалізує класичний однорівневий МАІ для кожної групи, а також розраховує оцінки парних порівнянь на основі введених даних; 3) КПС однорівневого класичного МАІ, яка дозволяє заповнити матрицю парних порівнянь та розрахувати ранги альтернатив. Всі три структури взаємодіють між собою на різних рівнях уточнюючих перетворень: через узгодження по даним на рівні конкретизації та використання реалізацій. Запропонована модель дозволила перейти на більш абстрактний рівень представлення розв'язку задач прийняття рішень для великої кількості критеріїв та альтернатив. **Наукова новизна.** За результатами роботи пропонується використовувати механізм КПС для формалізації модифікацій МАІ із сортуванням для розв'язку задач прийняття рішень із великою кількістю критеріїв та альтернатив. **Практична значимість.** Формалізація представлення як самого методу аналізу ієрархій, так і його модифікацій дозволяє розширити коло застосування даного методу, впорядкувати описи різних модифікацій МАІ. Таке представлення забезпечує можливість розробки програм для реалізації гібридних модифікацій методу. Використання різних інтерпретацій запропонованих в статті КПС дозволить використати інші підходи при визначенні узгодженості матриць парних порівнянь, розрахунку оцінок та рангів альтернатив і критеріїв.

**Ключові слова:** моделювання; конструктивно-продукційні структури; конструктивний процес; метод аналізу ієрархій; модифікація

Т. Н. ВАСЕЦКАЯ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Компьютерные информационные технологии», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел./факс +38 (098) 237 05 21, эл. почта tetyana@vasetsky.com, ORCID 0000-0001-7008-2839

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ СРЕДСТВАМИ КОНСТРУКТИВНО-ПРОДУКЦИОННЫХ СТРУКТУР

**Цель.** В исследовании предполагается: 1) расширить возможности классического метода анализа иерархий (МАИ) для большого количества альтернатив и критериев; 2) построить модель конструктивного процесса принятия решений с использованием модифицированного метода анализа иерархий с сортировкой (МАИС). **Методика.** Для достижения поставленной цели используется механизм конструктивно-продукционных структур (КПС). Выполнены уточняющие преобразования обобщенной конструктивно-продукционной структуры. **Результаты.** Разработанная модель конструктивного процесса представляет собой взаимодействие трех структур: 1) общей КПС МАИС, которая позволяет определить альтернативы и критерии, выполняя декомпозицию иерархической структуры задачи; 2) КПС группировки и сортировки, которая разбивает на группы альтернативы и критерии, реализуя для каждой из групп классический одноуровневый МАИ, а также рассчитывая оценки парных сравнений на основании введенных данных; 3) КПС одноуровневого классического МАИ, которая позволяет заполнить матрицу парных сравнений и рассчитать ранги альтернатив. Все три структуры взаимодействуют между собой на разных уровнях уточняющих преобразований: посредством согласования по данным на уровне конкретизации и использования реализаций. Предложенная модель позволила перейти на более абстрактный уровень представления разрешения задач принятия решений для большого количества критериев и альтернатив. **Научная новизна.** По результатам работы предлагается использовать механизм КПС для формализации модификаций МАИ с сортировкой для разрешения задач принятия решений с большим количеством критериев и альтернатив. **Практическая значимость.** Формализация представления как самого метода анализа иерархий, так и его модификаций позволяет расширить круг применения данного метода; унифицировать описания различных модификаций МАИ. Такое представление обеспечивает возможность разработки программ для реализации гибридных модификаций данного метода. Использование разных интерпретаций представленных в статье КПС позволит использовать другие подходы при определении согласованности матриц парных сравнений, расчета оценок и весов альтернатив и критериев.

**Ключевые слова:** моделирование; конструктивно-продукционные структуры; конструктивный процесс; метод анализа иерархий; модификация

### REFERENCES

1. Kolesnikova S.I. Modifikatsiya metoda analiza ieyrarkhiy dlya dinamicheskikh naborov alternativ [Modification of hierarchies analysis method for dynamic set of alternatives]. *Prikladnaya diskretnaya matematika – Applied Discrete Mathematics*, 2009, no. 4 (6), pp. 102-109.
2. Mironova N.A. Integratsiya modifikatsiy metoda analiza iyerarkhiy dlya sistem podderzhki prinyatiya gruppovykh resheniy [Integration of modifications of hierarchy analysis method for support systems of group decision making]. *Radioelektronika, informatika, upravleniye – Electronics, Computer Science, Management*, 2011, no. 2 (25), pp. 47-54.
3. Saati T.L. Ob izmerenii neosyazayemogo. Podkhod k otnositelnym izmereniyam na osnove glavnogo sobstvennogo vektora matritsy parnykh sravneniy [On the measurement of the intangible. The approach to the relative measurements based on the main eigenvector of pairwise comparisons matrix]. *Cloud of Science*, 2015, volume 2, issue 1, pp. 5-40. Available at: [https://cloudofscience.ru/sites/default/files/pdf/CoS\\_2\\_1.pdf](https://cloudofscience.ru/sites/default/files/pdf/CoS_2_1.pdf) (Accessed 17 June 2016).
4. Saati T.L. *Prinyatiye resheniy pri zavisimostyakh i obratnykh svyazyakh: Analiticheskiye seti* [Decision making at dependences and feedbacks: Analytic networks]. Moscow, LKI Publ., 2008. 360 p.
5. Shinkarenko V.I., Zabula H.V. Konstruktivnaya model adaptatsii struktur dannykh v operativnoy pamyati: Chast I. Konstruirovaniye tekstov programm. [Constructive model of data structures adaptation in ram: Part I.



## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

- Program text constructing]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2016, no. 1 (61), pp. 109-121. doi 10.15802/stp2016/60998.
6. Shinkarenko V.I., Ilman V.M. Konstruktivno-produktsionnyye struktury i ikh grammaticheskiye interpretatsii. Obobshchennaya formalnaya konstruktivno-produktsionnaya struktura. [Constructive-synthesizing Structures and their Grammatical Interpretations. I. Generalized Formal Constructive-synthesizing Structure]. *Kibernetika i sistemnyy analiz – Cybernetics and Systems Analysis*, 2014, vol. 49, issue 5, pp. 1-15.
  7. Shinkarenko V.I., Ilman V.M. Konstruktivno-produktsionnyye struktury i ikh grammaticheskiye interpretatsii. Obobshchennaya formalnaya konstruktivno-produktsionnaya struktura. [Constructive-synthesizing Structures and their Grammatical Interpretations. I. Generalized Formal Constructive-synthesizing Structure]. *Kibernetika i sistemnyy analiz – Cybernetics and Systems Analysis*, 2014, no. 6, pp. 15-28.
  8. Shynkarenko V.I., Vasetska T.M. Modeliuvannia protsesu ranzhuvannia alternatyv metodom analizu iierarkhii zasobamy konstruktivno-produktsionnykh struktur [Simulation of ranking process of alternatives using the method of analytic hierarchy by means of structurally-productive structures]. *Matematychni mashyny i systemy – Mathematical Machines and Systems*, 2016, issue 1, pp. 39-47.
  9. Expert Choice for Collaborative Decision Making. Available at: <http://expertchoice.com/> (Accessed 17 June 2016).
  10. Saaty T.L., Vargas L.G. Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process. New York, Springer Science & Business Media Publ., 2012. 345 p.
  11. Saaty T.L. Relative Measurement and Its Generalization in Decision Making Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors The Analytic Hierarchy/Network Process. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Fisicas y Naturales. Serie A. Matematicas*, 2008, vol. 102, issue 2, pp. 251-318. doi: 10.1007/BF03191825.
  12. Saaty T.L., Vargas L.G. The possibility of group choice: pairwise comparisons and merging functions. *Social Choice and Welfare*, 2012, vol. 38, issue 3, pp. 481-496. doi: 10.1007/s00355-011-0541-6.
  13. Setiawan H., Istiyanto J.E., Wardoyo R., Santoso P. The Group Decision Support System to Evaluate the ICT Project Performance Using the Hybrid Method of AHP, TOPSIS and Copeland Score. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2016, no. 7 (4), pp. 334-341. doi: 10.14569/IJACSA.2016.070444.
  14. Shynkarenko V.I., Vasetska T.M., Boiko E.Y. Reducing the number of expert judgments in analytic hierarchy process by sorting and survey management. *Systemni tekhnolohii. Rehionalnyi mizhvuzivskyi zbirnyk naukovykh prats* [System technologies. Regional Interuniversity collection of scientific papers], 2016, vol. 2 (103), pp. 16-31.
  15. Super Decisions Software. Available at: <http://www.superdecisions.com/> (Accessed 17 June 2016).

*Prof. V. Ye. Belozеров, Dr. Sc. (Phys. and Math.) (Ukraine); Prof. V. I. Shinkarenko, Dr. Sc. (Tech.) (Ukraine) recommended this article to be published*

Received: March 22, 2016

Accepted: July 20, 2016

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 669.017:621.771.25

Э. В. ПАРУСОВ<sup>1</sup>, А. Б. СЫЧКОВ<sup>2</sup>, С. И. ГУБЕНКО<sup>3</sup>, И. Н. ЧУЙКО<sup>4</sup>, Л. В. САГУРА<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>Отдел термической обработки металла для машиностроения, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова, Национальная академия наук Украины, пл. Академика Стародубова, 1, Днепро, Украина, 49050, тел. +38 (0562) 33 71 63, эл. почта tometal@ukr.net, ORCID 0000-0002-4560-2043

<sup>2</sup>Каф. «Литейное производство и материаловедение», Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, пр. Ленина, 38, Магнитогорск, Российская Федерация, 455000, тел. +7 (919) 348 66 84, эл. почта absychkov@mail.ru, ORCID 0000-0002-0886-1601

<sup>3</sup>Каф. «Материаловедение», Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепро, Украина, 49600, тел. +38 (056) 374 83 57, эл. почта sigubenko@gmail.com, ORCID 0000-0001-5427-1154

<sup>4</sup>Отдел термической обработки металла для машиностроения, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова, Национальная академия наук Украины, пл. Академика Стародубова, 1, Днепро, Украина, 49050, тел. +38 (0562) 33 71 63, эл. почта ichuyko@mail.ru, ORCID 0000-0002-4753-614X

<sup>5\*</sup>Отдел термической обработки металла для машиностроения, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова, Национальная академия наук Украины, пл. Академика Стародубова, 1, Днепро, Украина, 49050, тел. +38 (0562) 33 71 63, эл. почта slv\_metal@mail.ru, ORCID 0000-0002-2614-0322

### ПРЕИМУЩЕСТВА ЭКСПРЕСС-МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАССЫ ОКАЛИНЫ И ОБЕЗУГЛЕРОЖЕННОГО СЛОЯ БУНТОВОГО ПРОКАТА

**Цель.** В работе необходимо установить универсальные эмпирические зависимости, которые позволят произвести оперативный расчет массы окалины и глубины обезуглероженного слоя, основываясь на параметрах технологического процесса производства бунтового проката. **Методика.** Исследования выполнены на промышленных партиях проката из сталей марок SAE 1006 и SAE 1065. Удаляемость окалины определяли в соответствии с методикой компании «Beckaert» по спецификациям: GA-03-16, GA-03-18, GS-03-02, GS-06-01. Глубину обезуглероженного слоя идентифицировали по ГОСТ 1763-68 (метод М). **Результаты.** Анализ экспериментальных данных позволил определить рациональные температуры виткообразования проката исследуемых марок стали, которые обеспечивают наилучшее удаление поверхностной окалины, минимальное ее количество, а также соответствие цвета поверхности металла требованиям европейских потребителей. **Научная новизна.** Авторами установлена корреляционная связь нормируемых качественных показателей бунтового проката из высокоуглеродистой стали (масса окалины, глубина обезуглероженного слоя и межпластиночное расстояние в перлите) с одним из главных параметров (температурой виткообразования) режима деформационно-термической обработки. Полученные уравнения регрессии позволяют, без применения металлографического анализа, с минимальной погрешностью определить количественные значения массы окалины, глубины обезуглероженного слоя и среднего межпластиночного расстояния в перлите бунтового проката из высокоуглеродистой стали. **Практическая значимость.** В соответствии со спецификациями компании «Beckaert» (GA-03-16, GA-03-18, GS-03-02 и GS-06-01) разработана и внедрена в условиях ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» методика проведения испытаний по удалению окалины механическим способом с поверхности бунтового проката из низко- и высокоуглеродистых марок сталей. Разработан экспресс-метод определения общей и остаточной масс окалины на поверхности бунтового проката из низко-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

и высокоуглеродистой марок сталей в зависимости от температуры виткообразования. Получен патент Украины на изобретение № 91760 «Спосіб визначення загальної та залишкової кількості окалини на поверхні катанки».

*Ключевые слова:* бунтовой прокат; окалина; обезуглероженный слой; деформационно-термическая обработка

### Введение

При аттестации горячекатаного бунтового проката из высокоуглеродистых марок сталей одними из важных показателей его качества, которые подвергаются нормированию и контролю, являются масса окалины и глубина обезуглероженного слоя на поверхности проката.

Стальная заготовка, из которой производят бунтовой прокат, при нагреве в печи перед горячей деформацией контактирует с продуктами горения природного газа, в результате на ее поверхности развиваются процессы обезуглероживания и окалинообразования. В случае, если заготовка имеет значительные поверхностные дефекты (трещины), которые не удаляются при естественном угаре металла в печи, то в бунтовом прокате они могут проявляться в виде локальных зон окисления и обезуглероживания, проникающих от поверхности вглубь металла. Такие дефекты снижают комплекс механических свойств готового металлопроката. Рационально выбранные температурно-скоростной регламент нагрева заготовки и атмосфера печи, позволяют добиться минимальной потери металла (не более 0,9 %), а имеющиеся неглубокие поверхностные дефекты на заготовке удаляются в процессе естественного угара металла в печи.

После горячей пластической деформации заготовки, при выходе проката из последней клетки чистового проволочного блока осуществляют его водяное охлаждение, а затем раскладку на витки транспортера линии Стелмор, где происходит повторное окалинообразование на поверхности металла, называемое вторичной окалиной. Масса окалины и глубина обезуглероженного слоя являются аттестационными показателями бунтового проката, ввиду чего они всегда регламентируются нормативной документацией и сертификатами качества на металлопродукцию [11, 8, 6]. Логично предположить, что первичная окалина, образующаяся на поверхности заготовки в нагревательной печи, оказывает влияние только на степень угара ме-

талла, защищая его от обезуглероживания. Однако, на практике прослеживается тесная взаимосвязь температуры виткообразования и глубины обезуглероженного слоя, которая может изменяться в достаточно широком диапазоне (3,0–1,0 % от диаметра бунтового проката).

Фазовый состав окалины, образующейся в процессе охлаждения проката, оказывает влияние на степень ее удаления с поверхности металла вне зависимости от выбранного способа (химический или механический) и является важным технологическим параметром при подготовке поверхности металла к последующему волочению. Окалина должна легко удаляться, а поверхность металла иметь при этом голубовато-серый оттенок [17]. Медленное охлаждение проката в интервале температур 570–450 °C приводит к выделению магнетита и  $\alpha$ -железа из вюстита, наибольшая скорость распада последнего происходит при температуре ~ 480 °C. При достаточно больших скоростях охлаждения распад вюстита удается практически подавить [15, 13], тем самым обеспечивая хорошую удаляемость окалины.

Согласно [15, 13, 14, 23, 5] окалина, которая состоит из вюстита и имеет толщину слоя более 10 мкм по сравнению с другими ее модификациями, наиболее легко удаляется с поверхности бунтового проката как механическим, так и химическим способами.

Масса окалины на поверхности проката возрастает с повышением температур горячей деформации и виткообразования, а также при снижении скорости воздушного охлаждения [13, 22, 4]. Однако исследования, выполненные в работах [5, 4], позволяют утверждать, что на массу образующейся окалины, а также глубину обезуглероженного слоя наиболее значимое влияние оказывает один из главных параметров режима деформационно-термической обработки – температура виткообразования проката.

В работе [4] показано, что при охлаждении проката в потоке непрерывного проволочного стана на линии Стелмор масса окалины на поверхности металла уменьшается при снижении

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

температуры окончания водяного охлаждения и повышении скорости воздушного охлаждения. Химический состав стали оказывает различное влияние на степень удаления окалины. К примеру, медь и сера улучшают удаление окалины при механическом способе, кремний и никель оказывают абсолютно противоположное воздействие, а легирование стали хромом и вовсе не существенно [13]. Ввиду того, что при скоростях воздушного охлаждения проката более 10 °C/с масса окалины изменяется незначительно, а химический состав высокоуглеродистой стали на металлургических предприятиях отличается несущественно, то влияние этих факторов в настоящей работе не рассматривалось.

Необходимо отметить, что достижение требуемого результата в условиях промышленных предприятий всегда основывается на стратегии управления инновационной деятельностью, что позволяет снизить расход энергетических ресурсов и повысить экологическую безопасность производственного процесса [12]. Сегодня, в странах ЕС, при подготовке поверхности проката к волочению преимущество отдается исключительно механическому способу удаления окалины, вследствие дешевизны и экологической чистоты такого процесса. При этом на металлургических предприятиях используют различные методы определения массы окалины на поверхности бунтового проката [7, 19, 21]. В мировой практике существуют нормативные документы, которые содержат методики, регламентирующие определение общей и остаточной масс окалины на поверхности металла, а также ее способности к удалению.

Лидирующие позиции по переработке бунтового проката широкого марочного сортамента занимает Бельгийская компания «Bekaert», которая контролирует до 20 % мирового рынка метизной продукции. Требования, предъявляемые к окалине на поверхности проката из высокоуглеродистой стали, подробно изложены в спецификации компании «Bekaert» GS-03-16. Масса окалины определяется при помощи взвешивания с точностью до 0,001 г по следующей методике: производят отбор образцов от горячекатаного проката и взвешивают их ( $G_1$ ), затем оба конца образца (длиной 50,0 мм) подвергают химическому травлению до полно-

го удаления окалины и осуществляют повторное взвешивание ( $G_2$ ). Травленные концы металла зажимаются в захваты разрывной машины и при помощи экстензометра осуществляют 6–7 % растяжение образца, а затем выполняют взвешивание образца ( $G_3$ ). После растяжения образец подвергают химическому травлению до полного удаления окалины и выполняют окончательное взвешивание ( $G_4$ ). Используя полученные значения результатов взвешиваний, расчетным методом определяют общую ( $A$ , кг/т) и остаточную ( $C$ , кг/т) массы окалины, а также способность к удалению окалины механическим способом с поверхности проката ( $B$ , %).

В целом, представленная методика направлена на определение остаточной массы окалины на поверхности бунтового проката и пригодна для использования механического способа ее удаления. При этом существует вероятность возникновения определенной погрешности, которая обусловлена травлением концов испытуемого образца. При наличии легко удаляемой окалины на поверхности металла, когда содержание вюстита на границе раздела металл-окалина составляет до 80 %, химическое травление образцов может привести к растворению металлоосновы, несмотря на наличие в травильном растворе ингибитора [16]. Однако такое утверждение не подтвердилось на практике ввиду невозможности обеспечения требуемой чистоты эксперимента.

Методика П. Функе мл. и М. Хайнритца [20] близка к методике компании «Bekaert» и основана на растяжении образца до 5 %.

Отличительная особенность методики заключается в том, что не проводят повторное химическое травление концов испытываемых образцов, благодаря чему исключается погрешность определения остаточной массы окалины.

Методика компании «Kobe Steel» [17], которая была предложена Робертсом и М. И. Мэннингом, основана на эмпирической зависимости и базируется на механике разрушения. При этом методика хорошо согласуется с существующей концепцией: лучшие характеристики удаления окалины обеспечиваются при повышении толщины слоя окалины и более гладкой поверхности проката.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Методика ОАО «Молдавский металлургический завод» в целом аналогична методике компании «Bekaert» GA-03-16. Отличительной особенностью является определение количества остаточной окалины, которое исключает ее зависимость от общей массы окалины.

Отделом термической обработки металла для машиностроения Института черной металлургии им. З. И. Некрасова разработана и опробована на стане 150-1 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» методика определения массы окалины на поверхности бунтового проката, охлажденного на линии Стелмор [17]. Количество окалины определяется расчетным методом, а в качестве исходных данных используются: масса окалины на поверхности горячекатаного металла (передний конец бунта), длина горячекатаной части бунта, масса одного погонного метра проката, масса окалины на поверхности проката, подвергнутого охлаждению, длина охлажденной части бунта и общая масса бунта.

Метод определения общей массы окалины на поверхности проката из высокоуглеродистых марок сталей, который применяется сегодня на металлургических предприятиях Украины, изложен в национальном стандарте ДСТУ 3683-98 (приложение Б) [9]. Согласно п. 6.1.5 ДСТУ 3683-98 образцы для всех видов испытаний, в том числе и определения массы окалины, для проката, охлажденного двухстадийным способом, отбираются от заднего конца раската, при этом не учитывается до 25 горячекатаных витков в головной части бунта.

Следует отметить, что определение способности окалины к удалению с поверхности проката на метизных предприятиях основано на 5–7 % растяжении исследуемых образцов, которое металл претерпевает при изгибе в устройстве окалиноломателя. В целом, рассмотренные методы разнообразны, а последовательность проведения требуемых операций и обработки данных различны и в ряде случаев специфичны. Методика «Kobe Steel» при оценке степени удаления окалины учитывает влияние шероховатости контактирующих поверхностей, модуль Юнга окалины и др. показатели. Методика П. Функе мл. и М. Хайнритца основана на определении фактической массы как общей, так и остаточной окалины через эмпирически полученное уравнение. Метод компа-

нии «Bekaert» (GA-03-16) основан на фактических расчетных значениях, а остаточное количество окалины после 6–7 % растяжения зависит от общей ее массы. Анализируя требования, предъявляемые к свойствам окалины по спецификации компании «Bekaert» следует отметить, что в комплексе они невыполнимы, так как часть из них противоречит друг другу. Так требование к общей массе окалины не более 7 кг/т и ее толщине 10–14 мкм является необоснованным ввиду того, что при указанной толщине слоя ее масса может составлять 8–12 кг/т [5].

На металлургических предприятиях постсоветского пространства обезуглероженный слой на поверхности бунтового проката определяют по ГОСТ 1763-68 (метод М). Согласно методике компании «Pirelli» (спецификация № 18.V.005) определяют среднюю глубину обезуглероженного слоя по 8 условно разделенным секторам поперечного сечения проката и максимальную по отдельному сектору. Главная трудность заключается в измерении длин участков обезуглероживания для каждого из секторов, что оказывает влияние на точность определения.

На заводе РУП «БМЗ» (г. Жлобин) разработан метод металлографического определения обезуглероженного слоя по периметру проката диаметром 5,5 мм из высокоуглеродистых сталей, в соответствии с которым обезуглероживание определяется на исследуемых образцах через каждые 0,24 мм, что соответствует выполнению замеров в 72 точках. Расчет глубины обезуглероженного слоя поверхности проката рассчитывается в «штрафных» баллах.

При увеличении диаметра исследуемого образца количество замеров пропорционально увеличивается, что является достаточным условием для объективной оценки глубины обезуглероженного слоя. Предложенная методика является универсальной, но при этом весьма трудоемкой.

В работе [18] показана возможность определения общей массы окалины, глубины обезуглероженного слоя и среднего межпластиночного расстояния в перлите при известном одном из указанных показателей. Однако для определения этого показателя требуется проведение металлографического анализа или наличие дополнительного лабораторного оборудования [4, 5].

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Основные недостатки рассмотренных методов связаны с применением специального исследовательского оборудования (оптический микроскоп, разрывная машина, высокоточные аналитические весы и т.д.), продолжительностью во времени, трудоемкостью выполняемых операций и соответствующей квалификацией рабочего персонала. Перечисленные недостатки снижают оперативность определения общей массы окалина и глубины обезуглероженного слоя на поверхности проката при изменяющихся технологических параметрах режима деформационно-термической обработки металла.

**Цель**

Установить универсальные эмпирические зависимости, которые позволят произвести оперативный расчет массы окалина, глубины обезуглероженного слоя и других качественных показателей бунтового проката, основываясь на параметрах технологического процесса его производства.

*Материал и методика исследований.* Исследования выполнены на промышленных партиях бунтового проката из сталей марок SAE 1006 и SAE 1065, химический состав которых соответствовал стандарту ASTM A 510M (табл. 1). Удаляемость окалина определяли в соответствии с методиками компании «Beckaert» по спецификациям: GA-03-16 «Количественное определение общей и остаточной масс окалина и способности к ее удалению с поверхности проката из низкоуглеродистых и высокоуглеродистых сталей», GA-03-18 «Испытание на удаление окалина механическим способом с поверхности проката из низкоугле-

родистой стали», GS-03-02 «Прокат из низкоуглеродистой стали для механического удаления окалина», GS-06-01 «Прокат из высокоуглеродистой стали качества Стелмор». Глубину обезуглероженного слоя идентифицировали в соответствии с ГОСТ 1763-68 (метод М). Используемые приборы и оборудование: разрывная машина «Р-50», раствор соляной кислоты с ингибитором ТДА, подготовленный в соответствии с требованиями ДСТУ 3683-98, высокоточные весы «JD 100» с точностью взвешивания 0,001 г, рентгеновский дифрактометр ДРОН-2.0, световые оптические микроскопы «Neophot-21», «Axiovert 200M MAT», электронный растровый микроскоп «VEGA TS5130MM».

**Результаты**

Разработка нового метода заключалась в создании способа определения массы окалина и глубины обезуглероженного слоя на поверхности проката, который бы не требовал применения вышеуказанных операций и характеризовался достаточной универсальностью и оперативностью при изменении одного из главных параметров режима деформационно-термической обработки металла (температуры виткообразования).

Новый способ определения массы окалина и глубины обезуглероженного слоя на поверхности металла предусматривает возможность оперативной корректировки режима охлаждения проката, изготавливаемого на проволоочном стане при изменяющихся технологических параметрах его производства.

Таблица 1

**Химический состав бунтового проката по ASTM 510/510M**

Table 1

**Chemical composition of rolled coil steel by ASTM 510/510M**

Марка стали	Диаметр проката, мм	Химический состав стали, % (масс.)							
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
SAE 1006	5,5	0,07	0,36	0,06	0,007	0,023	0,028	0,017	0,028
SAE 1065	5,5	0,65	0,71	0,25	0,024	0,029	0,050	0,020	0,050

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Решение поставленной задачи обеспечивалось тем, что разработанный способ основывается на фактическом измерении массы окалины и глубины обезуглероженного слоя, которые определяются в реальных производственных условиях с использованием стандартного промышленного оборудования. При проведении исследований раскладку металла витками на транспортер при помощи виткоукладчика производили в интервале температур  $(800–940) \pm 20$  °С, с шагом в 50 °С. Для каждой из температур виткообразования измеряли глубину обезуглероженного слоя (по ГОСТ 1763-68) и рассчитывали массу окалины на поверхности бунтового проката, изготовленного из сталей SAE 1006 и SAE 1065 (см. табл. 1). Для расчета массы окалины на поверхности проката (из низко- и высокоуглеродистых сталей) в условиях ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» разработана методика на базе спецификаций GA-03-16, GA-03-18, GS-03-02 и GS-06-01 компании «Bekaert», в соответствии с которой отбирают образцы длиной 300,0 мм от горячекатаного металла, не подвергают правке и выполняют взвешивание ( $G_1$ ). Затем на обоих концах образцов наносят идентификационные надрезы, травят в растворе кислоты (глубина погружения 50,0 мм, время травления 15 минут), после чего концы образцов промывают и сушат, затем выполняют взвешивание ( $G_2$ ). Последующее растяжение образцов с остаточным удлинением 6 % (прокат из стали SAE 1065) и 7 % (прокат из стали SAE 1006) выполняют таким образом, чтобы рабочая длина образцов между захватами разрывной машины составляла 200,0 мм. Удаление остатков окалины с поверхности металла осуществляют при помощи четырехкратного обдува сжатым воздухом, при этом каждый раз образец поворачивается на 90°, затем производят взвешивание ( $G_3$ ) и оценивают состояние поверхности в соответствии с эталонными фотографиями (рис. 1). Оставшаяся окалина на образце травится в растворе кислоты в течение 3 минут, после чего выполняют окончательное взвешивание ( $G_4$ ).

Расчет общей ( $A$ , кг/т) и остаточной ( $C$ , кг/т) масс окалины, а также ее способности к удалению механическим способом ( $B$ , %) выполняется по формулам (1–3):

$$A = (G_1 - G_4) \div G_1 \cdot 1000 \quad ,$$

$$C = (G_1 - G_4) \div G_1 \cdot \left( 1 - \frac{(G_2 - G_3)}{(G_2 - G_4)} \right) 1000 \quad ,$$

$$B = (G_2 - G_3) \div (G_2 - G_4) \cdot 100 \quad .$$

Согласно работы [1], точность опыта определяется величиной отклонения измеренного значения от действительного, с ошибкой (погрешностью) эксперимента. Расчеты показали, что в зависимости от точности взвешивания образцов погрешность эксперимента будет различной: при точности весов 0,001 г – 17 %, при 0,005 г – 85 %. В связи с этим при проведении исследований образцы взвешивали на высокоточных аналитических весах с точностью до 0,001 г.

Шаблон для выполнения маркировки и нарезки образцов приведен на рис. 2.

Зависимости определения общей и остаточной масс окалины на поверхности бунтового проката из сталей марок SAE 1006 и SAE 1065 получены путем статистической обработки экспериментальных данных производственного процесса на проволочном стане (ПС-150-1) ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог». Проволочный стан оборудован линией водовоздушного охлаждения Стелмор с соответствующими контрольно-измерительными приборами. Бунтовой прокат из сталей SAE 1006 и SAE 1065 диаметром 5,5 мм прокатывался из непрерывнолитой заготовки сечением 125×125 мм, нагрев и горячую деформацию проводили в соответствии с ТИ 228-П1-02-03. В табл. 2 представлены данные о температуре нагрева заготовок в печи.

Технологические режимы охлаждения бунтового проката на линии Стелмор приведены в табл. 3, а механические свойства бунтового проката – в табл. 4. Металлографические исследования показали, что номера действительных зерен изменяются в пределах 8–10 для стали SAE 1006 и 8–11 для стали SAE 1065, а разбег значений для каждого из режимов не превышает 2–3 номеров. При этом следует отметить, что для неохлажденного переднего конца бунтового проката обеих марок стали характерным является увеличение размеров действительного зерна на 1–2 номера. На по-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

верхности неохлажденного горячекатаного переднего конца бунтового проката из сталей марок SAE 1006 и SAE 1065 общую массу окалины не удалось идентифицировать в полном объеме из-за ее скалывания при отборе и подготовке

образцов. Толщина слоя окалины на поверхности проката из стали SAE 1006 составляет 0,008–0,026 мм, а из стали SAE 1065 – 0,003–0,017 мм соответственно.

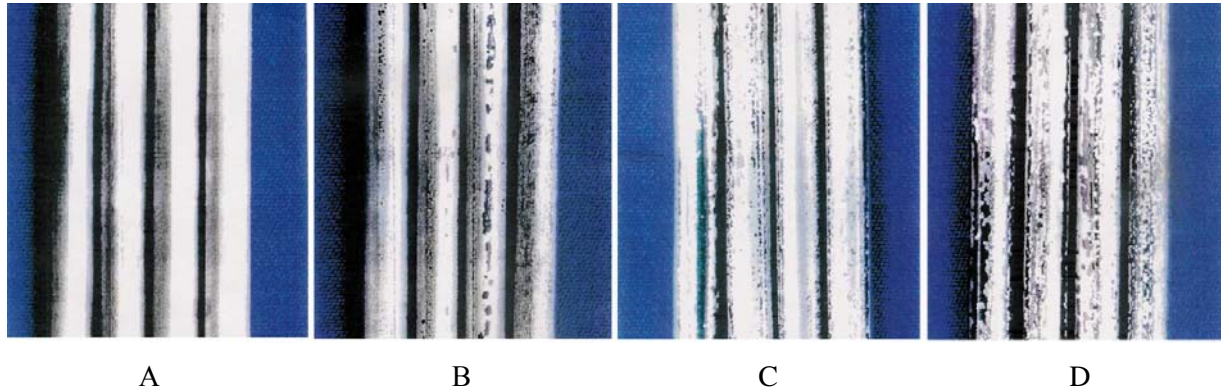


Рис. 1. Эталонная шкала определения типа (кода) состояния поверхности бунтового проката диаметром 5,5 мм [10]:

*A* – чистая серая поверхность проката; *B* – небольшие остаточные темные пятна или слабые следы окалины; *C* – значительная часть поверхности (20 %) покрыта темными пятнами или на субстрате проката отчетливо видны остатки окалины; *D* – крупные сплошные участки поверхности покрыты темными пятнами или на субстрате проката отчетливо видны остатки окалины

Fig. 1. Reference scale for determination of type (code) of surface state of the rolled coil steel of 5.5 mm diameter [10]:

*A* – clean grey surface of rolled steel; *B* – small residual dark spots or faint traces of scale; *C* – a significant part of the surface (20 %) is covered with dark spots or scale residues are clearly visible on the rolled substrate; *D* – large continuous surface portions are covered with dark spots or scale residues are clearly visible on the rolled substrate

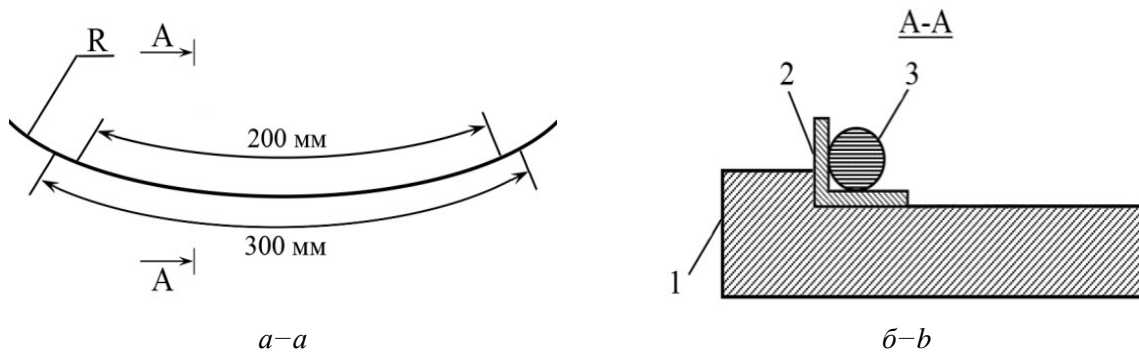


Рис. 2. Эскиз приспособления подготовки образцов для определения массы окалины и состояния поверхности по методике «Bekaert» [10]:  
*a* – размер отбираемых образцов и рабочая длина образца; *R* – радиус витка проката; *b* – 1 – основание; 2 – угловой профиль с прорезами для полотна ножовки; 3 – горячекатаный бунтовый прокат

Fig. 2. Sketch of sample preparation tool for determination of scale mass and surface state by Bekaert method [10]:  
*a* – size of selected samples and sample working length; *R* – rolled coil radius; *b* – 1 – basis; 2 – corner profile with hacksaw blade slots; 3 – hot-rolled coil steel



## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

С целью изучения фазового состава окалина на поверхности бунтового проката, изготовленного по различным режимам двухстадийного охлаждения, окалину отбирали методом кручения при подготовке образцов.

Фазовый состав окалина определяли по дифрактограммам, полученным на установке ДРОН-2,0 в медном излучении с графитовым

монохроматором. На дифрактометре предварительно были записаны эталонные смеси, содержащие различные соотношения оксидов (вюстит, магнетит, гематит). Расшифровку дифрактограмм и идентификацию фаз осуществляли по дифракционным характеристикам эталонных смесей (табл. 5) и изменению значений углов дифракции.

Таблица 2

## Температура нагрева металла в печи

Table 2

## Metal heating temperature in furnace

Марка стали	Температура нагрева металла по зонам печи ( $\pm 20$ °C), °C						
	зона 1	зона 2	зона 3	зона 4	зона 5	зона 6	зона 7
SAE 1006 SAE 1065	720	730	1 090	1 200	1 160	1 205	1 215

Таблица 3

Параметры режимов двухстадийного охлаждения  
бунтового проката из сталей SAE 1006 и SAE 1065

Table 3

Parameters of two-stage cooling modes of rolled coil  
steel of SAE 1006 and SAE 1065 grades

№ режима	Марка стали	Скорость прокатки, м/с	Температура вит-кообразования, °C	Скорость транспортера на секциях (1–7) линии Стелмор, м/с	Положение тепло-изоляционных крышек	Работа вентиляторов, об/мин
1–1	SAE 1006	86,8	800 $\pm$ 20	0,50–0,55	все открыты	№1-7 – 900; №8-12 – откл.; № 13-14 – 200; № 15 – 150; № 16-17 – 100
1–2			850 $\pm$ 20	0,50–0,55		
1–3			900 $\pm$ 20	0,50–0,55		
1–4			940 $\pm$ 20	0,50–0,55		
2–1	SAE 1065	86,8	800 $\pm$ 20	0,50–0,55	все открыты	№17 – 900; №8-12 – откл.; №13-14 – 200; №15 – 150; №16-17 – 100
2–2			850 $\pm$ 20	0,50–0,55		
2–3			900 $\pm$ 20	0,50–0,55		
2–4			940 $\pm$ 20	0,50–0,55		

Таблица 4

**Механические свойства<sup>1</sup> исследуемого бунтового проката из сталей SAE 1006 и SAE 1065**

Table 4

**Mechanical properties of the tested rolled coil steel of SAE 1006 and SAE 1065 grades**

№ режима	Место отбора проб <sup>2</sup>	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_{10}$ , %	$\psi$ , %	Номер действительного зерна <sup>3</sup>	Толщина слоя окалины, мм
1-1	<i>o</i>	<u>390–400</u> 396,7	<u>29–34</u> 31,7	<u>71–72</u> 71,3	10; 9	0,009–0,011
1-2	<i>o</i>	<u>390–410</u> 401,7	<u>29–32</u> 30,3	<u>70–72</u> 70,7	10; 9	0,008–0,013
1-3	<i>o</i>	<u>385–385</u> 385,0	<u>31–33</u> 32	<u>75–77</u> 76,3	10; 9	–
1-4	<i>z</i>	<u>380–400</u> 388,3	30–31 30,3	75–76 75,7	9; 8	–
	<i>o</i>	<u>390–405</u> 396,7	<u>31–34</u> 32,3	<u>72–73</u> 72,3	10; 9	0,024–0,026
2-1	<i>o</i>	<u>1 000–1 040</u> 1 021,7	<u>11–12</u> 11,5	<u>47–49</u> 47,7	11; 10	0,008–0,009
2-2	<i>o</i>	<u>970–1 045</u> 1010	<u>12–14</u> 12,7	<u>45–47</u> 46,0	10; 9	0,008–0,010
2-3	<i>o</i>	<u>980–1 015</u> 998,3	<u>11–14</u> 12,5	<u>42–47</u> 44,7	10; 11	0,006–0,008
2-4	<i>z</i>	<u>1 070–1 130</u> 1 098,3	<u>9,2–11,0</u> 10,2	<u>39–42</u> 40	9; 8	0,003–0,004
	<i>o</i>	<u>1 060–1 115</u> 1 091,7	<u>11,5–12,5</u> 12,0	<u>39–42</u> 40	10; 11	0,016–0,017

Примечание: 1 – в числителе минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее;  
2 – (z) – горячекатаный передний конец бунта, (o) – охлажденный задний конец бунта;  
3 – испытания по ГОСТ 5639-82.

Таблица 5

**Состав эталонных смесей для определения фазового состава окалины**

Table 5

**Composition of reference compounds for determination of scale phase composition**

Состав эталонных смесей, % масс.			
№ 1	№ 2	№ 2	№ 4
33,3 % – Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	10 % – Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	25 % – Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	50 % – Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
33,3 % – Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5 % – Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15 % – Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	50 % – FeO
33,3 % – FeO	85 % – FeO	60 % – FeO	

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

При расшифровке полученных дифрактограмм установлено, что количественное соотношение фазовых составляющих окалины при прочих равных условиях зависит главным образом от температуры виткообразования металла. Исследования показали, что при изменении температуры виткообразования на поверхности проката образуется окалина, состоящая из двух-трех фаз (табл. 6).

Точность количественного анализа зависит от представительности проб – количества вещества (окалины). В качестве связующего материала использовался вазелин. Применить метод гомологических пар в данном случае не представлялось возможным ввиду того, что он предназначен для двухфазных образцов. Способ наложения основан на использовании предварительно снятых эталонных (смесей известного состава) образцах, отличающихся между собой ступенчатым изменением отношения интенсивностей. После чего сравнивают интенсивность эталонных и исследуемых образцов.

Исследования показали, что при повышении температуры виткообразования металла на линии Стелмор в диапазоне температур 800–940 °C

количество окалины и глубина обезуглероженного слоя для проката из стали марки SAE 1065 изменяются следующим образом:

– при раскладке на витки при температурах 800, 850, 900 и 940 °C и последующего воздушного охлаждения средние значения общей масса окалины составляют: 3,85, 3,59, 3,36 и 9,19 кг/т, а остаточной – 0,11, 0,16, 0,18 и 0,22 кг/т соответственно;

– средняя глубина обезуглероженного слоя после охлаждения проката от температур 800, 850, 900 и 940 °C составляет – 0,11, 0,09, 0,08 и 0,05 мм соответственно.

Для проката из низкоуглеродистой стали, в частности SAE 1006, глубина обезуглероженного слоя не подвергается контролю ни одним из существующих нормативных документов, ввиду невозможности ее определения методом металлографического анализа, а количество окалины изменяется в таких диапазонах:

– при раскладке на витки при температурах 800; 850; 900 и 940 °C и последующего воздушного охлаждения средние значения общей массы окалины составляют: 4,64; 5,85; 10,33 и 11,17 кг/т, а остаточной – 0,67; 0,73; 0,30 и 0,33 кг/т соответственно.

Таблица 6

## Фазовый состав окалины на поверхности бунтового проката марок SAE 1006 и SAE 1065

Table 6

## Scale phase composition on the surface of rolled coil steel of SAE 1006 and SAE 1065 grades

№ режима	Марка стали	Температура виткообразования, °C	Количественное содержание оксидов железа, %		
			Вюстит (FeO)	Магнетит (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	Гематит (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
1-1	SAE 1006	800±20	~ 90	8–10	~ 2
1-2		850±20	88–90	10–12	–
1-3		900±20	~ 85	~ 15	–
		940±20	~ 80	~ 15	~ 5
1-4		горячекатаный передний конец бунта	75–80	20–15	~ 5
2-1	SAE 1065	800±20	85–88	10–12	~ 2
2-2		850±20	85–88	10–12	~ 2
2-3		900±20	83–85	~ 15	~ 2
2-4		940±20	80	17–15	3–5

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

В табл. 7 приведенные результаты взвешиваний, расчета общей и остаточной масс окалины на поверхности металла, а также ее способности к удалению в зависимости от температуры виткообразования металла.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что для стали SAE 1006 наилучшая способность к удалению окалины составляет 96,8–97,5 % и 96,7–97,6 %, которая наблюдается на образцах металла, охлажденного до температур виткообразования 900 и 940 °С соответственно. Для указанного температурного диапазона характерным является и минимальное количество остаточной окалины на поверхности металла. Для проката из стали SAE 1065 наилучшие показатели по удаляемости окалины достигнуты при температурах виткообразования 800 и 940 °С – 95,9–98,3 %

и 97,3–97,9 % соответственно, а минимальное количество остаточной окалины на поверхности металла наблюдается при температуре виткообразования 800 °С. При снижении температуры виткообразования (при прочих равных условиях: скорости передвижения витков по роликовому транспортеру линии Стелмор, количеству задействованных единиц и режимов работы воздушных вентиляторов, положению теплоизоляционных крышек) общая масса окалины снижается, а остаточная возрастает. При температуре виткообразования 850 °С и ниже на поверхности металла образуется гематит характерного красно-рыжего оттенка (цвет ржавчины), что приводит к потере товарного вида металлопродукции и опасению потребителей относительно возможности дальнейшей ее переработки.

Таблица 7

**Результаты испытаний по механическому удалению окалины  
с поверхности бунтового проката марок SAE 1006 и SAE 1065**

Table 7

**Tests results for mechanical descaling of the surface  
of rolled coil steel of SAE 1006 and SAE 1065 grades**

№ режима	$G_1$ , г	$G_2$ , г	$G_3$ , г	$G_4$ , г	$A$ , кг/т	$B$ , %	$C$ , кг/т	Код (тип) поверхности
Сталь SAE 1006								
1-1	57,712	57,622	57,480	57,453	4,49	84,0	0,72	В
	57,980	57,893	57,749	57,724	4,42	85,2	0,65	В
	57,732	57,632	57,466	57,442	5,02	87,4	0,64	В
1-2	56,190	56,074	55,882	55,856	5,94	88,1	0,71	В
	55,714	55,615	55,461	55,431	5,08	83,7	0,83	В
	56,437	56,323	56,094	56,069	6,52	90,2	0,64	В
1-3	58,142	57,932	57,493	57,482	11,35	97,6	0,28	В
	58,031	57,845	57,486	57,475	9,58	97,0	0,29	В
	58,217	58,024	57,645	57,632	10,04	96,7	0,33	В
1-4 <sup>1</sup>	56,248	56,216	56,129	56,098	2,67	73,7	0,70	С
	55,792	55,741	55,659	55,631	2,87	74,5	0,74	С
	55,812	55,783	55,751	55,721	1,63	51,6	0,79	С
1-4	57,194	56,975	56,523	56,508	11,99	96,8	0,39	В
	57,696	57,482	57,085	57,072	10,82	96,8	0,34	В
	57,354	57,147	56,750	56,740	10,71	97,5	0,26	В

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Окончание табл. 7

End of table 7

№ режима	$G_1$ , г	$G_2$ , г	$G_3$ , г	$G_4$ , г	$A$ , кг/т	$B$ , %	$C$ , кг/т	Код (тип) поверхности
Сталь SAE 1065								
2-1	57,530	57,460	57,339	57,335	3,39	96,8	0,11	B
	58,085	58,009	57,867	57,861	3,86	95,9	0,16	B
	58,278	58,199	58,030	58,027	4,31	98,3	0,08	B
2-2	57,020	56,949	56,822	56,816	3,58	95,5	0,16	B
	56,550	56,474	56,348	56,342	3,68	95,5	0,17	B
	58,025	57,955	57,826	57,820	3,53	95,5	0,16	B
2-3	55,638	55,573	55,463	55,454	3,31	92,4	0,25	B
	56,552	56,484	56,370	56,366	3,29	96,6	0,11	B
	56,811	56,741	56,620	56,613	3,49	94,5	0,19	B
2-4 <sup>1</sup>	56,312	56,288	56,252	56,224	1,56	56,3	0,68	D
	55,937	55,898	55,835	55,811	2,25	72,4	0,62	C
	56,670	56,634	56,585	56,557	1,99	63,6	0,73	C
2-4	57,384	57,182	56,823	56,813	9,95	97,3	0,27	B
	57,477	57,291	56,921	56,913	9,81	97,9	0,21	B
	57,325	57,170	56,884	56,877	7,82	97,6	0,19	B

Примечание: 1 – горячекатаный передний конец бунта.

Возникающий градиент температур при различных температурах виткообразования, несмотря на незначительно отличающийся фазовый состав окарины (табл. 5), приводит к образованию вторичных оксидов на границе раздела металлокалина с различными свойствами и, соответственно, способности к механическому удалению окарины с поверхности бунтового проката.

Данные металлографического анализа измерения глубины обезуглероженного слоя представлены в табл. 8.

Графическое представление результатов исследований в зависимости от температуры виткообразования проката приведено на рис. 3–5.

Статистическая обработка данных позволила установить корреляционную связь общей и остаточной масс окарины, а также глубины обезуглероженного слоя ( $h_{об}$ , %) на поверхности металла от изменения температуры виткообразования ( $T_{вот}$ , °C).

Исходные данные были обработаны стандартными методами математической статистики,

в результате чего получены следующие уравнения регрессии:

– для проката из стали SAE 1006:

$$A_{SAE1006} = 44,597 \cdot \ln T_{BO} - 293,9;$$

$$C_{SAE1006} = 1,4371 \cdot T_{BO}^3 \cdot 10^{-6} - 3,7619 \cdot T_{BO}^2 \times \\ \times 10^{-3} + 3,273 \cdot T_{BO} - 945,9;$$

– для проката из стали SAE 1065:

$$A_{SAE1065} = 1,1894 \cdot T_{BO}^3 \cdot 10^{-6} - 3,0324 \cdot T_{BO}^2 \times \\ \times 10^{-3} + 25,736 \cdot T_{BO} - 7267;$$

$$C_{SAE1065} = 0,7337 \cdot T_{BO} \cdot 10^{-3} - 0,4733;$$

$$h_{об} = 3,7857 \cdot T_{BO}^3 \cdot 10^{-7} + 9,867 \cdot T_{BO}^2 \times \\ \times 10^{-4} - 0,862 \cdot T_{BO} + 253,82.$$

Таблица 8

## Измерение глубины обезуглероженного слоя на поверхности бунтового проката

Table 8

## Measuring the depth of decarbonized layer on the rolled coil steel surface

Марка стали	Температура виткообразования, °C			
	800	850	900	940
SAE 1006 <sup>1</sup>	–	–	–	–
SAE 1065 <sup>2</sup>	<u>2,21–2,04</u>	<u>1,72–1,87</u>	<u>1,45–1,67</u>	<u>1,14–1,38</u>
	2,11	1,78	1,56	1,27

Примечание: 1 – не подвергается контролю в нормативной документации; 2 – в числителе минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

При проведении металлографических исследований изменения глубины обезуглероженного слоя на поверхности проката из стали SAE 1065 в зависимости от температуры виткообразования дополнительному контролю подвергали изменение главного параметра микроструктуры – межпластиночного расстояния в перлите (рис. 6), средние значения которого ( $S_0$ , мкм) для температур виткообразования 800, 850, 900 и 940 °C составили – 0,341, 0,263, 0,176 и 0,158 мкм соответственно.

Уравнение регрессии (1), описывающее взаимосвязь  $S_0$  с температурой виткообразования, показало хорошую корреляционную связь ( $R = 0,93$ ):

$$S_0 = -1,1895 \cdot \ln T_{BO} + 8,287. \quad (1)$$

Необходимо отметить, что сопоставительный анализ данных, полученных расчетным путем, и результатов исследований для всех уравнений регрессии показал достаточно высокое соответствие расчетных и экспериментальных данных ( $R = 0,90–0,96$ ). Принимая во внимание, что уравнения регрессии получены путем обработки экспериментальных данных типового проволочного стана ПС-150-1 стандартными статистическими методами, разработанная методика определения общей и остаточной масс окалины, глубины обезуглероженного слоя, а также среднего межпластиночного расстояния в перлите бунтового проката марки SAE 1065 может быть использована в условиях других металлургических предприятий.

Предложенный экспресс-метод позволяет снизить трудоемкость и существенно умень-

шить временные потери, необходимые для определения нормируемых показателей качества бунтового проката. Выполненные эксперименты позволили добиться необходимого практического результата в силу возможности оперативного управления режимами регулируемого охлаждения металла, а также обеспечить контроль над процессами структурообразования в процессе деформационно-термической обработки бунтового проката.

В заключение следует отметить, что товарный вид проката при прочих равных условиях определяется цветом его поверхности. Допустимыми цветами проката являются серо-голубой и черный, а недопустимым – красно-рыжий. При температурах виткообразования 800 и 940 °C окалина имеет допустимый (черный) цвет, а при 850 °C и 900 °C – недопустимый (красно-рыжий). С учетом удаляемости окалины с поверхности бунтового проката механическим способом рациональной температурой раскладки проката на витки, при двухстадийном охлаждении металла на линии Стелмор, является температура  $(940 + 20)$  °C.

На основании результатов исследований в условиях ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» введена во внутривозвратное использование методика проведения испытаний по удалению окалины механическим способом с поверхности проката из низко- и высокоуглеродистых марок стали. Получен патент Украины на изобретение № 91760 «Спосіб визначення загальної та залишкової кількості окалини на поверхні катанки».

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

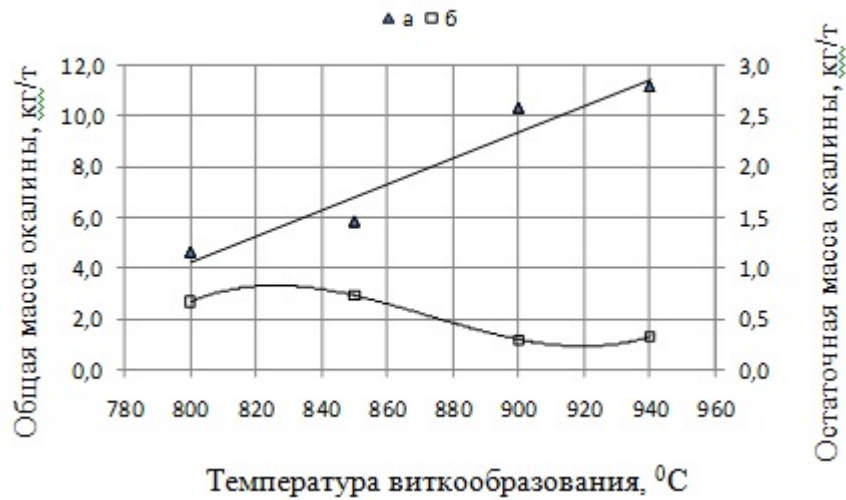


Рис. 3. Изменение количества окалины  
на поверхности бунтового проката диаметром 5,5 мм  
из стали марки SAE 1006  
в зависимости от температуры виткообразования:  
*a* – общая масса окалины; *b* – остаточная масса окалины

Fig. 3. Changes in scale mass on rolled coil steel  
surface of 5.5 mm diameter of SAE 1006 steel grade  
depending on coil formation temperature:  
*a* – total scale mass; *b* – residual scale mass

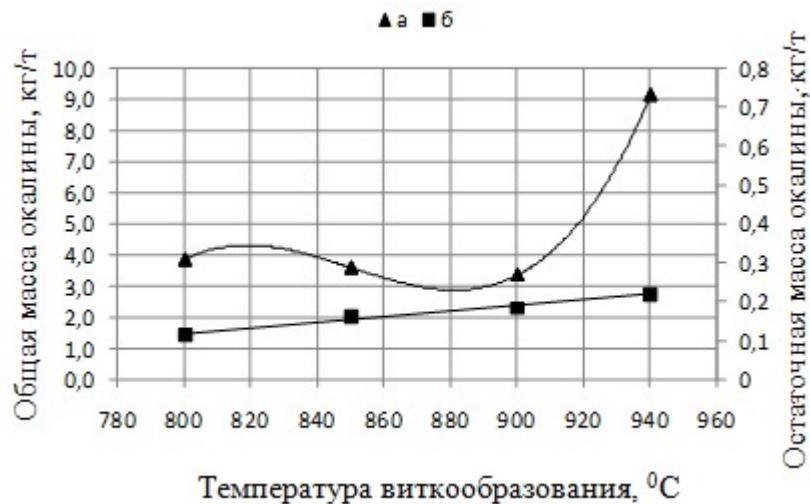


Рис. 4. Изменение количества окалины  
на поверхности бунтового проката диаметром 5,5 мм  
из стали марки SAE 1065  
в зависимости от температуры виткообразования:  
*a* – общая масса окалины; *b* – остаточная масса окалины

Fig. 4. Changes in scale mass on rolled coil steel  
surface of 5.5 mm diameter of SAE 1065 steel grade  
depending on coil formation temperature:  
*a* – total scale mass; *b* – residual scale mass

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

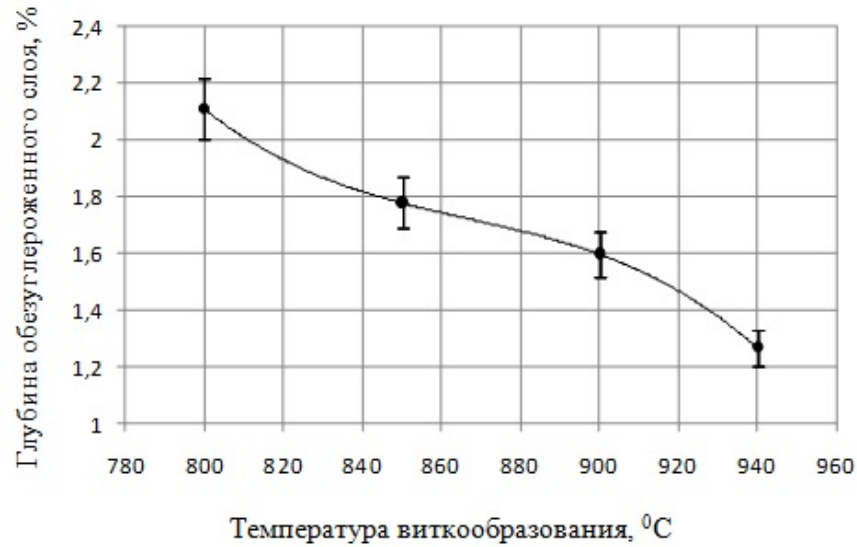


Рис. 5. Изменение глубины обезуглероженного слоя на поверхности бунтового проката диаметром 5,5 мм из стали марки SAE 1065 в зависимости от температуры виткообразования

Fig. 5. Changes in decarburized layer depth on rolled coil steel surface of 5.5 mm diameter of SAE 1065 steel grade depending on coil formation temperature

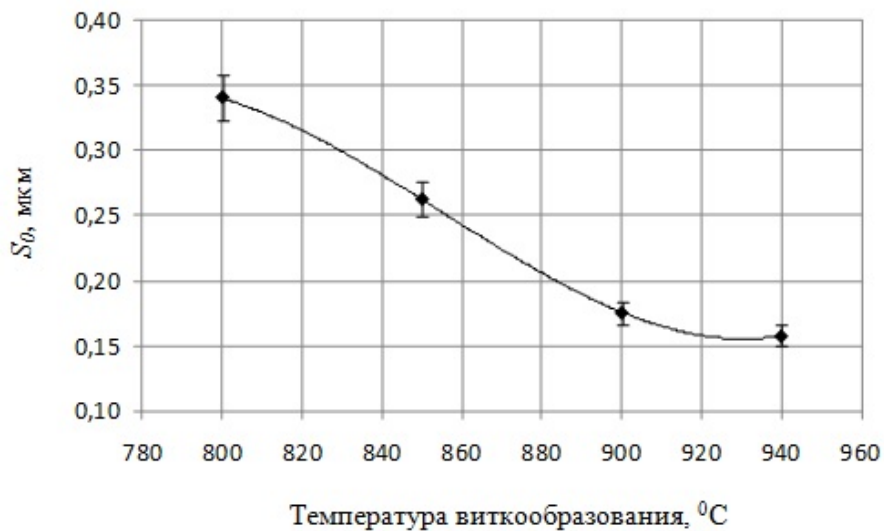


Рис. 6. Изменение межпластиночного расстояния в перлите бунтового проката диаметром 5,5 мм из стали марки SAE 1065 в зависимости от температуры виткообразования (интенсивность воздушного охлаждения – const)

Fig. 6. Changes in interlamellar spacing in pearlite of 5.5 mm diameter rolled coil steel of SAE 1065 steel grade depending on coil formation temperature (intensity of air-cooling – const)



### Выводы

1. Установлено влияние температуры виткообразования и последующего непрерывного воздушного охлаждения на фазовый и количественный состав окалины, образующейся на поверхности бунтового проката диаметром 5,5 мм из сталей марок SAE 1006 и SAE 1065.

2. Анализ экспериментальных данных позволил определить рациональные температуры виткообразования металла, которые обеспечивают наилучшее удаление окалины, минимальное ее остаточное количество и соответствие цвета поверхности металла требованиям европейских потребителей.

3. На базе спецификаций компании «Bekaert» (GA-03-16, GA-03-18, GS-03-02 и GS-06-01) в условиях ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» разработана и внедрена методика проведения испытаний по удалению окалины механическим способом с поверхности бунтового проката из низко- и высокоуглеродистой марок сталей.

4. Разработан экспресс-метод определения общей и остаточной масс окалины на поверхности металла в зависимости от температуры виткообразования. Получен патент Украины на изобретение № 91760 «Спосіб визначення загальної та залишкової кількості окалини на поверхні катанки».

5. Установлена корреляционная связь нормируемых показателей качества бунтового проката из высокоуглеродистой стали (масса окалины, глубина обезуглероженного слоя и межпластиночное расстояние в перлите) с одним из главных параметров (температурой виткообразования) режима деформационно-термической обработки.

6. Полученные уравнения регрессии позволяют без применения металлографического анализа с минимальной погрешностью определить массу окалины, глубину обезуглероженного слоя и среднее межпластиночное расстояние в перлите проката из высокоуглеродистой стали. При этом не требуется проведение трудоемких и длительных во времени аттестационных испытаний.

7. Показано дополнительное обоснование рациональности повышения температуры виткообразования металла с точки зрения формирования эффективных механических свойств,

структурного состояния и других качественных показателей бунтового проката.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Блатнер, М. Е. Методика исследований металлов и обработки опытных данных / М. Е. Блатнер. – Москва : Металлургиздат, 1952. – 444 с.
2. Вакуленко, И. А. Морфология структуры и деформационное упрочнение стали / И. А. Вакуленко, В. И. Большаков. – Днепропетровск : Маковецкий, 2008. – 196 с.
3. Вакуленко, І. О. Структурний аналіз в матеріалознавстві / І. О. Вакуленко. – Дніпропетровськ : Маковецкий, 2010. – 124 с.
4. Взаимосвязь структурных, механических и технологических характеристик катанки из стали 80 КРД / Э. В. Парусов, В. В. Парусов, В. А. Луценко [и др.] // Стальные канаты : сб. научн. тр. – Одесса, 2007. – С. 155–161.
5. Взаимосвязь толщины и удельной массы окалины на поверхности высокоуглеродистой катанки / В. В. Парусов, Э. В. Парусов, И. Н. Чуйко [и др.] // Стр-во, материаловедение, машиностроение : сб. научн. тр. – Днепропетровск : ПГАСА, 2004. – Вып. 27, ч. 2. – С. 26–29.
6. Исследование влияния окиснообразования на состояние поверхности заготовок для повышения качества горячекатаных безшовных труб / И. А. Ковалева, А. А. Кучков, А. В. Венгура [и др.] // Литье и металлургия. – 2014. – № 3 (76). – С. 53–57.
7. Исследование охлаждения труб при гидросбиве окалины / В. Д. Добряк, А. Н. Степаненко, Ю. Д. Угрюмов [и др.] // Металлург. и горноруд. промышленность. – 2016. – № 1. – С. 99–102.
8. Кайстров, Е. А. Борьба с обезуглероживанием в прокатных цехах / Е. А. Кайстров // Сталь. – 1950. – № 12. – С. 1106–1108.
9. Катанка стальная канатная. Технические условия: ДСТУ 3683–98. – [Чинний від 1999-01-01]. – Київ : Держспоживстандарт України, 1999. – 34 с. – (Національний стандарт України).
10. Количественное определение общего количества окалины, способности к удалению окалины и остаточных оксидов с поверхности высокоуглеродистого и низкоуглеродистого проката: GA-03-16. – BEKAERT. MBUSC. BK-спес: GA-03-16. – 1994. – 9 с.
11. Копытов, В. Ф. Нагрев стали в печах / В. Ф. Копытов. – Москва : Металлургия, 1955. – 264 с.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

12. Кравченко, М. С. Стратегия инновационной деятельности промышленных предприятий / М. С. Кравченко, Н. В. Марченко // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 2 (62). – С. 25–35. doi: 10.15802/stp2016/67283.
13. Кубашевский, О. Окисление металлов и сплавов / О. Кубашевский, В. Гопкинс [пер. с англ.]. – Москва : Металлургия, 1965. – 428 с.
14. Ледков, В. Г. Непрерывные травильные линии / В. Г. Ледков. – Москва : Металлургиздат, 1961. – 158 с.
15. Матвеев, Б. Н. Методы повышения качества катанки / Б. Н. Матвеев // Прокатное производство. – 2001. – № 1. – С. 40–47.
16. Налча, Г. И. Комплексное исследование окалины, образующейся при горячей прокатке / Г. И. Налча // Новости черной металлургии России и зарубежных стран. – 1999. – № 2. – С. 102–112.
17. Парусов, В. В. Разработка технологических режимов охлаждения катанки на линии Stelmor, обеспечивающих требуемую удаляемость окалины механическим способом и товарный вид металлопродукции : отчет о НИР / Ин-т черной металлургии НАНУ ; рук. В. В. Парусов. – Днепропетровск, 2007. – 88 с.
18. Формирование структуры и свойств катанки для сверхвысокопрочного металлокорда / В. А. Луценко, В. А. Маточкин, Н. И. Анелькин [и др.] // Металлург. и горноруд. промышленность. – 2006. – № 6. – С. 54–57.
19. Фрик, Ю. Оптимизация технологии гидромеханического удаления окалины на стали / Ю. Фрик // Новости черной металлургии за рубежом. – 2012. – № 4 (88). – С. 59–60.
20. Функе, П. мл. Влияние условий охлаждения на стане на структуру окалины и травимость стальной катанки / П. мл. Функе, М. Хайнрихт // Черные металлы. – 1970. – № 3. – С. 12–20.
21. Integrated process for drawing wire-rod without a die plate and descaling the rod surface / Yu. F. Bakhmatov, K. G. Pashchenko, A. A., Kal'chenko [et al.] // Metallurgist. – 2014. – Vol. 58. – Iss. 3-4. – P. 316–320. doi: 10.1007/s11015-014-9908-0.
22. Manufacture of Wire Rods with Good Descaling Property / J. Tominaga, K. Wakimoto, T. Mori [et al.] // Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan. – 1982. – Vol. 22. – Iss. 8. – P. 646–656. doi: 10.2355/isijinternational1966.22.646.
23. Pfeil, L. B. J. of the Iron and Steel Institute / L. B. Pfeil. – 1931. – № 123.

Е. В. ПАРУСОВ<sup>1</sup>, О. Б. СИЧКОВ<sup>2</sup>, С. І. ГУБЕНКО<sup>3</sup>, І. М. ЧУЙКО<sup>4</sup>, Л. В. САГУРА<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>Відділ термічної обробки металу для машинобудування, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова, Національна академія наук України, пл. Ак. Стародубова, 1, Дніпро, Україна, 49050, тел. +38 (0562) 33 71 63, ел. пошта tometal@ukr.net, ORCID 0000-0002-4560-2043

<sup>2</sup>Каф. «Ливарне виробництво і матеріалознавство», Магнітогорський державний технічний університет ім. Г. І. Носова, пр. Леніна, 38, Магнітогорськ, Російська Федерація, тел. +7 (919) 348 66 84, ел. пошта absychkov@mail.ru, ORCID 0000-0002-0886-1601

<sup>3</sup>Каф. «Матеріалознавство», Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 374 83 57, ел. пошта sigubenko@gmail.com, ORCID 0000-0002-0886-1601

<sup>4</sup>Відділ термічної обробки металу для машинобудування, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова, Національна академія наук України, пл. Ак. Стародубова, 1, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 33 71 63, ел. пошта ichuuko@mail.ru, ORCID 0000-0002-4753-614X

<sup>5\*</sup>Відділ термічної обробки металу для машинобудування, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова, Національна академія наук України, пл. Ак. Стародубова, 1, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 33 71 63, ел. пошта slv\_metal@mail.ru, ORCID 0000-0002-2614-0322

## ПЕРЕВАГИ ЕКСПРЕС-МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ МАСИ ОКАЛИНИ І ЗНЕВУГЛЕЦЬОВАНОГО ШАРУ БУНТОВОГО ПРОКАТУ

**Мета.** У роботі необхідно встановити універсальні емпіричні залежності, які дозволять здійснити оперативний розрахунок маси окалини і глибини зневуглицьованого шару, ґрунтуючись на параметрах технологічного процесу виробництва бунтового прокату. **Методика.** Дослідження виконані на промислових партіях прокату із сталей марок SAE 1006 і SAE 1065. Видалення окалини визначали відповідно до методик компанії «Beaert» за специфікаціями: GA-03-16, GA-03-18, GS-03-02, GS-06-01. Глибину зневуглицьованого шару ідентифікували відповідно до ГОСТ 1763-68 (метод М). **Результати.** Аналіз експериментальних даних дозволив визначити раціональні температури виткоутворення прокату досліджуваних марок сталі, які забезпечують найкраще видалення поверхневої окалини, мінімальну її остаточну кількість, а також відповідність

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

кольору поверхні металу вимогам європейських споживачів. **Наукова новизна.** Авторами встановлений кореляційний зв'язок нормованих показників якості, бунтового прокату з високовуглецевої сталі (маса окалини, глибина знеуглецьованого шару і міжпластинкова відстань у перліті) з одним з головних параметрів (температурою виткоутворення) режиму деформаційно-термічної обробки. Отримані рівняння регресії дозволяють, без застосування металографічного аналізу, з мінімальною похибкою визначити кількісні значення маси окалини, глибини знеуглецьованого шару і середньої міжпластинчастої відстані в перліті бунтового прокату з високовуглецевої сталі. **Практична значимість.** На базі специфікацій компанії «Bekaert» (GA-03-16, GA-03-18, GS-03-02 і GS-06-01) розроблена і впроваджена в умовах ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» методика проведення випробувань по видаленню окалини механічним способом із поверхні бунтового прокату з низько- і високовуглецевої марок сталі. Розроблено експрес-метод визначення загальної та залишкової маси окалини на поверхні прокату в залежності від температури виткоутворення. Отримано патент України на винахід № 91760 «Спосіб визначення загальної та залишкової кількості окалини на поверхні катанки».

*Ключові слова:* бунтовий прокат; окалина; знеуглецьований шар; деформаційно-термічна обробка

E. V. PARUSOV<sup>1</sup>, A. B. SYCHKOV<sup>2</sup>, S. I. GUBENKO<sup>3</sup>, I. N. CHUIKO<sup>4</sup>, L. V. SAHURA<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>Dep. of metal heat treatment for mechanical engineering, Nekrasov Iron and Steel Institute of the National Academy of Sciences in Ukraine, Akademik Starodubov Sqr., 1, Dnipro, Ukraine, 49050, tel. +38 (0562) 33 71 63, e-mail tometal@ukr.net, ORCID 0000-0002-4560-2043

<sup>2</sup>Dep. «Foundry and Materials», Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov, Lenin Ave., 38, Magnitogorsk, Russian Federation, 455000, tel. +7 (919) 348 66 84, e-mail absychkov@mail.ru, ORCID 0000-0002-0886-1601

<sup>3</sup>Dep. «Material Science», National Metallurgical Academy of Ukraine, Haharin Ave., 4, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (056) 374 83 57, e-mail sigubenko@gmail.com, ORCID 0000-0002-0886-1601

<sup>4</sup>Dep. of metal heat treatment for mechanical engineering, Nekrasov Iron and Steel Institute of the National Academy of Sciences in Ukraine, Akademik Starodubov Sqr., 1, Dnipro, Ukraine, 49050, tel. +38 (0562) 33 71 63, e-mail ichuyko@mail.ru, ORCID 0000-0002-4753-614X

<sup>5\*</sup>Dep. of metal heat treatment for mechanical engineering, Nekrasov Iron and Steel Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Akademik Starodubov Sqr., 1, Dnipro, Ukraine, 49050, tel. +38 (0562) 33 71 63, e-mail slv\_metal@mail.ru, ORCID 0000-0002-2614-0322

## ADVANTAGES OF RAPID METHOD FOR DETERMINING SCALE MASS AND DECARBURIZED LAYER OF ROLLED COIL STEEL

**Purpose.** To determine the universal empirical relationships that allow for operational calculation of scale mass and decarbonized layer depth based on the parameters of the technological process for rolled coil steel production.

**Methodology.** The research is carried out on the industrial batches of the rolled steel of SAE 1006 and SAE 1065 grades. Scale removability was determined in accordance with the procedure of «Bekaert» company by the specifications: GA-03-16, GA-03-18, GS-03-02, GS-06-01. The depth of decarbonized layer was identified in accordance with GOST 1763-68 (M method). **Findings.** Analysis of experimental data allowed us to determine the rational temperature of coil formation of the investigated steel grades, which provide the best possible removal of scale from the metal surface, a minimal amount of scale, as well as compliance of the metal surface color with the requirements of European consumers. **Originality.** The authors established correlation of the standardized quality indicators of the rolled coil high carbon steel (scale mass, depth of decarbonized layer and inter-laminar distance in pearlite) with one of the main parameters (coil formation temperature) of the deformation and heat treatment mode. The resulting regression equations, without metallographic analysis, can be used to determine, with a minimum error, the quantitative values of the total scale mass, depth of decarbonized layer and the average inter-lamellar distance in pearlite of the rolled coil high carbon steel. **Practical value.** Based on the specifications of «Bekaert» company (GA-03-16, GA-03-18, GS-03-02 and GS-06-01) the method of testing descaling by mechanical means from the surface of the rolled coil steel of low- and high-carbon steel grades was developed and approved in the environment of PJSC «ArcelorMittal Kryvyi Rih». The work resulted in development of the rapid method for determination of total and remaining scale mass on the rolled coil steel surface of low- and high-carbon steel grades depending on the temperature coil formation. There was obtained the patent of Ukraine for invention no. 91760 «The method for determining the total and remaining amount of scale on the rolled steel surface».

*Keywords:* rolled coil steel; scale; decarbonized layer; deformation-thermal treatment

## REFERENCES

1. Blatner M.Ye. *Metodika issledovaniy metallov i obrabotki opytnykh dannykh* [Methods of metals research and processing of experimental data]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1952. 444 p.
2. Vakulenko I.A., Bolshakov V.I. *Morfologiya struktury i deformatsionnoye uprochneniye stali* [The morphology of the structure and work hardening of steel]. Dnepropetrovsk, Makovetskiy Publ., 2008. 196 p.
3. Vakulenko I.O. *Strukturniy analiz v materialoznavstvi* [Structural analysis in material science]. Dnipropetrovsk, Makovetskiy Publ., 2010. 124 p.
4. Parusov E.V., Parusov V.V., Lutsenko V.A. Vzaimosvyaz strukturnykh, mekhanicheskikh i tekhnologicheskikh kharakteristik katanki iz stali 80 KRD [The relationship of the structural, mechanical and technological characteristics of 80 KRD wire-rod of steel]. *Sbornik nauchnykh trudov «Stalnyye kanaty»* [Pros. «Steel ropes»], Odessa, Astroprint Publ., 2007, pp. 155–161.
5. Parusov V.V., Parusov E.V., Chuyko I.N., Sychkov A.B., Derevyanchenko I.V. Vzaimosvyaz tolshchiny i udelnoy massy okaliny na poverkhnosti vysokouglerodistoy katanki [The relationship of thickness and specific mass scale on the surface of high carbon wire rod]. *Sbornik nauchnykh trudov «Stroitelstvo, materialovedeniye, mashinostroeniye»* [Proc. «Construction, Material Science, Engineering Industry»], Dnepropetrovsk, PGASA Publ., 2004, vol. 27, no.2, pp. 26–29.
6. Kovaleva I. A., Kuchkov A. A., Vengura A. V., Hodosovskaya N. A., Guzova I. A., Ovchinnikova I. A. Issledovaniye vliyaniya okalinoobrazovaniya na sostoyaniye poverkhnosti zagotovok dlya povysheniya kachestva goryachekatanykh bezshovnykh trub [Study of the effect of scaling on the state of the surface of the workpieces to improve the quality of hot-rolled seamless pipes]. *Litye i metallurgiya – Casting and Metallurgy*, 2014, no. 3 (76), pp. 53–57.
7. Dobryak V. D., Stepanenko A. N., Ugryumov Yu. D., Gubinskiy M. V., Grinev A. F. Issledovaniye ohlazhdeniya trub pri gidrosbive okaliny [Research cooling pipes at descaling]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost – Metallurgical and Mining Industry*, 2016, no. 1, pp. 99–102.
8. Kaystrov E. A. Borba s obezuglerozhivaniyem v prokatnykh tsekhakh [Fighting with decarbonization in rolling mills]. *Stal – Steel*, 1950, no 12, pp. 1106–1108.
9. *Katanka stalnaya kanatnaya. Tehnicheskiye usloviya: DSTU 3683–98* [State Standard 3683–98. Steel cable wire rod]. Kiev, Derzhspozhivstandart Ukrayini Publ., 1999, 34 p.
10. Kolichestvennoye opredeleniye obshchego kolichestva okaliny, sposobnosti k udaleniyu okaliny i ostatoknykh oksidov s poverkhnosti vysokouglerodistogo i nizkouglerodistogo prokata [Quantitative determination of the total amount of scale, descaling ability and residual oxides from the surface of rolled high-low-carbon]: GA–03–16, BEKAERT. MBUSC. BK-spec: GA-03-16. May 1994, 9 p.
11. Kopyitov V. F. *Nagrev stali v pechah* [Heating the steel in furnaces]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1955. 264 p.
12. Kravchenko M. S., Marchenko N. V. Strategiya innovatsionnoy deyatel'nosti promyshlennykh predpriyatiy [The strategy of innovative activity of industrial enterprises]. *Nauka ta progres transportu – Science and Transport Progress*, 2016, no. 2 (62), pp. 25–35. doi: 10.15802/stp2016/67283.
13. Kubashevskiy O., Gopkins V. *Okisleniye metallov i splavov* [Oxidation of metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1965, 428 p.
14. Ledkov V. G. *Nepreryvnyye travilnyye linii* [The continuous pickling lines]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1961. 158 p.
15. Matveyev B.N. Metody povysheniya kachestva katanki [Methods to improve the quality of a wire rod]. *Prokatnoye proizvodstvo – Rolling*, 2001, no. 1, pp. 40–47.
16. Nalcha G.I. Kompleksnoye issledovaniye okaliny, obrazuyushcheyasya pri goryachey prokatke [Comprehensive study of scale produced during hot rolling]. *Novosti chernoy metallurgii Rossii i zarubezhnykh stran – News of Ferrous Metallurgy in Russia and Abroad*, 1999, no. 2, pp. 102–112.
17. Parusov V.V. Razrabotka tekhnologicheskikh rezhimov okhlazhdeniya katanki na linii Stelmor, obespechivayushchikh trebuemyu udalyaemost okaliny mekhanicheskim sposobom i tovarnyy vid metalloproduktii [Development of technological modes of rod cooling on Stelmor line, providing the required removability of scale with mechanical way and presentation of metal]. Dnepropetrovsk, 2007. 88 p.
18. Lutsenko V.A., Yevsyukov M.F., Sivak A.I., Matochkin V.A., Anelkin N.I. Formirovaniye struktury i svoystv katanki dlya sverkhvysokoprochnogo metallokorda [Formation of structure and properties of the rod for ultra-high steel cord]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost – Metallurgical and Mining Industry*, 2006, no. 6, pp. 54–57.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

19. Frik Yu. Optimizatsiya tekhnologii gidromekhanicheskogo udaleniya okaliny na stali [Optimization of hydro-mechanical descaling technology on steel]. *Novosti chernoy metallurgii za rubezhom – News of Ferrous Metallurgy in Russia and Abroad*, 2012, no. 4 (88), pp. 59–60.
20. Funke P. ml., Khaynritts M. Vliyaniye usloviy okhlazhdeniya na stane na strukturu okaliny i travimost stalnoy katanki [Effect of cooling conditions at the camp on the scale structure of the etchability of steel rod]. *Chernyye metally – Ferrous Metals*, 1970, no. 3, pp. 12–20.
21. Bakhmatov Yu.F., Pashchenko K.G., Kal'chenko A. A., Belov A. S. , Tyuteryakov N. Sh. Integrated process for drawing wire-rod without a die plate and descaling the rod surface. *Metallurgist*, 2014, vol. 58, issue 3, pp. 316–320. doi:10.1007%2Fs11015-014-9908-0
22. Tominaga J., Wakimoto K. Mori T. Manufacture of Wire Rods with Good Descaling Property. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, 1982, no. 8, vol. 22, pp. 646–656. doi: 10.2355/isijinternational1966.22.646.
23. Pfeil L. B. Journal of the Iron and Steel Institute, 1931. No. 123.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Г. В. Левченко (Украина); д.т.н., проф. И. А. Вакуленко (Украина)

Поступила в редколлегию: 24.03.2016

Принята к печати: 04.07.2016

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 656.212.6.073.22.002.5:519.876.5

С. М. ВАСИЛЬЕВ<sup>1\*</sup>, А. Д. ЖЕЛЕЗНЯКОВ<sup>2</sup>, Л. П. ЦЕЛКОВИКОВА<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Вагоны», Белорусский государственный университет транспорта, ул. Кирова, 34, Гомель, Республика Беларусь, 246653, тел. +37 (529) 634 78 58, эл. почта stepangomel@mail.ru, ORCID 0000-0003-3656-1603

<sup>2</sup>Каф. «Вагоны», Белорусский государственный университет транспорта, ул. Кирова, 34, Гомель, Республика Беларусь, 246653, тел. +37 (523) 277 71 48, ORCID 0000-0002-0117-1309

<sup>3</sup>ОНИЛ ТТОРЕПС, Белорусский государственный университет транспорта, ул. Кирова, 34, Гомель, Республика Беларусь, 246653, тел. + 37 (523) 295 39 08, эл. почта Ilin\_maksimka@list.ru, ORCID 0000-0002-1499-7257

### МОДЕЛИРОВАНИЕ СОУДАРЕНИЙ ВАГОНОВ ПРИ СУХОМ ТРЕНИИ В ОПОРАХ ГРУЗА

**Цель.** В статье необходимо исследовать: 1) перемещения длинномерного груза, перевозимого на сцепе двух железнодорожных платформ, оборудованных опорными турникетно-крепежными устройствами (ТКУ); 2) действие сил на груз со стороны ТКУ. **Методика.** Исследования выполнены методом теории колебаний механических систем с конечным числом степеней свободы. **Результаты.** Авторами получены рациональные параметры ТКУ при сухом трении в опорах, которые обеспечивают наименьшие силы, действующие на груз в результате соударения. **Научная новизна.** Ранние исследования динамики систем «вагон–груз» с подвижными ТКУ осуществлялись с недостаточной точностью. При рассмотрении подобных задач прибегали к значительному упрощению расчетных схем. Использование таких устройств позволяет делать опоры длинномерного груза на вагоны подвижно-центрируемыми. ТКУ допускают более или менее значительный сдвиг груза относительно опорных вагонов в продольном направлении. После удара обеспечивается возвращение груза в первоначальное положение. Возвращающая сила в таких устройствах образуется либо за счет упругих свойств ТКУ, либо за счёт повышения уровня центра опирающихся на них масс. Процесс возвращения происходит кинематическим путём при горизонтальном отклонении ТКУ из равновесного положения. Решение задачи определения характера и величин, действующих на грузы сил и ускорений, реализовано адекватной реальным условиям математической моделью. Учтены ограничения по зазорам в ТКУ и поглощающих аппаратах вагонов. **Практическая значимость.** Проведенное исследование позволит рассчитать параметры реальных ТКУ, что приведет к снижению повреждаемости длинномерных грузов, перевозимых на сцепе железнодорожных платформ.

**Ключевые слова:** длинномерный груз; турникетно-крепежное устройство; математическое моделирование; повреждаемость груза

#### Введение

Продольные силы, испытываемые вагоном и грузом, а, соответственно, и убытки от повреждений, достигают своих наибольших величин при соударениях. Поэтому, основная задача защиты длинномерных и крупногабаритных грузов от динамических воздействий при пере-

возке состоит в уменьшении ударных нагрузок, передаваемых грузу при соударениях вагонов в процессе сортировочной и маневровой работы. Решение задачи определения характера и величин действующих на грузы сил и ускорений, вызывает необходимость исследования сложных механических систем, включающих в себя вагоны или сцепы вагонов с грузом и взаимодействующие с ними другие единицы

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

подвижного состава (локомотивы, вагоны, группы вагонов).

*Анализ предыдущих исследований.* Теоретическими исследованиями в области крепления грузов на подвижном составе железных дорог занимались ученые и специалисты А. Д. Малов, Г. П. Ефимов, Н. Г. Гончаров, Г. П. Гриневич, Б. М. Хотин, Е. Н. Гохбом и другие [2–8]. Общей чертой всех названных работ является то, что вопросы выбора типа крепления, его конструкции и расчета на прочность при перевозке длинномерных и крупногабаритных грузов решаются исходя из существующих традиционных конструктивных схем крепления груза с использованием упоров, стоек, растяжек и обвязок. Крепление длинномерных грузов на сцепках из нескольких вагонов принципиального отличия в аспекте продольной динамики не имеет, поскольку турникетная опора на одном из опорных вагонов обеспечивает жесткое крепление груза. Прочность такого рода крепления обеспечивается при соударениях вагонов со скоростями не более 5–6 км/ч. При этом ускорения груза достигают величин 2–3 g и более.

Совершенствованию методов расчета передаваемых грузам при соударениях вагонов продольных инерционных сил посвящен ряд работ А. Д. Малова, В. А. Каблукова, И. К. Мороза, А. В. Шатунова, В. А. Калашника, Б. Г. Кеглина, Е. Ф. Стуся, Г. Б. Крайзгура, Г. В. Костина, В. А. Лазаряна, Е. П. Блохина, Л. А. Манашкина и др. [2–8].

### Цель

Обеспечение сохранности вагонов и длинномерных грузов в процессе перевозки требует совершенствования методики определения параметров ТКУ.

### Методика

Исследования выполнены методом теории колебаний механических систем с конечным числом степеней свободы, с использованием математического моделирования актуального в настоящее время способа исследования вагонных конструкций [5, 10–13].

Платформы сцепа и груза считаются абсолютно жесткими телами, а межвагонные соединения и опоры ТКУ упругими связями постоянной жесткости сухим трением. Для получе-

ния движения системы используем принцип Даламбера.

Расчетная схема соударения сцепа с неподвижной преградой (группы заторможенных вагонов) показано на рис. 1.

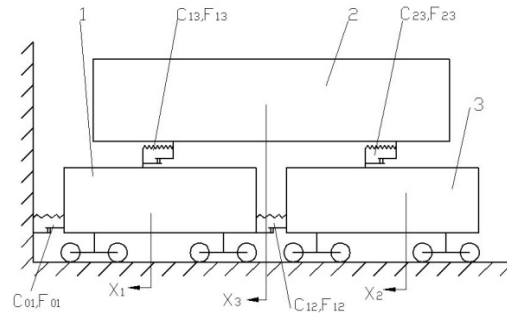


Рис. 1. Расчетная схема соударения

Fig. 1. The calculation model of impact

В начальный момент набегания сцепа на преграду платформа 1 получает жесткий удар, сила которого при любой скорости соударения  $V_0$  к началу деформации упругой связи  $C_{01}$  практически мгновенно возрастает до величины силы трения  $F_{01}$ . В результате платформа 1 как жесткое тело приобретает ускорение  $x_1$ , зависящее от степени участия в ударе каждой из масс системы. Возможны следующие варианты взаимодействия тел.

Все три массы системы жестко соединены между собой силами сухого трения в единое тело и на первом этапе движутся совместно ( $x^1 = x^2 = x^3$ ). Условия, при которых возникает такое движение, могут быть представлены в виде:

$$\frac{F_{12} + F_{13}}{m_2 + m_3} \geq \frac{F_{01}}{m_1 + m_2 + m_3} \leq \frac{F_{13} + F_{23}}{m_3}. \quad (1)$$

Рассматриваемое движение описывается уравнением:

$$(m_1 + m_2 + m_3)\ddot{x}_1 + c_{01}x_1 = -F_{01}\text{sign}\dot{x}_1. \quad (2)$$

Характер движения сохраняется, пока выполняется следующие условие  $x^1 \geq 0$ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{c_{01}x_1 + F_{01}}{m_1 + m_2 + m_3} &\leq \frac{F_{12} + F_{13}}{m_2 + m_3}, \\ \frac{c_{01}x_1 + F_{01}}{m_1 + m_2 + m_3} &\leq \frac{F_{12} + F_{23}}{m_2}, \\ \frac{c_{01}x_1 + F_{01}}{m_1 + m_2 + m_3} &\leq \frac{F_{13} + F_{23}}{m_3}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

При нарушении первого, второго или третьего неравенства (3) начинает двигаться отдельно первая, вторая или третья массы системы соответственно.

Платформы 1 и 2 жестко соединены между собой силами сухого трения в единое тело и на первом этапе движутся совместно ( $x_1 = x_2$ ), а груз 3 начинает проскальзывать относительно их. Условия возникновения такого движения в момент удара определяются неравенствами:

$$\frac{F_{12} - F_{23}}{m_2} \geq \frac{F_{01} - F_{13} - F_{23}}{m_1 + m_2} > \frac{F_{13} F_{23}}{m_3}. \quad (4)$$

Оно описывается следующими уравнениями:

$$m_3 \ddot{x}_3 + (c_{13} + c_{23})(x_3 - x_1) = -(F_{13} + F_{23}) \text{sign}(\dot{x}_3 - \dot{x}_1), \quad (5)$$

где

$$\text{sign}(\dot{x}_3 - \dot{x}_1) = +1 \text{ при } (\dot{x}_3 - \dot{x}_1) > 0,$$

$$\text{sign}(\dot{x}_3 - \dot{x}_1) = -1 \text{ при } (\dot{x}_3 - \dot{x}_1) < 0.$$

Рассматриваемый вид движения происходит до тех пор, пока соблюдаются условия  $x_1 \geq 0$ ;  $(x_3 - x_1) \geq 0$ :

$$\left. \begin{aligned} & \frac{F_{01} - F_{13} - F_{23} + c_{01}x_1 - (c_{13} + c_{23})(x_3 - x_1)}{m_1 + m_2} \leq \\ & \leq \frac{F_{12} - F_{23} - c_{23}(x_3 - x_1)}{m_2}; \\ & \frac{F_{01} - F_{13} - F_{23} + c_{01}x_1 - (c_{13} + c_{23})(x_3 - x_1)}{m_1 + m_2} > \\ & > \frac{F_{13} + F_{23} + (c_{13} + c_{23})(x_3 - x_1)}{m_3}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

При нарушении первого неравенства в полученных условиях возникает относительное перемещение платформ 1 и 2, при нарушении второго – все три массы начинают двигаться совместно.

Массы 1 и 3 жестко связаны между собой силами сухого трения в единое тело и на первом этапе движутся совместно ( $x_1 = x_3$ ), а платформа 2 начинает проскальзывать относительно

но их. Условия, при которых возникает такое движение, могут быть получены в виде:

$$\frac{F_{13} - F_{23}}{m_3} \geq \frac{F_{01} - F_{12} - F_{23}}{m_1 + m_3} > \frac{F_{12} + F_{23}}{m_2}. \quad (7)$$

Рассматриваемое движение описывается уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} & (m_1 + m_3) \ddot{x}_1 + c_{01}x_1 - (c_{12} + c_{23})(x_2 - x_1) = \\ & = -F_{01} \text{sign} \dot{x}_1 + (F_{12} + F_{23}) \text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1); \\ & m_2 \ddot{x}_2 + (c_{12} + c_{23})(x_2 - x_1) = \\ & = -(F_{12} + F_{23}) \text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Этот вид движения происходит только при соблюдении следующих условий (при  $x_1 \geq 0$ ;  $(x_2 - x_1) \geq 0$ ):

$$\left. \begin{aligned} & \frac{F_{01} - F_{12} - F_{23} + c_{01}x_1 - (c_{12} + c_{23})(x_2 - x_1)}{m_1 + m_3} \leq \\ & \leq \frac{F_{13} - F_{23} - c_{23}(x_2 - x_1)}{m_3}; \\ & \frac{F_{01} - F_{12} - F_{23} + c_{01}x_1 - (c_{12} + c_{23})(x_2 - x_1)}{m_1 + m_3} > \\ & > \frac{F_{12} + F_{23} + (c_{12} + c_{23})(x_2 - x_1)}{m_2}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

В случае нарушения первого неравенства в условиях (9) возникает относительное перемещение масс 1 и 3, при нарушении второго – все три массы начинают двигаться совместно.

Массы 2 и 3 жестко связаны между собой силами сухого трения в единое тело и на первом этапе движутся совместно ( $x_2 = x_3$ ), а платформа 1 начинает проскальзывать относительно их. Условия, при которых возникает рассматриваемое движение, можно представить в виде:

$$\left. \begin{aligned} & (m_2 + m_3) F_{23} > |m_3 F_{12} - m_2 F_{13}|; \\ & \frac{F_{01} - F_{12} - F_{23}}{m_1} > \frac{F_{12} + F_{13}}{m_2 + m_3}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Оно описывается следующими уравнениями:



## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + c_{01}x_1 - (c_{12} + c_{13})(x_3 - x_1) = \\ = -F_{01}\text{sign}\dot{x}_1 + (F_{12} + F_{13})\text{sign}(\dot{x}_3 - \dot{x}_1); \\ (m_2 + m_3)\ddot{x}_3 + (c_{12} + c_{13})(x_3 - x_1) = \\ = -(F_{12} + F_{13})\text{sign}(\dot{x}_3 - \dot{x}_1). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Характер движения сохраняется до тех пор, пока выполняются условия при  $x^1 \geq 0, (x^3 - x^1) \geq 0$ :

$$\left. \begin{aligned} m_3 [c_{12}(x_3 - x_1) + F_{12}] - \\ F_{23} \geq \frac{-m_2 [c_{13}(x_3 - x_1) + F_{13}]}{m_2 + m_3}; \\ (m_1 + m_2 + m_3)(F_{12} + F_{13}) - \\ - (m_2 + m_3)F_{01} > \\ > (m_1 + m_2 + m_3)(c_{12} + c_{13}) \times \\ \times (x_3 - x_1) - (m_2 + m_3)c_{01}x_1. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

В случае нарушения первого неравенства в условиях (12) возникает относительное перемещение масс 2 и 3, при нарушении второго – все три массы начинают двигаться совместно.

Все три массы системы имеют перемещения относительно друг друга. Такое движение возникает в случаях, когда не выполняется ни одно из условий (1), (4), (7), (10) в начале движения или нарушаются первые неравенства в условиях (6), (9), (12). Дифференциальные уравнения этого вида движения имеют вид (13). Рассматриваемый характер движения сохраняется до возникновения условий для жесткого соединения каких-либо масс силами трения.

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + c_{01}x_1 - c_{12}(x_2 - x_1) - \\ - c_{13}(x_3 - x_1) = \\ = -F_{01}\text{sign}\dot{x}_1 + F_{12}\text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + \\ + F_{13}\text{sign}(\dot{x}_3 - \dot{x}_1); \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_{12}(x_2 - x_1) - c_{23}(x_3 - x_2) = \\ = -F_{12}\text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + F_{23}\text{sign}(\dot{x}_3 - \dot{x}_2); \\ m_3 \ddot{x}_3 + c_{13}(x_3 - x_1) + c_{23}(x_3 - x_2) = \\ = -F_{13}\text{sign}(\dot{x}_3 - \dot{x}_1) - F_{23}\text{sign}(\dot{x}_3 - \dot{x}_2). \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Порядок расчетов по приведенным уравнениям может быть принят следующим:

а) по формулам (1), (4), (7), (10) определяется характер движения на его начальном этапе;

б) по выявленному характеру движения производится интегрирование соответствующих уравнений при начальных условиях:

$$t = 0, \quad x_1(0) = x_2(0) = x_3(0) = 0,$$

$$\dot{x}_1(0) = \dot{x}_2(0) = \dot{x}_3(0) = v_0.$$

Интегрирование ведется до тех пор, пока соблюдаются условия, соответствующие этому характеру движения;

в) при нарушении характера движения используется другая, соответствующая этому нарушению система уравнений и производится ее интегрирование при начальных условиях, равных значениям параметров в конечный момент предыдущего этапа. Интегрирование производится, пока не нарушатся условия, определяющие характер движения на рассматриваемом этапе;

г) работы по п. в продолжаются до прекращения роста значений  $x_1$ ;  $(x_3 - x_1)$ ;  $(x_2 - x_1)$ ;

д) проверяется соответствие максимальных величин полученных относительных перемещений  $x_1$ ;  $(x_3 - x_1)$ ;  $(x_3 - x_2)$ ;  $(x_2 - x_1)$  заданным конструктивным ограничениям (указанные перемещения не должны превышать допускаемых значений). Если это условие не выполняется, то либо рассматриваемый расчетный вариант, определяемый сочетанием параметров системы и скорости соударения, признается неприемлемым (не удовлетворяющим ограничениям), либо решается вопрос об учете собственной упругости масс сцепа;

е) в случае удовлетворения полученных относительных перемещений установленным ограничениям максимальные значения усилий, характеризующих повреждаемость груза, определяются из формул:

$$\left. \begin{aligned} N_{13m} &= \max [c_{13}(x_3 - x_1) + F_{13}]; \\ N_{23m} &= \max [c_{23}(x_3 - x_2) + F_{23}]. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

## Результаты

По изложенной методике были проведены расчеты по определению динамических воздействий на перевозимый длинномерный груз при соударении сцепа с неподвижной преградой. Для расчета было принято:  $m_1 = m_2 = 2,2 \times 10^4$  кг (что соответствует массе порожней четырехосной платформы);  $m_3 = 12,02 \times 10^4$  кг (соответст-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

вует примерно полному использованию грузо-  
подъемности двух платформ);  $c_{01}=c_{12}=8,5$  МН/м  
(соответствует жесткости двух последователь-  
но работающих поглощающих аппаратов авто-  
сцепки);  $F_{01} = F_{12} = 0,2$  МН (соответствует  
предварительной затяжке поглощаемого аппа-  
рата);  $v_0 = 2$  м/с (примерно соответствует пер-  
спективной норме скорости соударения). До-  
пускаемые значения относительных перемеще-  
ний (зазоры в связях) принимались равными:  $x_1$   
 $= (x_2 - x_1) = 0,15$  м (примерно соответствует уд-  
военному ходу поглощающего аппарата с уче-  
том зазоров и деформаций жестких тел);  
 $(x_3 - x_1) = (x_3 - x_2) = 0,5$  м.

Расчет с использованием программы интег-  
рирования дифференциальных уравнений ме-  
тодом Рунге–Кутты четвертого порядка. Рас-  
сматривались 4 комбинации коэффициентов

трения:  $\mu_{13} = \mu_{23} = 0,1$ ;  $\mu_{13} = \mu_{23} = 0,3$ ;  $\mu_{13} = \mu_{23} =$   
 $0,5$ ;  $\mu_{12} = 0,1$ ,  $\mu_{23} = 0,55$ .

Проверка выполнения условий (1), (4), (7),  
(10) показала, что движение сцепа в начальный  
момент соударения при всех сочетаниях коэф-  
фициентов трения между грузом и платфор-  
ми, кроме первого (при  $\mu_{13} = \mu_{23} = 0,1$ ), начина-  
ется с совместного движения всех трех масс.  
При первом сочетании указанных коэффициен-  
тов платформы 1 и 2 начинают двигаться со-  
вместно, а груз относительно их проскальзывает.  
Результаты расчета по определению относи-  
тельных перемещений элементов системы  
и усилий  $N_{13}$  и  $N_{23}$  с учетом ограничений по за-  
зорам в турникетно крепежных устройствах  
и поглощающих аппаратах представлены  
в табл. 1.

Таблица 1

## Результаты расчетов

Table 1

## Calculations date

Варьируемые параметры				Относительные перемещения, м			$N_{13}$ МН	$N_{23}$ МН
$c_{13}$ МН/м	$c_{23}$ МН/м	$F_{12}$ МН	$F_{23}$ МН	$x_1$	$x_3-x_1$	$x_3-x_2$		
0	0,5	0,06	0,06	–	>>0,500*	>>0,500*	–	–
		0,18	0,18	0,129	0,509*	0,509*	0,18	0,4194
		0,30	0,30	0,144	0,380	0,380	0,30	0,4634
		0,06	0,33	0,118	0,508*	0,508*	0,05	0,5615
	4	0,06	0,06	0,117	0,378	0,268	0,06	1,1320
		0,18	0,18	0,130	0,306	0,211	0,18	1,0235
		0,30	0,30	0,144	0,255	0,161	0,30	1,0446
		0,06	0,33	0,118	0,320	0,206	0,06	1,1559
	8	0,06	0,06	0,117	0,293	0,162	0,06	1,2534
		0,18	0,18	0,130	0,226	0,121	0,18	1,1487
		0,30	0,30	0,147	0,220	0,110	0,30	1,1830
		0,06	0,33	0,133	0,267	0,137	0,06	1,4287
0,5	0,5	0,06	0,06	–	>>0,500*	>>0,500*	–	–
		0,18	0,18	0,131	0,437	0,396	0,39	0,37
		0,30	0,30	0,146	0,326	0,279	0,46	0,4396
		0,06	0,33	0,120	0,431	0,382	0,27	0,5211

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Окончание табл. 1

End of table 1

Варьируемые параметры				Относительные перемещения, м			$N_{13}$ мН	$N_{23}$ мН
$c_{13}$ МН/м	$c_{23}$ МН/м	$F_{12}$ мН	$F_{23}$ мН	$x_1$	$x_3 - x_1$	$x_3 - x_2$		
4	4	0,06	0,06	$\gg 0,150^*$	—	—	—	—
		0,18	0,18	$\gg 0,150^*$	—	—	—	—
		0,30	0,30	$\gg 0,150^*$	—	—	—	—
		0,06	0,33	$\gg 0,150^*$	—	—	—	—
8	8	0,06	0,06	$\gg 0,150^*$	—	—	—	—
		0,18	0,18	$\gg 0,150^*$	—	—	—	—
		0,30	0,30	$\gg 0,150^*$	—	—	—	—
		0,06	0,33	$\gg 0,150^*$	—	—	—	—

\*Не удовлетворяет ограничениям по зазорам в поглощающих аппаратах или ТКУ.

**Научная новизна и практическая значимость**

Исследовано соударение сцепа вагонов с размещенным длинномерным грузом с учетом сухого трения в опорах. Преведенную методику следует иметь ввиду при расчете параметров ТКУ с сухим трением.

**Выводы**

Как видно из полученных данных, рациональная схема ТКУ должна обеспечивать минимальную жесткость на первой по ходу движения платформе и жесткость, подбираемую исходя из ограничений по зазорам в ТКУ и поглощающих аппаратах, на задней платформе. Такое сочетание должно сохраняться независимо от направления при ударе. Наименьшие силы удара, действующие на груз, возникают при средних значениях коэффициентов трения в ТКУ. Эти выводы могут быть уточнены путём оптимизации упругих и демпфирующих параметров с применением методов математического программирования.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Васильев, С. М. Параметры подвижных турникетно-крепёжных устройств для перевозки длинномерных грузов на железнодорожном

подвижном составе : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.08 / Васильев Степан Михайлович ; БелГУТ. – Гомель, 2011. – 128 с.

2. Исследование с помощью ЭВМ нагрузок, действующих на вагоны и амортизированные грузы при соударении сцепов и пуске в ход грузовых поездов / Л. А. Манашкин, Б. С. Ратнер, А. В. Юрченко, Н. И. Грановская // Тр. ДИИТ. – Днепропетровск, 1978. – Вып. 199/25 : Проблемы механики наземного транспорта. – С. 87–93.
3. Лазарян, В. А. Моделирование соударения сцепов из вагонов с подвижными хребтовыми балками / В. А. Лазарян, Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин // Тр. ДИИТ. – Днепропетровск, 1968. – Вып. 76. – С. 26–33.
4. Мямлин, С. В. Построение математической модели фрикционно-полимерного поглощающего аппарата / С. В. Мямлин, Н. Е. Науменко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 24. – С. 25–33.
5. Никольский, Л. Н. Амортизаторы удара подвижного состава / Л. Н. Никольский, Б. Г. Кеглин. – Москва : Машиностроение, 1986. – 144 с.
6. Размещение и крепление грузов в вагонах / А. Д. Малов, Г. П. Ефимов, О. И. Михайлов, Г. М. Штейнфер. – Москва : Транспорт, 1980. – 328 с.
7. Совершенствование способов размещения и крепления грузов в вагонах / под ред.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

- А. Д. Малова. – Москва : Транспорт, 1970. – 136 с.
8. Спиридонов, Б. К. Аналитическое определение динамических силовых характеристик катковых опор турникетно-крепежных устройств / Б. К. Спиридонов, А. Д. Железняков ; БелИИЖТ. – Гомель, 1982. – 14 с. – Деп. в ЦНИИТ МПС 1982, № 2094.
  9. Спиридонов, Б. К. Применение подвижных турникетно-крепежных устройств для перевозки длинномерных строительных конструкций железнодорожным транспортом / Б. К. Спиридонов, А. Д. Железняков, Л. П. Целковицкая ; БелИИЖТ. – Гомель, 1982. – 13 с. – Деп. в ЦНИИТ МПС 1982, № 2093.
  10. A selected review on the negative externalities of the freight transportation: Modeling and pricing / E. Demir, Y. Huang, S. Scholts, T. Van Woensel // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. – 2015. – Vol. 77. – P. 95–114. doi:10.1016/j.tre.2015.02.020.
  11. Chou, M. Modeling and model validation of heavy-haul trains equipped with electronically controlled pneumatic brake systems / M. Chou, X. Xia, C. Kayser // Control Engineering Practice. – 2007. – Vol. 15. – Iss. 4. – P. 501–509. doi:10.1016/j.conengprac.2006.09.006.
  12. Fahmy Aly, M. H. Computer applications in railway operation / M. H. Fahmy Aly, H. Hemeda, M. A. El-sayed // Alexandria Engineering J. – 2016. – Vol. 55. – Iss. 2. – P. 1573–1580. doi:10.1016/j.aej.2015.12.028.
  13. Simulation of venting and leaks from pressure vessels / R. Kaness, A. Basha, L. N. Véhot, M. Castier // J. of Loss Prevention in the Process Industries. – 2016. – Vol. 40. – P. 563–577. doi:10.1016/j.jlp.2016.02.011.

С. М. ВАСИЛЬСВ<sup>1\*</sup>, А. Д. ЖЕЛЕЗНЯКОВ<sup>2</sup>, Л. П. ЦЕЛКОВИКОВА<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Вагони», Білоруський державний університет транспорту, вул. Кірова, 34, Гомель, Республіка Білорусь, 246653, +37 (529) 634 78 58, ел. пошта stepangomel@mail.ru, ORCID 0000-0003-3656-1603

<sup>2</sup>Каф. «Вагони», Білоруський державний університет транспорту, вул. Кірова, 34, Гомель, Республіка Білорусь, 246653, +37 (523) 277 71 48, ORCID 0000-0002-0117-1309

<sup>3</sup>ГНДІ ТТОРЕПС, Білоруський державний університет транспорту, вул. Кірова, 34, Гомель, Республіка Білорусь, 246653, +37 (523) 295 39 08, ел. пошта llin\_maksimka@list.ru, ORCID0000-0002-1499-7257

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗІТКНЕНЬ ВАГОНІВ ПРИ СУХОМУ ТЕРТІ В ОПОРАХ ВАНТАЖУ

**Мета.** У статті необхідно дослідити: 1) переміщення довгомірного вантажу, що перевозиться на зчепі двох залізничних платформ, обладнаних турникетно-кріпильними пристроями (ТКП); 2) дію сил на вантаж із боку ТКП. **Методика.** Дослідження виконані методом теорії коливань механічних систем із кінцевим числом ступенів свободи. **Результати.** Авторами отримано раціональні параметри ТКП при сухому терті в опорах, які забезпечують найменші сили, що діють на вантаж у результаті зіткнення. **Наукова новизна.** Ранні дослідження динаміки систем «вагон–вантаж» із рухомими ТКП здійснювалися з недостатньою точністю. При розгляді подібних завдань вдавалися до значного спрощення розрахункових схем. Використання таких пристроїв дозволяє робити опори довгомірного вантажу на вагони рухливо-центрованими. ТКП допускають більш або менш значний зсув вантажу відносно опорних вагонів у поздовжньому напрямку. Після удару забезпечується повернення вантажу в початкове положення. Поворотна сила в таких пристроях утворюється або за рахунок пружних властивостей ТКП, або за рахунок підвищення рівня центру мас, що спираються на них. Процес повернення відбувається кінематичним шляхом при горизонтальному відхиленні ТКП з рівноважного положення. Рішення задачі визначення характеру та величин, що діють на вантажі сил і прискорень, реалізовано адекватною реальним умовам математичною моделлю. Враховано обмеження по зазорам у ТКП та поглинаючих апаратах вагонів. **Практична значимість.** Проведене дослідження дозволить розрахувати параметри реальних ТКП, що призведе до зниження пошкоджуваності довгомірних вантажів, які перевозяться на зчепі залізничних платформ.

**Ключові слова:** довгомірний вантаж; турникетно-кріпильний пристрій; математичне моделювання; пошкоджуваність вантажу

S. M. VASILYEU<sup>1\*</sup>, A. D. ZHELEZNYAKOV<sup>2</sup>, L. P. TSELKOVIKOVA<sup>3</sup><sup>1\*</sup>Dep. «Cars», Belarusian State University of Transport, Kirov St., 34, Gomel, Republic of Belarus, 246653,  
tel. +37 (529) 634 78 58, e-mail stepangomel@mail.ru, ORCID 0000-0003-3656-1603<sup>2</sup>Dep. «Cars», Belarusian State University of Transport, Kirov St., 34, Gomel, Republic of Belarus, 246653,  
tel. +37 (523) 277 71 48, ORCID 0000-0002-0117-1309<sup>3</sup>Dep. TTOREPS, Belarusian State University of Transport, Kirov St., 34, Gomel, Republic of Belarus, 246653,  
tel. +37 (523) 295 39 08, e-mail Ilin\_maksimka@list.ru, ORCID0000-0002-1499-7257

## CARS IMPACT SIMULATION AT DRY FRICTION IN CARGO SUPPORTS

**Purpose.** The study investigates: 1) long cargo movements, carried on coupling of two railway platforms equipped with turnstile-fastening devices (TFD); 2) the forces acting on the cargo by the TFD. **Methodology.** Research were carried out using oscillations theory of mechanical systems with a finite number of degrees of freedom. **Findings.** Authors obtained rational parameters of TFD at dry friction in supports, which provide the smallest forces acting on the cargo as a result of impact. **Originality.** Early studies of «car – cargo» system dynamics with moving TFD were carried out with insufficient accuracy. When considering such tasks one resorted to a significant simplification of the calculation schemes. The use of such devices allows producing supports of long cargo for cars movable-centered ones. TED allow more or less significant shift of the cargo relatively to support cars in the longitudinal direction. After impact the return of the goods in the original position is ensured. Restoring force in such devices is formed either by the elastic properties of TED, either by increasing the center level relying on them masses. The return process takes place by the kinematic way when horizontal deflection of TFD from the equilibrium position. The solution of the problem to determine the nature and magnitudes acting on the cargo forces and accelerations is implemented by mathematical model, adequate to real conditions. Gaps limitations and absorbing apparatuses of the cars in TFD are taken into account. **Practical value.** This study will allow to calculate the parameters of real TFD that will reduce the damage of long cargo transported on coupling of railway platforms.

**Keywords:** long cargo; turnstile-fastening device; mathematical modeling; damage of goods

### REFERENCES

1. Vasilyeu S.M. *Parametry podvizhnykh turniketo-krepezhnykh ustroystv dlya perevozki dlinnomernykh грузов na zheleznodorozhnom podvizhnom sostave*. Dokt. Diss. [Parameters of moving turnstile-mounting devices for long cargo carrying on railway rolling stock. Doct. Diss.]. Gomel, 2011. 168 p.
2. Manashkin L.A., Ratner B.S., Yurchenko A.V., Granovskaya N.I. Issledovaniye s pomoshchyu EVM nagruzok, deystvuyushchikh na vagony i amortizirovannyye грузы pri soudarenii stsepov i puske v khod грузовykh poyezdov [Research using DCM loads, acting on the cars and elastic cargo at collision of tractive connections and starting freight trains]. *Trudy DIIT: Problemy mekhaniki nazemnogo transporta* [Proc. of DIIT: Mechanics issues of land transport], 1978, vol. 199/25, pp. 87-93.
3. Lazaryan V.A., Blokhin Ye.P., Manashkin L.A. Modelirovaniye soudareniya stsepov iz vagonov s podvizhnymi khebtovyimi balkami [Modeling tractive connections collision of cars with backframes]. *Trudy DIIT* [Proc. of DIIT], 1968, vol. 76, pp. 26-33.
4. Myamlin S.V., Naumenko N.Ye. Postroyeniye matematicheskoy modeli friktsionno-polimernogo pogloshchayushchego apparata [The mathematical model of frictional-plastic absorbing machine]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2008, issue 24, pp. 25-33.
5. Nikolskiy L.N., Keglin B.G. *Amortizatory udara podvizhnogo sostava* [Shock damper of rolling stock]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1986. 144 p.
6. Malov A.D., Yefimov G.P., Mikhaylov O.I., Shteynfer G.M. *Razmeshcheniye i krepleniye грузов v vagonakh* [Placing and securing of cargo in cars]. Moscow, Transport Publ., 1980. 328 p.
7. Malov A.D. *Sovershenstvovaniye sposobov razmeshcheniya i krepleniya грузов v vagonakh* [Improvement of methods for cargo placement and securing in cars]. Moscow, Transport Publ., 1970. 136 p.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

8. Spiridonov B.K., Zheleznyakov A.D. *Analiticheskoye opredeleniye dinamicheskikh silovykh kharakteristik katkovykh opor turniketno-krepezhnykh ustroystv* [Analytical determination of the dynamic and power characteristics of the expansion roller in turnstile-mounting devices]. Gomel, 1982. No. 2094. 14 p.
9. Spiridonov B.K., Zheleznyakov A.D., Tselkovikova L.P. *Primeneniye podvizhnykh turniketno-krepezhnykh ustroystv dlya perevozki dlinnomernykh stroitelnykh konstruksiy zheleznodorozhnym transportom* [Application of mobile turnstile-mounting devices for carrying the long building constructions by railway transport]. Gomel, 1982. No. 2093. 13 p.
10. Demir E., Huang Y., Scholts S., Van Woensel T. A selected review on the negative externalities of the freight transportation: Modeling and pricing. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2015, vol. 77, pp. 95-114. doi:10.1016/j.tre.2015.02.020.
11. Chou M., Xia X., Kayser C. Modelling and model validation of heavy-haul trains equipped with electronically controlled pneumatic brake systems. *Control Engineering Practice*, 2007, vol. 15, issue 4, pp. 501-509. doi:10.1016/j.conengprac.2006.09.006.
12. Fahmy Aly M.H., Hemeda H., El-sayed M. A. Computer applications in railway operation. *Alexandria Engineering Journal*, 2016, vol. 55, issue 2, pp. 1573-1580. doi:10.1016/j.aej.2015.12.028/.
13. Kanen R., Basha A., Véhot L. N., Castier M. Simulation of venting and leaks from pressure vessels. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, vol. 40, pp. 563-577. doi:10.1016/j.jlp.2016.02.011.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. А. В. Пуцято (Республика Беларусь);  
д.т.н., проф. С. В. Мямлиным (Украина)

Поступила в редколлегию: 22.03.2016

Принята к печати: 20.07.2016

UDC 629.488.27:378.4(437.3)

J. KALIVODA<sup>1\*</sup>, P. BAUER<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Automobiles, Combustion Engines and Railway Vehicles», Czech Technical University, Faculty of Mechanical Engineering, Technická St., 4, Praha 6, Czech Republic, 16607, tel. +(420) 224 352 493, e-mail jan.kalivoda@fs.cvut.cz, ORCID 0000-0002-0278-2515

<sup>2\*</sup>Dep. «Automobiles, Combustion Engines and Railway Vehicles», Czech Technical University, Faculty of Mechanical Engineering, Technická St., 4, Praha 6, Czech Republic, 16607, tel. +(420) 224 352 493, e-mail petr.bauer@fs.cvut.cz, ORCID 0000-0002-0940-3303

## ROLLER RIG TESTING AT THE CZECH TECHNICAL UNIVERSITY

**Purpose.** Although the advancements in computer simulation technology have paved way to provide very reliable simulation results, track tests still play an essential role during the process of development and homologation of any railway vehicle. On the other hand, track tests depend on weather conditions, are difficult to organize and are not suitable for testing vehicles in critical situations. On a roller rig, the tested vehicle is longitudinally fixed and a track is replaced by rotating rollers. Such device offer testing of railway vehicle running dynamics in safe and stable laboratory environment. The purpose of an article is to investigate and describe roller rig testing at the Czech technical university in Prague (CTU). **Methodology.** In the paper it is shown the history of development of the scaled CTU roller rig from the earlier stages until the current projects for which the CTU roller rig is utilized for. The current design of the experimental bogie, roller rig, sensors instrumentation and types of experiments conducted at the CTU roller rig are described in more detail. **Findings.** Although the differences in vehicle behaviour on a track and a scaled model on a roller rig are not negligible, scaled roller rig experiments are found as a relatively inexpensive way for verification and demonstration of computer simulations results. They are especially useful for verification of multibody system simulations (MBS) of entirely new running gear concepts. **Originality.** The CTU roller rig is currently used for the experiments with active controlled wheelset guidance. According to simulations results published in many papers such systems offer, in principle, better performance compared to conventional passive vehicles. However, utilization and testing of active controlled wheelset guidance on vehicles is still rare. CTU roller rig serves as a tool to verify computer simulations and demonstrate benefits of active wheelset guidance. **Practical value.** Experiments conducted on the CTU roller rig confirm the possibility to significantly influence railway vehicle running dynamics by actively controlled wheelset guidance. Such concept could be regarded as a possible and likely approach for the design of future railway vehicles running gears.

**Keywords:** roller rig; active control; wheelset guidance; mechatronic bogie

### Introduction

MBS simulations play an important role in the development of rail vehicles with steadily increasing significance. Although results of today's MBS simulation are very realistic, experimental verification is still unavoidable. Track tests play an essential role in the process of new rolling stock approval. Nevertheless track tests are also very expensive, time consuming and difficult to organize. Therefore, it is almost impossible to perform them under a university environment. Moreover, the track tests are not suitable for initial experiments with completely new concepts of running gears, because in that case it is hardly possible to fulfill all safety requirements.

Roller rig testing of railway vehicles is based on replacement of a track by rotating rollers with a rail profile on their circumference. Although on

the roller rig a tested vehicle is longitudinally fixed and has no forward velocity, the creep conditions in the wheel-roller contacts are very similar to the creep conditions in wheel-rail contacts on a real track.

The key advantages of railway vehicles laboratory roller rig testing are stable climatic conditions, knowledge of the current state of the track and elimination of safety risks and legislative problems associated with the operation of prototypes in a public railway network. Moreover, in contrast with track tests, roller rigs offer also the advantages of low cost, low spatial demands, a safe and controlled laboratory environment, and ease of access to components and the testing apparatus.

The first known utilization of a roller rig for the investigation of the performance of steam locomotives was in United Kingdom in 1904 [1]. How-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ever, the most important era of roller rigs utilization came together with the development of high-speed vehicles. From the late fifties until the early eighties last century, roller rigs in Japan, UK, Canada, USA, Italy, France, Germany and Russia, later in China, were built [2]. Once the early stages of high speed vehicle development were successfully finished, the demand for roller rig vehicle testing significantly dropped. Because full-scale roller rigs are rather costly facilities, most of them are out of the operation now and advanced MBS simulations often replace their role in the vehicle development process.

Roller rigs designed for testing scaled models of railway vehicles are called scaled or model roller rigs. The main advantages of scaled roller rig compared to the full scale ones are:

- Manufacturing of the scale rig and test vehicle causes rather decreased expenses.
- Handling and maintenance are comparatively easier.
- A lot of vehicle parameters can be changed with tolerable effort.

However, there are also inconveniences and disadvantages connected with scaling and applying similarity laws [3, 4]. The design of a scaled model always depends on scaling strategy [5] and the area of investigated phenomena. It is not possible to build a scaled model exactly representing all properties of a full scale vehicle.

### Purpose

Due to the above mentioned scaling issues, model roller rigs are rarely used for the verification of behaviour of real vehicles. The use of a scaled roller rig is usually focused on:

- Verification and validation of simulation models [6].
- Investigation of fundamental railway vehicles running behaviour [9].
- Development and testing of novel bogie designs [7, 8, 10].

Although MBS simulations give reliable results, it is always necessary to identify model parameters by a comparison with the experimental data. Scaled roller rig experiments are an advantageous way for model parameters identification and consequent demonstration of simulations results.

Typically, scaled roller rigs are not used for assessing the performance of a particular vehicle, but

they play an important role in a development of entirely new concepts of running gears and suspensions and in verification of MBS simulations.

### Methodology

The history of roller rig testing at the CTU began towards the end of eighties last century, when the first single axis roller rig was built (Fig. 1).

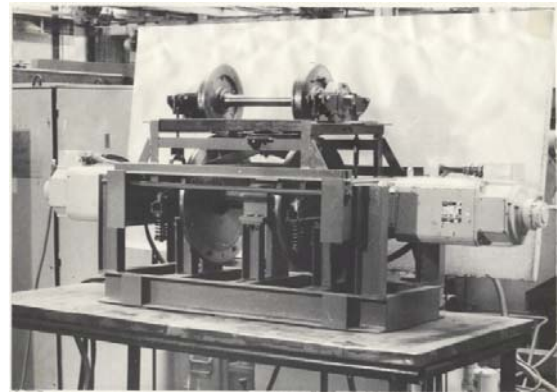


Fig. 1. The first scaled roller rig at the CTU

The scale of the first CTU roller rig was 1 to 3.5 and it remained unchanged until now. The rig was built as an initial step of full scale roller rig development. Because the project of the full scale roller rig has never been started, the first scaled roller rig became a basis for all future roller rig testing at the CTU. The rig has been improved and updated many times, where the design changes were specifically performed mainly according to the objectives of the projects in which the rig was used. The first major modification came during the first half of the 90's, when the rig was completely rebuilt to a 2-axle type configuration (Fig 2). The experimental two-axle bogie had a wheelbase of 714 mm, track gauge of 410 mm and wheels diameter 263 mm. This corresponds to a wheelbase of 2500 mm and 920 mm wheel diameter for real standard gauged vehicle [11, 12]. In the following period the rig was not intensively used.

The new era of the CTU roller rig development took place from 2005 together with the beginning of experiments focused on the behaviour of the wheelsets with independently rotating wheels (IRW) and later with the experiments with active wheelset guidance.



## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

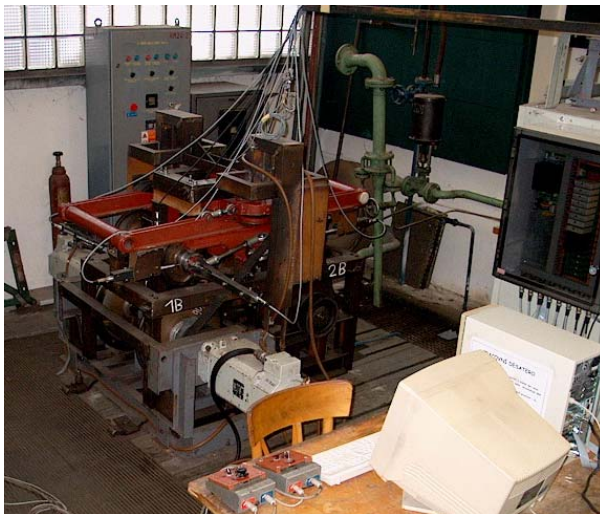


Fig. 2. CTU roller rig after redesign to 2 axle bogie stand

The main design changes were:

- Replacement of DC roller drives by 3-phase asynchronous motors.
- Possibility to simulate a curved track.
- A system for measurement of wheel roller contact forces.
- Actuated wheelset steering mechanism.
- Data acquisition system based on Matlab-Simulink software.

The state of the CTU roller rig in the 2015 after more than two decades of modifications is depicted in Fig. 3. The rig is designed to carry out experimentation with a roller revolution range up to  $700 \text{ min}^{-1}$ , corresponding to the full scale vehicle speed of  $230 \text{ kmh}^{-1}$ . The CTU roller rig is not restricted to perform experiments only for a straight track, but it is capable also to simulate negotiation of a curved track, or track consisting of arbitrary number of straight, transition and constant curvature sections.

The increasing demands on experiments carried out and also the wear of the currently used test bogie instilled motivation for the design of a new test bogie which was designed, manufactured and put into operation in 2015 [14].

Fig. 4 shows the CTU roller rig with the new experimental bogie. This bogie does not correspond to any specific bogie of a real vehicle. Its design is based upon the goals of experimental research. In order to achieve a high geometrical precision, most of the parts are made of aluminium by CNC machining. In order to eliminate dry friction and clearances, connections of mutually movable

components are realized by roller and linear roller type bearings. The wheelsets can be quickly setup to conventional or IRW type. Wheel profiles with different taper grade in range from  $1/40$  to  $1/5$  are available. The wheelsets are designed to accommodate individual wheel drives in the future.



Fig. 3. CTU roller rig in 2015



Fig. 4. The new test bogie at the CTU roller rig

The bogie has no primary suspension and the wheelsets can move only in the yaw direction towards the bogie frame. Each wheelset is independently actuated by an active controlled mechanism (Fig. 5). The actuator is a permanent magnet synchronous servomotor M408S (item 1) with rated torque  $2.5 \text{ Nm}$ . It can be controlled to the desired magnitude of yaw torque acting on the wheelset, or to a desired value of yaw angle between the wheelset and the bogie frame. The actuator torque is

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

transmitted via the toothed belt (item 2) to a steering rod (item 3) and finally by two pairs of linkages (item 5) to the wheelset.

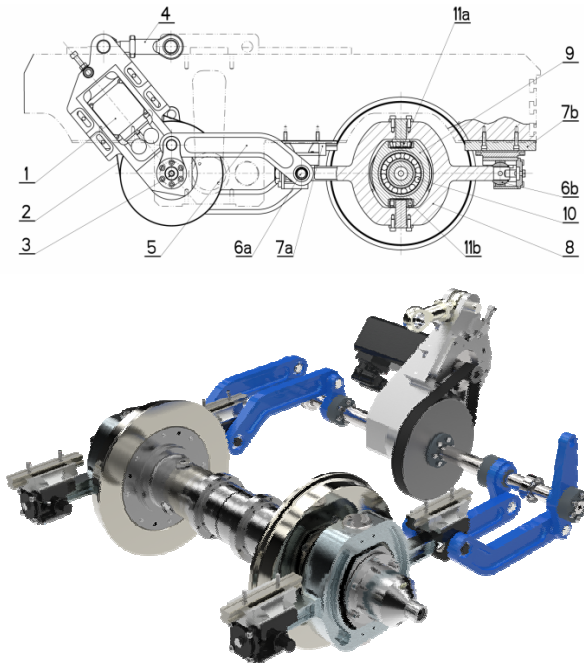


Fig. 5. Actuated wheelset steering mechanism

### Findings

The CTU roller rig is utilized both for education and research purposes. Regarding education, the CTU roller rig serves not only to demonstrate fundamentals of railway vehicles running dynamics and to teach students measurement of various physical quantities, but students are also involved in the rig development. Many of its parts and sub-systems were designed in lieu with student diploma works.

With regards to research, the CTU roller rig is utilized for projects focused on running dynamics of both conventional and IRW wheelsets and could be divided to the three main areas:

- Improvement of high speed stability.
- Improvement of curving behaviour.
- Improvement of guiding properties.

First two points relate mainly to the running gears with conventional wheelsets, whereas the third point concerns IRW. As an example two types of experiments are shown.

*Radial steering of conventional wheelsets.* To confirm roller rig capability for curved track simu-

lations and to test system for wheel roller contact forces measurement, roller rig experiments focused on radial steering of conventional wheelsets were performed [13].

The simple control law was applied by setting required yaw angle between wheelset and bogie frame proportional to the radius of negotiated curve. Experiments with varying curve radii and varying yaw angles between wheelsets and bogie frame were performed. Influence of the wheelset yaw angle to the quasistatic mean value of lateral component of the wheel rail force (Y-force) was studied. Fig. 6 shows an example of Y-force time development obtained by one test run.

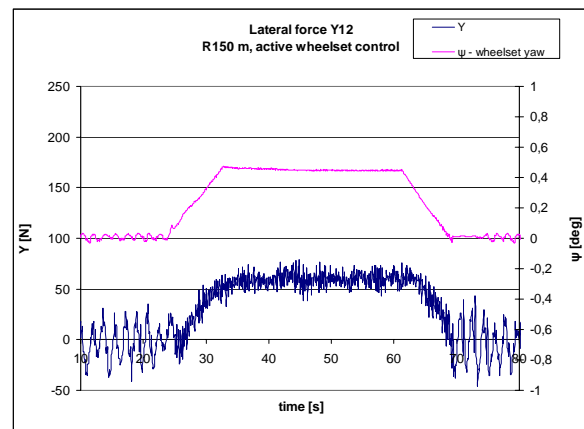


Fig. 6. Curve passing test at the roller rig – measured data  $\psi$  ... yaw angle of the wheelset towards the bogie frame Y ... lateral component of wheel roller contact force

In accordance with the CTU scaling strategy, the parameters of a virtual bogie were calculated. This virtual bogie is a full scale representation of roller rig test bogie. The MBS software Simpack was used to build a computer simulation model of the virtual full scale bogie and perform simulations of curve negotiation. The radius of the curve was 150 m and the vehicle speed was set up to 35 km/h. To obtain similar conditions as we are able to simulate on the roller rig, the lateral acceleration was fully compensated by rail superelevation and the friction coefficient set up to 0.3. Different respective wheelset steering angles were set up and the mean value of Y-force on the outer wheel of the leading axle was observed.

Fig. 7 compares Simpack simulation results with the roller rig measurements. Considering the differences in a vehicle behaviour on a roller rig

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

and on a track and scaling issues, the experimental and MBS model results show good agreement. The results confirmed possibility of curved track experiments on CTU roller rig and expected Y-forces reduction by actuated wheelset steering.

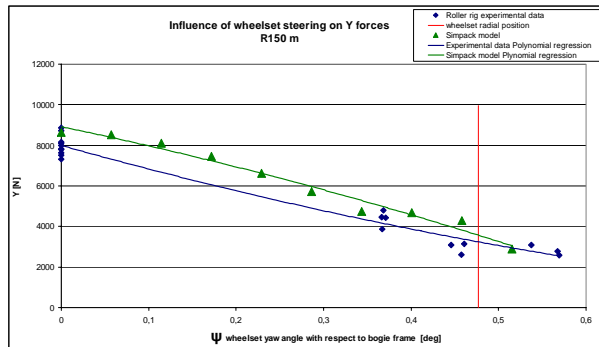


Fig. 7: Dependency of Y force mean values on yaw angle of wheelsets

*Hunting motion stabilization by active controlled wheelset guidance.* The concept of active control is based on adding sensors, a controller and actuators to the existing mechanical system. Sensors observe the system and provide the information about its current state to the controller. Based on sensors signals the controller computes driving commands for the actuators which then influence the system behaviour by applying corresponding forces or torques. It is generally agreed that by utilization of such system in a vehicle suspension superior properties over a conventional passive vehicle could be achieved.

Most of the experiments conducted at the CTU roller rig over the last several years were focused on utilization of active control in a primary suspension and wheelset guidance. Different control goals, control strategies, controller complexities and sensor instrumentations were tested. As an example the implementation of the «Active yaw damping» is shown [16].

Wheelset stabilization is commonly achieved by linking two wheelsets to the bogie frame via primary suspension. This stabilizes the wheelset but also deteriorates the curving performance. The demand of higher operating speeds usually requires stiffer primary suspension, whereas improvement in the curving performance requires primary suspension softening and vice versa. Thus a design of a railway vehicle running gear is always based on tuning suspension parameters and the inevitable compromising between curving performance and

high-speed stability. Applying the «Active yaw damping» method, high speed stability can be achieved without deterioration of curving performance by increasing a yaw stiffness of the primary suspension. This method is based on introducing controlled yaw torque acting between a wheelset and a bogie frame. The torque value is proportional to the lateral velocity of the wheelset.

The system of active yaw damping was implemented as a functional test of the new experimental bogie [15]. Lateral positions of wheelsets were directly measured by contact position transducers, the output signal of which is sent to the analogue inputs of an I/O card installed in a standard PC. Then the signals were filtered, differentiated, and further processed to obtain wheelsets lateral velocities. All the signal processing is executed in a real time using Matlab Simulink software and its real time toolbox. The controller output is in the form of two voltage signals proportional to required actuator torques. Those signals are in a sampling rate of 200 Hz sent via analogue output of the I/O card to the analogue inputs of inverters, which control wheelset steering actuators.

Fig. 8 shows measured lateral positions of both wheelsets during a roller rig test. It can be seen, that once active yaw damping control is switched on (from 15 to 66 s) both wheelsets run in the centre of a track, whereas without active control wheelsets exhibit heavy hunting.

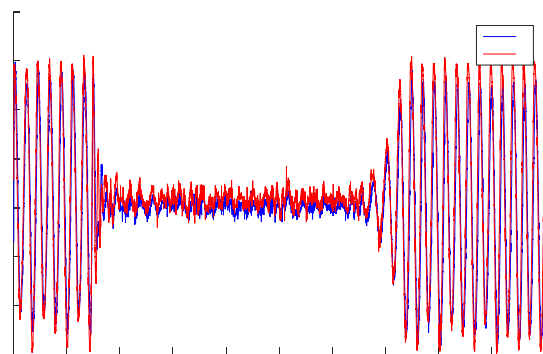


Fig. 8. Time development of wheelsets' lateral position

### Originality and practical value

Active control employed throughout today's railway vehicles are mainly utilized in partial subsystems such as, drive control, wheel slide protec-



## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

tion, heating and ventilation, etc. The direct impact of electronics and control systems on the vehicle running dynamics is on railway vehicles in regular operation limited to the vehicles with tilting body and rare usage of semi-active dampers. In contrast to this, for aircrafts or motorcars, the electronics has fundamentally higher impact on basic functional properties. Practically each of today's military or passenger aircraft are equipped with so called «fly-by-wire» technology that fully controls flight dynamics. Also motorcars are commonly equipped with advanced drive-assistance electronic systems. This technological lead can be attributed to long-term operational life of railway vehicles in comparison to motorcars or aircrafts. It can be assumed that also on railway vehicles the utilization of the electronics and control concepts will increase with time. Further, the utilization of control concepts that directly influence running dynamics and interaction between the railway vehicle and the track can be expected.

Thus, scaled roller rig experiments plays an important role in the research of active control of railway bogies conducted at the CTU.

### Conclusions

The CTU roller rig and its experimental bogie provide the possibility of laboratory tests featuring most of the applicable actuation schemes at the primary suspension and the wheelset guidance level. Besides standard displacement, acceleration, torque and force sensors, the bogie is equipped with measurement of forces between axleboxes and the bogie frame. Furthermore, Y forces measurement implemented on the rollers allows not only to study running dynamics of active controlled railway bogie, but also to test its influence to the magnitude of wheel-rail contact forces and consequent wear of the wheels and rails.

Despite the increasing accuracy and reliability of computer simulations, vehicle testing is still unavoidable part of the process of a vehicle development and homologation. Long term experience at the CTU shows that testing on a scaled roller rig is an outstanding way to verify computer simulations results without high costs. Despite of the technical and legislative issues the utilization of active controlled wheelset guidance is regarded as a promising design solution for the railway vehicles in the future. Research in this area

is certainly not finished and CTU indeed plans to progress it further, where scaled-roller rig testing will definitely play a vital role.

### LIST OF REFERENCE LINKS

1. The Application of roller rigs to railway vehicle dynamics / A. Jaschinski, H. Chollet, S. D. Iwnicki, A. H. Wickens // *Vehicle System Dynamics*. – 1999. – Vol. 31. – Iss. 5–6. – P. 345–392. doi: 10.1076/vesd.31.5.345.8360.
2. Iwnicki, S. (Ed.), *Handbook of Railway Vehicle Dynamics* / S. Iwnicki. – Chap. 14. Roller Rigs. – P. 458–477. – Chap. 15. Scale Testing. – P. 507–526. – Abingdon : Taylor and Francis, 2006. doi: 10.1201/9781420004892.
3. Jaschinski, A. On the application of similarity laws to a scaled railway bogie model / A. Jaschinski // *Dissertation, TU-Delft, 1990 and DLR-FB 90-06, Oberpfaffenhofen, 1990*. – 158 p.
4. Allen, P. D. Error quantification of a scaled railway roller rig // P. D. Allen // *Dissertation, Manchester Metropolitan University, 2001*. – 227 p.
5. Bosso, N. Comparison of different scaling techniques for the dynamics of a bogie on roller rig / N. Bosso, A. Gugliotta, A. Soma // *Vehicle System Dynamics*. – 2002. – Vol. 37. – Iss. sup1. – P. 514–530. doi: 10.1080/00423114.2002.1166-6259.
6. Gretzschel, M. Design of an Active Wheelset on a Scaled Roller Rig / M. Gretzschel, A. Jaschinski // *Vehicle System Dynamics*. – 2004. – Vol. 41. – Iss. 5. – P. 365–381. doi: 10.1080/00423110412-331300336.
7. Kurzeck, B. A novel mechatronic running gear: concept, simulation and scaled roller rig testing / B. Kurzeck, L. Valente // *Proc. of the 9th World Congress on Railway Research, (22.05–26.05.2011)*. – Lille, Frankreich, 2011.
8. Bosso, N. Simulation of narrow gauge railway vehicles and experimental validation by mean of scaled tests on roller rig / N. Bosso, A. Gugliotta, A. Somà // *Meccanica*. – 2008. – Vol. 43. – Iss. 2. – P. 211–223. doi: 10.1007/s11012-008-9128-4.
9. A study on the critical speed of worn wheel profile using a scale model / H. M. Hur, J. H. Park, W. H. You, T. W. Park // *J. of Mechanical Science and Technology*. – 2009. – Vol. 23. – Iss. 10. – P. 2790–2800. doi: 10.1007/s12206-009-0732-6.
10. A scaled roller test rig for high-speed vehicles / B. Allotta, L. Pugi, M. Malvezzi [et al.] // *Vehicle System Dynamics*. – 2010. – Vol. 48. – Iss. sup1. – P. 3–18. doi: 10.1080/0042311100366-3576.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

11. Šíba, J. Stend pro modelové zkoušky jízdních vlastností kolejových vozidel. Současné problémy v kolejových vozidlech / J. Šíba, J. Kolář. – Pardubice : Univerzita Pardubice, 1997. – P. 225–234.
12. Šíba, J. A Model of the experimental two axle bogie / J. Šíba, J. Kolář, T. Heptner. – Workshop : Prague, 1997. – P. 1511–1512.
13. Kalivoda, J. Scaled Roller Rig Experiments with a Mechatronic Bogie / J. Kalivoda, P. Bauer // Proc. of the Second Intern. Conf. on Railway Technology : Research, Development and Maintenance. Edinburgh: Civil-Comp Press, 2014, art. no. 317, ISSN 1759-3433. ISBN 978-1-905088-59-1. – 12 p.
14. Kalivoda, J. Mechatronic Bogie for Roller Rig Tests / J. Kalivoda, P. Bauer // Proc. of the 24th Symposium of the Intern. Association for Vehicle System Dynamics (IAVSD 2015) (17.08–21.08.2015). – 2015. – Graz, Austria. – CRC Press 2016. Print ISBN: 978-1-138-02885-2, eBook ISBN: 978-1-4987-7702-5.
15. Kalivoda, J. Roller Rig Tests with Active Stabilization of a Two-Axle Bogie / J. Kalivoda, P. Bauer // The Third Intern. Conf. on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, J. Pombo, (Editor), Civil-Comp Press, Stirlingshire, United Kingdom. – 2016. – 96 p. doi:10.4203/ccp.110.96.
16. Active stability control strategies for a high speed bogie / J. T. Pearson, R. M. Goodall, T. X. Mei, G. Himmelstein // Control Engineering Practice. – 2004. – Vol. 12. – Iss. 11. – P. 1381–1391. doi:10.1016/S0967-0661(03)00152-7.

Я. КАЛІВОДА<sup>1\*</sup>, П. БАУЕР<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Автомобілі, двигуни внутрішнього згоряння та залізничний транспорт», Чеський технічний університет, факультет машинобудування, вул. Технічна, 4, Прага 6, Чеська Республіка, 16607, тел. +(420) 224 352 493, ел. пошта jan.kalivoda@fs.cvut.cz, ORCID 0000-0002-0278-2515

<sup>2\*</sup>Каф. «Автомобілі, двигуни внутрішнього згоряння та залізничний транспорт», Чеський технічний університет, факультет машинобудування, вул. Технічна, 4, Прага 6, Чеська Республіка, 16607, тел. +(420) 224 352 493, ел. пошта petr.bauer@fs.cvut.cz, ORCID 0000-0002-0940-3303

## СТЕНДОВІ КАТКОВІ ВИПРОБУВАННЯ В ЧЕСЬКОМУ ТЕХНІЧНОМУ УНІВЕРСИТЕТІ

**Мета.** Хоча досягнення в області технології комп'ютерного моделювання дозволяють отримати досить надійні результати моделювання, натурні випробування досі грають істотну роль у процесі розробки і сертифікації будь-якого залізничного транспортного засобу. З іншого боку, шляхові випробування залежать від погодних умов, їх важко організувати і вони не підходять для випробування транспортних засобів у критичних ситуаціях. На катковому стенді випробувальний транспортний засіб фіксується в поздовжньому напрямку, а замість залізничної колії використовуються обертові ролики. Таке пристосування дає можливість провести динамічні випробування ходових характеристик рейкових транспортних засобів у безпечному та стабільному лабораторному середовищі. **Мета статті:** дослідити та описати стендові каткові випробування на катковому стенді в Чеському технічному університеті (ЧТУ) в Празі. **Методика.** В статті показана історія розвитку масштабованого каткового стенду ЧТУ, починаючи з ранніх етапів і до поточних проектів, в яких використовується катковий стенд ЧТУ. Докладно описані діючі конструкції експериментального візка, каткового стенду, датчиків і приладів, а також типів експериментів, що проводяться на катковому стенді ЧТУ. **Результати.** Доведено недопустимість нехтування відмінностями в поведінці транспортного засобу на залізничній колії та масштабованої моделі на катковому стенді. Масштабовані випробування на катковому стенді є відносно недорогим способом для перевірки і демонстрації результатів комп'ютерного моделювання. Вони особливо корисні для перевірки моделювання багатомодульних систем (БМС) абсолютно нових концепцій ходової частини. **Наукова новизна.** Досліджено, що в даний час катковий стенд у ЧТУ використовується для випробувань із активним контрольованим керуванням колісної пари. Згідно з результатами моделювання, опублікованими в багатьох роботах, такі системи пропонують, в принципі, більш високу продуктивність у порівнянні зі звичайними пасивними транспортними засобами. Однак використання і тестування активного контрольованого управління колісної пари на транспортних засобах і раніше рідко зустрічалося. Катковий стенд ЧТУ служить в якості інструменту для перевірки комп'ютерного моделювання та демонстрації переваг активного управління колісної пари. **Практична значимість.** Випробування, проведені на катковому стенді ЧТУ, підтверджують можливість істотно впливати на динаміку ходу залізничного транспортного засобу за допомогою активного контролю-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ваного управління колісної пари. Така концепція може розглядатися в якості можливого і ймовірного підходу при розробці ходової частини майбутніх залізничних транспортних засобів.

*Ключові слова:* катковий стенд; активний контроль; управління колісної пари; мехатронний візок

Я. КАЛИВОДА<sup>1\*</sup>, П. БАУЕР<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Автомобили, двигатели внутреннего сгорания и железнодорожный транспорт», Чешский технический университет, факультет машиностроения, ул. Техническая, 4, Прага 6, Чешская Республика, 16607, тел. + (420) 224 352 493, эл. почта jan.kalivoda@fs.cvut.cz, ORCID 0000-0002-0278-2515

<sup>2\*</sup>Каф. «Автомобили, двигатели внутреннего сгорания и железнодорожный транспорт», Чешский технический университет, факультет машиностроения, ул. Техническая, 4, Прага 6, Чешская Республика, 16607, тел. + (420) 224 352 493, эл. почта petr.bauer@fs.cvut.cz, ORCID 0000-0002-0940-3303

## СТЕНДОВЫЕ КАТКОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ В ЧЕШСКОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

**Цель.** Хотя достижения в области технологии компьютерного моделирования позволяют получить весьма надежные результаты моделирования, натурные испытания до сих пор играют существенную роль в процессе разработки и сертификации любого железнодорожного транспортного средства. С другой стороны, путевые испытания зависят от погодных условий, их трудно организовать и они не подходят для испытания транспортных средств в критических ситуациях. На катковом стенде испытываемое транспортное средство фиксируется в продольном направлении, а вместо железнодорожного пути используются вращающиеся ролики. Такое приспособление дает возможность провести динамические испытания ходовых характеристик рельсовых транспортных средств в безопасной и стабильной лабораторной среде. Цель статьи: исследовать и описать стендовые катковые испытания на катковом стенде в Чешском техническом университете (ЧТУ) в Праге. **Методика.** В статье показана история развития масштабированного каткового стенда ЧТУ, начиная с ранних этапов и до текущих проектов, в которых используется катковый стенд ЧТУ. Подробно описаны действующие конструкции экспериментальной тележки, каткового стенда, датчиков и приборов, а также типов экспериментов, проводимых на катковом стенде ЧТУ. **Результаты.** Доказана недопустимость пренебрежения различиями в поведении транспортного средства на железнодорожном пути и масштабируемой модели на катковом стенде. Масштабируемые испытания на катковом стенде являются относительно недорогим способом для проверки и демонстрации результатов компьютерного моделирования. Они особенно полезны для проверки моделирования многомодульных систем (ММС) совершенно новых концепций ходовой части. **Научная новизна.** Доказано, что в настоящее время катковый стенд ЧТУ используется для испытаний с активным контролируемым управлением колёсной пары. Согласно результатам моделирования, опубликованным во многих работах, такие системы предлагают, в принципе, более высокую производительность по сравнению с обычными пассивными транспортными средствами. Однако использование и тестирование активного контролируемого управления колёсной пары на транспортных средствах по-прежнему редко встречается. Катковый стенд ЧТУ служит в качестве инструмента для проверки компьютерного моделирования и демонстрации преимуществ активного управления колёсной пары. **Практическая значимость.** Испытания, проведенные на катковом стенде ЧТУ, подтверждают возможность существенно влиять на динамику хода железнодорожного транспортного средства с помощью активного контролируемого управления колёсной пары. Такая концепция может рассматриваться в качестве возможного и вероятного подхода при разработке ходовой части будущих железнодорожных транспортных средств.

*Ключевые слова:* катковый стенд; активный контроль; управление колёсной пары; мехатронная тележка

### REFERENCES

1. Jaschinski A., Chollet H., Iwnicki S.D., Wickens A.H. The Application of roller rigs to railway vehicle dynamics. *Vehicle System Dynamics*, 1999, vol. 31, issue 5-6, pp. 345-392. doi: 10.1076/vesd.31.5.345.8360.
2. Iwnicki S. (Ed.). Handbook of Railway Vehicle Dynamics. Chap. 14. Roller Rigs, pp. 458-477. Chap. 15. Scale Testing, pp. 507-526. Abingdon, Taylor and Francis Publ., 2006. doi: 10.1201/9781420004892.
3. Jaschinski A. On the application of similarity laws to a scaled railway bogie model. Dissertation, TU-Delft, 1990 and DLR-FB 90-06, Oberpfaffenhofen, 1990. 158 p.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

4. Allen P.D. Error quantification of a scaled railway roller rig. Dissertation, Manchester Metropolitan University, 2001. 227 p.
5. Bosso N., Gugliotta A., Soma A. Comparison of different scaling techniques for the dynamics of a bogie on roller rig. *Vehicle System Dynamics*, 2002, vol. 37, issue sup1, pp. 514-530. doi: 10.1080/00423114.2002.1166-6259.
6. Gretzschel M., Jaschinski A. Design of an Active Wheelset on a Scaled Roller Rig. *Vehicle System Dynamics*, 2004, vol. 41, issue 5, pp. 365-381. doi: 10.1080/00423110412-331300336.
7. Kurzeck B., Valente L. A novel mechatronic running gear: concept, simulation and scaled roller rig testing. Proc. of the 9th World Congress on Railway Research, (22.05–26.05.2011). Lille, Frankreich, 2011.
8. Bosso N., Gugliotta A., Somà A. Simulation of narrow gauge railway vehicles and experimental validation by mean of scaled tests on roller rig. *Meccanica*, 2008, vol. 43, issue 2, pp. 211-223. doi: 10.1007/s11012-008-9128-4.
9. Hur H.M., Park J.H., You W.H., Park T.W. A study on the critical speed of worn wheel profile using a scale model. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2009, vol. 23, issue 10, pp. 2790-2800. doi: 10.1007/s12206-009-0732-6.
10. Allotta B., Pugi L., Malvezzi M., Bartolini F., Cangioli F. A scaled roller test rig for high-speed vehicles. *Vehicle System Dynamics*, 2010, vol. 48, issue sup1, pp. 3-18. doi: 10.1080/0042311100366-3576.
11. Šíba J., Kolář J. Stend pro modelové zkoušky jízdních vlastností kolejových vozidel. Současné problémy v kolejových vozidlech. Pardubice, Univerzita Pardubice Publ., 1997. P. 225-234.
12. Šíba J., Kolář J., Heptner T. A Model of the experimental two axle bogie. Workshop, Prague, 1997. P. 1511-1512.
13. Kalivoda J., Bauer P. Scaled Roller Rig Experiments with a Mechatronic Bogie. Proc. of the Second Intern. Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance. Edinburgh: Civil-Comp Press, 2014, art. no. 317, ISSN 1759-3433. ISBN 978-1-905088-59-1. – 12 p.
14. Kalivoda J., Bauer P. Mechatronic Bogie for Roller Rig Tests. Proc. of the 24th Symposium of the Intern. Association for Vehicle System Dynamics (IAVSD 2015) (17.08–21.08.2015). 2015. Graz, Austria. CRC Press 2016. Print ISBN: 978-1-138-02885-2, eBook ISBN: 978-1-4987-7702-5.
15. Kalivoda J., Bauer P. Roller Rig Tests with Active Stabilization of a Two-Axle Bogie. The Third Intern. Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, J. Pombo, (Editor), Civil-Comp Press, Stirlingshire, United Kingdom. 2016. Paper 96. doi:10.4203/ccp.110.96.
16. Pearson J.T., Goodall R.M., Mei T.X., Himmelstein G. Active stability control strategies for a high speed bogie. *Control Engineering Practice*, 2004, vol. 12, issue 11, pp. 1381-1391. doi:10.1016/S0967-0661(03)00152-7.

*Prof. S. V. Myamlin, Sc. Tech. (Ukraine); Scientific Committee of the 14th International Conference «Problems of the railway transport mechanics. Safety of Motion, Dynamics, Strength of Rolling Stock and Energy Saving» recommended this article to be published*

Accessed: Apr. 04, 2016

Received: July 21, 2016

## UDC [629.4.027.5:543.1]-047.58

S. V. MYAMLIN<sup>1</sup>, O. A. KIRILCHUK<sup>2\*</sup>, V. S. METYZHENKO<sup>3</sup><sup>1</sup>Dep. «Car and Car Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel./fax +38 (056) 776 84 98, e-mail sergeymyamin@gmail.com, ORCID 0000-0002-7383-9304<sup>2\*</sup>Dep. «Car and Car Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel./fax +38 (056) 776 82 27, e-mail kirilchuk.o@mail.ru, ORCID 0000-0002-0565-1692<sup>3</sup>Dep. «Car and Car Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel./fax +38 (099) 709 85 34, e-mail VladR.K.I.S.M@yandex.ua, ORCID 0000-0001-5318-7559MATHEMATICAL MODEL OF WHEELSET OSCILLATIONS WITH  
INDEPENDENT WHEEL ROTATION IN THE HORIZONTAL PLANE

**Purpose.** The work is devoted to the study of horizontal oscillation and the assessment of the motion stability of a single wheelset with independent wheel rotation, and to the comparison of stability indicators of the typical wheelset and the wheelset with independent wheel rotation. This is connected with the necessity to increase traffic speed of rolling stock, improve road safety and comfort of passengers. **Methodology.** To achieve this purpose we used the methods of mathematical simulation of railway rolling stock dynamics, as well as the linear algebra methods to assess the stability of solutions of the linear homogeneous differential equations. **Findings.** To solve the set task the design model of a single wheelset with independent wheel rotation was created. The wheelset is not a single solid body; each of the wheelset axles has a surplus degree of freedom. Thus, we obtained the system with 4 degrees of freedom. The design model allowed to obtain the system of linear homogeneous differential equations describing the oscillations of the represented wheelset in a horizontal plane on a straight track section. On the basis of the computer modeling were calculated the eigenvalues of the differential equation system coefficients and the asymptotic stability analysis of the wheelset motion with independent wheel rotation. The increment and the frequency of fluctuations were compared with similar indicators for the standard wheelset. The authors also discussed non-oscillatory forms of the wheelset motion and the issues of wheelset self-centering on the track. **Originality.** The result of the work is the mathematical model of the sinuous movement of a single wheelset, in two-dimensional formulation, with independent wheel rotation and the estimate of the dynamic indices during its motion on a straight track section without any irregularities. There were also proposed the ways to ensure the self-centering on the track of the wheelset with independent wheel rotation. **Practical value.** The developed mathematical model of the single wheelset motion with independent wheel rotation can be used to create the advanced designs of railway running gear of cars.

**Keywords:** wheelset; sinuous movement; independent wheel rotation; horizontal oscillations; rolling stock; motion stability

## Introduction

During movement along the track the car components perform complex oscillations. These oscillations are caused by dynamic forces and by the track irregularities, gaps on the rail junctions, wheel bearing surface conicity, as well as the irregularities on wheel bearing surface, variability of physical properties of track and wheelset materials, spring suspension type, changes of car speed, etc. [1, 2, 4, 5]. This paper examines in detail the oscillations caused by wheel bearing surface conicity.

Analyzing the movement of the wheelset on the rail track it is not difficult to see that it moves not only progressively along the track axis, but also

makes lateral and rotational movements around its vertical axis. The conical wheel bearing surface causes the alternate lead of one wheel in relation to the other, herewith the geometric center of the wheelset axle deviates from the track central axis and at the same time the wheelset axle is rotated from the perpendicular to the track center position [6, 9, 10, 13]. So during the motion the wheelset traces out a complex wavy trajectory. This motion was first described in 1883 by Klingel [3]. In this regard, at high speed the train becomes unstable, there are lateral oscillations and the motion quality becomes unsatisfactory. There is a danger of derailment.



### Purpose

The purpose of the work is to study horizontal oscillation and to assess the motion stability of a single wheelset with independent wheel rotation, as well as to compare the stability indicators of the typical wheelset and the wheelset with independent wheel rotation.

### Methodology

To achieve this purpose we developed the design model and composed the mathematical model describing the oscillations of a single wheelset with independent wheel rotation and in a horizontal plane. After that we analyzed the asymptotic solutions stability of linear homogeneous differential equations describing the oscillations of a single wheelset with independent wheel rotation in a horizontal plane on a straight track section.

### Findings

The wheelset consists of two wheels firmly fixed on the relevant axle shafts. The axle shafts are connected with bearing units. Thus the wheelset may be represented as a single solid body, but the axle shafts can be rotated in a longitudinal plane on each other (have surplus degree of freedom). In the proposed mathematical model of the single wheelset motion, the friction in the bearing unit is ignored. To describe the motion of the wheelset with independent wheel rotation on the straight track section, we should calculate the rail-wheel interaction forces. In 1926, F. Carter found that the tangential force of contact wheel-rail interaction is proportional to the relative slip (creep) of the contacting bodies [3, 7, 8, 11]. The tangential force projections onto the longitudinal and transversal axis are, respectively:

$$\begin{aligned} X_i &= -k\varepsilon_{xi}, \\ Y_i &= -k\varepsilon_{yi}, \end{aligned} \quad (1)$$

where  $\varepsilon_{xi}$ ,  $\varepsilon_{yi}$  – relative slip towards x-axis and y-axis, respectively;  $k$  – creep coefficient (according to Carter's hypothesis we consider that the proportionality coefficients between longitudinal slip and longitudinal force and between lateral slip and lateral force are equal).

Design model of wheelset with independent wheel rotation is shown in Fig. 1.

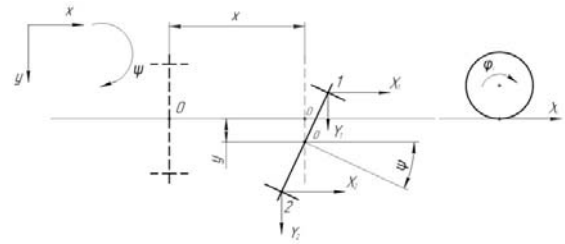


Fig. 1. Design model of wheelset with independent wheel rotation

The wheelset with independent wheel rotation moves at a speed  $V$ . According to the above design model (Fig. 1) the wheelset position is determined by the lateral swaying  $y$ , the hunting angle  $\psi$ , and the additional angle of rotation of each of wheelset axle shaft in the longitudinal plane  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ , so the angular velocity of each axle shaft is:

$$V/r + \dot{\phi}_i.$$

Thus, we consider a system with four degrees of freedom. We accept that the hunting angle of the wheelset is small enough. The relative slip  $\varepsilon_{xi}$ ,  $\varepsilon_{yi}$  can be determined by the formulas:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xi} &= \eta_{xi}/V, \\ \varepsilon_{yi} &= \eta_{yi}/V, \end{aligned}$$

where  $\eta_{xi}$ ,  $\eta_{yi}$  – slip velocity at the wheel-rail contact points;

The slip rate is determined as the difference between the rail and the wheel speeds:

$$\eta_{x1} = [V + d_1\dot{\psi} - (r - \mu y)(\frac{V}{r} + \dot{\phi}_1)]$$

$$\eta_{x2} = [V - d_1\dot{\psi} - (r + \mu y)(\frac{V}{r} + \dot{\phi}_2)]$$

$$\eta_{y1} = \dot{y} - \psi V$$

$$\eta_{y2} = \dot{y} - \psi V$$

where  $\mu$  – wheel tread grade;  $r$  – rim radius on neutral axis.

The relative slip is:

$$\varepsilon_{x1} = \frac{1}{V} [V + d_1\dot{\psi} - (r - \mu y) \times$$

$$\times (\frac{V}{r} + \dot{\phi}_1)] = \frac{d_1\dot{\psi}}{V} + \frac{\mu y}{r} - \frac{r\dot{\phi}_1}{V}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{x2} &= \frac{1}{V}[V - d_1\dot{\psi} - (r + \mu y)(\frac{V}{r} + \dot{\phi}_2)] = \\ &= -\frac{d_1\dot{\psi}}{V} - \frac{\mu y}{r} - \frac{r\dot{\phi}_2}{V} \\ \varepsilon_{y1} &= \frac{1}{V}[\dot{y} - \psi V] = \frac{\dot{y}}{V} - \psi \\ \varepsilon_{y2} &= \frac{1}{V}[\dot{y} - \psi V] = \frac{\dot{y}}{V} - \psi\end{aligned}$$

Herewith we ignore the summand  $\mu y\dot{\phi}_i$ , given that it is by several orders of magnitude smaller than the others.

Let us substitute the slip expressions into the formula 1 and we obtain the expression:

$$\begin{aligned}X_1 &= -\frac{kd_1\dot{\psi}}{V} - \frac{k\mu y}{r} + \frac{kr\dot{\phi}_1}{V} \\ X_2 &= \frac{kd_1\dot{\psi}}{V} + \frac{k\mu y}{r} + \frac{kr\dot{\phi}_2}{V} \\ Y_1 &= k\psi - \frac{k\dot{y}}{V} \\ Y_2 &= k\psi - \frac{k\dot{y}}{V}\end{aligned}$$

Then the principal moment acting on the vertical axis is:

$$\begin{aligned}M_z &= X_1d_1 - X_2d_1 = \\ &= -\frac{2kd_1^2\dot{\psi}}{V} - \frac{2kd_1\mu y}{r} + \frac{krd_1}{V}(\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2)\end{aligned}$$

The principal vector in the transversal direction is equal to:

$$Y = Y_1 + Y_2 = -2\frac{k}{V}\dot{y} + 2k\psi$$

The moment acting transversely on the axle shafts respectively:

$$\begin{aligned}M_{y1} &= -X_1r = \frac{krd_1\dot{\psi}}{V} + k\mu y - \frac{kr^2\dot{\phi}_1}{V} \\ M_{y2} &= -X_2r = -\frac{krd_1\dot{\psi}}{V} - k\mu y - \frac{kr^2\dot{\phi}_2}{V}\end{aligned}$$

The motion equations:

$$\begin{aligned}I_z^{ws}\ddot{\psi} &= M_z, \\ m^{ws}\ddot{y} &= Y, \\ I_y^{wsas}\ddot{\phi}_1 &= M_{y1}, \\ I_y^{wsas}\ddot{\phi}_2 &= M_{y2}.\end{aligned}\quad (2)$$

The resulting system of equations describes the motion of a single wheelset on a straight track section.

To assess the stability of the motion of the single wheelset with independent wheel rotation, we write the equation 2 in matrix form:

$$M\ddot{q} + F\dot{q} + Kq = 0 \quad (3)$$

where  $q$  – вектор обобщенных координат.

$$q = \begin{pmatrix} y \\ \psi \\ \phi_1 \\ \phi_2 \end{pmatrix}$$

$M$  – matrix of inertial coefficients;

$$M = \begin{pmatrix} m & & & \\ & I_z & & \\ & & I_y^{n.kn} & \\ & & & I_y^{n.kn} \end{pmatrix}$$

$F$  – matrix of damping coefficients;

$$F = \frac{k}{V} \begin{pmatrix} 2 & & & \\ & 2d_1^2 & -d_1r & d_1r \\ & -d_1r & r^2 & \\ & d_1r & & r^2 \end{pmatrix}$$

$K$  – coefficient matrix of the movements;

$$K = k \begin{pmatrix} & -2 & & \\ & \frac{2\mu d_1}{r} & & \\ & -\mu & & \\ & \mu & & \end{pmatrix}.$$

To determine the eigenvalues of the coefficient matrix the system of equations 3 can be written as:

$$\ddot{q} = -M^{-1}[F\dot{q} + Kq]$$

After some transformations we obtain:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \dot{q} \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -M^{-1}F & -M^{-1}K \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{q} \\ q \end{pmatrix}$$

Thus, calculation of the eigenvalues of the coefficient matrix for different speeds and different values of the wheel rate allows obtaining the diagrams of oscillation increment and frequency dependency on speed (Fig. 3, 4).

- 1 – Wheelset with independent wheel rotation;
- 2 – Standard wheelset.

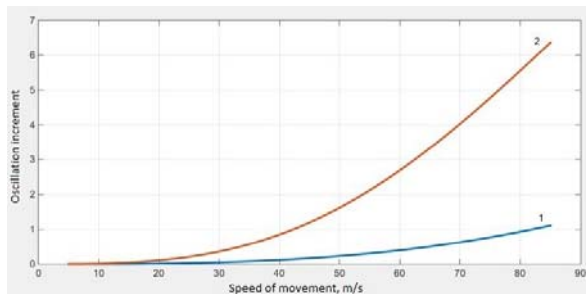


Fig.2. Dependency of oscillation increment on speed

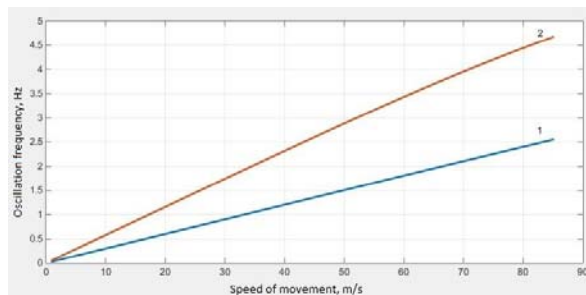


Fig. 3. Dependency of oscillation frequency on speed

The obtained results indicate that for the wheelset with independent wheel rotation the form of hunting oscillations and swaying remains. Here with the oscillation frequency at the same speed is half that of the standard wheelset. Oscillation increment is 5.5 times less than for the standard wheelset, although it remains positive over the entire range of the examined velocities. This indicates that the use of wheelsets with independent wheel rotation will increase the car movement stability at high speeds. However wheelset with independent wheel rotation is also characterized by non-oscillatory movement forms. In this regard, under certain conditions the wheelset loses its self-centering in the track that is its significant disadvantage.

One of the variants to ensure wheelset self-centering in the track is the use of resistance element to the relative rotation of the wheelset axle-shafts [12]. During the relative rotation of the wheelset axle-shafts such an element will create a moment of resistance in an effort to equal the angular velocities of the axle-shafts. This will lead to the wheelset rotation around the vertical axis in such a way that the wheelset will tend to take the central position in relation to the track axis [14, 15]. Of course, to confirm this assumption it is necessary to conduct experiments on a physical model or prototype of the wheelset as part of a bogie and a car.

### Originality and practical value

The result of the work is the mathematical model of the sinuous movement of a single wheelset with independent wheel rotation and the estimate of the dynamic indices during its motion on a straight track section without any irregularities. The developed mathematical model of the motion of the single wheelset with independent wheel rotation can be used to create the advanced designs of railroad car undercarriage at the stage of selection of running gear parameters using mathematical modeling.

### Conclusions

As a result of comparison of the increment and the oscillation frequency of a single wheelset, standard and with independent wheel rotation, it was found that the use of wheelsets with independent wheel rotation allows achieving higher dynamic qualities of movement. However, this requires experimental verification on the stand or dynamic tests on the line.

### LIST OF REFERENCE LINKS

1. Вериго, М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава / М. Ф. Вериго, А. Я. Коган. – Москва : Транспорт, 1986. – 560 с.
2. Дьомін, Ю. В. Основи динаміки вагонів : навч. посібник / Ю. В. Дьомін, Г. Ю. Черняк. – Київ : КУЕТТ, 2003. – 270 с.
3. Компьютерное моделирование ходовой динамики и износа колес грузового локомотива с радиальной установкой колесных пар / Г. С. Михальченко, В. Н. Языков, В. С. Коссов,

- А. В. Спиров // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2004. – Вип. 5. – С. 139–142.
4. Лазарян, В. А. Динамика вагонов / В. А. Лазарян. – Москва : Транспорт, 1964. – 256 с.
5. Лазарян, В. А. Динамика транспортных средств / В. А. Лазарян. – Киев : Наук. думка, 1985. – 528 с.
6. Математическое моделирование колебаний рельсовых транспортных средств / В. Ф. Ушкалов, Л. М. Резников, В. С. Иккол [и др.]. – Киев : Наук. думка, 1989. – 240 с.
7. Математическое описание силового взаимодействия колес и рельсов / Л. Н. Дегтярева, Ю. И. Осенин, С. В. Мямлин // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. 28. – С. 21–24.
8. Михайлов, Е. В. Анализ путей снижения износа в системе «ребень колеса-рельс» / Е. В. Михайлов, С. А. Семенов // Вісн. СНУ ім. В. Даля. – 2012. – Ч. 1, № 5 (176). – С. 71–76.
9. Мусаев, Ж. С. Сравнительный анализ продольной динамики железнодорожных экипажей при переходных режимах / Ж. С. Мусаев, В. Г. Солоненко, Т. М. Дюсенгалиева // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Изв. высш. учебн. заведений. Машиностроение. – 2013. – № 1. – С. 33–37.
10. Основные динамические показатели пассажирского вагона / Ю. М. Федюшин, А. Н. Пшинько, С. В. Мямлин [и др.] // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2005. – Вип. 7. – С. 91–94.
11. Malavasi, G. Contact Forces and Running Stability of Railway Vehicles / G. Malavasi // Intern. J. of Railway Technology. – 2014. – Vol. 3. – Iss. 1. – P. 121–132. doi: 10.4203/ijrt.3.1.6.
12. Manashkin, L. A. To the question of modeling of wheels and rails wear processes / L. A. Manashkin, S. V. Myamlin // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 3 (45). – С. 119–124. doi: 10.15802/stp2013/14791.
13. Myamlin, S. V. Investigation of dynamic characteristics of gondola cars on perspective bogies / S. V. Myamlin, V. M. Bubnov, Ye. O. Pysmennyi // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 5 (53). – С. 126–137. doi: 10.15802/stp2014-/30789.
14. Rozenblat, G. M. On the stability of motion of a railway wheel pair / G. M. Rozenblat // Doklady Physics. – 2012. – Vol. 57. – Iss. 2. – P. 87–91. doi: 10.1134/S1028335812020085.
15. Vil'ke, V. G. Stability of the Rectilinear Motion of a Railway Wheelset / V. G. Vil'ke, B. A. Maksimov, S. A. Popov // Moscow University Mechanics Bulletin. – 2010. – Vol. 65. – Iss. 2. – P. 31–37. doi: 10.3103/S0027133010020020.

С. В. МЯМЛІН<sup>1</sup>, О. А. КИРИЛЬЧУК<sup>2\*</sup>, В. С. МЕТИЖЕНКО<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 776 84 98, ел. пошта sergey.myamlin@gmail.com, ORCID 0000-0002-7383-9304

<sup>2\*</sup>Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 776 82 27, ел. пошта kirilchuk.o@mail.ru, ORCID 0000-0002-0565-1692

<sup>3</sup>Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (099) 709 85 34, ел. пошта VladR.K.I.S.M@yandex.ua, ORCID 0000-0001-5318-7559

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КОЛИВАНЬ КОЛІСНОЇ ПАРИ З НЕЗАЛЕЖНИМ ОБЕРТАННЯМ КОЛІС В ГОРИЗОНТАЛЬНІЙ ПЛОЩИНІ

**Мета.** Робота присвячена дослідженню горизонтальних коливань та оцінці стійкості руху одиночної колісної пари з незалежним обертанням коліс, а також порівнянню показників стійкості типової колісної пари і колісної пари з незалежним обертанням коліс. Це пов'язано з необхідністю підвищення швидкостей руху рухомого складу, підвищення показників безпеки руху, а також покращенням комфорту перевезення пасажирів. **Методика.** Для досягнення поставленої мети використані методи математичного моделювання динаміки залізничного рухомого складу, а також методи лінійної алгебри – для оцінки стійкості розв'язку системи лінійних однорідних диференціальних рівнянь. **Результати.** Для вирішення поставленої задачі була по-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

будована розрахункова схема одиночної колісної пари з незалежним обертанням коліс. Колісна пара представлена єдиним твердим тілом, проте кожна з півосей колісної пари має додаткові ступені свободи. Таким чином, отримали систему з 4 ступенями свободи. На основі розрахункової схеми була отримана система лінійних однорідних диференціальних рівнянь, що описує коливання представленої колісної пари в горизонтальній площині на прямій ділянці шляху. З використання ЕОМ були обчислені власні числа матриці коефіцієнтів системи диференціальних рівнянь і виконаний аналіз асимптотичної стійкості руху колісної пари з незалежним обертанням коліс. Інкремент і частоту коливань порівнювали з аналогічними показниками для типової колісної пари. Також розглянуті неколивальні форми руху колісної пари і питання самостійного центрування колісної пари в колії. **Наукова новизна.** Розроблена математична модель звивистого руху одиночної колісної пари в плоскій постановці задачі з незалежним обертанням коліс і виконана оцінка динамічних характеристик при русі її по прямій ділянці шляху без нерівностей. Також розглянуті способи забезпечення самостійного центрування в колії колісної пари з незалежним обертанням коліс. **Практична значимість.** Розроблена авторами математична модель руху одиночної колісної пари з незалежним обертанням коліс може бути використана при створенні перспективних конструкцій ходових частин вагонів.

*Ключові слова:* колісна пара; звивистий рух; залежне обертання коліс; горизонтальні коливання; рухомий склад; стійкість руху

С. В. МЯМЛИН<sup>1</sup>, О. А. КИРИЛЬЧУК<sup>2\*</sup>, В. С. МЕТЫЖЕНКО<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 776 84 98, эл. почта sergeyuyamlin@gmail.com, ORCID 0000-0002-7383-9304

<sup>2\*</sup>Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 776 82 27, эл. почта kirilchuk.o@mail.ru, ORCID 0000-0002-0565-1692

<sup>3</sup>Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (099) 709 85 34, эл. почта VladR.K.I.S.M@yandex.ua, ORCID 0000-0001-5318-7559

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОЛЕБАНИЙ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ С НЕЗАВИСИМЫМ ВРАЩЕНИЕМ КОЛЕС В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

**Цель.** Работа посвящена исследованию горизонтальных колебаний и оценке устойчивости движения одиночной колесной пары с независимым вращением колес, а также сравнению показателей устойчивости типовой колесной пары и колесной пары с независимым вращением колес. Это связано с необходимостью повышения скоростей движения подвижного состава, увеличением показателей безопасности движения, а также улучшением комфорта перевозки пассажиров. **Методика.** Для достижения поставленной цели использованы методы математического моделирования динамики железнодорожного подвижного состава, а также методы линейной алгебры – для оценки устойчивости решения системы линейных однородных дифференциальных уравнений. **Результаты.** Для решения поставленной задачи была построена расчетная схема одиночной колесной пары с независимым вращением колес. Колесная пара представлена единым твердым телом, каждая из полуосей колесной пары имеет дополнительные степени свободы. Таким образом, получили систему с 4 степенями свободы. На основе расчетной схемы была получена система линейных однородных дифференциальных уравнений, описывающая колебания представленной колесной пары в горизонтальной плоскости на прямом участке пути. С использованием ЭВМ вычислены собственные числа матрицы коэффициентов системы дифференциальных уравнений и выполнен анализ асимптотической устойчивости движения колесной пары с независимым вращением колес. Инкремент и частоту колебаний сравнивали с аналогичными показателями для типовой колесной пары. Также рассмотрены неколебательные формы движения колесной пары и вопросы самостоятельного центрирования колесной пары в колее. **Научная новизна.** По результатам работы разработана математическая модель извилистого движения одиночной колесной пары в плоской постановке задачи с независимым вращением колес и выполнена оценка динамических показателей при ее движении по прямому участку пути без неровностей. Также рассмотрены способы обеспечения самостоятельного центрирования в колее колесной пары с независимым вращением

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

колес. **Практическая значимость.** Разработанная авторами математическая модель движения одиночной колесной пары с независимым вращением колес может быть использована при создании перспективных конструкций ходовых частей вагонов.

**Ключевые слова:** колесная пара; извилистое движение; зависимое вращение колес; горизонтальные колебания; подвижной состав; устойчивость движения

## REFERENCES

1. Verigo M.F., Kogan A.Ya. *Vzaimodeystviye puti i podvizhnogo sostava* [Interaction of track and rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1986. 560 p.
2. Domin Yu.V., Cherniak H.Yu. *Osnovy dynamiky vahoniv* [Fundamentals of car dynamics]. Kyiv, KUETT Publ., 2003. 270 p.
3. Mikhailchenko G.S., Yazykov V.N., Kossov V.S., Spirov A.V. Kompyuternoye modelirovaniye khodovoy dinamiki i iznosa koles gruzovogo lokomotiva s radialnoy ustanovkoy kolesnykh par [Computer simulation of the dynamics and wear of the freight locomotive wheels with radial layout of wheel sets]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2004, issue 5, pp. 139-142.
4. Lazaryan V.A. *Dinamika vagonov* [Car dynamics]. Moscow, Transport Publ., 1964. 256 p.
5. Lazaryan V.A. *Dinamika transportnykh sredstv* [Dynamics of vehicles]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1985. 528 p.
6. Ushkalov V.F., Reznikov L.M., Ikkol V.S. *Matematicheskoye modelirovaniye kolebaniy relsovykh transportnykh sredstv* [Mathematical modeling of rail vehicles oscillations]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1989. 240 p.
7. Degtyareva L.N., Osenin Yu.I., Myamlin S.V. Matematicheskoye opisaniye silovogo vzaimodeystviya koles i relsov [Mathematical description of the force interaction of wheels and rails]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 28, pp. 21-24.
8. Mikhaylov Ye.V., Semenov S.A. Analiz putey snizheniya iznosa v sisteme «greben koleasa-rels» [Analysis of ways to reduce the wear in the system, «wheel flange-rail»]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni V. Dalia* [Volodymyr Dahl East Ukrainian National University], 2012, part 1, no. 5 (176), pp. 71-76.
9. Musayev Zh.S., Solonenko V.G., Dyusengalieva T.M. Sravnitelnyy analiz prodolnoy dinamiki zheleznodorozhnykh ekipazhey pri perekhodnykh rezhimakh [Comparative analysis of longitudinal dynamics of railway vehicles during transient conditions]. *Vestnik MGTU imeni N. E. Baumana. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye – Bulletin of Bauman Moscow State Technical University*, 2013, no. 1, pp. 33-37.
10. Fedyushin Yu.M., Pshinko A.N., Myamlin S.V., Donchenko A.V., Loboyko L.M. Osnovnyye dinamicheskiye pokazateli passazhirskogo vagona [The basic dynamic performance of passenger car]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2005, issue 7, pp. 91-94.
11. Malavasi G. Contact Forces and Running Stability of Railway Vehicles. *International Journal of Railway Technology*, 2014, vol. 3, issue 1, pp. 121-132. doi: 10.4203/ijrt.3.1.6.
12. Manashkin L.A., Myamlin S.V. To the question of modeling of wheels and rails wear processes. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2013, no. 3 (45), pp. 119-124. doi: 10.15802/stp2013/14791.
13. Myamlin S.V., Bubnov V.M., Pysmennyi Ye.O. Investigation of dynamic characteristics of gondola cars on perspective bogies. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2014, no. 5 (53), pp. 126-137. doi: 10.15802/stp2014/30789.
14. Rozenblat G.M. On the stability of motion of a railway wheel pair. *Doklady Physics*, 2012, vol. 57, issue 2, pp. 87-91. doi: 10.1134/S1028335812020085.
15. Vil'ke V.G., Maksimov B.A., Popov S.A. Stability of the Rectilinear Motion of a Railway Wheelset. *Moscow University Mechanics Bulletin*, 2010, vol. 65, issue 2, pp. 31-37. doi: 10.3103/S0027133010020020.

*Prof. V. L. Horobets., D. Sc. (Tech.) (Ukraine) recommended this article to be published*

Accessed: 17 May, 2016

Received: 01 Aug., 2016

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 624.014"401.4":620.193

А. Н. ГИБАЛЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Строительство, техническая эксплуатация и реконструкция», Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500, тел. +38 (050) 473 14 52, эл. почта alexgib@yandex.ru, ORCID 0000-0003-2979-5225

### СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ КОРРОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ ПРИ РАЦИОНАЛЬНОМ КОНСТРУИРОВАНИИ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

**Цель.** Научная статья посвящена разработке принципов робастного (устойчивого) проектирования при обосновании конструктивных решений первичной и вторичной защиты металлоконструкций на основе управления уровнем коррозионной опасности строительных объектов, конструктивной приспособленности, технологической рациональности при эксплуатации в условиях воздействия коррозионно-агрессивных сред. **Методика.** Авторами были использованы и развиты расчетные методы оценки надежности и конструктивной безопасности. В основе методов – построение информационно-аналитической базы данных определяющих параметров коррозионного состояния строительных металлоконструкций для совершенствования и контроля мер первичной и вторичной защиты от коррозии. **Результаты.** Предложена основа для постановки и реализации задач управления эксплуатационным сроком службы зданий и сооружений в коррозионных средах. Она достигается путем повышения качества и надежности мер первичной и вторичной защиты металлоконструкций с учетом уровня коррозионной опасности по управлению технологической безопасностью в течение установленного срока службы строительных объектов. **Научная новизна.** Разработаны принципы робастного проектирования противокоррозионной защиты с учетом установленной надежности и конструктивной безопасности комбинированных металлоконструкций в условиях коррозионно-активных сред на основе методики предельных состояний конструкций (с учетом уровня коррозионной опасности). Использован расчетно-измерительный метод подтверждения соответствия мер коррозионной защищенности для резервирования работоспособности и задания сроков службы комбинированных металлоконструкций и их защитных покрытий. **Практическая значимость.** Разработана методика обоснования проектных решений и подтверждения их соответствия по признакам коррозионной опасности строительных объектов. Реализованы технические решения, обеспечивающие снижение уровня рисков аварийных ситуаций.

**Ключевые слова:** металлические конструкции; живучесть; процессный подход; обеспечение надежности; робастное проектирование; уровень коррозионной опасности

#### Введение

В настоящее время в строительной отрасли наблюдается определенный рост применения комбинированных конструкций, в которых ограждающие элементы выполнены из конструкционных пластиков и пластмасс, с успехом заменившие материалы из полиметилметакрилата

и полистирола [1, 2]. Как показывает практика, использование сотового поликарбоната, поливинилхлоридных профилей, металлопластов в практике дизайна, проектирования, изготовления и эксплуатации конструкций создает предпосылки внедрения выразительных архитектурных решений с учетом функционального

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

назначения сооружений при одновременном снижении металлоемкости, повышении надежности и долговечности, увеличении ресурса при эксплуатации в условиях неблагоприятных воздействий внешних сред за счет снижения уровня коррозионной опасности [2, 3, 4, 5, 10, 14].

Анализ состояния проблемы обеспечения качества и надежности мер первичной и вторичной защиты металлоконструкций свидетельствует о возможности продления ресурса конструкций за счет комбинированного использования элементов из стали и полимеров, что обуславливается повышенной коррозионной стойкостью соответствующих материалов с одновременным рациональным конструированием, разработкой и использованием выразительных архитектурных форм и объемно-планировочных решений [6, 7, 21].

Изучение коррозионной стойкости материалов и элементов структурных блоков, защитного противокоррозионного покрытия с учетом наиболее неблагоприятного сочетания воздействий рассмотрены в работах [6, 8], где выполнен расчет срока службы конструкций по результатам контроля коррозионного состояния в период обследования и на основании экспериментальных данных моделирования физико-химических воздействий среды эксплуатации.

### Цель

Исследования направлены на обеспечение качества и надежности мер первичной и вторичной защиты металлоконструкций, совершенствование конструктивных решений, расширение области применения стальных перекрестно-стреловых систем из трубчатых элементов на основании расчетно-экспериментальной оценке показателей коррозионной стойкости и долговечности [7, 8].

### Методика

Определение проектных показателей долговечности комбинированных конструкций основано на разработанной методике учета коэффициентов надежности и готовности противокоррозионной защиты установленных по результатам экспериментальных исследований определяющих показателей коррозионной стойкости первичной и вторичной защиты при определенных (ускоренных или стендовых) испыта-

ниях фрагментов-образцов с защитными покрытиями согласно классификационным признакам коррозионных сред [9, 10, 11].

Целью выполняемых определительных испытаний является определение коэффициента готовности металлоконструкций и их защитных покрытий. Коэффициент готовности стальных конструкций ( $K_g$ ) является комплексным показателем ремонтпригодности, характеризующим параметры конструктивных и технологических мер первичной и вторичной защиты:

$$K_g = \frac{T_{k\gamma} T_{z\gamma}}{T_{k\gamma} + n T_{z\gamma}},$$

где  $T_{k\gamma}$  – срок службы (лет) стальных комбинированных конструкций по показателю коррозионной стойкости (первичная защита);  $T_{z\gamma}$  – расчетный срок службы (лет) защитных покрытий с доверительной вероятностью  $\gamma = 0,95$  по результатам ускоренных испытаний;  $n$  – количество ремонтных циклов восстановления противокоррозионной защиты при установленном сроке службы объекта.

Основной материал и результаты. С целью решения задачи оценки коэффициента готовности металлоконструкций и их защитных покрытий на основе определительных (ускоренных, стендовых и натурных) испытаний выполнены исследования [12, 13, 16]. Изучение режима эксплуатации и факторов, определяющих защитные свойства противокоррозионных покрытий в агрессивных средах, позволило установить основные причины, нарушающие работоспособность покрытий конструкций:

- процессы сорбции и переноса агрессивной среды и продуктов коррозии через покрытие;
- растрескивание покрытия под действием механических напряжений и агрессивной среды;
- химическая деструкция материала покрытия в агрессивных средах;
- процессы адсорбции и смачивания на границе металл-покрытие, нарушающие адгезию покрытия к металлу;
- процессы коррозии металла под покрытием.

Учитывая закономерности разрушения покрытий в агрессивных средах, срок службы за-



## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

щитных покрытий для установленных критериев отказа выражается следующими зависимостями:

- для первичной системы защиты ( $T_3$ )

$$T_3 = t_n + t_3 + t_{om} \triangleright, \quad (2)$$

- при восстановлении защитных свойств покрытий ( $T_n$ )

$$T_n = t_n + t_3,$$

где  $t_n$  – время проникновения агрессивной среды до поверхности металла, год;  $t_3$  – время от момента проникновения агрессивной среды к поверхности до начала коррозии, лет.

Срок службы противокоррозионной защиты при ремонтно-восстановительных работах определяется как промежуток времени, необходимый для достижения отказа восстановленной системы защиты:

$$T_n = b \cdot T_3,$$

где  $b$  – коэффициент изменения срока службы восстановленного покрытия при ремонте.

Диагностика коррозионного состояния металлизационных покрытий и определение срока службы выполняется с помощью зависимости:

$$T_m = \frac{a_m \cdot h_0 \cdot t_m}{K} 10^{-3},$$

где  $a_m$  – степень разрушения существующего металлического покрытия;  $h_0$  – проектная тол-

щина покрытия, мкм;  $t_m$  – средняя относительная долговечность 1 мм металлизационного покрытия, г/м<sup>2</sup>•мм.

Расчетно-экспериментальная оценка показателей долговечности защитных покрытий выполнена на основе моделирования физико-химических воздействий в процессе ускоренных испытаний образцов из замкнутых трубчатых профилей с защитными покрытиями, предназначенными для долговременной защиты от коррозии (рис. 1).

Выбор систем защитных покрытий включал анализ показателей технологической рациональности противокоррозионной защиты  $B_{oz}$  при изготовлении сборно-разборных трубчатых конструкций.

Рассмотрены объемно-планировочные решения конструкций покрытий пространственно-стержневой системы (ПСС) с разреженной схемой расположения трехгранных, плоских ферм и доборных элементов на примере конструктивного решения системы «Кристалл» многоцелевого назначения (рис. 2).

Сравнительная оценка защитных свойств и обоснование коэффициентов надежности  $\gamma_{zn}$  произведены для покрытий, образованных при электрохимическом цинковании, диффузионном нанесении в расплаве цинка, цинкополимерных и комбинированных покрытий.

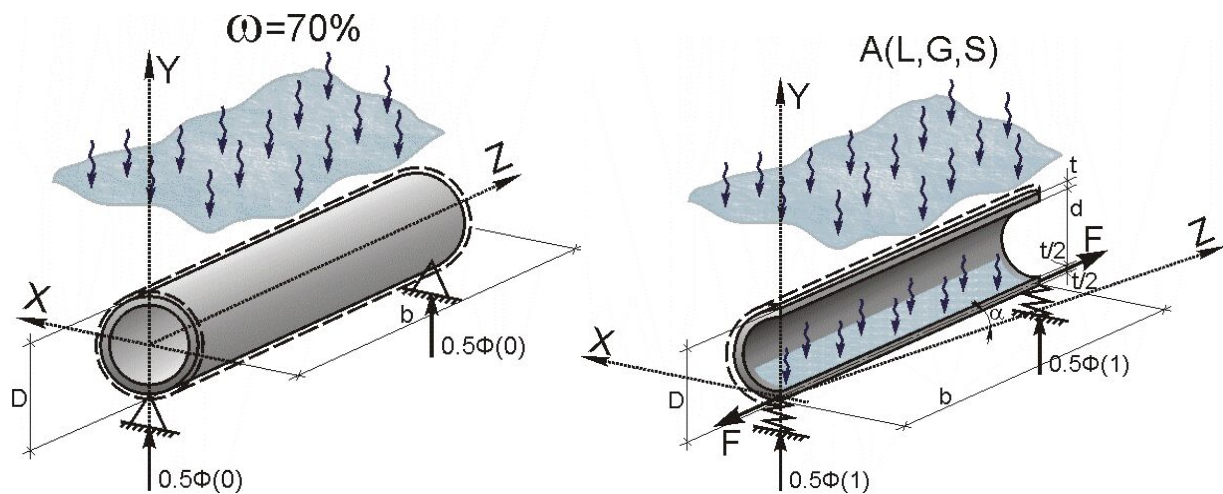


Рис. 1. Обобщенные модели коррозионных воздействий

Fig. 1. Generalized model of corrosion effects

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

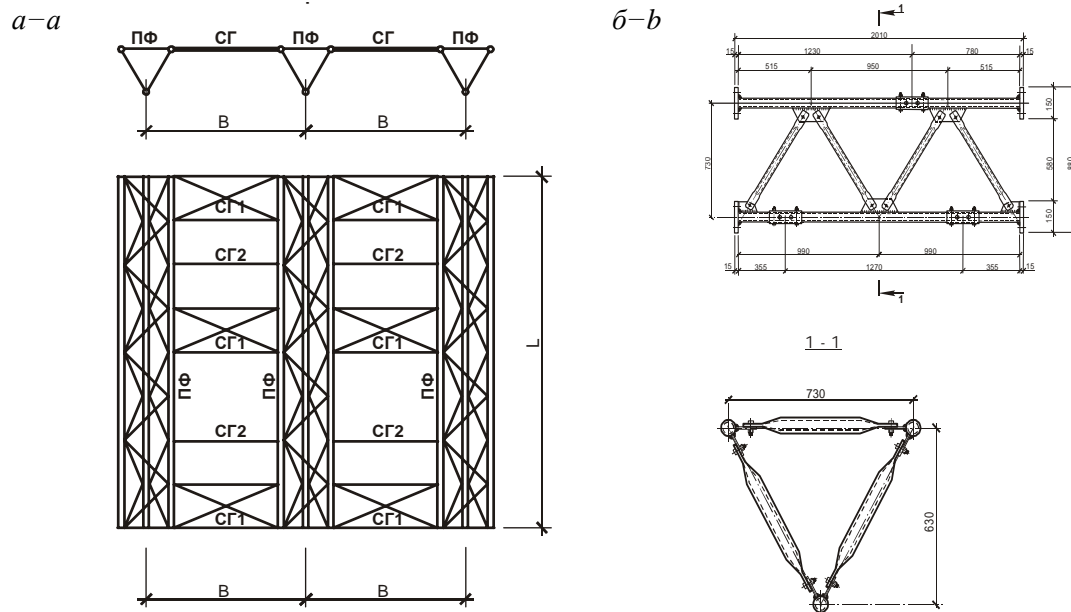


Рис. 2. Конструктивное решение системы «Кристалл»: *a* – компоновочные решения конструкций покрытий перекрестно-стержневых систем; *b* – блок трехгранной секции формообразующего элемента

Fig. 2. The design of the system «Crystal»:

*a* – layout designs of coatings cross-rod systems; *b* – block triangular sections forming element

## Результаты

Результаты испытаний систем противокоррозионных покрытий, обеспечивающих долговременную защиту конструктивных элементов сборно-разборных трубчатых конструкций, представлены в табл. 1. Реализация алгоритма

определения показателей гарантированной долговечности с учетом коэффициентов надежности первичной  $\gamma_{zk}$  и вторичной  $\gamma_{zn}$  защиты связана с расчетно-экспериментальным обоснованием отношения резерва надежности для систем пространственных трубчатых конструкций.

Таблица 1

## Результаты испытаний систем противокоррозионных покрытий

Table 1

## Test results of anticorrosive coating systems

№ п/п	Схема конструктивного элемента (образца)	Группа средств и методов защиты	Показатель $B_{oz}$	Срок службы покрытия $T$ , лет	Контрольный норматив $K_p$ , г/м <sup>2</sup>	$\gamma_{zn}$
1	Горячее цинкование	СКС3	3,7	50	45,3	0,90
2	Электрохимические покрытия	СКС3	3,1	50	46,8	0,95
3	Электрохимические покрытия + ЛКП	СКС4	2,5	50	132,6	0,99
4	Цинкополимерные покрытия	СКС4	4,3	50	156,0	0,99
5	Порошковые покрытия	СКС5	5,0	50	241,8	0,95

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

**Научная новизна и практическая значимость**

Основной целью проведения определительных испытаний является определение методом экспериментального исследования фактической несущей способности и деформативности конструкции пространственной фермы с муфтовыми сборно-разборными соединениями с последующим использованием полученных результатов для ее совершенствования.

Силовые испытания для проверки эффективности принципов формообразования при мелкосерийном производстве сборно-разборных трубчатых конструкций с гарантированной долговечностью проведены с целью: экспериментального изучения эксплуатационных свойств конструкции при предельных значениях нагружения; выявления элементов, в которых при максимальной контрольной нагрузке проявляются признаки предельных состояний; определение фактической несущей способности конструкции и характера разрушения (рис. 3). Комплексная оценка показателей технологической рациональности выбранного вида конструкционного полимера на стадии проектирования связана с разработкой научно обоснованных методов оценки долговечности конструкционного сотопласта, а также нормативных документов, регламентирующих правила технической эксплуатации [10, 18].

Решающее значение при учете требований технологической рациональности оказывают

результаты стендовых (натурных) испытаний, где учитываются условия атмосферного старения, для которых преобладающее влияние оказывает аperiодический характер технологических выделений среды, формирующих показатели агрессивности условий эксплуатации.

Строительные материалы, применяемые в комбинированных ограждающих панелях, оборудование и оснастка для их изготовления на автоматизированных поточных линиях в широком ассортименте предлагаются зарубежными компаниями и отечественными производителями [17]. Основные показатели технологичности конструкционных полимеров комбинированных ограждающих конструкций приведены в табл. 2.

Оценка показателей долговечности и технологичности элементов ограждающих конструкций выполнена на основе комплексного подхода, разработанного в научно-испытательной лаборатории «Антикор-Дон» ООО «Укринсталькон им. В.Н. Шимановского», который обеспечивает реализацию следующих этапов: зонирование и систематизацию состава и конструкций агрессивных воздействий на элементы конструкций; анализ вариантов конструктивных схем комбинированных ограждающих конструкций; количественную оценку показателей долговечности конструкционных пластиков; сравнительный анализ долговечности конструктивных форм [6].

а-а



б-б

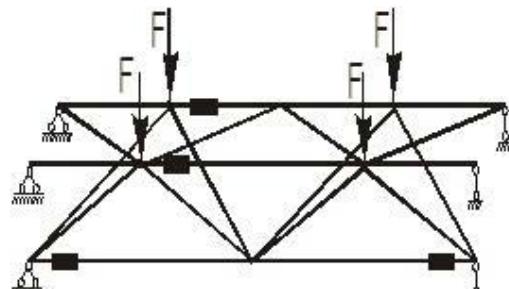


Рис. 3. Пространственный блок:  
а – общий вид при проведении испытаний; б – схема приложения узловой нагрузки

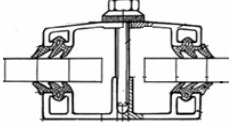

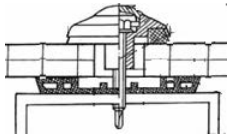

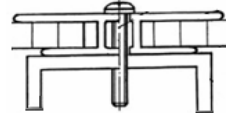

Fig. 3. Dimensional block:  
а – General view during testing; б – scheme of application of the nodal load

Таблица 2

**Технологичность конструкционных полимеров  
комбинированных ограждающих конструкций**

Table 2

**Technological of engineering polymers for combined walling**

Фрагмент конструктивного решения		Показатель технологичности (лет)		Общая характеристика долговечности, лет.
Сопряжения профиля и несущей конструкции	Элемент соединения пластин	I-е предельное состояние	II-е предельное состояние	
		12–15	7–10	19–25
		10–11	5–7	15–18
		6–9	3–5	9–14

### Выводы

Практическое применение разработок осуществлено при реализации конструкций пространственного блока в качестве светопрозрачного покрытия [19]. Пространственный блок покрытия состоит из ферм треугольного очертания, соединенных в коньковом и опорных узлах прогонами, на которые укладываются полимерные пластины.

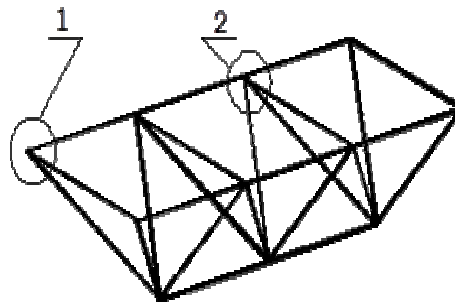
Основные несущие конструкции (фермы, прогоны, шпренгель и раскосы) выполнены из стержней замкнутого круглого профиля, что в свою очередь повышает коррозионную стойкость конструктива; предполагает повышения

уровня долговечности, уменьшение металлоемкости конструкции и образования новых форм конструкций (рис. 4).

Указанные принципы формообразования связаны с использованием металлопластиковых профилей, полимерных панелей в качестве ограждающих конструкций [20].

Предложенные решения обеспечивают снижение показателей концентрации металла, что при развитой поверхности конструктивных элементов определяет необходимость разработки эффективных мер по обеспечению гарантированной долговечности конструкционных пластиков.

*a-a*



## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

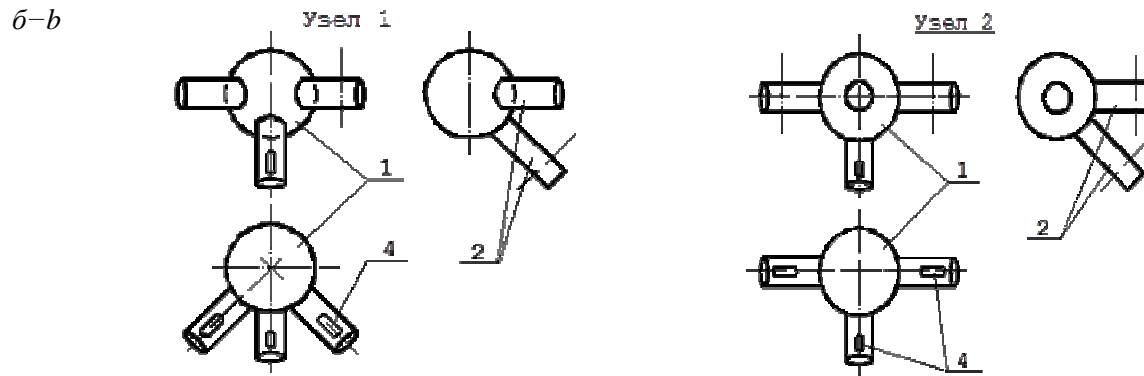


Рис. 4. Конструктивное решение пространственно-стержневого блока:  
*a* – монтажный укрупненный блок, *б* – узлы сопряжения элементов: 1 – пустотелая полусфера;  
 2 – стержни-коротыши; 3 – стержни основные; 4 – овальное отверстие

Fig. 4. A constructive solution of space frame block:  
*a* – enlarged mounting block, *b* – junctions: 1 – hollow semi-sphere; 2 – rods-short stacks; 3 – the main rods; 4 – oval hole

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гибаленко, А. Н. Мониторинг остаточного ресурса металлоконструкций в коррозионных средах / А. Н. Гибаленко // 36. наук. пр. Серія : Галузеве машинобудування, будівництво / Полтав. нац. техн. ун-т. – Полтава, 2015. – Вип. 3 (45). – С. 110–116.
2. Гибаленко, А. Н. Рациональное проектирование комбинированных ограждающих конструкций / А. Н. Гибаленко // Містобудування та територіальне планування : наук.-техн. зб. / Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури / Київ, 2015. – Вип. 58. – С. 81–89.
3. Гибаленко, А. Н. Оценка живучести металлоконструкций при моделировании факторов эксплуатации / А. Н. Гибаленко, Т. С. Трофимчук // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 2 (62). – С. 119–128. doi: 10.15802/stp2-016/67327.
4. Гибаленко, А. Н. Расчетно-экспериментальная оценка характеристики живучести металлоконструкций путепровода / А. Н. Гибаленко, Т. С. Трофимчук, А. С. Коваленко // 36. наук. пр. / Укр. держ. ун-т залізн. трансп. – Харків, 2016. – Вип. 160. – С. 65–75.
5. ДБН В.1.2-14-2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – 37 с.
6. ДСТУ Б В.2.6-193:2013. Захист металевих конструкцій від корозії. Вимоги до проектування. – Київ : Мінрегіон України, 2013. – 74 с.
7. Експлуатаційні властивості і захист від корозії будівельних металлоконструкцій: Розробки і практичний досвід забезпечення довговічності : прес-дос'є НВВЛ «Антикор-Дон» / Донб. нац. акад. буд-ва і архітектури / уклад. О. М. Гибаленко [та ін.] ; ред. В. П. Корольов. – Донецьк : Норд-Прес, 2005. – 45 с.
8. Корольов, В. П. Теоретические основы инженерных расчетов стальных конструкций на коррозионную стойкость и долговечность / В. П. Корольов // Сб. науч. тр. – Донецк, 1995. – Вып. 1–95. – С. 24–25.
9. Павлов, Н. Н. Старение пластмасс в естественных и искусственных условиях / Н. Н. Павлов. – Москва : Химия, 1982. – 224 с.
10. Пат. 36144А Україна, МПК (2006) Е 04 В 7/00. Просторовий блок покриття / В. П. Корольов, О. М. Гибаленко [та ін.] ; заявник та патентовласник Донб. держ. акад. буд-ва і архітектури. – № 99116090 ; заявл. 05.11.1999 ; опубл. 16.04.2001 ; Бюл. № 3. – 4 с.
11. Пособие по контролю состояния строительных металлических конструкций зданий и сооружений в агрессивных средах, проведению обследований и проектированию восстановления защиты конструкций от коррозии (к СНиП 2.03.11-85) / сост. Голубев А. И., Горохов Е. В., Корольов В. П. [и др.]. – Москва : Стройиздат, 1989. – 51 с.
12. Сайт фирмы CAMPUS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.campus-plastics.com/campushome/coc>. – Загл. с экрана. – Проверено : 02.07.2016.



## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

13. Трущев, А. Г. Пространственные металлические конструкции / А. Г. Трущев. – Москва : Стройиздат, 1983. – 215 с.
14. Arner, M. Taguchi and his Ideas on Robust Design / M. Arner // Statistical Robust Design: An Industrial Perspective. – 2014. – P. 195–208. doi: 10.1002/9781118842003.ch11.
15. Ellobody, E. Finite Element Modeling / E. Ellobody, R. Feng, B. Young // Finite Element Analysis and Design of Metal Structures. – 2014. – P. 31–55. doi: 10.1016/b978-0-12-416561-8.00-003-2.
16. Hollaway, L. The Evolution of and the way Forward for Advance Polymer Composites in the Civil Infrastructure / L. Hollaway // Construction and Building Materials. – 2003. – Vol. 17. – Iss. 6–7. – P. 365–378. doi:10.1016/S0950-0618(03)00038-2.
17. Korolov, V. Design criteria of reliability and safety in the design of corrosion protection of structural steel / V. Korolov, Y. Vysotsky, Y. Filatov // Improving materials durability: from cultural heritage to industrial applications : The European Corrosion Congress (8.09-12.09.2014). – Pisa, Italy, 2014. – P. 88.
18. Mozaffari, A. The Great Salmon Run Metaheuristic for Robust Shape and Size Design of Truss Structures with Dynamic Constraints / A. Mozaffari, M. Ebrahimnejad // Intern. J. of Applied Metaheuristic Computing. – 2014. – Vol. 5. – Iss. 2. – P. 54–79. doi: 10.4018/ijamc.2014040104.
19. Nutt-Powell, Thomas E. The House That Machines Built: Making Sense of a Housing Opportunity / E. Thomas Nutt-Powell. – Boston : Auburn House Publishing Company, 1982. – 40 p.
20. Ronald, L. Progress in Naval Composites / L. Ronald, P. Reyes, H. Reyes // Advanced Materials and Processes. – 1987. – 35 p.
21. Singh, R. Corrosion Control and Monitoring / R. Singh // Corrosion Control for Offshore Structures. – 2014. – P. 41–44. doi:10.1016/B978-0-12-404615-3.00003-6.
22. Smallowitz, H. Reshaping the Future of Plastic Buildings / H. Smallowitz // Civil Engineering (ACSE). – 1985. – Vol. 55. – Iss. 5. – P. 38–41.

О. М. ГІБАЛЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Будівництво, технічна експлуатація і реконструкція», Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет», вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87500, тел. +38 (050) 473 14 52, ел. пошта alexgib@yandex.ru, ORCID 0000-0003-2979-5225

## ЗНИЖЕННЯ РІВНЯ КОРОЗІЙНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ПРИ РАЦІОНАЛЬНОМУ КОНСТРУЮВАННІ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ

**Мета.** Наукова стаття присвячена розробці принципів робастного (сталого) проектування при обґрунтуванні конструктивних рішень первинного та вторинного захисту металоконструкцій на основі управління рівнем корозійної небезпеки будівельних об'єктів, конструктивної пристосованості, технологічної раціональності при експлуатації в умовах впливу корозійно-агресивних середовищ. **Методика.** Авторами були використані та розвинені розрахункові методи оцінки надійності та конструктивної безпеки. В основі методів – побудова інформаційно-аналітичної бази даних визначальних параметрів корозійного стану будівельних металоконструкцій для вдосконалення та контролю заходів первинного та вторинного захисту від корозії. **Результати.** Запропонована основа для постановки та реалізації завдань управління експлуатаційним терміном служби будівель і споруд у корозійних середовищах. Вона досягається шляхом підвищення якості й надійності заходів первинного та вторинного захисту металоконструкцій із урахуванням рівня корозійної небезпеки з управління технологічною безпекою протягом встановленого терміну служби будівельних об'єктів. **Наукова новизна.** Розроблені принципи робастного проектування протикорозійного захисту з урахуванням встановленої надійності та конструктивної безпеки комбінованих металоконструкцій в умовах корозійно-активних середовищ на основі методики граничних станів конструкцій (із урахуванням рівня корозійної небезпеки). Використано розрахунково-вимірювальний метод підтвердження відповідності заходів корозійної захищеності для резервування працездатності та завдання строків служби комбінованих конструкцій та їх захисних покриттів. **Практична значимість.** Розроблена методика обґрунтування проектних рішень та підтвердження їх відповідності за ознаками корозійної небезпеки будівельних об'єктів. Реалізовані технічні рішення, що забезпечують зниження рівня ризиків аварійних ситуацій.

**Ключові слова:** металеві конструкції; живучість; процесний підхід; забезпечення надійності; робастне проектування; рівень корозійної небезпеки

О. М. GIBALENKO<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Construction, Technical Operating and Reconstruction», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87500, tel. +38 (050) 473 14 52, e-mail alexgib@yandex.ru, ORCID 0000-0003-2979-5225

## THE DECREASE IN THE LEVEL OF CORROSION HAZARD IN THE RATIONAL DESIGN OF METAL STRUCTURES

**Purpose.** The paper highlights development the principles of robust (sustainable) design in the constructive decisions substantiation of the primary and secondary protection for steel structures based on the control of corrosion risk level of construction projects, structural adaptation, and technological rationality when operating in conditions of corrosive environments impact. **Methodology.** The computational methods for assessing the reliability and structural safety were used and developed by authors. In the base of methods there is a construction of information-analytical databases attributive parameters on the corrosion state of metal construction for the improvement and control measures the primary and secondary corrosion protection. **Findings.** The basis was proposed for setting and implementing management tasks exploitation service life of buildings and structures in corrosive environments. It achieved by improving the quality and reliability of primary and secondary protection steel structures considering corrosion level hazards management of process safety within a specified period of Builder-structures service. **Originality.** The principles of robust design of corrosion protection, taking into account the established reliability and constructive security with combined metal structures under corrosive environments based on the methodology of limit states of structures (taking into account the level of danger of corrosion) were developed. The metering method confirmation of conformity corrosion protection measures for reserving a workable and tasks of the service life composite structures and their protective coatings was used. **Practical value.** The substantiation methodology of the design solutions and assessment of their conformity upon corrosion risks indicators of construction projects was developed. Technical solutions providing the level reduction of risk emergency situations were realized.

**Keywords:** metal construction; the durability; the process approach; ensuring reliability; robust design; corrosion risk level

### REFERENCES

1. Gibalenko A.N. Monitoring ostatochnogo resursa metallokonstruktsiy v korrozionnykh sredakh [Monitoring of residual resource in metal corrosion environments]. *Zbirnyk naukovykh prats. Seriya: haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo* [Proc. Series: Industrial engineering, construction], 2015, issue 3 (45), pp. 110–116.
2. Gibalenko A.N. Ratsionalnoye proektirovaniye kombinirovannykh ogradhdayushchikh konstruktsiy [Rational design of combined walling]. *Naukovo tekhnichnyi zbirnyk «Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia»* [Science and research collection «Town planning and territorial planning»], 2015, issue 58, pp. 81–89.
3. Gibalenko A.N., Trofimchuk T.S. Otsenka zhivuchesti metallokonstruktsiy pri modelirovanii faktorov ekspluatatsii [Metal structures survivability assessment when simulating service conditions]. *Nauka ta progres transportu – Science and Transport Progress*, 2016, no. 2 (62), pp. 119–128. doi: 10.15802/stp2016/67327.
4. Gibalenko A.N., Trofimchuk T.S., Kovalenko A.S. Raschetno-eksperimentalnaya otsenka kharakteristiki zhivuchesti metallokonstruktsiy puteprovoda [Settlement and experimental evaluation of characteristics for metalwork overpass survivability], 2016, issue 160, pp. 65–75.
5. DBN V.1.2-14-2009. Zahalni pryntsypy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel, sporud, budivelnykh konstruktsii ta osnov [State Building Norms V.1.2-14-2009. General principles of reliability and structural safety of buildings, structures and foundations]. Kyiv, Minrehionbud Ukrainy Publ., 2009. 37 p.
6. DSTU B V.2.6-193:2013. Zakhyst metalevykh konstruktsii vid korozii. Vymohy do proektuvannia [State Standard B V.2.6-193:2013. Protection of metal structures from corrosion. Requirements for the design]. Kyiv, Minrehion Ukrainy Publ., 2013. 74 p.
7. Hibalenko O.M., Korolov V. P. Ekspluatatsiini vlastyvoli i zakhyst vid korozii budivelnykh metallokonstruktsii: Rozrobky i praktychnyi dosvid zabezpechennia dovhovichnosti: pres-dosie NVVL «Antykor-Don» [Operating properties and corrosion protection of metal constructions: development and experience to ensure durability]. Donetsk, Nord-Press Publ., 2005. 45 p.
8. Korolev V.P. Teoreticheskiye osnovy inzhenernykh raschetov stalnykh konstruktsiy na korrozionnyuyu stoykost i dolgovechnost [Theoretical foundations of engineering calculations of steel structures on the corrosion resistance and durability]. Donetsk, 1995, issue 1-95, pp. 24–25.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

9. Pavlov N.N. *Stareniye plastmass v estestvennykh i iskusstvennykh usloviyakh* [Aging of plastics in natural and artificial conditions]. Moscow, Khimiya Publ., 1982. 224 p.
10. Korolov V.P., Hibalenko O.M., Voitova Zh.M., Horokhov O.Ye. *Pat. 36144A Ukraina, MPK (2006) E 04 V 7/00. Prostorovyi blok pokryttia* [Spatial unit of cover]. Donetsk, 1999, No. 991160901. 4 p.
11. Golubev A.I., Gorokhov Ye.V., Korolev V.P. *Posobiye po kontrolyu sostoyaniya stroitelnykh metallicheskih konstruksiy zdaniy i sooruzheniy v agressivnykh sredakh, provedeniyu obsledovaniy i proyektirovaniyu vosstanovleniya zashchity konstruksiy ot korrozii (k SNiP 2.03.11-85)* [Manual for condition monitoring of metal structures of buildings and structures in aggressive environments, surveying and the design of the restoration to protect structures against corrosion]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1989. 51 p.
12. *Sayt firmy CAMPUS* (CAMPUS firm site). Available at: <http://www.campusplastics.com/campushome/coc> (Accessed 02 July 2016).
13. Trushchev A.G. *Prostranstvennyye metallicheskiye konstruksii* [Spatial metal structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983. 215 p.
14. Arner M. Taguchi and his Ideas on Robust Design. *Statistical Robust Design: An Industrial Perspective*, 2014, pp. 195-208. doi: 10.1002/9781118842003.ch11.
15. Ellobody E., Feng R., Young B. Finite Element Modeling. *Finite Element Analysis and Design of Metal Structures*, 2014, pp. 31-55. doi: 10.1016/b978-0-12-416561-8.00003-2.
16. Hollaway L. The Evolution of and the way Forward for Advance Polymer Composites in the Civil Infrastructure. *Construction and Building Materials*, 2003, vol. 17, issue 6–7, pp. 365-378. doi:10.1016/S0950-0618(03)00038-2.
17. Korolov V., Vysotskiy Y., Filatov Y. Design criteria of reliability and safety in the design of corrosion protection of structural steel. Improving materials durability: from cultural heritage to industrial applications : The European Corrosion Congress (8–12 September 2014). Pisa, Italy, 2014. P. 88.
18. Mozaffari A., Ebrahimnejad M. The Great Salmon Run Metaheuristic for Robust Shape and Size Design of Truss Structures with Dynamic Constraints. *Intern. Journal of Applied Metaheuristic Computing*, 2014, vol. 5, issue 2, pp. 54-79. doi: 10.4018/ijamc.2014040104.
19. Nutt-Powell Thomas E. *The House That Machines Built: Making Sense of a Housing Opportunity*. Boston. Boston, Auburn House Publishing Company Publ., 1982. 40 p.
20. Ronald L., Reyes P., Reyes H. Progress in Naval Composites. *Advanced Materials and Processes*. 1987. 35 p.
21. Singh R. Corrosion Control and Monitoring. *Corrosion Control for Offshore Structures*, 2014, pp. 41-44. doi:10.1016/B978-0-12-404615-3.00003-6.
22. Smallowitz H. Reshaping the Future of Plastic Buildings. *Civil Engineering (ACSE)*, 1985, vol. 55, issue 5, pp. 38-41.

*Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. В. П. Королёвым (Украина); д.т.н., проф. В. Д. Петренко (Украина)*

Поступила в редколлегию: 24.03.2016

Принята к печати: 04.07.2016



## UDC 624.954.014.2-047.42

V. V. KACHURENKO<sup>1\*</sup>, D. O. BANNIKOV<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Building Structures», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St. 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 532 54 46, e-mail valentina.kachurenko@gmail.com, ORCID 0000-0001-7383-205X

<sup>2\*</sup>Dep. «Building Structures», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St. 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 400 43 07 e-mail bdo2013@yandex.ua, ORCID 0000-0002-9019-9679

**EXPERIMENTAL STUDY OF HORIZONTAL PRESSURE  
DISTRIBUTION ON CORRUGATED STEEL SILO WALLS**

**Purpose.** The paper aims: 1) qualitative assessment of the nature of the container corrugated wall deformation caused by the load from bulk materials. 2) determination of the horizontal pressure redistribution scheme for each individual corrugation plate and the calculation method that is closer to the real situation. 3) obtaining the quantitative deformation indicators to compare them with the calculated ones produced by means of mathematical model simulation. **Methodology.** To achieve this purpose the different types of capacitive structure profiles were investigated and the values of total vertical displacement under load were obtained. The computational experiment used the design computer system Structure CAD for Windows. In addition, the laboratory experiment was conducted, the analysis of which is important to confirm the correctness of pre-made computer models. **Findings.** The conducted experiment allowed receiving the confirmation of the FEM calculated data, namely qualitatively and quantitatively the deformation direction and nature completely repeated the design situation in SCAD. The work of corrugated profile was analysed for different theoretically possible load schemes and different calculation methods. Also the work contains the recommendations for the real calculation using computer simulation. During a joint study the authors obtained the data that allow for more accurate assessment of the corrugated profile performance under the pressure from bulk materials. **Originality.** The conducted research and experimental tests explain and clarify the ways for possible redistribution of bulk material pressure on each corrugation plate, while there is no such information in the existing recommendation literature and regulatory framework concerning the capacitive structure design. **Practical value.** The use of the proposed solutions is useful for correct design of containers with corrugated walls during further calculations and search of new directions for future research.

**Keywords:** silo; capacitive structure; silo wall; corrugated profile; experimental studies; deformations; computer simulation

**Introduction**

In Ukraine, the major portion of grain is stored in state bulk reinforced concrete silos whose equipment is morally and physically obsolete, that results in reduced grain quality and throughput efficiency of elevators. At the same time the silos are remote from grain manufacturers, while the grain storage costs are very high and are about 25% of the stored grain cost.

One of the most important ways to reduce losses and improve product quality is to provide each household with an own modern grain elevator. Thus, in the agro developed countries up to 80% of the crop is kept at its producer. Herewith the storage towers are the most preferred in the world. The technology of storing grain in the storage towers equipped with active ventilation is widely used in

the USA and Canada and in this decade in Europe [13].

Metal ventilated silos are deservedly considered as the most profitable for storage of grain crops [10]. Prefabricated metal silos have the following advantages: they reduce the capital costs during installation in two or three times and the complexity of installation – in four-five times; allow mounting silos closer to the place of collection and use of grain; make it possible to implement a complete mechanization and automation of the storage process [13]. Their construction and maintenance is cheaper, and the self-warming process that occurs in the grain can be influenced through effective aeration, ventilation and thermometry systems. Abroad, the half of all granaries is metal silos. Their number is slowly but surely growing in Ukraine as well [4].

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

The best containers in terms of design and subsequent operation are rigid vertical capacities. Mostly they consist of two parts: the top one with vertical walls, designed to accumulate the necessary stored supply of bulk material and the bottom one with sloping walls designed to discharge the material by gravity [1]. This type of silo is realized in two versions of walls: profiled or smooth. Most overseas silos are manufactured and operated with corrugated steel wall plates [16]. For optimal storage of bulk materials the best containers are those with smooth walls in the bottom part and profiled walls in the top part. This reduces the pressure at the bottom of the silo and facilitates the discharge flow due to the smooth wall section at the bottom part. To the extent that the profiled wall itself is very durable, it requires less steel, which also makes this solution economic [15].

### Purpose

To design a silo an engineer must determine all loads that can affect it. These loads include the whole range, namely, wind, seismic, snow load, as well as the load on the silo inner surface caused by pressure from the bulk material that is stored. Numerous Eurocodes and national standards [6, 7] determine the methods to calculate the latter load [14]. However, the regular recurrence of silo structure accidents and damages indicate that the existing methods of calculation and design of such structures do not include all the features of their operation [3]. Still, one of the challenges to creating reliable and economic structures of this type is the interaction of bulk material with corrugated wall elements of the capacitive structure [8]. Unfortunately, the enacted DSTU-N B EN 1991-4:2012 [6] has no information on how to properly set the horizontal component of the pressure on the profiled wall. And meanwhile the operating experience of these structures demonstrates the need for improved methods of bulk material pressure determination [2].

To solve this problem the authors created multiple mathematical models in the program complex SCAD [11] and investigated the capacity behaviour at different ways of transferring the load onto the corrugated wall elements [8]. However, the obtained results were multivalued by direction and character of deformations and required clarification.

Thus, it was necessary to formulate and conduct more sophisticated experimental research that will determine fundamentally the nature of corrugated wall deformation under the load from bulk materials and help to understand how the horizontal pressure is distributed on each individual corrugated plate [9]. In addition, it was necessary to get quantitative deformation values to compare them with the calculated ones obtained during mathematical modelling.

### Methodology

The researches in this field were performed by means of the searching laboratory model experiment because it was not possible to examine the object itself, given its large size [5]. Therefore, the model of the studied object was examined.

Preparation and planning of the experiment contained a lot of tasks, including the following: previous theoretical analysis and mathematical modelling of the experiment-predicted situation; selection of a common form of the experimental capacity and the material from which it must be manufactured; accurate selection of parameters to characterize the bulk materials to be used and the created experimental capacitive structure; determination of the total number of these parameters and their linkage to each other; defining the number of variables, etc. In addition, the scope of the research was limited by the dimensions of the used premises (outdoors had a high probability of influence of the hard-predictable adverse factors), the scope of physical work (loading and unloading of capacities was performed manually), the estimated cost of the planned research. More details concerning the experiment planning and preparation can be found in the previous publication of the authors [9].

In the final study, the experimental design was adopted as symmetrical single-stage capacity of prismatic type with three flat and one replaceable corrugated walls.

The material for prismatic capacity was chosen as follows: for two sides and the bottom – 8 mm MDF sheets, for the third side – glass of the same thickness. The corrugated wall was made of the technical paper with 0.27 mm sheet thickness and 220 g/m<sup>2</sup> density that is equivalent to 0.815 g/cm<sup>3</sup>. The strength factor and Poisson coefficient according to A.H. Yahofarov's thesis [12] were adopted as 10000 MPa and 0.5, respectively.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

The main parameters that characterized the experimental bulk material – millet – included the following of its physical and mechanical characteristics: grain diameter, bulk density, specific weight, angle of friction, angle of external friction and friction coefficient. They were determined experimentally during the special relevant additional research and had the following values respectively:

- $d_{gr} = 2.25 \text{ mm}$ ;
- $\rho_b = 707.33 \text{ kg/m}^3$ ;
- $\gamma = 707.56 \text{ kgf/m}^3$ ;
- $\psi_{gr} = 24.8^\circ$ ;
- $\varphi_{ext}^{gr} = 15^\circ$ ;
- $f = 0.27$ .

As the variable design parameters were taken the corrugation form type and size – crinkle height and length.

The corrugation profile for the panel was made in three versions: square profile with smaller plate oriented to bulk material, square profile with bigger plate oriented to bulk material and triangular profile (or zigzag), which was a simplified version of the wavy one (see Fig. 1). Herewith the crinkle length, depending on the profile type and experiment stage, ranged from 22 to 78 mm and the crinkle height was researched in two versions: 19 and 25 mm.

To solve the experimentally set task the corrugated wall deformations were measured. For this purpose the construction was equipped with a watch-type indicator of 0.01 mm-accuracy to obtain the values of total vertical displacements of the corrugated panel top point. Also the 1 mm-scale rule was attached to the grooves along the entire corrugated wall on both sides, in order to fix the vertical deformations of each crinkle while the capacity is filled with bulk materials. Material filling was carried out at the wall the most remote from the corrugated panel in order to transmit the bulk load gradually, by gravity, without bumps.

The experiment was conducted twice. The aim of the first one was qualitative determination of the nature and direction of the deformations of various corrugation types, since the previous mathematical modelling of experimental situations provided the results with different directions of vertical displacements and they needed experimental confirmation. Loading of capacity took place for the

three above mentioned corrugation types, whose dimensions (see. Fig. 2) were selected from the conditions of proportionality of plate sizes to bulk material fraction and compliance with profile groove sizes.

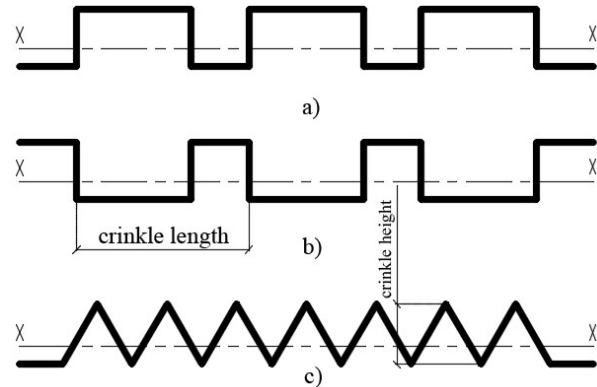


Fig. 1. The studied corrugation profile types:  
a – square profile with smaller plate oriented to bulk material;  
b – square profile with bigger plate oriented to bulk material;  
c – triangular profile

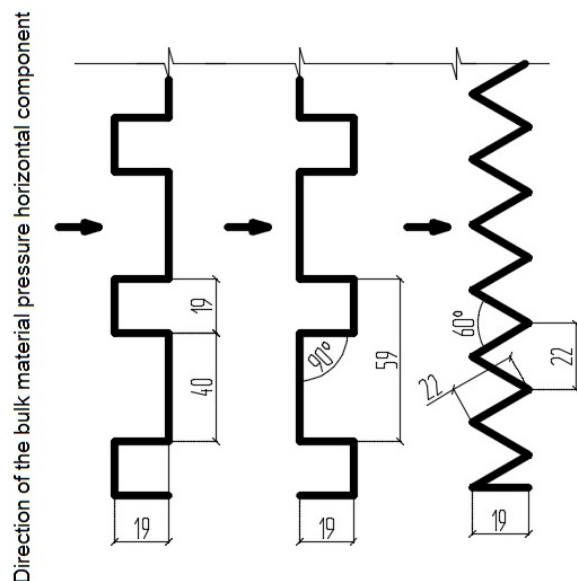


Fig. 2. Sizes of some corrugation plates of each section type for production of capacity corrugated wall

The aim of the second experiment was to obtain quantitative indicators of displacements for clarifying the scheme of load on each individual corrugation plate as well as selection of a calculation method to analyse the future mathematical models in FEM (finite element method).

This version tested only square profiles with smaller and bigger plates oriented to bulk material. Theoretically, the model evaluation included con-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

sideration of 7 load charts with different versions of the pressure distribution on each individual plate. These charts and sizes for square profile with smaller plate oriented to bulk material are shown in Fig. 3.

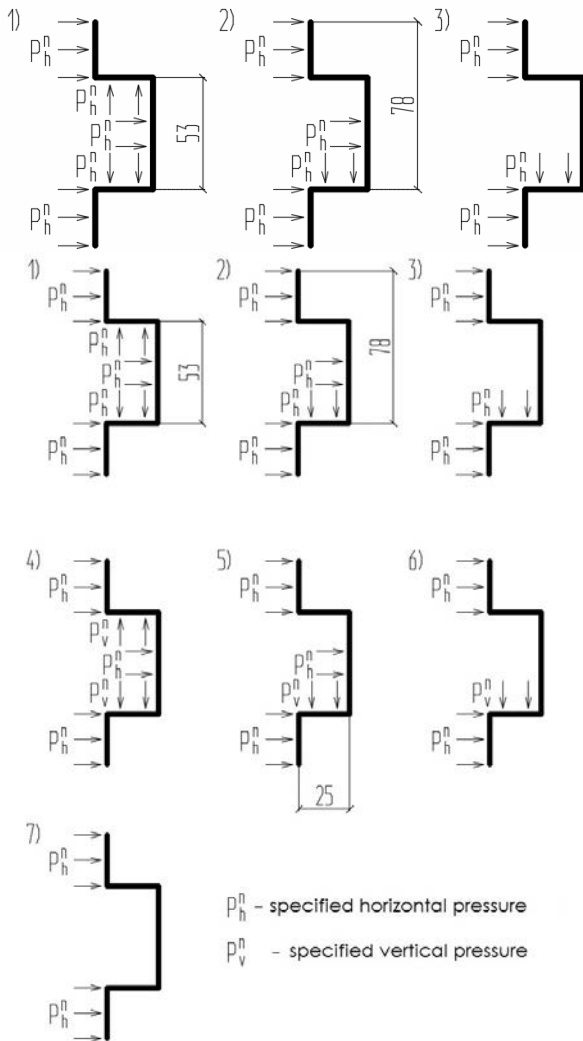


Fig. 3. Theoretically probable load charts

The load values for SCAD simulation were determined in accordance with DBN [6] by Jansen theory with consideration of local pressure rise coefficient  $a_1$ , taken in accordance with the requirements of par. 4.11. The calculation was performed using linear and nonlinear methods.

### Findings

During computer simulation of the first experiment by non-linear calculation method each type of profile sections was deformed differently

and quite specifically. Direction of total vertical displacements of the square profile with smaller plate oriented to bulk material was downward and had a value of 4.34 mm, and that of the square profile with bigger plate oriented to bulk material – upward (coincided with the direction of z-axis in SCAD model) by 5.79 mm. For triangular profile the vertical deformation values were significantly lower and made 1.76 mm downward, but the profile was quite significantly deformed in plane, which was not observed in the previous two versions.

The conducted experiment confirmed the data obtained by FEM calculation, namely – in essence the direction and character of the deformations completely repeated the SCAD design situation. In addition, the quantitative values of vertical deformations of the corrugation plate top reference point for each section type under full load were very close to the pre-calculated ones and differed in value by less than 1 mm.

Photos of full loading of the experimental capacity to 48 cm height are shown in Fig. 4.



Fig. 4. Experimental capacity with the square profile with smaller plate oriented to bulk material under full load

For more accurate monitoring of deformation nature the samples were taken evenly along the entire height of the corrugated panel for pre-defined control points at different levels of capacity load. The results for each type of profile in the form of charts are presented in Fig. 5.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

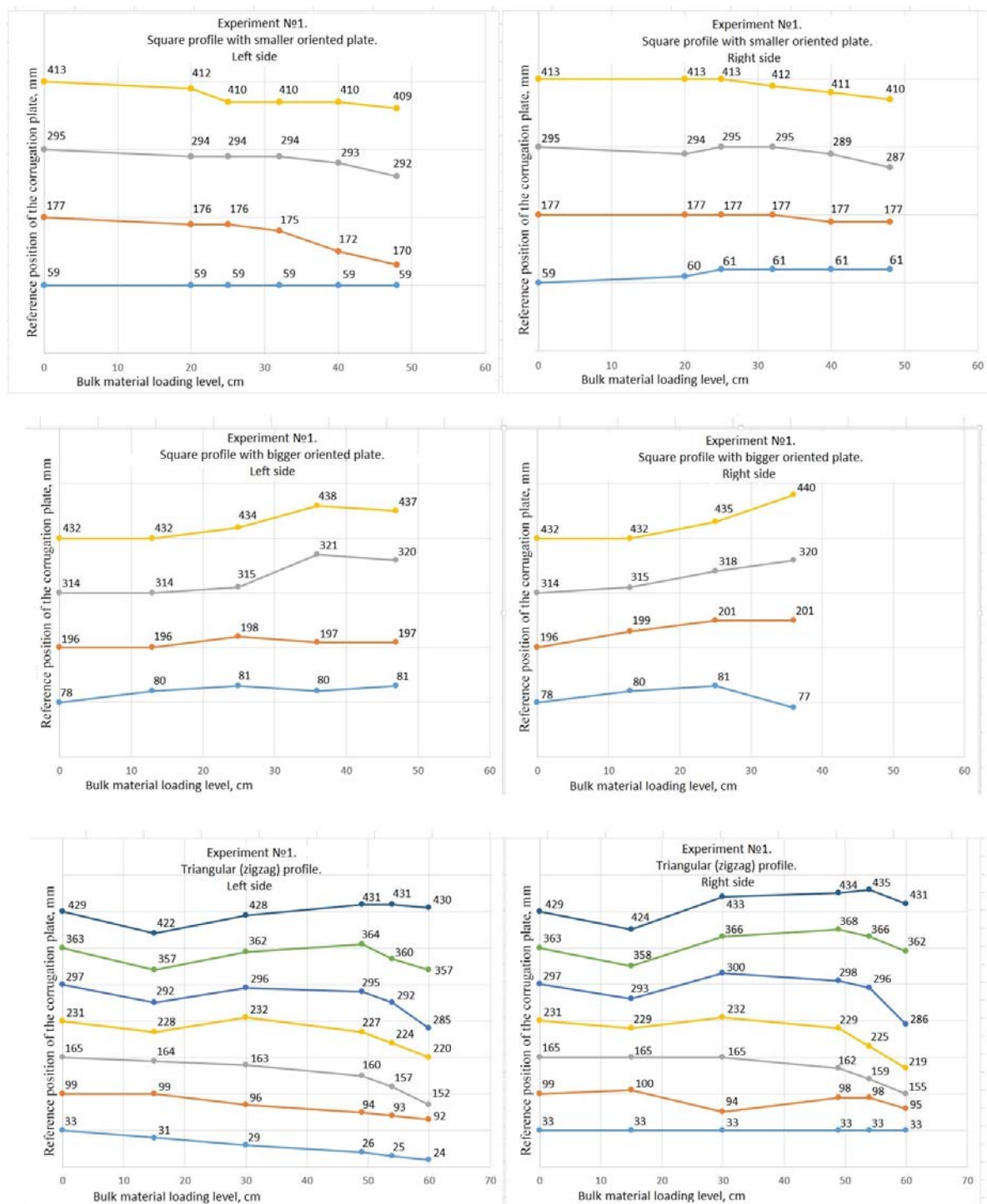


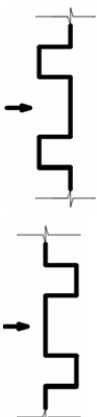
Fig. 5. Charts of displacement of corrugated panel control points when capacity is loaded with bulk material

The comparative results of computer calculation for square profiles in design and computing complex SCAD at different load patterns, which

were analysed during the second experiment, are given for full load of the capacity in the Table 1.

Table 1

**The calculation results for total vertical displacement of corrugated panels**

Profile type	Calculation method	Values of total vertical deformations at the appropriate load patterns, mm						
		1	2	3	4	5	6	7
	Linear	–28.39	–187.57	–164.94	–58.53	–324.83	–302.37	+5.12
	Non-linear	–10.74	–24.21	–22.38	–15.86	–27.93	–25.90	+1.4
	Linear	+39.72	–147.12	–123.04	+56.92	–346.41	–341.55	+32.47
	Non-linear	+11.02	–20.23	–17.81	+13.58	–28.41	–28.52	+8.76

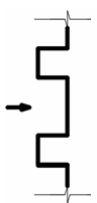
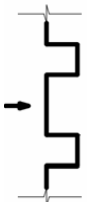
Note: The sign of deformations indicates their direction with regard to the set z-axis direction in SCAD; “+” – corrugated panel is deformed upward; “–” – corrugated panel is deformed downward.

After analysing the figures, the load patterns 2, 3, 5, 6, 7 were immediately rejected as the sign indicating the deformation direction does not comply with the real operation scheme of corrugated panel, which was observed during both experiments.

To choose the calculation method and the final load pattern the results of the left patterns 1 and 4 required the comparison with quantitative indicators obtained after the second experiment. However, if in case of the first experiment all types of profiles withstood the full load, then in case of the second one the last samples which managed to be taken before destruction of corrugated panels were at the capacity load levels of 25 and 20 cm for the square profile with smaller and bigger plates oriented to bulk material respectively. This flow of experiment occurred because the dimensions of crinkle length and height in the latter case were increased by 30%, and therefore the area of material of the corrugated panel perceiving the pressure from the bulk material decreased. Therefore, the need to compare the quantitative deformation indicators led to another simulated load situation for appropriate experimental level, as well as to additional calculations, the results of which are summarized in the Table 2.

Table 2

**Values of total vertical displacements of corrugated panels under partial load**

Profile type	Method of result generation	Values of total vertical deformations at the appropriate load patterns, mm	
		1	4
 $h = 25$	Linear calculation	–12.62	–26.16
	Non-linear calculation	–4.78	–7.09
	Experiment	–5.25	
 $h = 20$	Linear calculation	+8.11	+10.44
	Non-linear calculation	+2.25	+2.49
	Experiment	+2.45	

Note:  $h$  – experimental capacity load level, cm.



## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

It should be noted that almost all destructions of the square profile panels occurred due to loss of local stability of separate corrugation flanges at the bottom and the most loaded part of the panel (the second or third crinkle), which is shown in Figure 6, while the triangular (zigzag) profile was losing the crinkle stability almost simultaneously throughout the height (Fig. 7). The exceptions of the above information were the cases when the initial corrugation deformations (workshop faults, inadequate angle between the plates under their own weight, etc.) resulted in crinkle jamming in grooves.



Fig. 6. Panel destruction due to loss of local stability of bottom plates of the second and the third corrugations



Fig. 7. Panel destruction due to loss of local stability of corrugation plates throughout the height

### Originality and practical value

Since the existing recommendation literature and regulatory framework concerning the capacitive structure design contain no information about

the features of modelling bulk material pressure on the corrugated steel elements, the conducted research and experimental tests explain and clarify the ways for possible redistribution of bulk material pressure on each corrugation plate, that is useful for correct design of containers with such walls during further calculations and search of new directions for future research.

### Conclusion

Summarizing all the above, we can make the following conclusions:

1. The experimental studies resulted in qualitative determination of the corrugated wall deformation character under the load from bulk materials and obtaining of quantitative indicators of total vertical displacements for the three types of corrugation section with variable output parameters.
2. Experimental data confirmed the analysis correctness of pre-made mathematical models, in addition the numerical results obtained from mathematical modelling and laboratory experiments have very similar values.
3. Also, it is fair to say that when the diameter of the bulk material is more than ten times smaller than the size of the smallest corrugation plate, the load pattern is as close as possible to the hydrostatic one.
4. For further mathematical modelling of capacitive structures it is recommended to use non-linear calculation method and the proposed 1 and 4 load patterns, selecting the worst option for real calculation.
5. The results obtained during the experiment show promise for further development of scientific research to discover new research areas.

### LIST OF REFERENCE LINKS

1. Банніков, Д. О. Експериментальні дослідження статичної поведінки сипучого середовища в ємнісній конструкції // Д. О. Банніков // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. 26. – С. 103–111.
2. Бібік, М. В. Визначення горизонтального навантаження на вертикальні стіни ємнісних конструкцій за різними нормами / М. В. Бібік, П. С. Мороз // Зб. наук. пр. Серія: Галузеве машинобуд., буд-во / Полтав. нац. техн. ун-т. – Полтава, 2014. – Вип. 1 (40). – С. 166–174.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

3. Грицак, І. В «моді» металеві силоси [Electronic resource] / І. Грицак // Аграрний тиждень. Україна. – 2014. – № 42 (254). – Available at: <http://a7d.com.ua/9655-v-mod-metalev-silosy.html>. – Title from the screen. – Accessed : 05.07.2016.
4. Гришук, Ю. С. Основы научных исследований : учеб. пособие / Ю. С. Гришук. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2011. – 196 с.
5. ДБН В.2.2-8-98. Підприємства, будівлі і споруди по зберіганню та переробці зерна. – На заміну СНиП 2.10.05-85. – Введ. 1998-01-07. – Київ : Держбуд України, 1998. – 39 с.
6. ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 4. Бункери і резервуари. – Введ. 2014-01-07. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2012. – 150 с.
7. Качуренко, В. В. Конструктивные решения стальных емкостей для сыпучих материалов : монография / В. В. Качуренко, Д. О. Банников. – Днепропетровск : Новая идеология, 2016. – 168 с.
8. Качуренко, В. В. Планування та проведення досліджень з експериментального вивчення дії сипучих матеріалів на гофровані стінки ємнісних конструкцій / В. В. Качуренко, Д. О. Банников // Вісн. Одес. держ. акад. буд-ва та архіт. – Одеса, 2016. – Вип. 61. – С. 154–162.
9. Класифікація аварій та пошкоджень сталевих силосів / М. В. Бібік, В. М. Бібік, Р. М. Ульянов, І. О. Бібік // Зб. наук. пр. Серія: Галузеве машинобуд., буд-во / Полтав. нац. техн. ун-т. – Полтава, 2014. – Вип. 1 (40). – С. 175–183.
10. Корінь, Л. Все, що ви не знали про силос [Electronic resource] / Л. Корінь // Агробізнес України. – 2011. – № 4 (203). – Available at: <http://www.agro-business.com.ua/mechanizatsiya-apk/-273-vse-scho-vy-ne-znaly-pro-sylos.html>. – Title from the screen. – Accessed : 05.07.2016.
11. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов [и др.]. – Москва : СКАД СОФТ, 2011. – 656 с.
12. Ягофаров, А. Х. Совершенствование конструкции, уточнение расчета и оптимальные параметры стального круглого бункера : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Ягофаров Анвар Хабинович ; Урал. гос. ун-т путей сообщ. – Екатеринбург, 2005. – 146 с.
13. Яшук, Н. О. Сучасні сховища для зерна, або як зекономити на елеваторних затратах [Electronic resource] / Н. О. Яшук // Пропозиція. – 2016. – № 6. – Available at: <http://propo-zitsiya.com/?page=146&itemid=3407>. – Title from the screen. – Accessed : 05.07.2016.
14. Carson, J. Silo design codes: Their limits and inconsistencies / J. Carson, D. Craig // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 102. – P. 647–656. doi:10.1016/j.proeng.2015.01.157.
15. Nemeth, C. Silo with a Corrugated Sheet Wall / C. Nemeth, J. Brodniansky // Slovak J. of Civil Engineering. – 2013. – Vol. 21. – Iss. 3. – P. 19–30. doi: 10.2478/sjce-2013-0013.
16. Viljoen, J. Select grain stores carefully to control costs / J. Viljoen // Farming Ahead. – 2001. – Iss. 119. – P. 44–45.

В. В. КАЧУРЕНКО<sup>1\*</sup>, Д. О. БАННИКОВ<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Будівельні конструкції», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 532 54 46, ел. пошта [valentina.kachurenko@gmail.com](mailto:valentina.kachurenko@gmail.com), ORCID 0000-0001-7383-205X

<sup>2\*</sup>Каф. «Будівельні конструкції», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 400 43 07, ел. пошта [bdo2013@yandex.ua](mailto:bdo2013@yandex.ua), ORCID 0000-0002-9019-9679

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ТИСКУ НА ГОФРОВАНІ СТАЛІВІ СІЛОСИ

**Мета.** У дослідженні потрібно зробити: 1) якісну оцінку характеру деформацій гофрованої стінки ємності при дії навантаження від сипучих матеріалів; 2) визначити схеми перерозподілу горизонтального тиску на кожну окрему пластину гофра та методи розрахунку, що ближчі до дійсної ситуації; 3) отримати кількісні показники деформацій для співставлення їх із розрахунковими, отриманими при моделюванні математичної моделі. **Методика.** Для досягнення поставленої мети були досліджені різні типи профілів ємнісних конструкцій та отримані значення вертикальних сумарних переміщень при дії навантаження. Для обчислювального експерименту був використаний проектно-обчислювальний комплекс Structure CAD для Windows. Крім того, проведено лабораторний експеримент, аналіз результатів якого важливий для підтвердження вірності

doi 10.15802/stp2016/78006

© V. V. Kachurenko, D. O. Bannikov, 2016



## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

попередньо виконаних комп'ютерних моделей. **Результати.** В роботі, внаслідок проведеного експерименту, було знайдено підтвердження отриманих при розрахунку методом скінчених елементів (МСЕ) даних, а саме – напрямок та характер деформацій повністю (якісно та кількісно) повторював розрахункову ситуацію в SCAD. Було виконано аналіз роботи гофрованого профіля при різних теоретично ймовірних схемах навантаження та різних методах розрахунку. Також викладені рекомендації для реального розрахунку за допомогою комп'ютерного моделювання. У процесі спільного дослідження авторів були отримані дані, що дозволяють більш точно та коректно оцінити роботу гофрованих профілів при дії тиску від сипучих матеріалів. **Наукова новизна.** Проведені дослідження та експериментальні випробовування пояснюють та уточнюють способи можливого перерозподілу тиску сипучого матеріалу на кожні окремі пластини гофра, про що відсутня інформація в наявній рекомендованій літературі та нормативній базі в сфері проектування ємнісних споруд. **Практична значимість.** Застосування запропонованих рішень є корисним для коректного моделювання ємностей із гофрованими стінками при наступних розрахунках та пошуку нових напрямків подальшого дослідження.

**Ключові слова:** силос; ємнісна споруда; стінка силосу; гофрований профіль; експериментальне дослідження; деформації; комп'ютерне моделювання

В. В. КАЧУРЕНКО<sup>1\*</sup>, Д. О. БАННИКОВ<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Строительные конструкции», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (097) 532 54 46, эл. почта valentina.kachurenko@gmail.com, ORCID 0000-0001-7383-205X

<sup>2\*</sup>Каф. «Строительные конструкции», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (063) 400 43 07, эл. почта bdo2013@yandex.ua, ORCID 0000-0002-9019-9679

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ГОФРИРОВАННЫЕ СТАЛЬНЫЕ СТЕНКИ СИЛОСА

**Цель.** В исследовании необходимо установить: 1) качественную оценку характера деформаций гофрированной стенки емкости при воздействии нагрузки от сыпучих материалов; 2) определить схемы перераспределения горизонтального давления на каждую отдельную пластину гофра и методы расчета, что ближе к действительной ситуации; 3) получить количественные показатели деформаций для сопоставления их с расчетными, полученными при моделировании математической модели. **Методика.** Для достижения поставленной цели были исследованы различные типы профилей емкостных конструкций и получены значения вертикальных суммарных перемещений при воздействии нагрузки. Для вычислительного эксперимента был использован проектно-вычислительный комплекс Structure CAD для Windows. Кроме того, проведено лабораторный эксперимент, анализ результатов которого важен для подтверждения верности предварительно выполненных компьютерных моделей. **Результаты.** В работе, в результате проведенного эксперимента, было найдено подтверждение полученных при расчете методом конечных элементов (МКЭ) данных, а именно – направление и характер деформаций полностью (качественно и количественно) повторял расчетную ситуацию в SCAD. Был выполнен анализ работы гофрированного профиля при различных теоретически возможных схемах нагрузки и различных методах расчета. Также изложены рекомендации для реального расчета с помощью компьютерного моделирования. В процессе совместного исследования авторов были получены данные, позволяющие более точно и корректно оценить работу гофрированных профилей при воздействии давления от сыпучих материалов. **Научная новизна.** Проведенные исследования и экспериментальные испытания объясняют и уточняют способы возможного перераспределения давления сыпучего материала на каждые отдельные пластины гофра, про что отсутствует информация в имеющейся рекомендованной литературе и нормативной базе в области проектирования емкостных сооружений. **Практическая значимость.** Применение предложенных решений является полезным для корректного моделирования емкостей с гофрированными стенками при последующих расчетах и поиска новых направлений дальнейшего исследования.

**Ключевые слова:** силос; емкостное сооружение; стенка силоса; гофрированный профиль; экспериментальное исследование; деформации; компьютерное моделирование

## REFERENCES

1. Bannikov D.O. Eksperymentalni doslidzhennia statychnoi povedinky sypuchoho seredovyscha v yemnisnii konstruktsii [Experimental studies of static behavior of granular media in the capacitive structures]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 26, pp. 103-111.
2. Bibik M.V., Moroz P.S. Vyznachennia horyzontalnoho navantazhennia na vertykalni stiny yemnisnykh konstruktsii za riznymi normamy [Determination of the horizontal load on vertical walls of capacitive structures upon different standards]. *Zbirnyk naukovykh prats. Seriya: haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo* [Proc. Series: Industrial Engineering, Construction], 2014, issue 1 (40), pp. 166-174.
3. Hrytsak I. V «modi» metalevi sylosy (Metal silos are «In fashion»). *Ahrarnyi tyzhden. Ukraina – Agricultural week. Ukraine*, 2014, no. 42 (254). Available at: <http://a7d.com.ua/9655-v-mod-metalev-silos.html> (Accessed 05 July 2016).
4. Grishchuk Yu.S. *Osnovy nauchnykh issledovaniy* [Research writing and style]. Kharkov, NTU «KhPI» Publ., 2011. 196 p.
5. DBN V.2.2-8-98. *Pidpriemstva, budivli i sporudy po zberihanniu ta pererobtsi zerna* [Enterprises, buildings and structures for storage and processing of grain]. Kyiv, Derzhbud Ukrainy Publ., 1998. 39 p.
6. DSTU-N B EN 1991-4:2012. *Yevrokod 1. Dii na konstruktsii. Chastyna 4. Bunkery i rezervuary* [ISO-H B EN 1991-4: 2012. Eurocode 1. Actions on structures. Part 4: Silos and tanks]. Kyiv, Minrehionbud Ukrainy Publ., 2012. 150 p.
7. Kachurenko V.V., Bannikov D.O. *Konstruktivnyye resheniya stalnykh emkostey dlya sypuchikh materialov* [Constructive solutions steel tanks for bulk materials]. Dnepropetrovsk, Novaya ideologiya Publ., 2016. 168 p.
8. Kachurenko V.V., Bannikov D.O. Planuvannia ta provedennia doslidzhen z eksperymentalnoho vyvchennia dii sypuchykh materialiv na hofrovani stinky yemnisnykh konstruktsii [Planning and conducting research on the experimental study of bulk materials action on the corrugated walls in capacitive structures]. *Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Odesa State Academy of Construction and Architecture], 2016, issue 61, pp. 154-162.
9. Bibik M.V., Bibik V.M., Ulchenko R.M., Bibik I.O. Klasyfikatsiia avarii ta poshkodzhen stalevykh sylosiv [Classification of accidents and damages of steel silo]. *Zbirnyk naukovyz prats. Seriya: haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvovo* [Proc. Series: Industrial Engineering, Construction], 2014, issue 1 (40), pp. 175-183.
10. Korin L. *Vse, shcho vy ne znaly pro sylos* (Everything you have not known about silo). *Ahrobiznes Ukrainy – Agribusiness in Ukraine*, 2011, no. 4 (203). Available at: <http://www.agro-business.com.ua/mekhanizatsiia-apk/273-vse-scho-vy-ne-znaly-pro-sylos.html> (Accessed 05 July 2016).
11. Karpilovskiy V.S., Kriksunov E. Z., Malyarenko A.A., Perelmutter A.V., Perelmutter M.A. *SCAD Office. Vy-chislitelnyy kompleks SCAD* [The computing complex SCAD]. Moscow, SKAD SOFT Publ., 2011. 656 p.
12. Yagofarov A.Kh. *Sovershenstvovaniye konstruktsii, utochneniye rascheta i optimalnyye parametry stalnogo kruglogo bunkera*. Kand. Diss. [Improving the design, specification and calculation of optimal parameters of steel round hopper. Cand. Diss.]. Yekaterinburg, 2005. 146 p.
13. Yashchuk N.O. Suchasni skhovyscha dlia zerna, abo yak zekonomyty na elevatorykh zatratakh (Modern storage for grain, or how to save on elevator expenses). *Propozytsiia – The Offer*, 2016, no. 6. Available at: <http://propozitsiya.com/?page=146&itemid=3407> (Accessed 05 July 2016).
14. Carson J., Craig D. Silo design codes: Their limits and inconsistencies. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 102, pp. 647-656. doi:10.1016/j.proeng.2015.01.157.
15. Nemeth C., Brodniansky J. Silo with a Corrugated Sheet Wall. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 2013, Vol. 21, issue 3, pp. 19-30. doi: 10.2478/sjce-2013-0013.
16. Viljoen J. Select grain stores carefully to control costs. *Farming Ahead*, 2001, issue 119, pp. 44-45.

*Prof. V. V. Kuliabko, Sc. Tech. (Ukraine); Ph.D. in Engineering Sc. C. O. Kostyrsia, Senior Research Associate (Ukraine) recommended this article to be published*

Accessed: March 23, 2016

Received: June 17, 2016

## UDC 625.122

V. D. PETRENKO<sup>1</sup>, O. L. TIUTKIN<sup>2</sup>, I. O. SVIATKO<sup>3\*</sup><sup>1</sup>Dep. «Bridges and Tunnels», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 79, e-mail petrenko1937@mail.ru, ORCID 0000-0002-5902-6155<sup>2</sup>Dep. «Bridges and Tunnels», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 79, e-mail tutkin@mail.ru, ORCID 0000-0003-4921-4758<sup>3\*</sup>Dep. «Bridges and Tunnels», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St. 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 79, e-mail i-svjatko@yandex.ua, ORCID 0000-0002-7099-2637**ESTIMATION OF SUBGRADE STRENGTHENING INFLUENCE  
USING SOILCEMENT ELEMENTS**

**Purpose.** The aim of this work is to identify dependencies and options to strengthen the roadbed and a weak base by grouting piles. Analysis of software package SCAD to assess the effect of the selected option of strengthening the construction of spatial subgrade models. **Methodology.** In this paper the method of calculation of the soil mass in the software package SCAD is considered, which is a universal accounting system of finite-element analysis of structures and is focused on solving problems of designing buildings and structures rather complex structure. The finite element method is among the most modern and effective methods for the calculation of structures for various purposes. In the simulation, we get a complete picture of the stress-strain state of the study area, as well as the value of the limit load, rainfall, and so on. The spatial model based on the finite element volume, to better address the real characteristics of the soil mass, meets all the geometric characteristics of size and natural subgrade and the top structure the path that has been adopted in Ukraine. **Findings.** It was found that the most effective option to strengthen the roadbed, when applying grouting piles at the base of the subgrade and body, is to strengthen the five piles. At the same time there is even strengthen the soil mass at the level of 25 ... 30% of the entire depth. However, even with the strengthening of the only two piles at the base of the effect of the strengthening of 14.1%. Established equation is linear and describes the decrease in strain. Taking into account the results of the research can be concluded that the consolidation is proportional to the depth with any number of piles. The dependence of the strain on the number of piles adheres to a polynomial function. Strengthening the bases of the subgrade and body depth also occurs in proportion with any number of piles. **Originality.** Design scheme generation algorithm for the calculation of the subgrade on a weak basis by finite element method was determined. The selection of strength characteristics of soils and the design parameters for use during the numerical simulation was completed. Load process simulation of the system by rolling stock was grounded. **Practical value.** Analysis of stress-strain state of «weak base-subgrade» allows you to see the basic laws work the soil and take the necessary measures to enhance the cross-section profile of jet-grouting elements.

**Keywords:** subgrade; weak base; soil cement; stress-deformed state

**Introduction**

The main priority of rail transport is to provide of goods and passengers safety.

All facilities should be designed so as to correspond to its purpose, to be stable and reliable. Design of bases is a complex task that takes into account engineering and geological conditions as well as the design and performance properties of the structure.

Under the influence of the load from rolling stock and own weight of permanent way the soils deformed, and its deformation is greater than the greater tension in the soil. Deformation of soils bring to setting of structure. The tensions should

not exceed the limits in order to be secured conditions of stability and safety of permanent way [1, 4, 10].

Breach of the foundation stability displace in the form of displacement of natural soil mass, bringing to injuries or disturbance of the roadbed, such as soil slips, dips and more.

Experience of designing and performance of track structure showed that over time should take some measures to improve the characteristics of the soil mass to be able to the follow normal performance of the roadbed. [5, 3, 13]

Soilcement elements that are widely used abroad, as well as construction of industrial and civil objects for its purpose, can be used for the

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

strengthening of transport facilities, in particular at strengthening the roadbed as well as weak bases.

### Purpose

The aim of this work is to identify dependencies and parameters of subgrade strengthening and weak base using soilcement piles. Analyses of using of SCAD software system came for assessing of impact choose variant of strengthening for structure of roadbed spatial models.

### Methodology

The most of appropriate and promising method for assessment of roadbed stress-strain state is modeling the spatial models using finite element method. In this paper considers the method of calculation of soil mass by software complex SCAD, which is a universal calculation system of finite-element analysis of structures and orientate on solution the tasks of designing buildings and constructions rather complex structure. The method of finite elements it goes to the most modern and effective methods for the calculation of structures for various purposes. During the simulation we get a complete picture of the stress-strain state of the study area and the limit value loading, sedimentation, etc.

The spatial model based on volumetric finite elements to better take into account the real charac-

teristics of the soil mass meets all the geometric characteristics and natural size of subgrade and permanent way, which was adopted in Ukraine.

Deformation characteristics, those taken in the model correspond to the values which have been obtained in the study of subgrade soil [6, 7, 14].

At the time modeling applied so restrictions (boundary conditions):

- on the model bottom impose a ban on movements in the direction of the three axis – X, Y, Z;
- lateral facets of base have a ban on movements over the axis X and Y;
- diametrical sides of model – a ban of movements over axis Y (plane deformations condition). [8, 9, 12]

Top of model and also embankment slopes have no restrictions – free from boundary conditions.

The thickness of the computational model (on the axis Y) adopted 1.15 m, which corresponds to the width of two standard sleepers and two distances between sleepers with its epures 1740 pieces/km. The model is symmetrical on thickness relatively of axis X. Inclination of the railway slope make 1: 1.5. General view of the roadbed plan is shown in Figure 1.

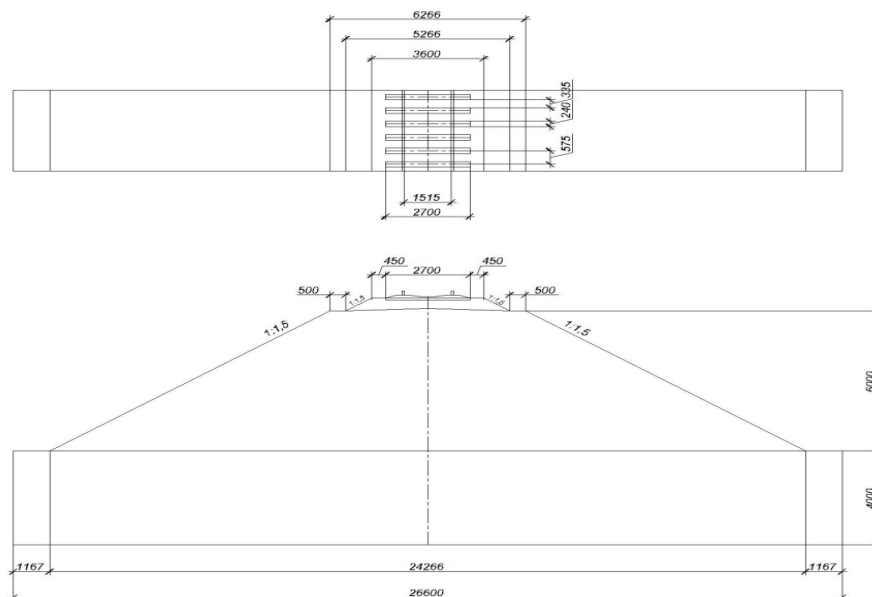


Fig. 1. General view of the roadbed plan with permanent way

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

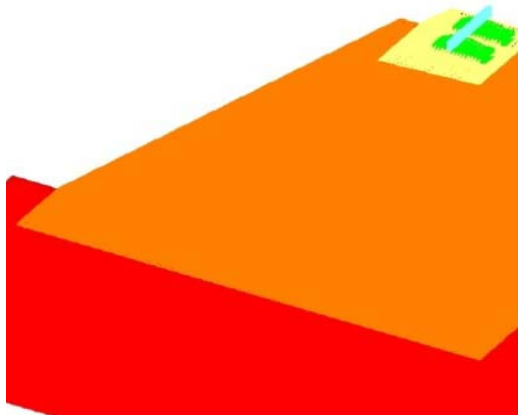


Fig. 2. The calculation model in program complex SCAD

All calculations performed by the multifrontal method of expansion of rigidity matrix with automatic optimization of the tape width, as this method is the most progressive when working with matrixes, which used to program complex SCAD [2, 11, 12, 15].

After the complete linear calculation values of deformations relatively axis Z and axis X were obtained. Precision of matrix expansion is  $1 \times 10^{12}$ .

General view of model in program complex SCAD shown in Figure 2.

In this paper have considered the following variants of strengthening: placement of soilcement piles with a diameter of 0.5 m only in the base of roadbed and in base and through the body of roadbed. Adopted by number of piles are two, three and five, respectively, for each variant.

In all cases soilcement piles were disposed symmetrically about the axis of the track.

During the calculations of strengthening variations the length of piles at the base is 3 m long and the length of piles in the base and in the body of embankment – 9 meters. The distance from the lower end of the pile to the bottom of the calculation model is 1.0 m.

### Findings

After carry out of the control calculation unfortified subgrade have been received the maximum deformations along the axis Z (Figure 3), that form 14.21 mm, and along the axis X (Figure 4) – 2.45 mm. At the level of the transition from the body of the embankment to the base subgrade is a slight curvature in view of change point with characteristic modification of direction deformation behavior.

It should also be noted that in the area of crossing from base to embankment remain about 50% of total deformations, which is 7 mm.

According to the results obtained with the strengthening by two soilcement piles only in the base, the overall deformation on the axis Z in the level of rail head formed 13.4 mm (Figure 5.), that is 5.7% less than the control calculation. Deformations of model in which additional piles were in the body of the embankment totaled 12.20 mm, that is 14,1% less deformations of unfortified models.

By the level of foot sleeper the deformations on the axis Z have been reduced in the case of strengthening of base on 4.0% and in the case of strengthening the base with the body of the embankment – on 14.0%.

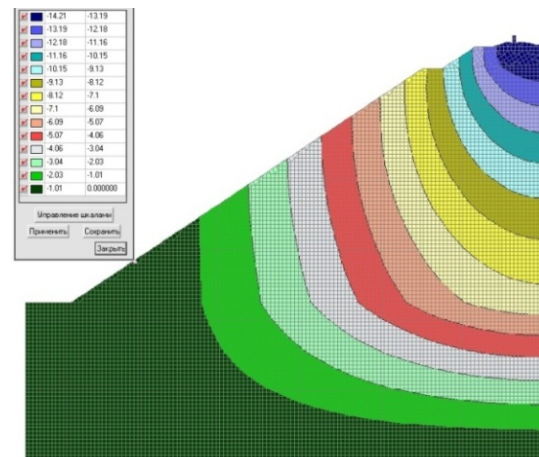


Fig. 3. The calculation without strengthening by soilcement piles. Deformation on the axis Z

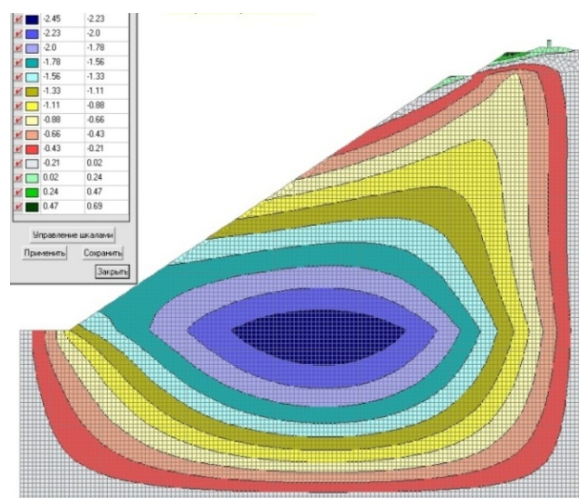


Fig. 4. The calculation without strengthening soilcement piles. Deformation on the axis X



## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

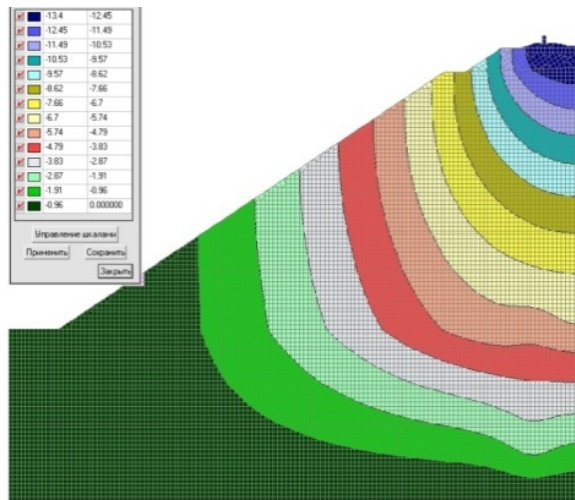


Fig. 5. Deformation on the axis Z.  
The calculation of two piles in base

In addition, the model the characteristic changes of izofields deformations on the places of piles existing. It should be noted that in the area of crossing between weak base and embankment total deformation decreased on average by 16%.

In strengthening of roadbed by three soilcement piles, so be observed decrease of deformation on the axis Z. Thus the effect of the pile using only in base and in the base and body of embankment significantly different. In the first case, reducing of deformations by the level of rail head happened on 8.2%, while in the second case – almost three times more – 20.6%.

However, in the plane of crossing between the base and the body of embankment exist several another situation. On the contrary, the strengthening only base reduce the deformations was about 27.3%, whereas the strengthening through the body of embankments exists of decrease by only 23.0%.

The calculation results in the strengthening by five soilcement piles testify about the following. The maximum deformation in the level of rail head totaled 12.62 mm and 10.57 mm at strengthening only bases and base with body of embankment respectively, representing a decrease of 11.2% and 25.6%. However, on the boundary of crossing from the base to the body of the embankments the effect from strengthening is the same reaching 29.1 ... 29.5% with comparison the control calculation. Also on the present boundary become more pronounced the change of isolines (Figure 6).

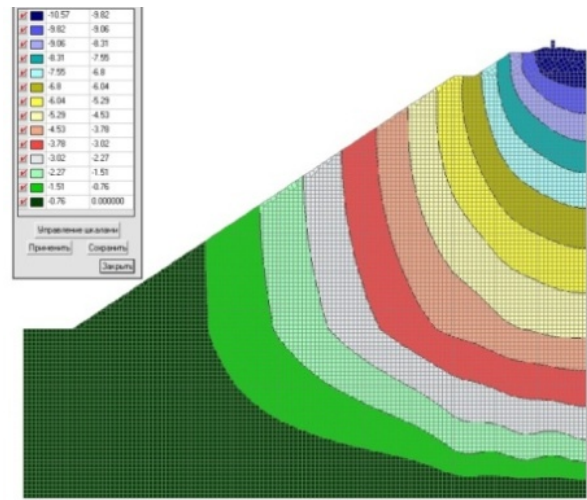


Fig. 6. Deformation on the axis Z.  
The calculation the five piles at the base and body of embankments

### Originality and practical value

The algorithm of forming design scheme for calculating of the embankment on the weak base by the finite element method has been determined. The selection of soil strength characteristics and the calculation parameters for use in numerical modeling has been done. The modeling of loading system process by rolling stock has been grounded.

Analysis of stress-strain state of the system «weak base – roadbed» permit to see the basic regularities of soil work and use of embankment cross-section profile strengthening by soilcement elements.

The method of subgrade on weak base modeling that reflects with their work under loading by own weight and rolling stock has been proposed.

### Conclusions

The most effective variant at the arrangement of soilcement piles at the base and in the body of embankment is strengthening its by five piles. Thus there is a uniform soil mass in the level 25 ... 30% on the all depth. Reducing of deformations is linear and describe by the equation  $y = 11.906 - 0.4867h$ , where  $h$  is the depth of plane base from top plane of railbed. However, even with the strengthening only two piles in the base effect from strengthening is 14.1%.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

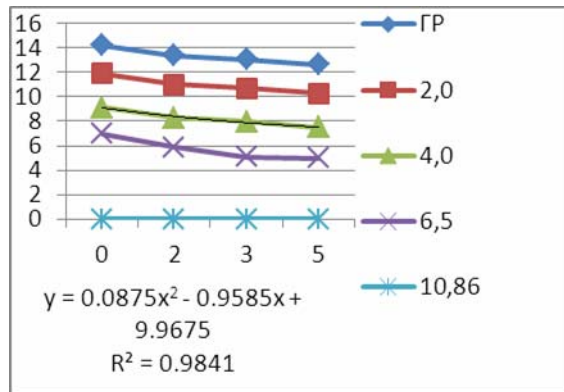


Figure 7. Graph of deformations  $Z$  (mm) in strengthening only base of embankment depending on number piles in base

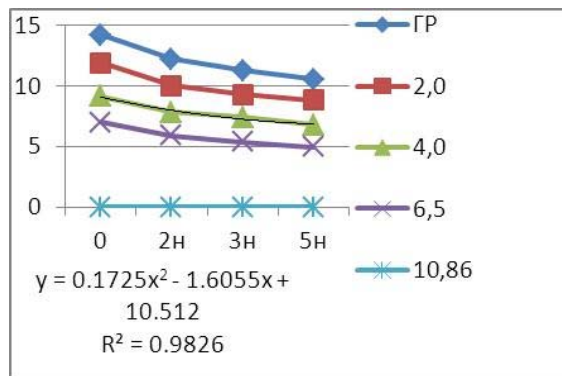


Fig. 8. . Graph of deformations  $Z$  (mm) in strengthening of base and of the body of embankment depending on number piles in base

Take into consideration these graphs possible to draw a conclusion that the strengthening is proportional to the depth at any number of piles. The dependence of the deformations from number of piles follows polynomial functions and describes by the equation  $y = 0,0875h^2 - 0,9585h + 9,9675$ . The strengthening of base and of embankment body at the depth also happens proportionately for any number of piles. The dependence of the deformations on the number of piles follows polynomial functions and describes by the equation  $y = 0,1725h^2 - 1,6055h + 10,512$ .

## LIST OF REFERENCE LINKS

1. Державна цільова програма реформування залізничного транспорту на 2010–2019 роки [Electronic resource] : законопроект України від 16 груд. 2009 р. № 1390. – Available at: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1390>. – Title from the screen. – Accessed : 13.09.2016.
2. ДБН В.2.1-10-2009. Зміна № 1. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування. – На замін СНИП 2.02.03-85 ; чинні з 2011–07–01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 126 с.
3. Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України : ЦП-0138./ Е. І. Даніленко, В. О. Яковлев, А. М. Орловський [та ін.]. – Київ : НКТБ колійного гос-ва Укрзалізниці, 2006. – 56 с.
4. Кожушко, В. П. Основи і фундаменти : підруч. для вузів : в 2-х ч. – Харків : ХНАДУ, 2002. – Ч. 2. – 492 с.
5. Линченко, Ю. П. Моделирование свайного основания здания с применением интегральных элементов / Ю. П. Линченко, А. Е. Шуст // Стр-во и техногенная безопасность : сб. науч. тр. / Нац. акад. природоохран. и курортного стр-ва. – Симферополь, 2010. – Вып. 33–34. – С. 176–182.
6. Литовченко, П. А. Численное моделирование взаимодействия буронабивной сваи с локальным закреплением в грунте и окружающего ее грунтового массива / П. А. Литовченко // Стр-во, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднепров. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2013. – Вып. 69. – С. 322–327.
7. Новые возможности системы ГРУНТ для определения параметров жесткости грунтового и свайного оснований / Д. А. Городецкий, В. П. Максименко, Д. В. Медведенко, Е. Б. Стрелец-Стрелецкий // Стр-во, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднепров. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – 2013. – Вып. 69. – С. 155–160.
8. Петренко, В. Д. Порівняльний аналіз методів укріплення земляного полотна / В. Д. Петренко, І. О. Святко, Д. О. Ямпольський // Стр-во, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднепров. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2013. – Вып. 69. – С. 369–373.
9. Петренко, В. Д. Порівняльний аналіз розрахункових моделей залізничного земляного полотна / В. Д. Петренко, Д. О. Ямпольський, І. О. Святко // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 4 (46). – Р. 56–62. doi: 10.15802/stp-2013/16619.
10. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість : ЦП-0117 : затв. наказом Укрзалізниці від 13.12.2004 р. № 960-ЦЗ. – Київ : ЦП УЗ, 2004. – 69 с.
11. Строкова, Л. А. Применение метода конечных элементов в механике грунтов : учеб. пособие /

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

- Л. А. Строкова. – Томск : Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2010. – 143 с.
12. Тюткин, А. Л. Сравнительный анализ конечных-элементных моделей свайного фундамента при взаимодействии с основанием / А. Л. Тюткин, А. В. Гулак // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 32. – С. 122–126.
  13. Horvát F. Evaluation of railway track geometry stabilisation effect of geogrid layers under ballast on the basis of laboratory multi-level shear box tests / F. Horvát, Sz. Fisher, Z. Major // Acta Technica Jaurinensis. – 2013. – № 2. – P. 21–44.
  14. Hogue, S. Building Simulation Tools for Retrofitting Residential Structures / S. Hogue // Energy Engineering. – 2012. – Vol. 109. – Iss. 3. – P. 53–74.
  15. Ziaie-Moay, R. Effective parameters on modulus of subgrade reaction in clayey soils / R. Ziaie-Moay, M. Janbaz // J. of Applied Sciences. – 2009. – Vol. 9. – Iss. 22. – P. 4006–4012. doi: 10.3923/jas.2009.4006.4012.

В. Д. ПЕТРЕНКО<sup>1</sup>, О. Л. ТЮТКІН<sup>2</sup>, І. О. СВЯТКО<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Мости та тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 79, ел. пошта petrenko1937@mail.ru, ORCID 0000-0002-5902-6155

<sup>2</sup>Каф. «Мости та тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 79, ел. пошта tutkin@mail.ru, ORCID 0000-0003-4921-4758

<sup>3\*</sup>Каф. «Мости та тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 79, ел. пошта i-svjatko@yandex.ua, ORCID 0000-0002-7099-2637

## ОЦІНКА ВПЛИВУ УКРІПЛЕННЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ҐРУНТОЦЕМЕНТНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

**Мета.** В роботі передбачається виявити залежності та параметри укріплення земляного полотна і слабкої основи за допомогою ґрунтоцементних паль. Також потрібно зробити аналіз використання програмного комплексу SCAD для оцінки впливу обраного варіанту укріплення при побудові просторової моделі земляного полотна. **Методика.** В даній роботі розглядається методика розрахунку ґрунтового масиву у програмному комплексі SCAD, який є універсальною розрахунковою системою кінцево-елементного аналізу конструкцій та орієнтований на вирішення завдань проектування будівель і споруд досить складної структури. Метод скінченних елементів відноситься до найбільш сучасних і ефективних методів для розрахунку споруд різного призначення. Під час моделювання отримуємо повну картину напружено-деформованого стану досліджуваної області, а також значення граничного навантаження, осідання тощо. Просторова модель на основі об'ємних кінцевих елементів, для кращого врахування реальних характеристик ґрунтового масиву, відповідає всім геометричним характеристикам і натурним розмірам земляного полотна та верхньої будови колії, яка прийнята на території України. **Результати.** Встановлено, що найефективнішим варіантом укріплення земляного полотна, при влаштуванні ґрунтоцементних паль в основі й тілі насипу, є укріплення п'ятьма палями. При цьому спостерігається рівномірне укріплення ґрунтового масиву на рівні 25...30 % по всій глибині. Проте, навіть із укріпленням лише двома палями в основі, ефект від укріплення становить 14,1 %. Встановлено рівняння, яке має лінійний характер і описує зменшення деформацій. Приймаючи до уваги результати досліджень, можна зробити висновки, що укріплення по глибині відбувається пропорційно при будь-якій кількості паль. Залежність деформацій від кількості паль дотримується поліноміальної функції. Укріплення основи і тіла насипу по глибині також відбувається пропорційно при будь-якій кількості паль. **Наукова новизна.** Авторами визначено алгоритм формування розрахункової схеми для розрахунку насипу на слабкій основі методом скінченних елементів. Виконано підбір міцнісних характеристик ґрунтів та розрахункових параметрів для застосування під час чисельного моделювання. Обґрунтовано моделювання процесу навантаження системи рухомим складом. **Практична значимість.** Аналіз напружено-деформованого стану системи «слабка основа-земляне полотно» дозволяє побачити основні закономірності роботи ґрунту і вжити необхідні заходи для підсилення поперечного профілю ґрунтоцементними елементами.

**Ключові слова:** земляне полотно; слабка основа; ґрунтоцементні елементи; напружено-деформований стан



## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

В. Д. ПЕТРЕНКО<sup>1</sup>, А. Л. ТЮТКИН<sup>2</sup>, И. А. СВЯТКО<sup>3\*</sup><sup>1</sup>Каф. «Мосты и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 79, эл. почта petrenko1937@mail.ru, ORCID 0000-0002-5902-6155<sup>2</sup>Каф. «Мосты и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 79, эл. почта tutkin@mail.ru, ORCID 0000-0003-4921-4758<sup>3\*</sup>Каф. «Мосты и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 79, эл. почта i-svjatko@yandex.ua, ORCID 0000-0002-7099-2637**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УКРЕПЛЕНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА  
ГРУНТОЦЕМЕНТНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

**Цель.** В работе предполагается выявить зависимости и параметры укрепления земляного полотна и слабого основания с помощью грунтоцементных свай. Также необходимо сделать анализ программного комплекса SCAD для оценки влияния выбранного варианта укрепления при построении пространственной модели земляного полотна. **Методика.** В данной работе рассматривается методика расчета грунтового массива в программном комплексе SCAD, который является универсальной расчетной системой конечно-элементного анализа конструкций и ориентирован на решение задач проектирования зданий и сооружений достаточно сложной структуры. Метод конечных элементов относится к наиболее современным и эффективным методам для расчета сооружений различного назначения. При моделировании получаем полную картину напряженно-деформированного состояния исследуемой области, а также значение предельной нагрузки, осадки и прочее. Пространственная модель на основе объемных конечных элементов, для лучшего учета реальных характеристик грунтового массива, соответствует всем геометрическим характеристикам и натурным размерам земляного полотна и верхнего строения пути, которые приняты на территории Украины. **Результаты.** Установлено, что наиболее эффективным вариантом укрепления земляного полотна, при устройстве грунтоцементных свай в основании и теле насыпи, является укрепление пятью сваями. При этом наблюдается равномерное укрепление грунтового массива на уровне 25...30 % по всей глубине. Однако, даже с укреплением только двумя сваями в основе, эффект от укрепления составляет 14,1 %. Найдено уравнивание, которое имеет линейный характер и описывает уменьшение деформаций. Принимая во внимание результаты исследований, можно сделать выводы, что укрепление по глубине происходит пропорционально при любом количестве свай. Зависимость деформаций от количества свай придерживается полиномиальной функции. Укрепление основы и тела насыпи по глубине также происходит пропорционально при любом количестве свай. **Научная новизна.** Авторами определен алгоритм формирования расчетной схемы для расчета насыпи на слабом основании методом конечных элементов. Выполнен подбор прочностных характеристик грунтов и расчетных параметров для применения численного моделирования. Обосновано моделирование процесса нагрузки системы подвижным составом. **Практическая значимость.** Анализ напряженно-деформированного состояния системы «слабое основание-земляное полотно» позволяет увидеть основные закономерности работы грунта и принять необходимые меры для усиления поперечного профиля грунтоцементными элементами.

**Ключевые слова:** земляное полотно; слабое основание; грунтоцементные элементы; напряженно-деформированное состояние

## REFERENCES

1. *Derzhavna tsilova prohrama reformuvannia zaliznychnoho transportu na 2010–2019 roky: zakonoproekt Ukrainy vid 16 hrudnia 2009 r. № 1390* (The state target program of reforming the railway transport in 2010–2019 years). Available at: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1390> (Accessed 13 September 2016).
2. *DBN V.2.1-10-2009. Zmina № 1. Osnovy ta fundamenti sporud. Osnovni polozhennia proektuvannia* [State Construction Standart V.2.1-10-2009. Change No. 1. Bases and foundations of buildings. General of the design.]. Kyiv, Minrehionbud Ukrainy Publ., 2011. 126 p.
3. Danilenko E.I., Yakovlev V.O., Orlovskiy A.M. *Instruktsiia z ulashtuvannia ta utrymannia kolii zaliznyts Ukrainy: TsP-0138* [Instructions for design and track maintenance of railways in Ukraine]. Kyiv, NKTB koliinoho hospodarstva Ukrzaliznytsi Publ., 2006. 56 p.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

4. Kozhushko V.P. *Osnovy i fundamenti* [Bases and foundations]. Kharkiv, KhNAHU Publ., 2002. Part 2. 492 p.
5. Linchenko Yu.P., Shust A.Ye. Modelirovaniye svaynogo osnovaniya zdaniya s primeneniyyem integralnykh elementov [Pile foundation simulation of the building with the integrated elements usage]. *Sbornik nauchnykh trudov «Stroitelstvo i tekhnogennaya bezopasnost»* [Proc. «Construction and technogenic safety»], 2010, issue 33-34, pp. 176-182.
6. Litovchenko P.A. Chislennoye modelirovaniye vzaimodeystviya buroinektsionnoy svai s lokalnym zakrepleniyyem v grunte i okruzhayushchego yeye gruntovogo massiva [Numerical modeling the interaction of inclined pile with local fixing in the ground and its surrounding soil mass]. *Sbornik nauchnykh trudov «Stroitelstvo, materialovedeniye, mashinostroeniye»* [Proc. «Construction, materials science, mechanical engineering»], 2013, issue 69, pp. 322-327.
7. Gorodetskiy D.A., Maksimenko V.P., Medvedenko D.V., Strelets-Streletskiy Ye.B. Novyye vozmozhnosti sistemy GRUNT dlya opredeleniya parametrov zhestkosti gruntovogo i svaynogo osnovaniy [New opportunities of system GRUNT for determining stiffness parameters of subgrades and pile foundations]. *Sbornik nauchnykh trudov «Stroitelstvo, materialovedeniye, mashinostroeniye»* [Proc. «Construction, materials science, mechanical engineering»], 2013, issue 69, pp. 155-160.
8. Petrenko V.D., Sviatko I.O., Yampolskiy D.O. Porivnialnyi analiz metodiv ukriplennia zemlianoho polotna [Comparative analysis of methods for subgrade strengthening]. *Sbornik nauchnykh trudov «Stroitelstvo, materialovedeniye, mashinostroeniye»* [Proc. «Construction, materials science, mechanical engineering»], 2013, issue 69, pp. 369-373.
9. Petrenko V.D., Yampolskiy D.O., Sviatko I.O. Porivnialnyi analiz rozrakhunkovykh modelei zaliznychnoho zemlianoho polotna [Comparative analysis of calculation models of railway subgrade]. *Nauka ta prohres transport – Science and Transport Progress*, 2013, no. 4 (46), pp. 56-62. doi: 10.15802/stp2013/16619.
10. *Pravyla rozrakhunkiv zaliznychnoi kolii na mitsnist i stiikist: TsP-0117. Nakaz Ukrzaliznytsi vid 13.12.2004 r. № 960-TsZ* [Calculations of railway track for strength and stability. Ukrzaliznytsia Order No. 960-TsZ]. Kyiv, TsP UZ Publ., 2004. 69 p.
11. Strokova L.A. *Primeneniye metoda konechnykh elementov v mekhanike gruntov* [Application of finite element method in soil mechanics]. Tomsk, Tomskiy politekhnicheskii universitet Publ., 2010. 143 p.
12. Tyutkin A.L., Gulak A.V. Sravnitelnyy analiz konechno-elementnykh modeley svaynogo fundamenta pri vzaimodeystvii s osnovaniyem [Comparative analysis of finite element models of pile foundation in cooperation with base]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 32, pp. 122-126.
13. Horvát F., Fisher Sz., Major Z. Evaluation of railway track geometry stabilisation effect of geogrid layers under ballast on the basis of laboratory multi-level shear box tests. *Acta Technica Jaurinensis*, 2013, no. 2, pp. 21-44.
14. Hogue S. Building Simulation Tools for Retrofitting Residential Structures. *Energy Engineering*, 2012, vol. 109, issue 3, pp. 53-74.
15. Ziaie-Moay R., Janbazi M. Effective parameters on modulus of subgrade reaction in clayey soils. *Journal of Applied Sciences*, 2009, vol. 9, issue 22, pp. 4006-4012. doi: 10.3923/jas.2009.4006.4012.

*Prof. N. B. Kurhan Dr. Sc. (Tech.) (Ukraine); Prof. A. V. Slodyankin Dr. Sc. (Tech.) (Ukraine) recommended this article to be published*

Received: March 22, 2016

Accepted: July 20, 2016

## БЕТОН НА ОСНОВІ ДИСПЕРСНО МОДИФІКОВАНОЇ ЦЕМЕНТНОЇ СИСТЕМИ

**Мета.** В науковій статті потрібно розглянути визначення типів зв'язків, що утворюються в модифікованій цементній матриці бетону, та оцінку якості цих зв'язків у неоднорідному матеріалі для визначення геометричних і фізичних співвідношень між структурою модифікаторів і цементної матриці. **Методика.** Для досягнення поставленої мети проведені дослідження мікроструктури дисперсно модифікованої цементної матриці бетону та механізму структуроутворення модифікованої цементної системи бетону природного тверднення. Визначені методи надійної оцінки міцності бетону. **Результати.** Автором запропонована модель просторової структури цементної матриці бетону, модифікованої шляхом дисперсного армування кристалогідратами. Вихідним об'єктом дослідження є сукупність елементарних об'ємів (чарунок) цементної матриці та система просторового розподілу в цих об'ємах армуючих кристалогідратів. Встановлено, що найбільш небезпечні дефекти у вигляді тріщин в об'ємі бетону при твердненні формуються в результаті виникнення внутрішніх напружень, головним чином, у зоні контакту цементна матриця – заповнювач, або в області, що межує з найбільш крупними порами бетону. **Наукова новизна.** Встановлений механізм розвитку процесу формування початкової міцності та жорсткості модифікованої цементної матриці за рахунок швидкого росту кристалогідратів у просторі між частинками дисперсного армуючого модифікатора. Оскільки вільному росту кристалів перешкоджає брак простору, кристали взаємно проростають, утворюючи щільну структуру, яка обумовлює зростання міцності. **Практична значимість.** Дисперсне модифікування цементної матриці дозволяє одержати довговічні бетони спеціального призначення з проектними експлуатаційними властивостями. Розроблена технологія дисперсного модифікування в'язучої речовини, встановлені особливості механізму структуроутворення модифікованої цементної системи, а також використання принципу конгруентності комплексу технологічних впливів фізико-хімічним процесам гідратації клінкерних мінералів дозволили розробити технологічні основи бетонів спеціального призначення.

*Ключові слова:* цементна матриця; дисперсне модифікування; структуроутворення; бетон

### Вступ

Відповідно до відомих уявлень бетон розглядають як гетерогенне середовище з «уродженими дефектами», які містяться у ньому з явно вираженою неоднорідною і неупорядкованою структурою з порушеннями суцільності у вигляді неоднорідного порового простору і можливих тріщин усадки. На поведінку бетону під час навантаження визначально впливають неоднорідності, що належать до верхнього рівня структури матеріалу. Верхній рівень структури (макроструктура) визначає значною мірою кінетику формування і розвитку критичних тріщин, які відповідальні за руйнування матеріалу під час експлуатації [4, 7]. У зв'язку з цим можна вважати, що ефективним рівням дисперсного модифікування цементної матриці повинні відповідати такі параметри її структури, за яких могло б найбільшою мірою

проявлятися гальмування (блокування) зростання тріщин, що формуються на рівні макроструктури бетону.

Для стереологічного уявлення структурної моделі модифікованої цементної матриці бетону введемо поняття – елементарний об'єм (елементарна чарунка). Будемо вважати, що елементарним є такий мінімальний об'єм цементної матриці бетону, який має усі основні властивості (у тому числі щільність) і містить усі рівні структури матеріалу. При цьому в об'ємі кожної елементарної чарунки виділимо неоднорідності («дефекти»), відповідні верхньому рівню структури бетону, а «дефекти» нижніх рівнів, які відносять до мезо-, мікро- і субмікроструктури, будемо вважати розподіленими по всьому об'єму, тобто матеріал чарунок між «дефектами» макроструктури подаємо квазіоднорідним.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

**Мета**

Визначення типів зв'язків, що утворюються у модифікованій цементній матриці бетону, та оцінка якості цих зв'язків у неоднорідному матеріалі для визначення геометричних і фізичних співвідношень між структурою модифікаторів і цементної матриці.

**Методика**

Для досягнення поставленої мети виконані дослідження мікроструктури дисперсно модифікованої цементної матриці бетону, механізму структуроутворення модифікованої цементної системи бетону природного тверднення; визначені методи надійної оцінки міцності бетону.

**Результати**

Моделльні дослідження структури бетонів виконувалися багатьма авторами [1, 5, 6]. Розвиваються різні уявлення, що моделюють структуру бетону у вигляді капілярно-пористого середовища, пронизаного паралельними циліндричними каналами, або системи послідовно розташованих капілярів різної довжини і різного діаметра, а також у вигляді простору, заповненого однаковими кулями з кубічною або гексагональною упаковкою, або такою, що містить контактуючі між собою октаедри зі зрізаними вершинами [3, 8, 9, 12].

Відомо модельне відображення [10], що подає бетон у вигляді квазіоднорідного вихідного середовища, пронизаного системою дефектів (тріщинами, порами, капілярами). Тріщини поділяють бетон на ізольовані об'єми, умовно названі зернами, причому переходи між зернами, прийняті умовно сферичної форми, утворюють «зв'язки», які формують у просторі ортогональну систему, що сприймає напруження розтягу у бетоні [2, 11]. Така модель дозволяє встановити закономірності крихкого і псевдокрихкого руйнування бетону з урахуванням впливу на ці процеси масштабного фактора [14, 15]. Масштабний фактор набуває істотного значення при моделюванні структури бетону на модифікованій цементній системі [13].

Викликає інтерес модель просторової структури цементної матриці бетону, модифікованої шляхом дисперсного армування кристалогідратами. При цьому, напевно, слід йти

не від геометричного «образу» просторової моделі до структури модифікування, а від аналізу структури цементної матриці до геометричного «образу» моделі модифікованого матеріалу.

У запропонованій моделі структури модифікованого матеріалу вихідним об'єктом дослідження є сукупність елементарних об'ємів (чарунок) цементної матриці та система просторового розподілу у цих об'ємах армуючих кристалогідратів. Вочевидь, найбільш небезпечні дефекти у вигляді тріщин в об'ємі бетону при його твердненні формуються у результаті виникнення внутрішніх напружень, головним чином, у зоні контакту цементна матриця – заповнювач або в області, що межує з найбільш крупними порами бетону. Можна вважати, що контактні тріщини при їх виникненні мають розміри, співмірні з розмірами макроскопічних неоднорідностей цементної матриці. На межі з неоднорідностями при силових впливах формується, як правило, найбільш інтенсивне поле напружень, здатне до нестійкого поширення тріщин в об'ємі бетону від одного неоднорідного включення до іншого. Завдання полягає у блокуванні зростання, перш за все, контактних тріщин.

Припустимо, що неоднорідності у бетоні знаходяться практично в ідеальному безладі. У такій системі з достатньо великою кількістю неоднорідних включень макроскопічний безлад повинен задовольняти вимогам постійної щільності розподілу, тобто можна уявити, що кількість неоднорідностей зерен заповнювача, пор, що приходяться на кожен елементарну одиницю об'єму цементної матриці бетону, буде приблизно однаковою і, отже, будь-який обмежений об'єм бетону, що містить певну кількість макроскопічних неоднорідностей, можна без небезпечних наслідків замінити аналогічним об'ємом, узятим з будь-якої іншої частини зразка. Така ситуація дозволяє надати системі з неупорядкованим ансамблем неоднорідностей певну регулярність у вигляді моделі з елементами структури, що мають статистичну однорідність.

Якщо уявити макроскопічні неоднорідності бетону у вигляді куль, що хаотично, але однорідно заповнюють простір, і провести вектори, що з'єднують центр кожної неоднорідності з центрами найближчих сусідів, а потім через середини векторів перпендикулярно їм провести пло-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

щини, то об'єми, обмежені цими площинами, будуть являти собою деяку багатогранну фігуру на кшталт поліедра, характерного для систем з невпорядкованою організацією структури.

Отриманий багатогранник подамо у вигляді елементарної чарунки макроструктури бетону. У реальних бетонах (навіть у одному складі) не можна отримати абсолютно ідентичні один одному елементарні чарунки макрооб'ємів. Але, оскільки у кожному з цих об'ємів у відповідності з прийнятим допущенням є макроскопічна неоднорідність, отримана елементарна чарунка не може істотно відрізнитися від симетричних і конгруентних об'ємних фігур, усереднених у реальному матеріалі.

Можна уявити різні варіанти геометричного відображення елементарних чарунок структури бетону і їх просторового розподілу в об'ємі матеріалу: від найбільш щільних упаковок, наприклад, у вигляді ромбічних додекаєдрів, до найпростіших просторових решіток з кубічним розподілом. Характер просторового розподілу і вид елементарних чарунок визначають важливі геометричні параметри структури, зокрема фіксують відстані між неоднорідностями у перетинах матеріалу, що моделюється. Якщо відомі діаметри макроскопічних неоднорідностей, можна визначити кількість матеріалу, що припадає на кожну неоднорідність. Ця кількість буде відповідати усередненій величині об'єму елементарної чарунки макроскопічної неоднорідності, об'ємному вмісту неоднорідностей на рівні макроструктури бетону та діаметра неоднорідних включень.

Також можна прогнозувати різні варіанти розподілу модифікуючих армуючих кристалогідратів в об'ємі елементарних чарунок цементної матриці.

Введемо положення про необхідність чергування з певним кроком макроскопічних неоднорідностей і геометричних центрів модифікуючих кристалогідратів по найкоротших з можливих відстаней між ними, тому що найбільш ймовірно поширення тріщини від однієї неоднорідності до іншої має протікати в напрямку найменшої відстані між ними, що відповідає мінімуму енергетичних витрат, необхідних у цілому для руйнування матеріалу. Цей період чергування (трансляції) визначає у значній мірі рівень дисперсності модифікуючих кристалогідратів.

Ґрунтуючись на цьому положенні, розмістимо центри кристалогідратів у центрі кожної грані багатогранних фігур, що обмежують об'єми елементарних чарунок бетону. Лінії (вектори), що з'єднують центр кожної неоднорідності з центрами найближчих сусідів, проходять через центр кожного з кристалогідратів. Якщо замінити багатогранник елементарної чарунки сукупністю ліній (векторів), що виходять з центру кожної неоднорідності до відповідного перетину з центрами кристалогідратів, отримаємо просторове відображення моделі у вигляді полярного комплексу. Рівень дисперсності модифікуючого армування кристалогідрату цементної матриці бетону у запропонованій моделі відповідає рівню дисперсного розподілу макроскопічних неоднорідностей в об'ємі матеріалу. Подібна модель розташування центрів кристалогідратів оптимальна з точки зору створення перешкод для розвитку тріщин між неоднорідностями в об'ємі бетону.

Мікроструктура новоутворень дисперсно модифікованої цементної системи досліджувалася на зразках, приготовлених з теоретично розрахованою кількістю води, необхідною для проектного ступеня гідратації. Спостереження за допомогою скануючого електронного мікроскопа виконані на поверхнях зламів, отриманих при розриві висушених зразків, покритих шаром сплаву, що складається з 60 % Au і 40 % Pd. Результати досліджень дозволили висунути таку гіпотезу розвитку мікроструктури модифікованої цементної системи. Кристалогідрати швидко ростуть у просторі між частинками дисперсного армуючого модифікатора. Механічне зчеплення, що виникає в результаті цього, зумовлює розвиток початкової міцності і жорсткості. Оскільки вільному росту кристалів перешкоджає брак простору, кристали взаємно проростають, утворюючи щільну структуру, яка зумовлює зростання міцності. Утворення голчастих кристалів не розглядається як безумовна вимога для затвердіння.

Міцність залежить від утворення продуктів реакції, що заповнюють вільний простір. Це призводить до формування щільної мікроструктури з мінімальною пористістю. Вочевидь, сприяє цьому характерне зростання голчастих і ниткоподібних кристалів. Наростання міцності модифікованої цементної системи наведено на рис. 1.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

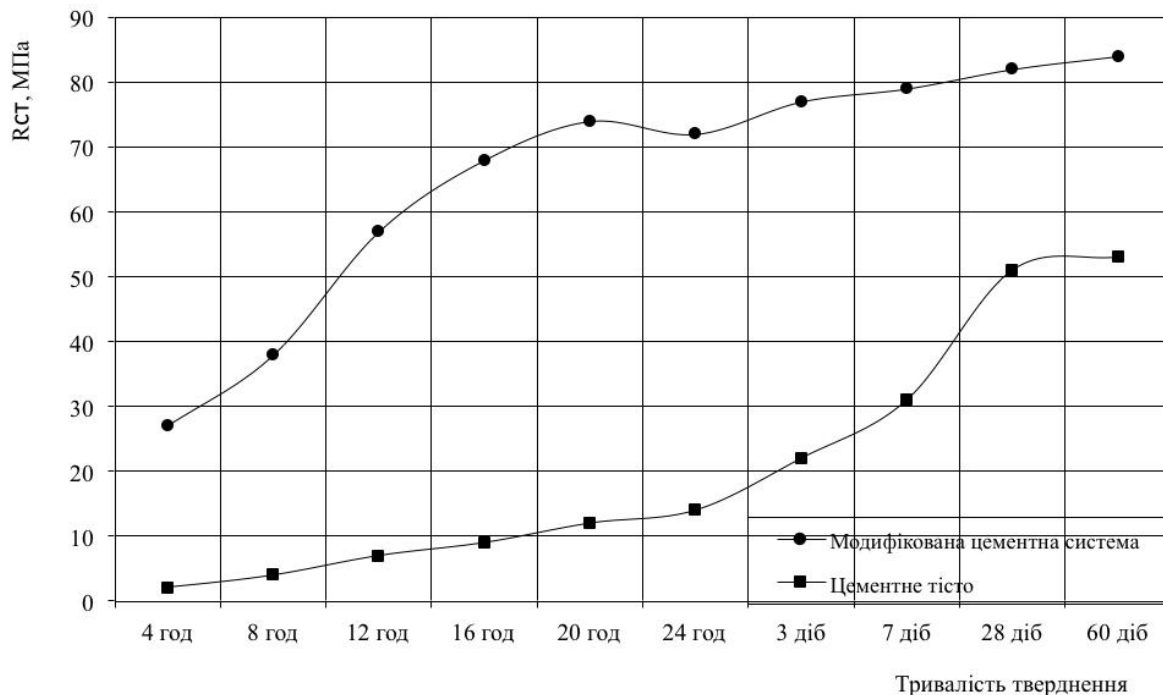


Рис. 1. Кінетика зміни міцності при стиску цементної матриці бетону

Fig. 1. Kinetics of changes in the compressive strength of cement concrete matrix

У дослідженнях використаний портландцемент М 500. Різниця в наростанні міцності очевидна. Оскільки немає помітної зміни у мікроструктурі, зменшення міцності зразків модифікованої цементної системи, яке тимчасово відбувалося у віці 1 доби, можна пояснити напруженням при розтягу, викликаним усадкою, що спостерігається через 1 добу тверднення. Раннє наростання міцності зразків модифікованої цементної системи у перші 24 год знаходиться у відповідності до спостережень, виконаних за допомогою скануючого електронного мікроскопа. Появу перших голчастих кристалів виявлено через 2 год після приготування модифікованої цементної системи, перш ніж система почала набирати міцність. До 4 год ріст кристалів значно збільшився. Надалі мікроструктура не показала змін, за винятком поступового зменшення пористості.

#### Наукова новизна та практична значимість

Встановлений механізм розвитку процесу формування початкової міцності і жорсткості модифікованої цементної матриці за рахунок

швидкого росту кристалогідратів у просторі між частинками дисперсного армуючого модифікатора. Оскільки вільному росту кристалів перешкоджає брак простору, кристали взаємно проростають, утворюючи щільну структуру, яка зумовлює зростання міцності.

Дисперсне модифікування цементної матриці дозволяє одержати довговічні бетони спеціального призначення з проектними експлуатаційними властивостями. Розроблена технологія дисперсного модифікування в'язучої речовини, встановлені особливості механізму структуроутворення модифікованої цементної системи, а також використання принципу конгруентності комплексу технологічних впливів фізико-хімічних процесів гідратації клінкерних мінералів дозволили розробити технологічні основи бетонів спеціального призначення. Це сприяє розширенню напрямків використання модифікованих бетонів у різних видах будівельного виробництва, наприклад підвищення в'язучого потенціалу цементу у високоміцних бетонах, використання модифікованих цементних систем в особливих умовах підводного бетонування і ремонту різних споруд, торкретування та ін. У перспективі дисперсне модифі-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

кування дозволяє розробити принципово нову пневмоструминну технологію бетонних та армобетонних виробів, при якій використовується кінетична енергія маси, що рухається, виключається процес приготування бетонної суміші і з'являється можливість формування виробів складної конфігурації.

## Висновки

1. Запропоновано модель просторової структури модифікування цементної матриці бетону шляхом дисперсного армування кристалогідратами. Вихідним об'єктом дослідження є сукупність елементарних об'ємів (чарунок) цементної матриці та система просторового розподілу в цих об'ємах армуючих кристалогідратів. Встановлено, що найбільш небезпечні дефекти у вигляді тріщин в об'ємі бетону при твердненні формуються у результаті виникнення внутрішніх напружень, головним чином, у зоні контакту цементна матриця – заповнювач або в області, що межує з найбільш крупними порами бетону.

2. Рівень дисперсності модифікуючого армування кристалогідратами цементної матриці бетону у запропонованій моделі відповідає рівню дисперсного розподілу макроскопічних неоднорідностей в об'ємі матеріалу. Подібна модель розташування центрів кристалогідратів оптимальна з точки зору створення перешкод для розвитку тріщин між неоднорідностями в об'ємі бетону.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Дейнега, Ю. Ф. Дисперсные системы в электрических полях / Ю. Ф. Дейнега // Укр. хим. журн. – 2001. – Т. 67, № 3. – С. 13–18.
- Иванова, А. П. Анализ и перспективы применения эффективных ресурсосберегающих технологий в производстве бетона / А. П. Иванова, О. И. Труфанова // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 5 (53). – С. 150–156. doi: 10.15802/stp2014/30453.
- Особенности структурообразования высокопрочного цементного камня в условиях длительного твердения / В. В. Бабков, Р. Р. Сахибгареев, А. Е. Чуйкин [и др.] // Строит. материалы. – 2003. – № 10. – С. 42–43.
- Пирадов, К. А. Механика разрушения железобетона / К. А. Пирадов, Е. А. Гузеев. – Москва : Новый век, 1998. – 190 с.
- Рабинович, Ф. Н. Композиты на основе дисперсноармированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции / Ф. Н. Рабинович. – Москва : АСВ, 2004. – 560 с.
- Руденко, Д. В. Фізико-хімічна модифікація цементної системи монолітного бетону // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 6 (60). – С. 174–182. doi: 10.15802/stp2015/57103.
- Хердтл, Р. Долговечность бетонов на основе многокомпонентных цементов / Р. Хердтл, М. Дитерманн, К. Шмидт // Цемент и его применение. – 2011. – № 1. – С. 76–80.
- Хорошун, Л. П. Нелинейные свойства композитных материалов стохастической структуры / Л. П. Хорошун, Б. П. Маслов. – Киев : Наук. думка, 1992. – 132 с.
- Collepari, M. Innovative Concretes for Civil Engineering Structures: SCC, HPC and RPC / M. Collepari // Workshop on New Technologies and Materials in Civil Engineering : Proceedings. – Milan, 2003. – P. 1–8.
- Lee, C. Y. Strength and microstructural characteristics of chemically activated fly ash-cement systems / C. Y. Lee, H. K. Lee, K. M. Lee // Cement and Concrete Research. – 2003. – Vol. 33, № 3. – P. 425–431. doi: 10.1016/S0008-8846(02)-00973-0.
- Mehta, P. K. High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete for Sustainable Development / P. K. Mehta // The Intern. Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology : Proc. (20.05–21.05.2004). – Beijing, 2004. – P. 3–13.
- Middendorf, B. Nanoscience and nanotechnology in cementitious materials / B. Middendorf, N. B. Singh // Cement Intern. – 2006. – № 4. – P. 80–86.
- Rudenko, D. Properties of the phase components of the modified cement system / D. Rudenko // TEKA Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa. – 2013. – Vol. 13, № 4. – P. 218–224.
- Rudenko, N. The Development of Conception of New Generation Concretes / N. Rudenko // TEKA Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa. – 2010. – Vol. 10B. – P. 128–133.
- Rudenko, N. Technology of shotcreting based on activated binder / N. Rudenko // TEKA Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa. – 2014. – Vol. 14, № 1. – P. 222–228.

Д. В. РУДЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Городское строительство и хозяйство», Запорожская государственная инженерная академия, пр. Соборный, 226, Запорожье, Украина, 69006, тел. +38 (098) 214 04 85, эл. почта veberc@ukr.net, ORCID 0000-0003-0827-042X

## БЕТОН НА ОСНОВЕ ДИСПЕРСНОЙ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЦЕМЕНТНОЙ СИСТЕМЫ

**Цель.** В научной статье необходимо рассмотреть определение типов связей, возникающих в модифицированной цементной матрице бетона, и оценку качества этих связей в неоднородном материале для определения геометрических и физических соотношений между структурой модификаторов и цементной матрицы. **Методика.** Для достижения поставленной цели проведены исследования микроструктуры дисперсно модифицированной цементной матрицы бетона и механизма структурообразования модифицированной цементной системы бетона естественного твердения. Определены методы надежной оценки прочности бетона. **Результаты.** Авторами предложена модель пространственной структуры цементной матрицы бетона, модифицированной путем дисперсного армирования кристаллогидратами. Исходным объектом исследования является совокупность элементарных объемов (ячеек) цементной матрицы и система пространственного распределения в этих объемах армирующих кристаллогидратов. Установлено, что наиболее опасные дефекты в виде трещин в объеме бетона при твердении формируются в результате возникновения внутренних напряжений, главным образом, в зоне контакта цементная матрица – наполнитель, или в области, граничащей с наиболее крупными порами бетона. **Научная новизна.** Установлен механизм развития процесса формирования начальной прочности и жесткости модифицированной цементной матрицы за счет быстрого роста кристаллогидратов в пространстве между частицами дисперсного армирующего модификатора. Поскольку свободному росту кристаллов препятствует недостаток пространства, кристаллы взаимно прорастают, образуя плотную структуру, которая обуславливает рост прочности. **Практическая значимость.** Дисперсное модифицирование цементной матрицы позволяет получить долговечные бетоны специального назначения с проектными эксплуатационными свойствами. Разработанная технология дисперсного модифицирования цементной системы, установленные особенности механизма ее структурообразования, а также использование принципа конгруэнтности комплекса технологических воздействий физико-химическим процессам гидратации клинкерных минералов позволили разработать технологические основы бетонов специального назначения.

*Ключевые слова:* цементная матрица; дисперсное модифицирование; структурообразование; бетон

D. V. RUDENKO<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Urban Construction and Management», Zaporizhzhia State Engineering Academy, Soborny Ave., 226, Zaporizhzhia, Ukraine, 69006, e-mail veberc@ukr.net, tel. +38 (098) 214 04 85, ORCID 0000-0003-0827-042X

## CONCRETE BASED ON MODIFIED DISPERSE CEMENT SYSTEM

**Purpose.** The article considers definition of the bond types occurring in a modified cement concrete matrix, and the evaluation of the quality of these links in a non-uniform material to determine the geometrical and physical relationships between the structure and the cement matrix modifiers. **Methodology.** To achieve this purpose the studies covered the microstructure of dispersed modified concrete cement matrix, the structure formation mechanism of the modified cement concrete system of natural hardening; as well as identification of the methods of sound concrete strength assessment. **Findings.** The author proposed a model of the spatial structure of the concrete cement matrix, modified by particulate reinforcement crystal hydrates. The initial object of study is a set of volume elements (cells) of the cement matrix and the system of the spatial distribution of reinforcing crystallohydrates in these volume elements. It is found that the most dangerous defects such as cracks in the concrete volume during hardening are formed as a result of internal stresses, mainly in the zone of cement matrix-filler contact or in the area bordering with the largest pores of the concrete. **Originality.** The result of the study is the defined mechanism of the process of formation of the initial strength and stiffness of the modified cement matrix due to the rapid growth of crystallohydrates in the space among the dispersed reinforcing modifier particles. Since the lack of space prevents from the free growth of crystals, the latter cross-penetrate, forming a dense structure, which contributes to the growth of



## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

strength. **Practical value.** Dispersed modifying cement matrix provides a durable concrete for special purposes with the design performance characteristics. The developed technology of dispersed cement system modification, the defined features of its structure formation mechanism and the use of congruence principle for the complex of technological impacts of physical and chemical processes of hydration of clinker minerals allowed developing technological bases for special-purpose concrete.

**Keywords:** cement matrix; disperse modification; structure formation; concrete

## REFERENCES

1. Deynaga Yu.F. Dispersnyye sistemy v elektricheskikh polyakh [Disperse systems in electric fields]. *Ukrainskiy khimicheskii zhurnal – Ukrainian Chemical Journal*, 2001, vol. 67, no. 3, pp. 13-18.
2. Ivanova A.P., Trufanova O.I. Analiz i perspektivy primeneniya effektivnykh resursosberegayushchikh tekhnologiy v proizvodstve betona [Analysis and application prospects of effective resources-saving technologies in concrete manufacture]. *Nauka ta progres transport – Science and Transport Progress*, 2014, no. 5 (53), pp. 150–156. doi: 10.15802/stp2014/30453.
3. Babkov V.V., Sakhibgareyev P.P., Chuykin A.Ye., Anvarov R.A., Komokhov P.G. Osobennosti strukturoobrazovaniya vysokoprochnogo tsementnogo kamnya v usloviyakh dlitel'nogo tverdeniya [Features of structure formation of high-strength cement stone in long-term hardening]. *Stroitelnyye materialy – Construction Materials*, 2003, no. 10, pp. 42-43.
4. Piradov K.A., Guzeyev Ye.A. *Mekhanika razrusheniya zhelezobetona* [Fracture mechanics of concrete]. Moscow, Novyy vek Publ., 1998. 190 p.
5. Rabinovich F.N. *Kompozity na osnove dispersnoarmirovannykh betonov. Voprosy teorii i proyektirovaniya, tekhnologiya, konstruksii* [Composites based on fiber reinforced concrete. Questions of the theory and design, technology, construction]. Moscow, ASV Publ., 2004. 560 p.
6. Rudenko D.V. Fizyko-khimichna modyfikatsiya tsementnoi systemy monolitnoho betonu [Physico-chemical modification of monolithic concrete cement system]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no.6 (60), pp. 174-182. doi: 10.15802/stp2015/57103.
7. Kherdtl R., Diermann M., Schmidt K. Dolgovechnost betonov na osnove mnogokomponentnykh tsementov [Durability of concrete on the basis of multicomponent cements]. *Tsement i yego primeneniye – Cement and its Application*, 2011, no. 1, pp. 76-80.
8. Khoroshun L.P., Maslov B.P. *Nelineynnye svoystva kompozitnykh materialov stokhasticheskoy struktury* [Non-linear properties of composite materials of stochastic structure]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1992. 132 p.
9. Collepardi M. Innovative Concretes for Civil Engineering Structures: SCC, HPC and RPC. Workshop on New Technologies and Materials in Civil Engineering: Proc. Milan, 2003, pp. 1-8.
10. Lee C.Y., Lee H.K., Lee K.M. Strength and microstructural characteristics of chemically activated fly ash-cement systems. *Cement and Concrete Research*, 2003, vol. 33, no. 3, pp. 425-431. doi: 10.1016/S0008-8846(02)00973-0.
11. Mehta P.K. High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete for Sustainable Development. The Intern. Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology: Proc. (20.05–21.05.2004). Beijing, 2004, pp. 3-13.
12. Middendorf B., Singh N.B. Nanoscience and nanotechnology in cementitious materials. *Cement International*, 2006, no. 4, pp. 80-86.
13. Rudenko D. Properties of the phase components of the modified cement system. *TEKA Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa*, 2013, vol. 13, no. 4, pp. 218-224.
14. Rudenko N. The Development of Conception of New Generation Concretes. *TEKA Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa*, 2010, vol. 10B, pp. 128-133.
15. Rudenko N. Technology of shotcreting based on activated binder. *TEKA Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa*, 2014, vol. 14, no 1, pp. 222-228.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. А. Банахом (Україна), д.т.н., проф. М. І. Нетесою (Україна)

Надійшла до редколегії: 16.03.2016

Прийнята до друку: 08.06.2016

# ЗМІСТ

## **ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ**

**В. А. КОЗАЧИНА**

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСАДЖЕННЯ ДОМІШОК У ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ ВІДСТІЙНИКУ .....7

## **ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ**

**Я. В. БОЛЖЕЛАРСЬКИЙ, Ю. Г. СОБОЛЕВСЬКА, С. С. ДОВГАНЮК, А. В. БАТІГ**

ВИЗНАЧЕННЯ ПОГЛИНАННЯ ЕНЕРГІЇ ГАСИТЕЛЕМ КОЛИВАНЬ  
ВАНТАЖНОГО ВАГОНА В АВАРІЙНОМУ РЕЖИМІ РУХУ .....15

**М. М. КОЛОС, М. А. ГОНЧАР**

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ РОБОТИ БІЛОРУСЬКОЇ ЗАЛІЗНИЦІ  
В УМОВАХ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ ДОКУМЕНТІВ .....24

**Д. М. КОЗАЧЕНКО, С. В. ГРЕВЦОВ, Т. В. БОЛВАНОВСЬКА**

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЛЬМОВИХ УПОВІЛЬНЮВАЧІВ  
НА ПЕРЕРОБНУ СПРОМОЖНІСТЬ СОРТУВАЛЬНИХ ПРОК .....37

**О. А. НАЗАРОВ**

ЗНИЖЕННЯ ШВИДКОСТІ ВІДЧЕПІВ НА ПОЧАТКУ СОРТУВАЛЬНИХ КОЛІЙ,  
ОСНАЩЕНИХ СИСТЕМОЮ РОЗПОДІЛЕНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ .....47

## **ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ**

**В. О. ПОЛЯКОВ, М. М. ХАЧАПУРІДЗЕ**

МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ РЕАЛІЗАЦІЇ ТЯГОВОЇ СИЛИ ДВИГУНА  
МАГНІТОЛЕВІТУЮЧОГО ПОЇЗДА .....55

## **ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ**

**В. В. КОВАЛЕНКО**

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕДЧАСНОГО РУЙНУВАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ШПАЛ  
НА МАГІСТРАЛЬНИХ КОЛІЯХ ПАТ «УКРЗАЛІЗНИЦЯ» .....63

**М. П. НАСТЕЧИК, Р. В. МАРКУЛЬ**

ПЕРСПЕКТИВИ УКЛАДАННЯ СКРІПЛЕННЯ ТИПУ СКД 65-Б  
В КРИВИХ ДІЛЯНКАХ КОЛІЇ МАЛОГО РАДІУСА .....71

## **ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ**

**Т. М. ВАСЕЦЬКА**

МОДЕЛЮВАННЯ МОДИФІКОВАНОГО МЕТОДУ АНАЛІЗУ ІСРАРХІЙ  
ЗАСОБАМИ КОНСТРУКТИВНО-ПРОДУКЦІЙНИХ СТРУКТУР .....81

## **МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО**

**Е. В. ПАРУСОВ, О. Б. СИЧКОВ, С. І. ГУБЕНКО, І. М. ЧУЙКО, Л. В. САГУРА**

ПЕРЕВАГИ ЕКСПРЕС-МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ МАСИ ОКАЛИНИ  
І ЗНЕВУГЛЕЦЬОВАНОГО ШАРУ БУНТОВОГО ПРОКАТУ .....96

## **РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ**

**С. М. ВАСІЛЬСВ, А. Д. ЖЕЛЄЗНЯКОВ, Л. П. ЦЕЛКОВІКОВА**

МОДЕЛЮВАННЯ ЗІТКНЕНЬ ВАГОНІВ ПРИ СУХОМУ ТЕРТІ В ОПОРАХ ВАНТАЖУ .....116

**Я. КАЛІВОДА, П. БАУЕР**

СТЕНДОВІ КАТКОВІ ВИПРОБУВАННЯ В ЧЕСЬКОМУ ТЕХНІЧНОМУ УНІВЕРСИТЕТІ .....125

**С. В. МЯМЛІН, О. А. КИРИЛЬЧУК, В. С. МЕТИЖЕНКО**

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КОЛИВАНЬ КОЛІСНОЇ ПАРИ  
З НЕЗАЛЕЖНИМ ОБЕРТАННЯМ КОЛІС В ГОРИЗОНТАЛЬНІЙ ПЛОЩИНІ .....134

## **ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО**

**О. М. ГІБАЛЕНКО**

ЗНИЖЕННЯ РІВНЯ КОРОЗІЙНОЇ НЕБЕЗПЕКИ

ПРИ РАЦІОНАЛЬНОМУ КОНСТРУЮВАННІ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ ..... 141

**В. В. КАЧУРЕНКО, Д. О. БАННИКОВ**

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ТИСКУ

НА ГОФРОВАНІ СТАЛЕВІ СТІНКИ СИЛОСУ ..... 151

**В. Д. ПЕТРЕНКО, О. Л. ТЮТЬКІН, І. О. СВЯТКО**

ОЦІНКА ВПЛИВУ УКРІПЛЕННЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ҐРУНТОЦЕМЕНТНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ ..... 161

**Д. В. РУДЕНКО**

БЕТОН НА ОСНОВІ ДИСПЕРСНО МОДИФІКОВАНОЇ ЦЕМЕНТНОЇ СИСТЕМИ ..... 169

# СОДЕРЖАНИЕ

## **ЭКОЛОГИЯ НА ТРАНСПОРТЕ**

**В. А. КОЗАЧИНА**

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСАЖДЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ОТСТОЙНИКЕ.....7

## **ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА**

**Я. В. БОЛЖЕЛАРСКИЙ, Ю. Г. СОБОЛЕВСКАЯ, С. С. ДОВГАНЮК, А. В. БАТИГ**

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ ГАСИТЕЛЕМ КОЛЕБАНИЙ  
ГРУЗОВОГО ВАГОНА В АВАРИЙНОМ РЕЖИМЕ ДВИЖЕНИЯ .....15

**М. М. КОЛОС, М. А. ГОНЧАР**

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАБОТЫ БЕЛОРУССКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ  
В УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ДОКУМЕНТОВ .....24

**Д. Н. КОЗАЧЕНКО, С. В. ГРЕВЦОВ, Т. В. БОЛВАНОВСКАЯ**

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТОРМОЗНЫХ ЗАМЕДЛИТЕЛЕЙ  
НА ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРОК.....37

**А. А. НАЗАРОВ**

СНИЖЕНИЕ СКОРОСТИ ОТЦЕПОВ В НАЧАЛЕ СОРТИРОВОЧНЫХ ПУТЕЙ,  
ОСНАЩЕННЫХ СИСТЕМОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ .....47

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ**

**В. А. ПОЛЯКОВ, Н. М. ХАЧАПУРИДЗЕ**

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РЕАЛИЗАЦИИ ТЯГОВОЙ СИЛЫ ДВИГАТЕЛЯ  
МАГНИТОЛЕВИТИРУЮЩЕГО ПОЕЗДА .....55

## **ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ**

**В. В. КОВАЛЕНКО**

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕЖДЕВРЕМЕННОГО РАЗРУШЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ШПАЛ  
НА МАГИСТРАЛЬНЫХ ПУТЯХ ПАО «УКРЗАЛИЗНИЦЯ» .....63

**Н. П. НАСТЕЧИК, Р. В. МАРКУЛЬ**

ПЕРСПЕКТИВЫ УКЛАДКИ СКРЕПЛЕНИЯ ТИПА СКД 65-Б  
В КРИВЫХ УЧАСТКАХ ПУТИ МАЛОГО РАДИУСА .....71

## **ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

**Т. Н. ВАСЕЦКАЯ**

МОДЕЛИРОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ  
СРЕДСТВАМИ КОНСТРУКТИВНО-ПРОДУКЦИОННЫХ СТРУКТУР.....81

## **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

**Э. В. ПАРУСОВ, А. Б. СЫЧКОВ, С. И. ГУБЕНКО, И. Н. ЧУЙКО, Л. В. САГУРА**

ПРЕИМУЩЕСТВА ЭКСПРЕСС-МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАССЫ ОКАЛИНЫ  
И ОБЕЗУГЛЕРОЖЕННОГО СЛОЯ БУНТОВОГО ПРОКАТА .....96

## **ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ И ТЯГА ПОЕЗДОВ**

**С. М. ВАСИЛЬЕВ, А. Д. ЖЕЛЕЗНЯКОВ, Л. П. ЦЕЛКОВИКОВА**

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОУДАРЕНИЙ ВАГОНОВ ПРИ СУХОМ ТРЕНИИ В ОПОРАХ ГРУЗА.....116

**Я. КАЛИВОДА, П. БАУЭР**

СТЕНДОВЫЕ КАТКОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ В ЧЕШСКОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ.....125

**С. В. МЯМЛИН, О. А. КИРИЛЬЧУК, В. С. МЕТЫЖЕНКО**

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОЛЕБАНИЙ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ  
С НЕЗАВИСИМЫМ ВРАЩЕНИЕМ КОЛЕС В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ .....134

## **ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО**

**А. Н. ГИБАЛЕНКО**

СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ КОРРОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ

ПРИ РАЦИОНАЛЬНОМ КОНСТРУИРОВАНИИ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ..... 141

**В. В. КАЧУРЕНКО, Д. О. БАННИКОВ**

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ГОФРИРОВАННЫЕ СТАЛЬНЫЕ СТЕНКИ СИЛОСА ..... 151

**В. Д. ПЕТРЕНКО, А. Л. ТЮТЬКИН, И. А. СВЯТКО**

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УКРЕПЛЕНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

ГРУНТОЦЕМЕНТНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ..... 161

**Д. В. РУДЕНКО**

БЕТОН НА ОСНОВЕ ДИСПЕРСНОЙ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЦЕМЕНТНОЙ СИСТЕМЫ..... 169

# CONTENTS

## **TRANSPORT ECOLOGY**

**V. A. KOZACHYNA**

INVESTIGATION OF ADMIXTURE SEDIMENTATION IN THE HORIZONTAL SETTLER .....7

## **OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS**

**Y. V. BOLZHELARSKIY, YU. H. SOBOLEVSKA, S. S. DOVGANYUK, A. V. BATIG**

DETERMINATION OF ENERGY LOSSES BY SHOCK ABSORBER  
IN A FREIGHT CAR AT CRASH MODE.....15

**M. M. KOLOS, M. A. GONCHAR**

IMPROVING THE TECHNOLOGY OF BELORUSSIAN RAILWAY  
IN CONDITIONS OF ELECTRONIC DOCUMENTS USAGE .....24

**D. M. KOZACHYENKO, S. V. GREVTSOV, T. V. BOLVANOVSKA**

STUDY OF TECHNICAL STATE IMPACT OF BRAKE RETARDERS  
AT THE PROCESSING ABILITY OF HUMPS .....37

**O. A. NAZAROV**

REDUCTION IN CUTS SPEED AT THE BEGINNING OF A SORTING SIDINGS,  
EQUIPPED WITH QUASI-CONTINUOUS SPEED CONTROL SYSTEM.....47

## **ELECTRIC TRANSPORT**

**V. O. POLYAKOV, M. M. KHACHAPURIDZE**

IMPLEMENTATION MODEL OF MOTOR TRACTION FORCE OF MAGLEV TRAIN .....55

## **RAILWAY TRACK**

**V. V. KOVALENKO**

RESEARCH PREMATURE DESTRUCTION OF CONCRETE SLEEPERS  
ON THE MAIN LINES OF PUBLIC COMPANY «UZ».....63

**M. P. NASTECHIK, R. V. MARCUL**

PROSPECTS FOR LAYING THE FASTENING OF THE TYPE CKД65 – Б  
IN THE CURVED TRACK SECTIONS WITH SMALL RADIUS.....71

## **INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL MODELING**

**T. M. VASETSKA**

MODELLING THE MODIFIED METHOD OF ANALYTIC HIERARCHY PROCESS  
BY MEANS OF CONSTRUCTIVE AND PRODUCTIVE STRUCTURES .....81

## **MATERIAL SCIENCE**

**E. V. PARUSOV, A. B. SYCHKOV, S. I. GUBENKO, I. N. CHUIKO, L. V. SAHURA**

ADVANTAGES OF RAPID METHOD FOR DETERMINING SCALE MASS  
AND DECARBURIZED LAYER OF ROLLED COIL STEEL.....96

## **ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION**

**S. M. VASILYEU, A. D. ZHELEZNYAKOV, L. P. TSELKOVIKOVA**

CARS IMPACT SIMULATION AT DRY FRICTION IN CARGO SUPPORTS.....116

**J. KALIVODA, P. BAUER**

ROLLER RIG TESTING AT THE CZECH TECHNICAL UNIVERSITY .....125

**S. V. MYAMLIN, O. A. KIRILCHUK, V. S. METYZHENKO**

MATHEMATICAL MODEL OF WHEELSET OSCILLATIONS  
WITH INDEPENDENT WHEEL ROTATION IN THE HORIZONTAL PLANE.....134

## ***TRANSPORT CONSTRUCTION***

**O. M. GIBALENKO**

THE DECREASE IN THE LEVEL OF CORROSION HAZARD  
IN THE RATIONAL DESIGN OF METAL STRUCTURES ..... 141

**V. V. KACHURENKO, D. O. BANNIKOV**

EXPERIMENTAL STUDY OF HORIZONTAL PRESSURE DISTRIBUTION  
ON CORRUGATED STEEL SILO WALLS ..... 151

**V. D. PETRENKO, O. L. TIUTKIN, I. O. SVIATKO**

ESTIMATION OF SUBGRADE STRENGTHENING INFLUENCE USING SOILCEMENT ELEMENTS ..... 161

**D. V. RUDENKO**

CONCRETE BASED ON MODIFIED DISPERSE CEMENT SYSTEM ..... 169

## 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 2003 або більш ранній версії – файли \*.doc (файли \*.docx, \*.docm не приймаються). Для набору формул використовується MathType 5.

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.

**Увага!** Згідно з міжнародними стандартами якості наукових публікацій необхідним є: наявність авторських розширених і структурованих резюме (рефератів – abstracts), у т.ч. англійською мовою, рецензій, пристатейних списків літератури в романському алфавіті тощо.

**Рекомендуємо скористатися правилами до оформлення статей журналу:**  
<http://library.diit.edu.ua/HTMLs/scientists/Vumogu/Vumogu.pdf>.

**Для здачі статті до друку автору/авторам необхідно:**

### 1. Для електронної інформації сформувати всі матеріали в п'яти файлах:

- **Перший** – із текстом статті та анотацій з ключовими словами. Назва файлу – прізвище та ініціали автора (першого співавтора) латинськими літерами, наприклад: Ivanov\_P\_stattia.doc.
- **Другий** – з розширеними відомостями про автора/авторів (прізвище, ім'я, по батькові; посада; науковий ступінь; учене звання; місце роботи або навчання; адреса електронної пошти; номери контактних телефонів). Назва файлу – Ivanov\_P\_vidomosti.doc.
- **Третій** – рецензія (відсканована). Назва файлу – Ivanov\_P\_recenziia.jpg.
- **Четвертий** – Експертний висновок (відсканований, складається у вільній формі). Назва файлу – Ivanov\_P\_vysnovok.jpg.
- **П'ятий** – Ліцензійний договір (відсканований). Назва файлу – Ivanov\_P\_dogovir.jpg. Текст договору: <http://library.diit.edu.ua/HTMLs/scientists/Vumogu/license.doc>.

**2. Для друкованої інформації.** До редакції надаються особисто або надсилаються поштою такі матеріали: 1) два друкованих примірники рукопису з підписами всіх співавторів на останньому аркуші роботи; 2) оригінал Ліцензійного договору з підписами всіх співавторів; 3) оригінал експертного висновку; 4) рекомендація до друку за підписом відповідального редактора розділу (для співробітників ДНУЗТ).

**Відповідальність за зміст статті, правильність, точність і коректність цитування, посилань та перекладу покладається на авторів.**

**Остаточне рішення щодо публікації ухвалює редакційна колегія журналу.  
 Статті, відхилені редакційною колегією, повертаються авторам для доопрацювання.**

**Шановні автори, запрошуємо до співробітництва!**

### З питань опублікування звертайтеся до редакції журналу за адресою:

Науково-технічна бібліотека (ауд. 166),  
 Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,  
 вул. Лазаряна, 2,  
 м. Дніпропетровськ,  
 Україна,  
 49010  
 e-mail: visnik@diit.edu.ua  
 Адреса сайту журналу: <http://stp.diit.edu.ua/>

**З питань придбання примірників журналу телефонуйте за номером (056) 776 90 59 Грідасова А. В.**



## ПОДІЇ

### ШАНОВНІ КОЛЕГИ!

В журналі розпочато публікацію статей, рекомендованих до друку науковими комітетами міжнародних наукових конференцій, за такими напрямками:

- Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту.
- Проблеми механіки залізничного транспорту.
- Проблеми економіки транспорту.
- Екологічний інтелект.
- Безпека руху і наукові засади експертних досліджень транспортних пригод та інженерних споруд.

Запрошуємо організаторів міжнародних наукових заходів до співпраці з метою оприлюднення найбільш вагомих наукових результатів.

\* \* \*

Так, 9–11 вересня 2015 р. у місті Львові відбулася Міжнародна науково-практична конференція «Безпека руху і наукові засади експертних досліджень транспортних пригод та інженерних споруд», присвячена доктору технічних наук Соколу Едуарду Миколайовичу і організована Дніпропетровським національним університетом залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Укрзалізницею, Львівською філією ДІІТУ та Львівським науково-дослідним інститутом судових експертиз.

У конференції взяло участь 125 науковців та спеціалістів з 26 організацій, у тому числі: 18 докторів наук, представники Міністерства інфраструктури, Міністерства юстиції, Укрзалізниці, вищих навчальних закладів, наукових та науково-дослідних установ і підприємств України, Німеччини, Литви, Вірменії та Польщі.

На пленарних та секційних засіданнях заслухано 70 доповідей з питань підвищення безпеки руху, методики та методології експертних досліджень рухомого складу залізниць, авто-транспортних засобів, інженерних споруд, під-

вищення їх експлуатаційної надійності та безпечності, оцінки економічної ефективності запропонованих заходів.

На конференції відмічено, що пріоритетним напрямом розвитку транспортної галузі є забезпечення безпеки. У даному аспекті важливим є профілактична роль експертних досліджень випадків транспортних пригод. Ретельний науковий аналіз причин, що призводять до транспортних пригод, дозволяє розробити рекомендації з недопущення їх у майбутньому, вносити зміни у нормативні документи, удосконалювати конструкцію транспортних засобів та інженерних споруд.

\* \* \*

25–27 травня 2016 р. у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна відбулась XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми механіки залізничного транспорту. Безпека руху, динаміка, міцність рухомого складу та енергозбереження». Конференція проводиться кожні 4 роки за участю представників вищих навчальних закладів і науково-дослідних інститутів, залізниць, локомотивних і вагонобудівних заводів багатьох країн світу. Це підтверджує зацікавленість виробників у нових технологіях і наукових розробках, пов'язаних з роботою залізничного транспорту. Обмін знаннями і досвідом вчених та інженерів, які представляють наукові школи різних країн, особливо важливі в умовах інтероперабельності, глобалізації економіки і поглиблення інтеграційних процесів.

На конференції працювали секції:

- безпека руху поїздів, перехідні режими, енергозбереження;
- взаємодія рухомого складу та колії, знос коліс і рейок;
- міцність, надійність.

\* \* \*

Для нотаток

.

Наукове видання

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

№ 4 (64) 2016

(українською, російською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – А. І. Миргородська

Комп'ютерне верстання – Л. А. Кобулія

Літературна обробка – О. М. Врублевська

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ум. друк. арк. 21,15. Тираж 300 пр. Зам. № .

**Дніпропетровський 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

*Адреса дільниці оперативної поліграфії:*

вул. Лазаряна, 2, кім. 1201, м. Дніпро, 49010, Україна

*Тел.:* +38 (056) 47-19-66, *факс:* +38 (056) 47-19-83



Научное издание

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

**(НАУКА И ПРОГРЕСС ТРАНСПОРТА. ВЕСТНИК ДНЕПРОПЕТРОВСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО  
УНИВЕРСИТЕТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ИМЕНИ АКАДЕМИКА В. ЛАЗАРЯНА)**

№ 4 (64) 2016

(на украинском, русском и английском языках)

Ответственный за выпуск – А. И. Миргородская

Компьютерная верстка – Л. А. Кобулия

Литературная обработка – О. М. Врублевская

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ус. печат. лист. 21,15. Тираж 300 экз. Зак. № .

**Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта  
имени академика В. Лазаряна**

*Адрес редакции, издателя:*

ул. Лазаряна, 2, ком. 267, г. Днипро, 49010, Украина

*Тел.:* +38 (056) 371-51-05

*E-mail:* lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

*Адрес участка оперативной полиграфии:*

ул. Лазаряна, 2, ком. 1201, г. Днипро, 49010, Украина

*Тел.:* +38 (056) 47-19-66, *факс:* +38 (056) 47-19-83



Scientific Edition

**NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU. VİSNIK DNİPROPETROVS'KOGO NACİONAL'NOGO  
UNİVERSİTETU ZALİZNIČNOGO TRANSPORTU**

**(SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS. BULLETIN OF DNIPROPETROVSK NATIONAL  
UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT NAMED AFTER ACADEMICIAN V. LAZARYAN)**

No. 4 (64) 2016

(in Ukrainian, Russian and English languages)

Responsible for issue – А. И. Myrhorodska

Computer makeup – Л. А. Kobuliya

Redaction – О. М. Vrublevska

Format 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Conventional printed sheet 21,15. Circulation 300. Order no .

**Dnipropetrovsk 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

*Address of small offset printing office*

Lazaryan St., 2, r. 1201, Dnipro, 49010, Ukraine

*Tel.:* +38 (056) 47-19-66, *Fax:* +38 (056) 47-19-83



СУЧАСНІ ЗАКЛАДИ ОСВІТИ - 2016  
Сьома Міжнародна виставка

# CERTIFICATE

якості наукових публікацій  
УДОСТОЄНИЙ

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна

Міністерство освіти і науки України  
Інститут модернізації змісту освіти

Директор

Н. Вяткіна

Підстав  
показаний наукометричної  
баз даних Scopus  
за 2015 рік



Національна академія  
педагогічних наук України

Президент

В. Кремень

Асоціація користувачів  
Української науково-освітньої  
телекомунікаційної мережі «Уран»

Голова Ради

Ю. Якименко

Україна, м. Київ





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

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2016. 4(64). 1-183