



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



# НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ  
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

(до 25-річчя Транспортної академії України)

№ 2(68)

.. 2017 ..



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

№ 2 (68) 2017

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*

Дніпро

2017

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

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

Пішінько 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., Вакулєнко І. О., Власова Т. І., Волкова В. Є., Габринєць В. О., Гаврилук В. І., Гетьман Г. К., Главацький К. Ц., Гнєнний О. М., Головкова Л. С., Гончаров К. В., Горобєць В. Л., Доєнко 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., Настєчик М. П., Нєтєса 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., Шинкаренко В. І., Штаєнко 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. Гєдими́наса, Литва); Васяк І. (Інститут електроенергетики Лодзинської політехніки, Республіка Польща); Гусєв Б. В. (Московський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація); Долежел І. (Університет Західної Богємії, 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. Гєдими́наса, Литва); Манашкін Л. А. («ALGAE ENERGY SOLUTION, LLC», США); Сладковські А. (Сілезька політехніка, Республіка Польща); Стржелицькі 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); Шєпонг Адам (Варшавський політехнічний університет, Республіка Польща).

Журнал зарєєстровано Державною реєстраційною службою Міністерства юстиції України. Свідєцтво про реєстрацію КВ № 19609-9409ПР від 29.12.2012 р. Видання внесєно до Перєліку наукових фахових видань України наказом Міністерства освїти і науки України 29.12.2014 р. № 1528 (технічні науки). Журнал зарєєстровано: в міжнародних каталогах періодичних видань Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; наукометричних системах Google Scholar, Global Impact Factor, eLibrary.ru, DOAJ, Index Copernicus, DRJI. Друкуєтьсє за рїшенням вченої ради університету від 24.04.2017 р., протокол № 9

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

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

Видання публікуєтьсє з 1936 р.:

- 1936–1993 рр. – «Труды Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта»;
- 1993–2002 рр. – «Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту» (за серіями);
- 2003–2012 рр. – «Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна», (ISSN 1993-9175);
- з 2013 р. – «Наука та прогрєс 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**

**№ 2 (68) 2017**

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*

Днепро

2017

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., Боднарь Б. Е., Босов А. А., Вакуленко И. А., Власова Т. И., Волкова В. Е., Габринiec В. А., Гаврилюк В. И., Гетьман Г. К., Главацкий К. Ц., Гненний О. Н., Головокова Л. С., Гончаров К. В., Горобец В. Л., Доценко Е. Н., Дудкина В. В., Жуковицкий 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., 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., Шинкаренко В. И., 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); Стржеleckи Р. (Гданьская морская академия, Республика Польша); Титова Т. С. (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация); Худзикевиc 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 24.04.2017 г., протокол № 9

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», (ISSN 1993-9175);
- 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. 2 (68) 2017**

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*

Dnipro

2017

Founder:  
DNIPROPETROVSK NATIONAL UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT  
NAMED AFTER ACADEMICIAN V. LAZARYAN

Chairman of the Editorial Board of the University	Pshinko O. M., Doctor of Technical Sciences
Editor-in-Chief	Myamlin S. V., Doctor of Technical Sciences
Deputy Chief Editor	Kozachenko D. M., Doctor of Technical Sciences
Executive Secretary	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., 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., Shynkarenko V. I., 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 24.04.2017, Protocol no. 9
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: <a href="http://stp.diit.edu.ua/">http://stp.diit.edu.ua/</a>

Edition is being published since 1936:

1936–1993 – «Труды Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта»;  
1993–2002 – «Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту» (за серіями);  
2003–2012 – «Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна», (ISSN 1993-9175),  
since 2013 – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»

## ВИДАТНІ ПОДІЇ. ТРАНСПОРТНІЙ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ – 25 РОКІВ

---

Транспортна академія України (ТАУ) – це всеукраїнська громадська наукова організація, створена на добровільних засадах провідними вченими і видатними інженерами, колективами наукових і навчальних закладів та підприємств сфери транспортного комплексу для цілеспрямованого розвитку наукової і науково-технічної діяльності, підвищення ефективності транспортного комплексу, захисту фахових інтересів, координації науково-дослідних робіт і впровадження їх результатів, обміну досвідом.

Академія заснована 31 березня 1992 року Установчими зборами та є найвищою формою громадської організації наукового забезпечення інноваційного розвитку транспорту, ефективного транспортного забезпечення економіки держави і створення нових видів техніки та технологій, підвищення рівня безпеки транспорту.

Головною метою діяльності Академії є визначення перспектив розвитку транспортного комплексу України, участь у формуванні й виконанні програм науково-технічного прогресу в галузі транспортного комплексу, створенні та вдосконаленні наукоємних технологій для висококомп'ютеризованих виробництв майбутнього, їх комплексної автоматизації, широкої інформатизації, охорони довкілля.

Академія співпрацює з Національною академією наук України, галузевими академіями наук України та академіями зарубіжних країн.

Рішенням Загальних зборів членів ТАУ у 2004 році Президентом ТАУ був обраний Заслужений діяч науки і техніки України, Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, доктор технічних наук, професор, ректор Національного транспортного університету М.Ф. Дмитриченко.

Академія має регіональні наукові центри

(Південний, Центральний, Західний, Східний та Північно-Східний), які об'єднують 18 областей України.

Східний Науковий Центр ТАУ був заснований 27 жовтня 1992 року. До складу Центру входять територіальні відділення (Дніпропетровське, Донецьке, Запорізьке та Луганське), які діють на підставі статуту СНЦ ТАУ та власних статутів.

Керівник центру – перший віце-президент ТАУ, академік Пшінько Олександр Миколайович, доктор технічних наук, професор, Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, ректор Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Головною метою діяльності СНЦ ТАУ є вибір перспектив розвитку вітчизняного транспорту та транспортного будівництва, участь у розробці концептуальних засад реформування транспортного комплексу України, програмах формування національної мережі транспортних коридорів, розробка та використання передових наукоємних технологій у авіакосмічній, морській, автомобільній, залізничній та інших галузях промисловості й транспорту, реалізація відповідних проектів подальшого розвитку транспортно-дорожнього комплексу України з урахуванням вимог до охорони навколишнього середовища.

За роки свого існування Східний Науковий Центр ТАУ набув статусу дійового координатора реалізації планів науково-дослідної роботи колективних членів, штабу підтримки розвитку міжнародних зв'язків у галузі транспортної науки, став важливим ланцюгом, що поєднує зусилля науково-дослідницьких установ, вищих навчальних закладів та підприємств транспортної галузі в східному регіоні України.



## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

УДК 656.225.073.2:622.33

Н. Н. БЕЛЯЕВ<sup>1\*</sup>, А. А. КАРПО<sup>2\*</sup>, З. Н. ЯКУБОВСКАЯ<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</sup>Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта alichka-88.karpo@yandex.ru, ORCID 0000-0003-3201-8435

<sup>3\*</sup>Каф. «Физика», Украинский государственный химико-технологический университет, просп. Гагарина, 8, Днипро, Украина, 49000, тел. +38 (056) 247 46 70, эл. почта zinaida.yakubovskaya@yandex.ua, ORCID 0000-0002-9893-3479

### СНИЖЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ УНОСА УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО РАСТВОРА

**Цель.** Данное исследование направлено на: 1) разработку раствора для покрытия угля в железнодорожных вагонах открытого типа или для покрытия угольных штабелей с целью минимизации уноса угольной пыли; 2) создание математической модели процесса подачи раствора на поверхность угля. **Методика.** Для решения поставленной задачи разработан специальный раствор, содержащий дешевые промышленные отходы и полупродукты химического производства. Проведен физический эксперимент по оценке интенсивности уноса угольной пыли при использовании созданного раствора. Построена математическая модель, основанная на применении уравнений движения идеальной жидкости и массопереноса. Разработанные численные модели составляют основу пакета прикладных программ для оценки качества обработки поверхности угля специальным раствором. **Результаты.** Представлены результаты проведенного физического эксперимента по оценке величины уноса угольной пыли с построенной модели угольного штабеля при обработке его поверхности специальным раствором и без обработки. Показано, что применение предложенного раствора для обработки поверхности угля позволяет существенно уменьшить унос угольной пыли. Это даст возможность снизить величину экономических потерь и уменьшить уровень пылевого загрязнения воздушной среды в рабочих зонах. Предложены результаты вычислительного эксперимента, проведенного на базе построенных численных моделей. **Научная новизна.** Авторами представлен новый раствор для обработки поверхности угля с целью минимизации уноса угольной пыли от угольного штабеля, позволяющий существенно уменьшить потери угля. Созданы численные модели, позволяющие учесть существенные факторы, влияющие на процесс рассеивания раствора в атмосфере при обработке угля в полувагонах. **Практическая значимость.** Предложенный в работе раствор имеет низкую цену, так как может быть создан на основе использования отходов промышленных производств. Применение данного раствора позволяет существенно уменьшить интенсивность уноса угольной пыли с поверхности угольного штабеля. Рассмотрены эффективные численные модели «diagnostic models» для экспресс-расчета процесса обработки раствором груза в полувагонах. Модели могут быть применены при разработке стратегии подачи раствора на поверхность груза при различных атмосферных условиях. Построенные численные модели могут служить для научного обоснования параметров процесса обработки груза при различной форме его поверхности в полувагоне.

**Ключевые слова:** унос угольной пыли; штабель угля; химическая обработка угля; численное моделирование; физический эксперимент

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

**Введение**

В Украине происходит интенсивная добыча угля, что обусловлено большими его запасами на территории страны. При добыче угля, его транспортировке возникает комплекс проблем [1, 2, 5, 7–9, 14, 16–18], где можно выделить две, наиболее острые. Первая проблема – это загрязнение угольной пылью прилегающей территории во время перевозки угля в полувагонах [1, 2, 15, 18] (рис.1).

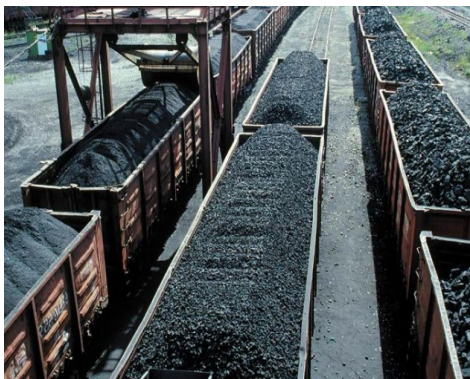


Рис. 1. Транспортировка угля

Fig. 1. Transportation of coal

Вторая проблема – загрязнение рабочих зон возле штабелей угля (рис. 2), которые находятся на территории шахт, коксохимических предприятий и других объектов.



Рис. 2. Штабели угля на территории промышленного объекта

Fig. 2. Coal piles in the territory of the Industrial object

Унос угольной пыли от поверхности штабелей создает интенсивные зоны загрязнения возле них. В этих зонах находятся работники предприятий. Таким образом, возникает угроза здоровью производственного персонала. В этой связи проблема загрязнения угольной

пылью воздушной среды на производстве остается в числе особо актуальных проблем.

**Анализ литературных источников**

В последнее время значительно повысился интерес к разработке методов защиты от пылевого загрязнения рабочих зон на прилегающей территории и на территории предприятий, где используют уголь [1, 2, 4, 5, 7, 8, 15, 17]. Существуют различные методы решения этой задачи. Например, могут использоваться специальные крышки, которые устанавливаются на полувагоны [15]. Такие крышки позволяют существенно уменьшить уровень загрязнения прилегающей территории, но являются очень дорогими. Наиболее часто для уменьшения Уноса угольной пыли используют смачивание водой поверхности транспортируемого груза (рис. 3).



Рис. 3. Подача воды на уголь в полувагонах

Fig. 3. Water supply to coal in gondola cars

Анализ литературных источников показал, что одним из эффективных методов защиты окружающей среды от загрязнения угольной пылью является применение специальных растворов, которыми обрабатывается поверхность угля [1]. Однако, не редко эти растворы являются дорогостоящие, поэтому возникает актуальная задача по созданию дешевых растворов, которые бы надежно защищали окружающую среду от попаданий угольной пыли.

Для уменьшения пылевого загрязнения рабочих зон возле штабелей угля применяют защитные экраны, которые достаточно часто бывают пористыми. Наиболее простым методом пылеподавления является подача воды с помощью водяных пушек на поверхность угольного штабеля (рис. 4).



Рис. 4. Применение водяных пушек для подачи воды на поверхность угольного штабеля

Fig. 4. The use of water cannons to supply water to the surface of the coal pile

Каждый из применяемых методов имеет свои достоинства и свои недостатки. Тем не менее, актуальной задачей остается разработка экономичных и эффективных методов уменьшения Уноса угольной пыли из полувагонов или от штабелей угля.

### Цель

Целью данной работы является разработка специального раствора, позволяющего уменьшить Унос пыли от штабеля угля или от поверхности сыпучего груза в полувагоне.

Кроме этого ставится задача по разработке математической модели процесса распыливания раствора над поверхностью угля в железнодорожных вагонах, которые поступают на место обработки груза [7] (рис. 5).

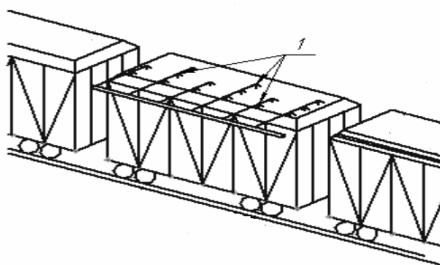


Рис. 5. Пункт подачи раствора на поверхность угля в полувагонах: 1 – форсунки [7]

Fig. 5. Point of solution feeding to the surface of coal in gondola cars: 1 – the injectors [7]

### Методика исследований

Для уменьшения процесса уноса угольной пыли при перевозке груза железнодорожным транспортом или при уносе от угольного штабеля предлагается использовать специальный раствор, содержащий дешевые промышленные отходы и полупродукты химического производств, а именно: отработанное трансформаторное масло, дибутилфталат, бензол, эмалит. Такие отходы имеются в достаточном количестве на коксохимических предприятиях.

Разработанный раствор представляет собой вязкую жидкость темно коричневого цвета. Подачу раствора на поверхность груза в полувагоне или на штабель угля предлагается осуществлять с помощью форсунок.

Для оценки степени уменьшения пылевыведения от поверхности угля, при применении раствора, был проведен физический эксперимент. В лабораторных условиях была изготовлена модель угольного штабеля в масштабе 1:10 (рис. 6).



Рис. 6. Модель угольного штабеля

Fig. 6. Model of coal pile

При проведении эксперимента на модель штабеля равномерно подавался предложенный раствор с образованием на поверхности угля пленки, толщиной 2–5 мм. С помощью воздуходувки создавался воздушный поток, направленный на модель угольного штабеля. Поток подавался в течение 10 минут. После окончания продувки происходил сбор вынесенной угольной пыли и ее взвешивание. Опыты проводились как для обработанного раствором штабеля, так и для штабеля, не обработанного раствором.

Результаты обработки некоторых экспериментальных данных представлены в табл. 1.

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Здесь показана интенсивность пылевыведения от поверхности угольного штабеля при использовании предложенного раствора и без обработки угольного штабеля раствором.

Как видно из табл. 1, применение предложенного раствора дает возможность существенно уменьшить интенсивность Уноса угольной пыли от поверхности штабеля. Очевидно, что данный раствор можно подавать на поверхность угля в полувагонах с целью уменьшения интенсивности пылевыведения от поверхности транспортируемого груза.

Таблица 1

**Интенсивность эмиссии угольной пыли**

Table 1

**Intensity of coal dust emission**

Скорость воздушно- го потока	Интенсивность эмиссии угольной пыли (без обрабо- тки поверхности угля раствором)	Интенсивность эмиссии угольной пыли (при обра- ботке раствором поверхности угля)
2,6 м/с	$2,6 \cdot 10^{-4} \text{ г/}(\text{см}^2 \text{ с})$	$0,2 \cdot 10^{-4} \text{ г/}(\text{см}^2 \text{ с})$
5,3 м/с	$11,2 \cdot 10^{-4} \text{ г/}(\text{см}^2 \text{ с})$	$0,5 \cdot 10^{-4} \text{ г/}(\text{см}^2 \text{ с})$
7,8 м/с	$13,5 \cdot 10^{-4} \text{ г/}(\text{см}^2 \text{ с})$	$0,8 \cdot 10^{-4} \text{ г/}(\text{см}^2 \text{ с})$

**Математическая модель**

На втором этапе исследований была разработана математическая модель для расчета процесса распыления раствора над поверхностью угля в полувагонах (рис. 5). Решение данной задачи осуществляется в два этапа. На первом этапе рассчитывается поле скорости воздушного потока на пункте обработки груза с учетом скорости ветра, турбулентной диффузии и интенсивности подачи раствора. На втором этапе осуществляется решение задачи массопереноса – рассеивания капель раствора над поверхностью груза в полувагонах.

Моделирующим уравнением на первом этапе решения задачи является уравнение для потенциала скорости (уравнение движения идеального безвихревого потока) [12, 13]:

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

где  $\varphi$  – потенциал скорости.

Компоненты вектора скорости воздушного потока связаны с величиной потенциала скорости такими соотношениями:

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial \varphi}{\partial y}. \quad (2)$$

Постановка краевых условий для уравнения (1) рассматривается в работах [12, 13].

Моделирующим уравнением на втором этапе решения задачи является уравнение массопереноса [2, 3, 6, 10, 12, 13]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v-w)C}{\partial y} = \text{div}(\mu \text{grad} C) + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x-x_i(t)) \delta(y-y_i(t)), \quad (3)$$

где  $C$  – концентрация раствора;  $u, v$  – компоненты вектора скорости воздушного потока;  $\mu = (\mu_x, \mu_y)$  – коэффициенты атмосферной турбулентной диффузии;  $Q$  – интенсивность подачи раствора из форсунки;  $\delta(x-x_i) \delta(y-y_i)$  – дельта-функция Дирака;  $x_i, y_i$  – координаты источника эмиссии раствора (форсунки);  $w_g$  – скорость гравитационного оседания капель раствора;  $t$  – время.

Постановка краевых условий для данного уравнения рассмотрена в работах [10, 12].

Численное интегрирование моделирующих уравнений выполняется на прямоугольной разностной сетке. При формировании расчетной области используется метод маркирования [12]. С помощью маркеров задается положение железнодорожного вагона, положение форсунок.

Численное решение. Для численного интегрирования уравнения для потенциала скорости используется метод Либмана [11]. Для численного интегрирования уравнения массопереноса используется неявная разностная схема расщепления [12, 13]. На каждом шаге расщепления неизвестное значение концентрации пыли находится



## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

по методу бегущего счета. Это позволяет получить простой алгоритм для расчета концентрационного поля раствора на пункте обработки груза.

## Результаты

Выполнена программная реализация разработанных численных моделей. На рис. 7 показаны результаты расчета концентрационного поля раствора на пункте обработки груза, при подаче раствора из форсунки. В расчетной области находятся два полувагона, и подача раствора происходит при наличии ветрового потока.

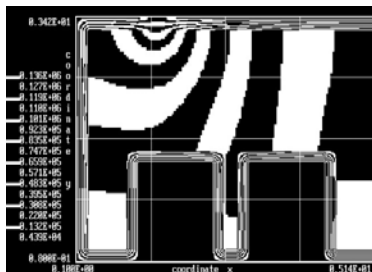


Рис. 7. Концентрационное поле раствора при подаче его на полувагоны с грузом

Fig. 7. The concentration field of the solution when feeding it to the gondola car with a load

Как видно из рис. 7 распределение раствора в расчетной области – неравномерное, что вызвано сносом капель раствора ветровым потоком. Это значит, что распределение раствора на поверхности груза также будет неравномерным. Таким образом, подача раствора на обрабатываемый объект должна корректироваться в зависимости от конкретных метеоусловий.

### Научная новизна и практическая значимость

Предложен специальный раствор, позволяющий уменьшить интенсивность пылевыведения от поверхности угольного штабеля. Созданы численные модели, позволяющие рассчитывать процесс рассеивания раствора на пункте обработки груза при подаче раствора из форсунки. Модели дают возможность учесть влияние скорости ветра, турбулентной диффузии, интенсивности подачи раствора на процесс формирования его концентрационного поля.

Применение предложенного раствора позволит уменьшить потери угля и уровень загрязнения рабочих зон вблизи штабелей или рядом с транспортными магистралями, где осуществляется перевозка угля.

## Выводы

Рассмотрен эффективный метод уменьшения интенсивности эмиссии угольной пыли от поверхности штабеля путем обработки его специальным раствором. Состав предложенного раствора основан на использовании промышленных отходов, поэтому рассмотренный в работе подход можно рассматривать как вариант утилизации промышленных отходов.

Дальнейшее развитие данного исследования следует проводить в области создания математических моделей процесса обработки штабелей угля раствором.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Беляев, Н. Н. Моделирование процесса сноса угольного концентрата из полувагонов / Н. Н. Беляев, А. А. Карпо // Науковий вісник буд-ва : зб. наук. пр. / Харк. нац. ун-т буд-ва та архітектури. – Харків, 2016. – №1 (83). – С. 196–199.
2. Беляев, Н. Н. Проблема уноса угольной пыли / Н. Н. Беляев, М. О. Оладипо // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 6 (66). – С. 17–24. doi: 10.15802/stp2016/90450.
3. Берлянд, М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. – 273 с.
4. Бойченко, С. В. Екологічна освіта – основа сталого розвитку суспільства: проблеми і перспективи вищої школи : монографія / С. В. Бойченко, Т. В. Сасенко. – Київ : Ун-т «Україна», 2013. – 502 с.
5. Бондарчук, О. М. Підвищення екологічної безпеки територій впливу залізничних гірничо-збагачувальних комбінатів на основі зменшення пиловиділення шламосховищ : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 26.05.01 / Бондарчук Ольга Михайлівна ; Нац. гірн. ун-т. – Дніпропетровськ, 2010. – 20 с.
6. Бруцкий, Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов / Е. В. Бруцкий. – Киев : Ин-т гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

7. Воробийов, Є. О. Запобігання забруднення повітря пилом під час транспортування вугілля / Є. О. Воробийов, М. О. Ніколенко, І. О. Худякова // Вісті АДІ ДВНЗ «ДонНТУ». – Горлівка, 2005. – № 1. – С. 34–38.
8. Домнічев, М. В. Розробка технології знепилення хвостосховищ гірничо-збагачувальних комбінатів Кривбасу : автореф. дис. ... канд. техн. : 26.05.01 / Домнічев Микола Володимирович ; Криворізь. техн. ун-т. – Кривий Ріг, 2010. – 20 с.
9. Колесник, В. Е. Математическое моделирование процесса рассеивания промышленной пыли в атмосфере / В. Е. Колесник, Л. А. Головина, В. В. Богуцкая // Зб. наук. пр. / Нац. гірн. ун-т. – Дніпропетровськ : РВК НГУ, 2006. – № 26, т. 2. – С. 120–130.
10. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – Москва : Наука, 1982. – 320 с.
11. Роуч, П. Вычислительная гидродинамика / П. Роуч. – Москва : Мир, 1980. – 616 с.
12. 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.
13. Biliaiev, M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography / M. Biliaiev // NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security. – 2012. – P. 87–91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8\_15.
14. Coal dust emissions: From environmental control to risk minimization by underground transport. An applicative case-study / B. Fabiano, F. Curro, A. P. Reverberi, E. Palazzi // Process Safety and Environmental Protection. – 2014. – Vol. 92. – Iss. 2. – P. 150–159. doi: 10.1016/j.psep.2013.01.002.
15. Ferreira, A. D. Full-scale measurements for evaluation of coal dust release from train wagons with two different shelter covers / A. D. Ferreira, D. X. Viegas, A. C. M. Sousa // J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2003. – Vol. 91. – Iss. 10. – P. 1271–1283. doi: 10.1016/S0167-6105(03)00077-1.
16. Full cost accounting for the life cycle of coal / P. R. Epstein, J. J. Buonocore, K. Eckerle [et al.] // Annals of the New York Academy of Sciences. – 2011. – Vol. 1219. – Iss. 1. – P. 73–98. doi: 10.1111/j.1749-6632.2010.05890.x.
17. Initial Report on the Independent Review of Rail Coal Dust Emissions Management Practices in the NSW Coal Chain / Chief Scientist & Engineer. – Sydney NSW, Australia, 2015. – 75 p.
18. Szabo, M. F. Environmental assessment of coal transportation / M. F. Szabo. – Cincinnati, Ohio : Environmental Protection Agency, 1978. – 142 p.

М. М. БІЛЯЄВ<sup>1\*</sup>, А. О. КАРПО<sup>2\*</sup>, З. М. ЯКУБОВСЬКА<sup>3\*</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) 273 15 09, ел. пошта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</sup>Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта alichka-88.karpo@yandex.ru, ORCID 0000-0003-3201-8435

<sup>3\*</sup>Каф. «Фізика», Український державний хіміко-технологічний університет, просп. Гагаріна, 8, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (056) 247 46 70, ел. пошта zinaida.yakubowskaya@yandex.ua, ORCID 0000-0002-9893-3479

## ЗНИЖЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ВИНЕСЕННЯ ВУГІЛЬНОГО ПИЛУ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ СПЕЦІАЛЬНОГО РОЗЧИНУ

**Мета.** Дане дослідження спрямоване на: 1) розробку розчину для покриття вугілля в залізничних вагонах відкритого типу або для покриття вугільних штабелів із метою мінімізації виносу вугільного пилу; 2) створення математичної моделі процесу подачі розчину на поверхню вугілля. **Методика.** Для вирішення поставленої задачі розроблений спеціальний розчин, що містить дешеві промислові відходи та напівпродукти хімічного виробництва. Проведено фізичний експеримент з оцінки інтенсивності виносу вугільного пилу при використанні розробленого розчину. Побудовано математичну модель, засновану на застосуванні рівнянь руху ідеальної рідини та масопереносу. Розроблені числові моделі складають основу створеного пакета прикладних програм для оцінки якості обробки поверхні вугілля спеціальним розчином.

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

**Результати.** Представлені результати проведеного фізичного експерименту з оцінки величини виносу вугільного пилу від побудованої моделі вугільного штабеля при обробці його поверхні спеціальним розчином і без обробки. Показано, що застосування запропонованого розчину для обробки поверхні вугілля дозволяє суттєво зменшити винос вугільного пилу. Це дозволяє знизити величину економічних втрат та зменшити рівень пилового забруднення повітряного середовища в робочих зонах. Запропоновані результати обчислювального експерименту, проведеного на базі побудованих чисельних моделей.

**Наукова новизна.** Авторами представлений новий розчин для обробки поверхні вугілля з метою мінімізації виносу вугільного пилу від вугільного штабеля, що дозволяє істотно зменшити втрати вугілля. Створено числові моделі, що дозволяють врахувати істотні фактори, що впливають на процес розсіювання розчину в атмосфері при обробці вугілля в напіввагонах.

**Практична значимість.** Запропонований в роботі розчин має низьку ціну, так як може бути створений на основі використання відходів промислових виробництв. Застосування даного розчину дозволяє істотно зменшити інтенсивність виносу вугільного пилу від поверхні вугільного штабеля. Розглянуто ефективні числові моделі «diagnostic models» для експрес-розрахунку процесу обробки розчином вантажу в піввагонах. Моделі можуть бути застосовані при розробці стратегії подачі розчину на поверхню вантажу при різних атмосферних умовах. Побудовані числові моделі можуть служити для наукового обґрунтування параметрів процесу обробки вантажу при різній формі його поверхні в напіввагоні.

*Ключові слова:* винос вугільного пилу; штабель вугілля; хімічна обробка вугілля; чисельне моделювання; фізичний експеримент

M. M. BILIAIEV<sup>1\*</sup>, A. A. KARPO<sup>2\*</sup>, Z. M. YAKUBOVSKA<sup>3\*</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) 273 15 09, e-mail gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</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) 273 15 09, e-mail alichka-88.karpo@yandex.ru, ORCID 0000-0003-3201-8435

<sup>3\*</sup>Dep. «Physics», Ukrainian State University of Chemical Technology, Gagarin Avenue, 8, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (056) 247 46 70, e-mail zinaida.yakubovskaya@yandex.ua, ORCID 0000-0002-9893-3479

## REDUCING THE INTENSITY OF TAKEAWAY PULVERIZED COAL BY USING SPECIAL SOLUTION

**Purpose.** The article is aimed: 1) to develop the coal coating solution in open railway cars or to cover coal piles to minimize the coal dust losses; 2) creating a mathematical model of the process of the solution feeding to the surface of coal. **Methodology.** To solve this problem, it was developed a special solution containing cheap industrial wastes and semiproducts of chemical industries. It was conducted a physical experiment to assess the intensity of coal dust loss when using the developed solution. A mathematical model based on the use of the motion equations of the ideal fluid and mass transfer was developed. The developed numerical models are the basis of the application program package created for assessing the quality of processing the coal surface by special solution. **Findings.** The results of the conducted physical experiment to assess the magnitude of the coal dust loss on the model of the coal pile in the processing of its surface with a special solution and without processing are presented in the article. It is shown that the application of the proposed solution for surface processing of coal can significantly reduce the coal dust loss. This makes it possible to reduce the amount of economic losses and reduce the level of air dust pollution in work areas. The results of computational experiments carried out on the basis of the constructed numerical models are presented in the article. **Originality.** Authors proposed a new solution for the coal surface processing in order to minimize the removal of pulverized coal from the coal pile, which substantially reduces the coal losses. There were created numerical models to take into account the relevant factors influencing the solution dispersion process in the atmosphere from coal processing in gondola cars. **Practical value.** Solution, proposed in the article has a low price, because it can be created on the basis of industrial production wastes. Application of this solution can significantly reduce the intensity of coal dust losses from the surface of the coal pile. There were considered effective numerical models «diagnostic models» for rapid calculation of cargo processing in gondola cars with the solution. The models may be used in developing strategies of solution feeding to the cargo surface at various atmospheric conditions. The con-

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

structured numerical models can be used for scientific substantiation of the parameters of cargo processing with various forms of its surfaces in the gondola car.

**Keywords:** coal dust loss; coal pile; chemical processing of coal; numerical modeling; physical experiment

## REFERENCES

1. Biliaiev, M. M., & Karpo, A. O. (2016). Modeling of dust dispersion from railway wagon. *Scientific Bulletin of Building*, 1(83), 196-199.
2. Biliaiev, M. M., & Oladipo, M. O. (2016). Coal dust emission problem. *Science and Transport Progress*, 6(66), 17-24. doi: 10.15802/stp2016/90450
3. Berlyand, M. Y. (1985). *Prognoz i regulirovaniye zagryazneniya atmosfery*. Leningrad: Gidrometeoizdat.
4. Boichenko, S. V., & Saienko, T. V. (2013). *Ekolohichna osvita – osnova staloho rozvytku suspilstva: problemy i perspektyvy vyshchoi shkoly*. Kyiv: University «Ukraine».
5. Bondarchuk, O. M. (2010). *Increasing ecological safety of the area influenced by iron ore dressing plants on the basis of reducing the dust level of slime pits*. (PhD thesis). Available from National Mining University, Dnipropetrovsk.
6. Bruyatskiy, Y. V. (2000). *Teoriya atmosfernoй diffuzii radioaktivnykh vybrosov*. Kyiv: Institute of Hydromechanics of National Academy of Sciences of Ukraine.
7. Vorobyov, Y. O., Nikolenko, M. O., & Khudyakova, I. O. (2005). Zapobihannia zabrudnennia povitria pylom pid chas transportuvannia vuhillia. *Visti Avtomobilno-dorozhnoho instytutu*, 1, 34-38.
8. Domnichev, M. V. (2010). *The technology development for the tailing ponds dust suppressing for the mining and beneficiation enterprises Krivbass*. (PhD thesis). Available from Kryvyi Rih Technical University, Kryvyi Rih.
9. Kolesnik, V. E., Golovina, L. A., & Boguckaya, V. V. (2006). Matematicheskoye modelirovaniye protsessa rasseivaniya promyshlennoy pyli v atmosfere. *Collection of Research Papers of National Mining University*, 26(2), 120-130.
10. Marchuk, G. I. (1982). *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy*. Moscow: Nauka.
11. Rouch, P. (1980). *Vychislitel'naya gidrodinamika*. Moscow: Mir.
12. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Biliaiev, M. M. (1997). *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kyiv: Naukova dumka.
13. Biliaiev, M. M., & Kharytonov, M. M. (2011). Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security*, 87-91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8\_15
14. Fabiano, B., Currò, F., Reverberi, A. P., & Palazzi, E. (2014). Coal dust emissions: From environmental control to risk minimization by underground transport. An applicative case-study. *Process Safety and Environmental Protection*, 92(2), 150-159. doi: 10.1016/j.psep.2013.01.002
15. Ferreira, A. D., Viegas, D. X., & Sousa, A. C. M. (2003). Full-scale measurements for evaluation of coal dust release from train wagons with two different shelter covers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91(10), 1271-1283. doi: 10.1016/S0167-6105(03)00077-1
16. Epstein, P. R., Buonocore, J. J., Eckerle, K., Hendryx, M., Stout III, B. M., Heinberg, R., & Glustrom, L. (2011). Full cost accounting for the life cycle of coal. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1219(1), 73-98. doi: 10.1111/j.1749-6632.2010.05890.x
17. Chief Scientist & Engineer. (2015). *Initial Report on the Independent Review of Rail Coal Dust Emissions Management Practices in the NSW Coal Chain*. Sydney NSW, Australia.
18. Szabo, M. F. (1978). *Environmental assessment of coal transportation*. Cincinnati, Ohio: Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Industrial Environmental Research Laboratory.

Статья рекомендована к публикации д.физ.-мат.н., проф. С. А. Пичуговым (Украина); д.т.н., проф. С. З. Полищуком (Украина)

Поступила в редколлегию: 07.12.2016

Принята к печати: 02.03.2017



## УДК 502.175:[502.3:504.5]

С. З. ПОЛИЩУК<sup>1\*</sup>, В. Ю. КАСПИЙЦЕВА<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Отопление, вентиляция и качество воздушной среды», Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24а, Днепро, Украина, 49005, тел. +38 (056) 756-34-92, эл. почта ov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-6473-253X

<sup>2\*</sup>Каф. «Отопление, вентиляция и качество воздушной среды», Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24а, Днепро, Украина, 49005, тел. +38 (056) 756-34-92, эл. почта ov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0001-5977-106X

## ПОДСИСТЕМА МОДЕЛЕЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

**Цель.** Научная работа посвящена усовершенствованию методики прогноза качества атмосферного воздуха при выбросе от стационарных источников загрязнения и от передвижных источников загрязнения. Выбор цели связан с тем, что в последнее время усилились требования к качеству прогнозной информации о состоянии атмосферного воздуха, что влечет за собой модернизацию существующих прогнозных методик. В работе проведено усовершенствование блока оценки и прогноза состояния атмосферного воздуха в системе регионального экологического мониторинга для повышения уровня экологической безопасности при планировании и застройке территорий. Усовершенствованный блок служит для определения показателей качества атмосферного воздуха и состояния его ресурсного потенциала. **Методика.** Для решения поставленной задачи использован комплексный метод исследований, который заключается в системном анализе и обобщении существующих исследований по проблеме оценки и прогноза состояния атмосферного воздуха, применении индуктивного метода при построении иерархической системы моделей. При определении показателей верхнего уровня использован метод экспертных оценок. Для решения дифференциальных уравнений аэродинамики и массопереноса применяются конечно-разностные методы. **Результаты.** Разработана структура прогнозного блока по атмосферному воздуху в системе экологического мониторинга. Выполнены исследования показателей качества атмосферного воздуха и состояния его ресурсного потенциала с использованием разработанных моделей. **Научная новизна.** Авторами обосновано использование иерархического ряда математических моделей для комплексной оценки и прогноза состояния атмосферного воздуха в сценариях социо-эколого-экономического развития и градостроительной деятельности регионов, что позволяет повысить уровень их экологической безопасности на этапе выполнения проектно-поисковых работ. **Практическая значимость.** Представленный комплекс моделей позволяет обеспечить оценку и прогноз состояния атмосферного воздуха в системе экологического мониторинга с учетом природно-климатических, социально-экономических особенностей регионов, их ресурсного потенциала и комплексных показателей устойчивого развития территорий. Предложенный подход может быть использован в системе мониторинга, как крупных мегаполисов, так и малых городов. Он может служить инструментом по экспертной оценке внедрения в городах различных природоохранных мероприятий.

**Ключевые слова:** загрязнение атмосферы; экологическая безопасность; ресурсный потенциал; мониторинг

### Введение

На сегодняшний день Днепропетровская область является наиболее характерным примером техногенно нагруженных регионов.

Согласно статданным почти 80 % выбросов вредных веществ дают Кривой Рог, Днепр и Каменское, поскольку именно в этих городах размещен основной промышленный потенциал области и они имеют значительный парк передвижных источников. Через Днепропетровскую область проходят 2 международных и 3 нацио-

нальные автомагистрали. До недавнего времени Днепр был одним из немногих областных центров, не имеющим объездных дорог, что негативно влияло на состояние окружающей среды.

По данным наблюдений в последние годы Кривой Рог, Днепр и Каменское входят в число 15 городов страны с наибольшим уровнем загрязнения атмосферного воздуха. Такая ситуация была обусловлена по большей части повышенным содержанием специфических вредных веществ, таких как формальдегид, фенол, фтористый водород, аммиак, а из числа основных

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

примесей – взвешенных веществ, диоксида азота, оксида углерода [7, 11].

Экологическая ситуация усугубляется тем, что выбросы в атмосферу осуществляются неравномерно, а преимущественно в промышленных зонах.

Объемы выбросов вредных веществ от стационарных источников в расчете на квадратный километр территории области составили свыше 22 т. В отдельных городах этот показатель значительно превышает средний по облас-

ти (Кривой Рог – в 30 раз, Каменское – в 28, Днепр – в 9 раз) [13].

Динамика выбросов в атмосферный воздух загрязняющих веществ от стационарных и передвижных источников, а также по отдельным видам автотранспорта предприятий Днепропетровской области по данным Главного областного управления статистики за период с 1992 года по 2015 год представлена на рис. 1 и 2 соответственно [11, 13].

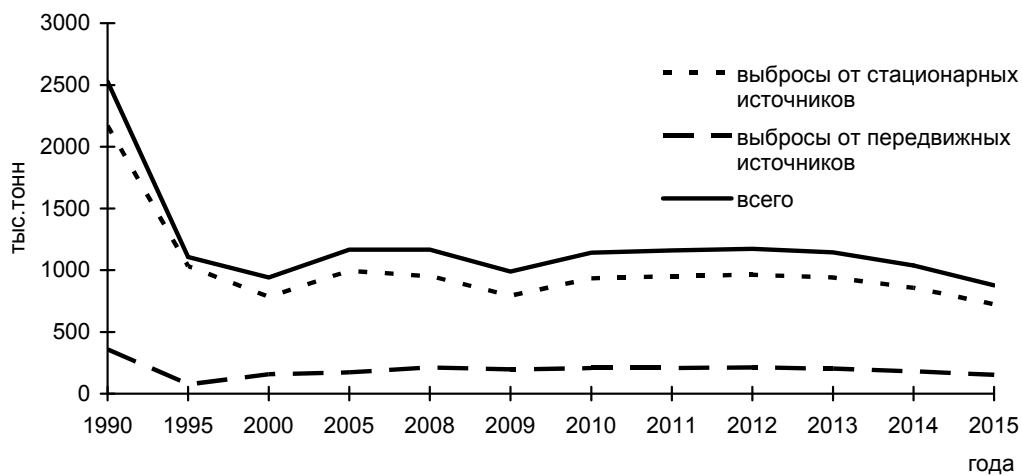


Рис. 1. Динамика выбросов загрязняющих веществ от стационарных и передвижных источников выбросов по Днепропетровской области за период 1990-2015 гг.

Fig. 1. Dynamics of emissions of contaminants from the stationary and movable sources of emissions in the Dnepropetrovsk region for 1990-2015 years

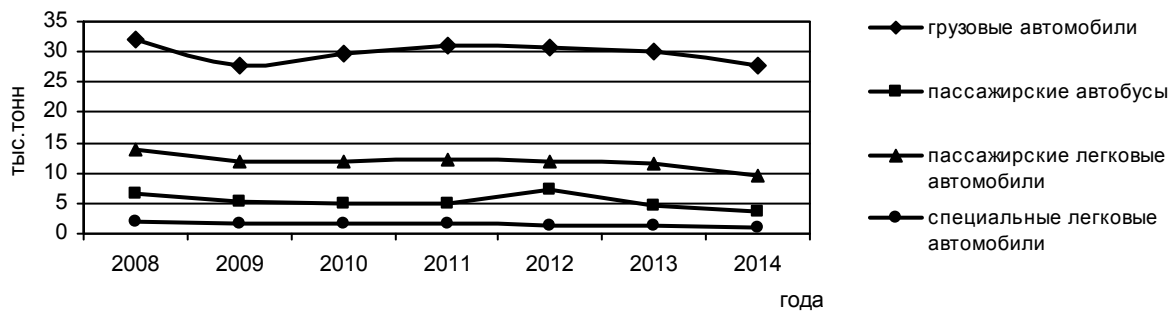


Рис. 2. Динамика выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от отдельных видов автотранспорта предприятий области

Fig. 2. Dynamics of air emissions of contaminants from separate types of motor transport of enterprises in the region

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

В сложившейся ситуации эффективная работа региональной системы экологического мониторинга является одной из необходимых мер по стабилизации и улучшению состояния окружающей природной среды.

**Цель**

Усиление прогнозных функций мониторинга, в частности по атмосферному воздуху, является необходимым условием при выборе оптимального сценария градостроения. Такая задача должна рассматриваться комплексно с учетом природно-ресурсного и промышленного потенциала, эффективности природоохранных мероприятий и медико-биологических показателей (здоровье населения). Для решения этой задачи широко используются математические модели [1, 4, 14–20].

Целью данной работы является усовершенствование блока оценки и прогноза состояния атмосферного воздуха в системе регионального экологического мониторинга для повышения уровня экологической безопасности при планировании и застройке территорий.

**Методика**

Территории регионов, даже небольших по площади, с их хозяйственными, социальными и природными процессами развития, несомненно, представляют собой большие сложные системы, обладающие свойствами стохастичности и иерархичности структуры.

Стохастичность поведения системы определяется тем, что все показатели ее по своей природе и ввиду наличия ошибок исходных данных являются случайными величинами, случайный характер носят и протекающие в системе процессы [12]. К ним относятся хозяйственное, социальное развитие территории и развитие природной среды под воздействием тех или иных сценариев.

Аналогично можно выделить иерархию в природной среде. Свойство изменчивости во времени ярко выражено во всех структурах рассматриваемой системы: непрерывно изменяется хозяйственная деятельность, социум, природная среда.

Таким образом, для описания социо-эколого-экономического развития территории необходимо создавать не одну модель, а целую

иерархическую систему взаимосвязанных моделей. Стратегия развития региона может быть выбрана только на основании прогноза последствий от внедрения различных альтернативных сценариев развития, поскольку эксперименты по реализации этих вариантов на реальных территориях чреваты возможными негативными результатами для окружающей среды и населения.

Одним из элементов моделирующего комплекса является атмосферный воздух, характеристика которого формируется на основании решения задачи оценки и прогноза загрязнения воздуха для сложившейся хозяйственной деятельности и заданного (выбранного) сценария развития региона на некоторый спрогнозированный период времени. Для комплексной оценки и прогноза состояния атмосферного воздуха и предназначена разрабатываемая многоуровневая математическая модель [10].

В соответствии с такой технологией поиска решения проблемы возникают и соответствующие требования к подсистеме оценки и прогноза загрязнения атмосферного воздуха, которая должна содержать перечисленные выше уровни информационно-математического обеспечения.

Согласно принятой методологии, программное обеспечение подсистемы прогноза и оценки загрязнения атмосферного воздуха, также как и математическое, имеет многоуровневую структуру, включающую в себя определение состояния ресурсных показателей и показателей качества воздуха, модели определения интегрального показателя загрязнения атмосферы, распространения пассивных примесей, модели распространения загрязнений от мощных точечных источников, построения полей концентраций и изолиний по данным измерений [3, 8, 9], а также методику ОНД-86 (программа «ЭОЛ-ПЛЮС»), рекомендованную Министерством экологии и природных ресурсов [5].

Структура программного обеспечения подсистемы оценки и прогноза загрязнения атмосферного воздуха в системе экологического мониторинга «Приднепровье» представлена в работе [10].

Данный комплекс моделей использует в качестве исходных данных характеристики хозяйственной деятельности, качества жизни, защищенности атмосферного воздуха, его физи-

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

ческого и химического загрязнения, а также данные мониторинга. Результаты расчета по моделям позволяют оценить уровень качества атмосферного воздуха с учетом состояния его ресурсного потенциала в связи с социально-экономическими показателями.

Для оптимизации работ по системе экологического мониторинга «Приднепровье» и улучшению координации между ее абонентами были разработаны формы представления информации в Центр управления мониторингом [6].

Поступление данных согласно разработанным формам, позволяет обеспечить унификацию накапливаемой информации, а также ее интеграцию, что послужит основой формирования банка экологических данных, а не только информационно-справочной системы, использование которой создает определенные трудности для потребителей за счет снижения оперативности в ее эксплуатации. Использование базы данных будет также способствовать повышению объективности контроля и прогноза состояния окружающей природной среды, что сочетается с высокой скоростью получения информации и, соответственно, своевременным принятием адекватных решений [2], поскольку сформированная и постоянно пополняющаяся база послужит основой информационного обеспечения выработки управленческих решений по природопользованию и природоохранной деятельности.

В общей сложности разработано 62 формы для самых различных организаций и ведомств, владеющих (или получающих) экологическую информацию. Эти формы прошли согласование в тех организациях, которые являются поставщиками соответствующей информации. Среди этих форм информацию об атмосферном воздухе содержат 27. Это данные о метеоусловиях в случае чрезвычайных ситуаций и на весь период восстановительных работ, результаты наблюдений загрязнения атмосферы на стационарных постах и подфакельных наблюдений в зоне деятельности предприятий, результаты радиационного контроля, уровень суммарного загрязнения воздушного бассейна в жилых районах, данные о катастрофоопасных объектах и катастрофоопасных ситуациях, данные об образовании, использовании и обезвреживании промышленных отходов на предприятиях области, данные о наличии и движении токсич-

ных отходов по отдельным веществам по городам области, интенсивность движения автотранспорта, выбросы в атмосферу от стационарных и передвижных источников в крупных городах области.

Информация, представленная в формах, позволяет, обеспечить исходными данными модели распространения пассивных примесей и распространения загрязнений от мощных точечных источников. Данные для моделей определения состояния ресурсного потенциала и качества атмосферного воздуха эти формы могут обеспечить лишь частично, поскольку в них нет данных о физическом загрязнении (акустическом, шумовом, электромагнитном), интенсивности перемещения воздушных масс, способности разложения в атмосферном воздухе вредных веществ (ультрафиолетовая радиация, влияние гроз), уровне ионизации атмосферного воздуха. Этой информацией было бы желательно дополнить формы, данные для которых обеспечивают Центр по гидрометеорологии и система экологического мониторинга г. Днепр. Также отсутствует информация экономического характера. Введение таких данных позволило бы обеспечить из форм представления информации в Центр управления мониторингом полноценную работу пакета с учетом всех региональных, социальных, экономических и экологических особенностей рассматриваемой территории.

Первоначальный этап исследований состоит в определении сводных интегральных показателей состояния ресурсного потенциала и качества атмосферного воздуха в условиях рассматриваемой территории в данный момент времени, включающих основные системообразующие их показатели и значения показателей, являющихся нормой для данной территории [3]. При этом защищенность атмосферы для различных ландшафтно-климатических условий определяется в каждом конкретном случае в зависимости от показателей ее степени (незащищенная, слабая, условная и надежная).

Для достижения поставленной цели разработаны структура и состав показателей состояния ресурсного потенциала и качества воздуха, методика агрегирования и нормирования показателей, способ определения весовых коэффициентов показателей с использованием экспертных оценок, а также показателей для усло-



## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

вий рассматриваемой территории.

Эти математические модели позволяют отразить основные связи и зависимости реального объекта, позволить в общем определиться с направлением развития региона без детальной характеристики составляющих социально-природно-техногенного комплекса, в том числе без особой территориальной детализации. Они предназначены для предварительной сравнительной оценки сценариев развития региона с точки зрения влияния их на загрязнение атмосферного воздуха. Считается, что такие модели могут быть использованы на этапе проектно-поисковых работ по разработке задач реформирования, структурной перестройки и развития региона.

## Результаты

Разработана структура прогнозного блока по атмосферному воздуху в системе экологического мониторинга. Выполнены исследования показателей качества атмосферного воздуха и состояния его ресурсного потенциала с использованием разработанных моделей. Результаты расчетов представлены в работах [3, 8, 9].

## Научная новизна и практическая значимость

Обоснованно использование иерархического ряда математических моделей для комплексной оценки и прогноза состояния атмосферного воздуха в сценариях социо-эколого-экономического развития и градостроительной деятельности регионов, что позволяет повысить уровень их экологической безопасности на этапе выполнения проектно-поисковых работ.

С использованием комплексных показателей разработан блок оценки и прогноза загрязнения атмосферного воздуха в системе экологического мониторинга.

## Выводы

Представленный комплекс моделей позволяет обеспечить оценку и прогноз состояния атмосферного воздуха в системе экологического мониторинга с учетом природно-климатических, социально-экономических особенностей регионов, состояния ресурсного потенциала атмосферы и комплексных показателей устойчивого развития территорий.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Беляев, Н. Н. Математическое моделирование в задачах экологической безопасности и мониторинга чрезвычайных ситуаций : монография / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, П. Б. Машихина. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2013. – 159 с.
2. Еремеев, А. П. Экспертные модели и методы принятия решений : учеб. пособие по курсу «Теория и методы принятия решений» / А. П. Еремеев ; ред. В. Н. Вагин. – Москва : Моск. энергет. ин-т, 1995. – 110 с.
3. Каспийцева, В. Ю. Оценка защищенности территорий от атмосферных загрязнений при планировании и застройке / В. Ю. Каспийцева // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 76 : Энергетика, экология, компьютерные технологии в строительстве. – С. 143–147.
4. Машихина, П. Б. Моделирование распространения примеси в атмосфере с учетом рельефа местности / П. Б. Машихина // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. 27. – С. 138–142.
5. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий : ОНД-86. – Ленинград : Гидрометеониздат, 1987. – 76 с.
6. Методические подходы к выбору стратегии устойчивого развития территории : в 2 т. / под науч. ред. А. Г. Шапаря ; ИППЭ НАН Украины. – Днепропетровск, 1996. – Т. 2. – 170 с.
7. Національна доповідь про стан навколишнього середовища в Україні у 2014 році [Електронний ресурс] : [веб-сайт М-ва екології та природ. ресурсів України]. – Електрон. текст. дані. – [Київ, 2015]. – Режим доступа: <http://www.menr.gov.ua/docs/activity-dopovidi/NacDopovid2014.pdf>. – Загл. с экрана. – Проверено : 31.03.2017.
8. Полищук, С. З. Прогноз распространения загрязнений в атмосфере от мощных точечных источников / С. З. Полищук, В. Ю. Каспийцева // Зб. наук. пр. Нац. гірн. ун-ту. – Дніпропетровськ, 2015. – № 49. – С. 218–223.
9. Полищук, С. З. К вопросу визуализации полей показателей экологического состояния атмосферного воздуха на региональном уровне / С. З. Полищук, В. Ю. Каспийцева // Строительство, материаловедение

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

- ние, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднeпр. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепр, 2016. – Вып. 92 : Энергетика, экология, компьютерные технологии в строительстве. – С. 104–108.
10. Полищук, С. З. Оценка и прогноз качества атмосферного воздуха на региональном уровне / С. З. Полищук, В. Ю. Каспийцева // Вісн. Придніпр. держ. акад. буд-ва та архітектури. : зб. наук. пр. / Придніпр. держ. акад. буд-ва та архітектури. – Дніпро, 2016. – № 8 (221). – С. 65–71.
  11. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Дніпропетровській області за 2014 рік [Электронный ресурс] : [веб-сайт М-ва екології та природ. ресурсів України]. – Електрон. текст. дані. – [Київ, 2015]. – Режим доступа: <http://www.menr.gov.ua/dopovidi/regionalni/4756-rehionalni-dopovidi-pro-stan-navkolyshnoho-prirodnoho-seredovyshcha-u-2014-rotsi>. – Загл. с экрана. – Проверено : 31.03.2017.
  12. Седж, Э. Н. Оптимальное управление системами / Э. Н. Седж, Ч. С. Уайт ; пер. с англ. Е. Б. Левиной, Ю. С. Шинакова ; под ред. Б. Р. Левина. – Москва : Радио и связь, 1982. – 392 с.
  13. Екологічний паспорт Дніпропетровської області за 2015 рік [Электронный ресурс] : [веб-сайт М-ва екології та природ. ресурсів України]. – Електрон. текст. дані. – [Київ, 2016]. – Режим доступа: [http://www.menr.gov.ua/docs/protection1/dniprotrovska/Dnipropetrovska\\_ekopasport\\_2015.pdf](http://www.menr.gov.ua/docs/protection1/dniprotrovska/Dnipropetrovska_ekopasport_2015.pdf). – Загл. с экрана. – Проверено : 31.03.2017.
  14. Artificial neural networks forecasting of PM 2.5 pollution using air mass trajectory based geographic model and wavelet transformation / F. Xiao, Q. Li, Y. Zhu [et al.] // Atmospheric Environment. – 2015. – Vol. 107. – P. 118–128. doi:10.1016/j.atmosenv.2015.02.030/.
  15. Biliaiev, M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography / M. Biliaiev ; In: Steyn D., Trini Castelli S. (eds.) // Air Pollution Modeling and its Application XXI. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. – Dordrecht : Springer, 2011. – P. 87–91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8\_15.
  16. Bougoudis, I. Fuzzy inference ANN ensembles for air pollutants modeling in a major urban area: the case of Athens / I. Bougoudis, L. Iliadis, A. Papaleonidas ; In: V. Mladenov, C. Jayne, L. Iliadis (eds.) // Engineering Applications of Neural Networks. EANN 2014. Communications in Computer and Information Science. – Cham : Springer, 2014. – Vol. 459. – P. 1–14. doi: 10.1007/978-3-319-11071-4\_1.
  17. Bougoudis, I. HISYCOL a hybrid computational intelligence system for combined machine learning: the case of air pollution modeling in Athens / I. Bougoudis, K. Demertzis, L. Iliadis // Neural Computing and Applications. – 2016. – Vol. 27. – Iss. 5. – P. 1191–1206. doi:10.1007/s00521-015-1927-7.
  18. Graber, W. K. Real time modeling as an emergency decision support system for accidental release of air pollutants / W. K. Graber, F. Gassmann // Mathematics and Computers in Simulation (MATCOM). – 2000. – Vol. 52. – Iss. 5/6. – P. 413–426. doi: 10.1016/s0378-4754(00)00164-6.
  19. Meroney, R. N. Perspectives on air pollution aerodynamics / R. N. Meroney // Proc. of the 10<sup>th</sup> Intern. Wind Engineering Conf., Copenhagen, Denmark, June 21–25, 1999. – Rotterdam : Balkema, 1999. – P. 79–90.
  20. Montavon, C. Validation of non-hydrostatic numerical model to simulate stratified wind fields over complex topography / C. Montavon // Proc. of the 2nd European & African Conf. on Wind Engineering, Palazzo Ducale, Genova, Italy, June 22–26, 1997. – Padova : SGE, 1997. – P. 357–362.

С. З. ПОЛИЩУК<sup>1\*</sup>, В. Ю. КАСПІЙЦЕВА<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Опалення, вентиляція і якість повітряного середовища», Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24а, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 756 34 92, ел. пошта [ov@mail.pgasa.dp.ua](mailto:ov@mail.pgasa.dp.ua), ORCID 0000-0002-6473-253X

<sup>2\*</sup>Каф. «Опалення, вентиляція і якість повітряного середовища», Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24а, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 756 34 92, ел. пошта [ov@mail.pgasa.dp.ua](mailto:ov@mail.pgasa.dp.ua), ORCID 0000-0001-5977-106X

## ПІДСИСТЕМА МОДЕЛЕЙ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ДЛЯ ОЦІНКИ СТАНУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ

**Мета.** Наукова робота присвячена удосконаленню методики прогнозу якості атмосферного повітря при викиді від стаціонарних джерел забруднення та від пересувних джерел забруднення. Вибір мети пов'язаний з тим, що останнім часом посилюються вимоги до якості прогнозної інформації про стан атмосферного повітря, що тягне за собою модернізацію існуючих прогнозних методик. В роботі проведено удосконалення бло-

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

ку оцінки та прогнозу стану атмосферного повітря в системі регіонального екологічного моніторингу для підвищення рівня екологічної безпеки при плануванні та забудові територій. Вдосконалений блок служить для визначення показників якості атмосферного повітря та стану його ресурсного потенціалу. **Методика.** Для розв'язання диференціальних рівнянь аеродинаміки і масопереносу застосовуються кінцево-різницеві методи. Для вирішення поставленої задачі використано комплексний метод досліджень, який полягає в системному аналізі та узагальненні існуючих досліджень із проблеми оцінки та прогнозу стану атмосферного повітря, застосування індуктивного методу при побудові ієрархічної системи моделей. При визначенні показників верхнього рівня використаний метод експертних оцінок. Для розв'язання диференціальних рівнянь аеродинаміки та масопереносу вживаються кінцево-різницеві методи. **Результати.** Авторами розроблена структура прогнозного блоку по атмосферному повітрю в системі екологічного моніторингу. Виконано дослідження показників якості атмосферного повітря та стану його ресурсного потенціалу з використанням розроблених моделей. **Наукова новизна.** Обґрунтовано використання ієрархічного ряду математичних моделей для комплексної оцінки та прогнозу стану атмосферного повітря в сценаріях соціо-еколого-економічного розвитку та містобудівної діяльності регіонів, що дозволяє підвищити рівень їх екологічної безпеки на етапі виконання проектно-пошукових робіт. **Практична значимість.** Представлений комплекс моделей дозволяє забезпечити оцінку та прогноз стану атмосферного повітря в системі екологічного моніторингу з урахуванням природно-кліматичних, соціально-економічних особливостей регіонів, їх ресурсного потенціалу та комплексних показників сталого розвитку територій. Запропонований підхід може бути використаний у системі моніторингу, як великих мегаполісів, так і малих міст. Він може служити інструментом по експертній оцінці впровадження в міста різних природоохоронних заходів.

*Ключові слова:* забруднення атмосфери; екологічна безпека; ресурсний потенціал; моніторинг

S. Z. POLISCHUK<sup>1\*</sup>, V. Y. KASPIJCTEVA<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Heating, Ventilation and Quality of Air Environment», State Higher Education Establishment «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», Chernyshevskiy St., 24a, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (056) 756 34 92, e-mail ov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-6473-253X

<sup>2\*</sup>Dep. «Heating, Ventilation and Quality of Air Environment», State Higher Education Establishment «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», Chernyshevskiy St., 24a, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (056) 756 34 92, e-mail ov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0001-5977-106X

## SUBSYSTEM OF MODELS OF ECOLOGICAL MONITORING FOR ESTIMATION OF THE STATE OF ATMOSPHERIC AIR

**Purpose.** The article is devoted to the improvement of the method of forecasting the quality of atmospheric air when discharging from stationary sources of pollution and from mobile sources of pollution. The choice of the goal is due to the fact that recently the requirements to the quality of the forecast information of the atmospheric air have increased, which entails the modernization of existing forecast methods. The work has improved the unit for assessing and forecasting the state of atmospheric air in a system of regional environmental monitoring to improve the level of environmental safety in the planning and development of territories. The improved unit serves to determine the quality indices of atmospheric air and the state of its resource potential. **Methodology.** For the decision of the put task the complex method of researches, which consists in the analysis of the systems and generalization of existent researches after the problem of estimation and prognosis of the state of atmospheric air, use of objective method at the construction of the hierarchical system of models, is utilized. For determination of indexes the method of expert estimations is top level used. For the solution of differential equations of aerodynamics and mass transfer uses finite-difference methods. **Findings.** The structure of prognosis block is developed on atmospheric air in the system of the ecological monitoring. Researches of indexes of quality of atmospheric air and state of its resource potential are executed with the use of the developed models. **Originality.** The use of a hierarchical series of mathematical models for a comprehensive assessment and prediction of the state of atmospheric air in scenarios of socio-ecological and economic development and urban development activities of the regions is justified by the authors, which makes it possible to raise the level of their ecological safety at the stage of carrying out design and prospecting works. **Practical value.** The presented complex of models allows to estimate and forecast the state of atmospheric air in the system of environmental monitoring, taking into account the natural and climatic, socio-economic characteristics of the regions, their resource potential and integrated indicators of sustainable development of the

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

territories. The proposed approach can be used in the monitoring system, both large megacities and small towns. It can serve as a tool for expert assessment of the implementation of various environmental measures in cities.

**Keywords:** contamination of atmosphere; ecological safety; resource potential; monitoring

## REFERENCES

1. Biliaiev, M. M., Gunko, Y. Y., & Mashyhina, P. B. (2013). *Matematicheskoye modelirovaniye v zadachakh ekologicheskoy bezopasnosti i monitoringa chrezvychaynykh situatsiy*. Dnipropetrovsk: Aktsent PP.
2. Yermeev, A. P. (1995). *Ekspertnyye modeli i metody prinyatiya resheniy*. Moscow: MPEI.
3. Kaspijceva, V. Y. (2014). Estimation of security of territories from atmospheric pollution at planning and building. *Construction. Material Science. Mechanical Engineering. Series: Energy, ecology, computer technologies in building*, 76, 143-147.
4. Mashyhina, P. B. (2009). The distribution modeling of impurities in the atmosphere with taking into account of terrain. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 27, 138-142.
5. Metodika rascheta kontsentratsiy v atmosfernom vozdukh vrednykh veshchestv, sodержashchikhsya v vybrosakh predpriyatiy, OND-86 Goskomitet SSSR po gidrometeorologii i kontrolyu prirodnoy sredy (1986). Retrieved from <http://dnaop.com/html/31047/doc-D0%9E%D0%9D%D0%A2%D0%9F-86/>
6. Shapar, A. G. (Ed.). (1996). *Metodicheskiye podkhody k vyboru strategii ustoychivogo razvitiya territorii* (Vol. 2). Dnipropetrovsk: Instytut problem pryrodokorystuvannia ta ekolohii.
7. Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine. (2016). *Natsionalna dopovid pro stan navkolyshnoho seredovyshcha v Ukraini u 2014 rotsi*. Kyiv: FOP Hrin D.S. Retrieved from <http://www.menr.gov.ua/docs/activity-dopovidi/NacDopovid2014.pdf>
8. Polischuk, S. Z., & Kaspijceva, V. Y. (2015). Estimation of Atmospheric Pollution Spread from Powerful Point Sources. *Collection of Research Papers of National Mining University*, 49, 218-223.
9. Polischuk, S. Z., & Kaspijceva, V. Y. (2016). Visualization of the fields of indexes of the ecological state of atmospheric air at regional level. *Construction. Material Science. Mechanical Engineering. Series: Energy, ecology, computer technologies in building*, 92, 104-108.
10. Polischuk, S. Z., & Kaspijceva, V. Y. (2016). Estimation and prognosis of quality of atmospheric air at regional level. *Bulletin of Prydniprov's'ka State Academy Civil Engineering and Architecture*, 8(221), 65-71.
11. Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine. (2015). *Rehionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha v Dnipropetrovskii oblasti za 2014 rik*. Kyiv. Retrieved from <http://www.menr.gov.ua/dopovidi/regionalni/4756-rehionalni-dopovidi-pro-stan-navkolyshnoho-pryrodnoho-seredovyshcha-u-2014-rotsi>
12. Sage, A. P., & White, C. C. (1982). *Optimalnoye upravleniye sistemami* (Y. B. Levina, Y. S. Shinakov, Trans.). Moscow: Radio i svyaz.
13. Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine. (2016). *Ekolohichnyi pasport Dnipropetrovskoi oblasti za 2015 rik*. Retrieved from [http://www.menr.gov.ua/docs/protection1/dnipropetrovska/Dnipropetrovska\\_ekopasport\\_2015.pdf](http://www.menr.gov.ua/docs/protection1/dnipropetrovska/Dnipropetrovska_ekopasport_2015.pdf)
14. Feng, X., Li, Q., Zhu, Y., Hou, J., Jin, L., & Wang, J. (2015). Artificial neural networks forecasting of PM 2.5 pollution using air mass trajectory based geographic model and wavelet transformation. *Atmospheric Environment*, 107, 118-128. doi:10.1016/j.atmosenv.2015.02.030/
15. Biliaiev, M., & Kharytonov M. M. (2011). Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. In D. Steyn, S. Trini Castelli (eds.) *Air Pollution Modeling and its Application XXI. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security* (pp. 87-91). Dordrecht: Springer. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8\_15
16. Bougoudis, I., Iliadis, L., & Papaleonidas, A. Fuzzy inference ANN ensembles for air pollutants modeling in a major urban area: the case of Athens. In: V. Mladenov, C. Jayne, & L. Iliadis (Eds.). *Engineering Applications of Neural Networks. EANN 2014. Communications in Computer and Information Science*, 459. Cham: Springer. doi: 10.1007/978-3-319-11071-4\_1
17. Bougoudis, I., Demertzis, K., & Iliadis, L. (2016). HISYCOL a hybrid computational intelligence system for combined machine learning: the case of air pollution modeling in Athens. *Neural Computing and Applications*, 27(5), 1191-1206. doi: 10.1007/s00521-015-1927-7
18. Graber, W. K., & Gassmann, F. (2000). Real time modeling as an emergency decision support system for accidental release of air pollutants. *Mathematics and Computers in Simulation (MATCOM)*, 52(5-6), 413-426. 10.1016/s0378-4754(00)00164-6



ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

---

19. Meroney, R. N. (1999). Perspectives on air pollution aerodynamics. *Proceedings of the 10th International Wind Engineering Conference, Copenhagen, Denmark, June 21-25, 1999*. 79-90. Rotterda: Balkena.
20. Montavon, C. (1997). Validation of non-hydrostatic numerical model to simulate stratified wind fields over complex topography. *Proceedings of the 2nd European & African Conference on Wind Engineering, Palazzo Ducale, Genova, Italy, June 22-26, 1997*. 357-362. Padova: SGE.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Н. Н. Беляевым (Украина); д.т.н., проф. А. С. Беликовым (Украина)

Поступила в редколлегию: 23.12.2016

Принята к печати: 24.03.2017

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

UDC 625(061.1)

B. FARKAS<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup> Dep. «Faculty of Transportation Engineering and Vehicle Engineering», The Budapest University of Technology and Economics, Műegyetem rkp., 3, Budapest, Hungary, H-1111, tel. +36 1 (463) 10 51, e-mail farkas.balint@mail.bme.hu, ORCID 0000-0001-5388-9905

### THE INTRODUCTION OF THE MOST POWERFUL RAILWAY OF THE EU, AND ITS SUPPORT WITH ECONOMIC ANALYSES

**Purpose.** The purpose of the research is to support with results and present one of the most powerful (German) railways' relationships with the economy and its network coverage. To prove that the railway has a strategic significance within the connection of economic regions. **Methodology.** We select the country with the highest capacity from the EU countries, then in respect of the given country we present its homogeneity and connections. We look for those points in the given country, where the greatest quantities of goods are placed on rail. Then we compare this with the country's GDP map and look for a relationship between the rail network and the country's GDP. **Findings.** The railway creates the country's ideal economic centre of gravity. It is clear that the country can be divided into two major regions, the northern and the southern part. **Originality.** The railway system has been studied rarely from an economic point of view, with GDP correlations. The method can serve as a useful research base to the economic analysis of any area, where we are interested in the importance of railways. **Practical value.** In case of any economic or geographical area, the importance of the railway can be determined, and it can be shown that how important role the railway can play in an economic region.

*Keywords:* competition; railway freight transport; GDP

#### Introduction

In this article we present Europe's most powerful railway system. Further, we examine its components, in particular from the aspect of freight transport. First, we examine Europe's freight transport data and determine where the largest rail freight flow in Europe is. Second, we present the railway density in Europe and deduce conclusions about the fact whether it is in direct proportion to the freight flows. Third, we take a closer look at Germany's dispatch points, which we divide into two main groups. Finally, we draw parallels between the railway dispatch points and the GDP-producing regions.

#### Research procedure

In our research we move step by step and examine the flow of goods from a quantitative and qualitative point of view, we determine the dispatch points, the network, and the other factors connected to the network, such as GDP. One of the essential questions of the research is the goods' volume, distribution. It is shown in Figure 1 that in freight ton kilometres the best is Germany in European context, and in passenger transport it also plays an outstanding position. In the following, we will present the reasons for this and examine why the German railway could become an outstanding player in Europe, and why it is so important for the German economy.

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

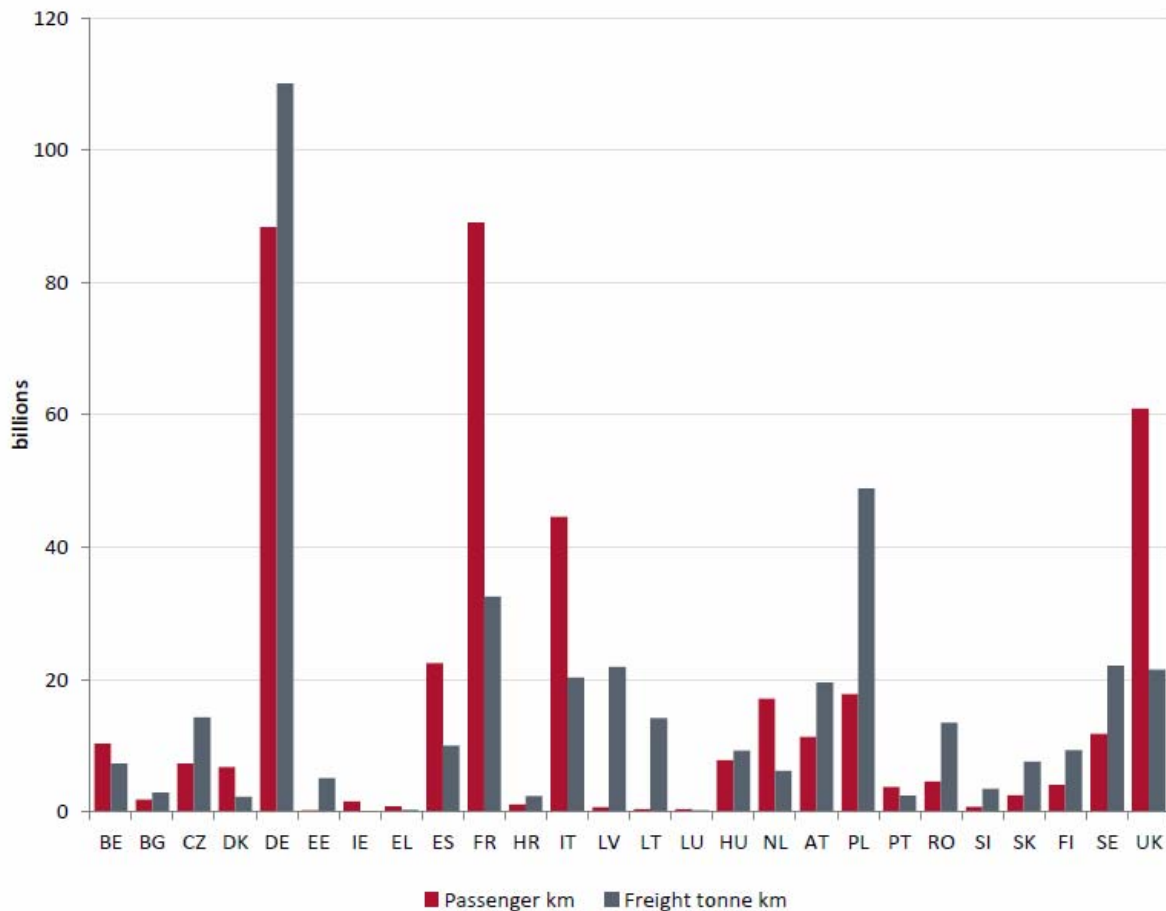


Fig. 1. Passenger and freight activity (2012) [18]

As a first step, we examine the distribution of shipped quantities in Germany in respect of international, domestic and transit traffic. Figure 2 shows that the nationally dispatched goods make up the largest proportion. This is followed by the international, and then the transit traffic. By examining the structure of the German rail market, it can be determined that it tries to keep roughly in balance all three types of traffic. This is advantageous, because if any of the three segment should fail, the German railway would be able to optimal operation [1, 18].

In contrast with the above, it is clearly visible in Figure 2 in case of Turkey, that the rail freight is made up exclusively from domestic traffic, so it is very vulnerable, however, their rail share can be increased on international level.

By examining Hungary, it is visible that most of the volume of goods transported is made up by the international traffic. From this we can conclude that it would be necessary to target an increase in its own flow of goods to make the ratio roughly the same.

In case of Austria, it can be determined that it has the same structure as Germany, only the quantities differ from each other. Thus, from the European cyclorama it can be concluded that only Germany and Austria has such a composition in terms of traffic, which can be said to be in equilibrium broadly. With regard to other European countries, Hungary is also close to the equilibrium distribution.

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

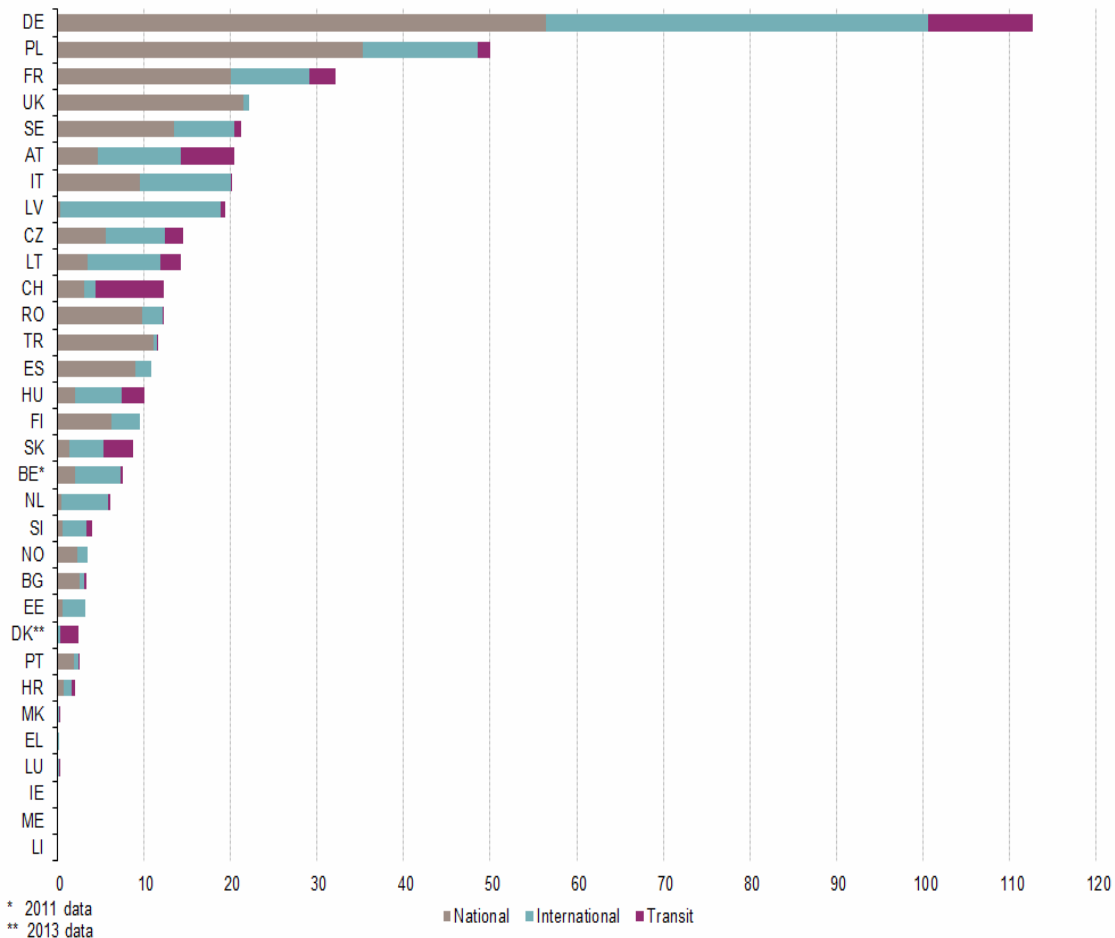


Fig.2. Rail transport of goods by country in 2014 – in billion tkm [15]

As a second step: So far it has been found that the role of the railway is the largest in Germany within Europe with respect to both passenger and freight transport. You may wonder that in this case whether Germany has the densest railway network or not. If this condition is not available, then it is difficult to meet the conditions for optimal operation.

In Figure 3, we see Europe's rail density, not surprisingly, one of the densest rail network is located in Germany (marked as hue, the darkest are the densest area approx. 200 km/1000 km<sup>2</sup>). It also confirms that why the rail freight volume is the best here.

As a third step we examine that if a dens infrastructure is available, then where good dispatches are formed [2].

In Figure 4 the places, where dispatches occurred in Europe, can be seen marked with blue dots. These may be land or sea points. From the network it is clearly visible that these point are concentrated in the area of North Germany, where the network is also the most powerful. In addition, nearly 20 of such dispatch point is located in the area of Germany [6]. Later on we will discuss that points located in the south [21].

As a fourth step: we examine the distributions by good types. From this we can conclude how homogeneous the rail freight market of Germany is in respect of the goods. We examine the volume of the goods traditionally carried by rail [12, 13].

The pie chart (Figure 5) show the quantity transported in million ton-kilometres in Germany.

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

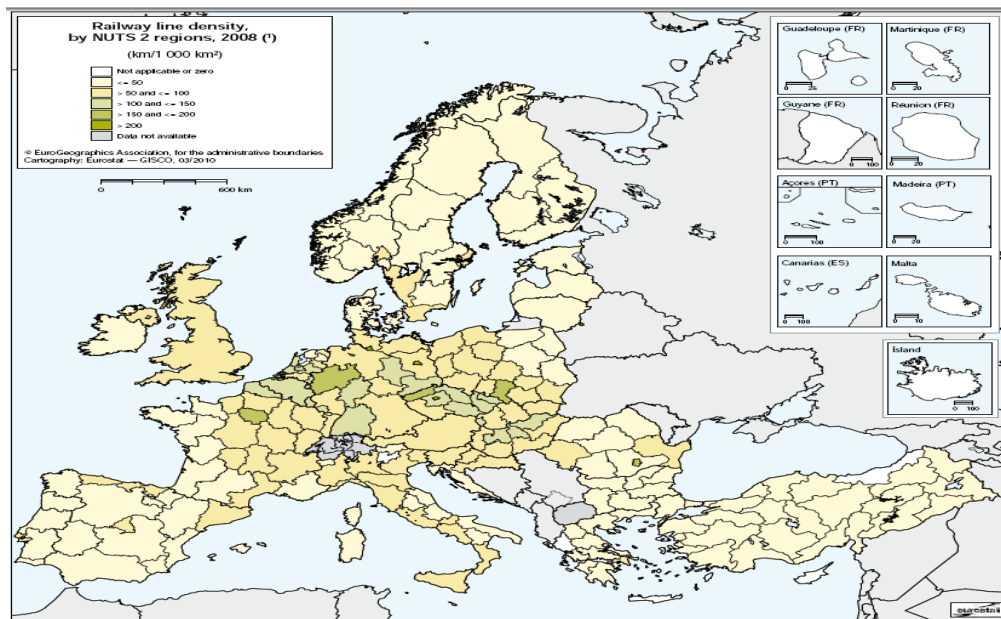


Fig. 3. Railway line density [19]



Fig. 4. ETRMS Planned Deployment Through 2020 [21]

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

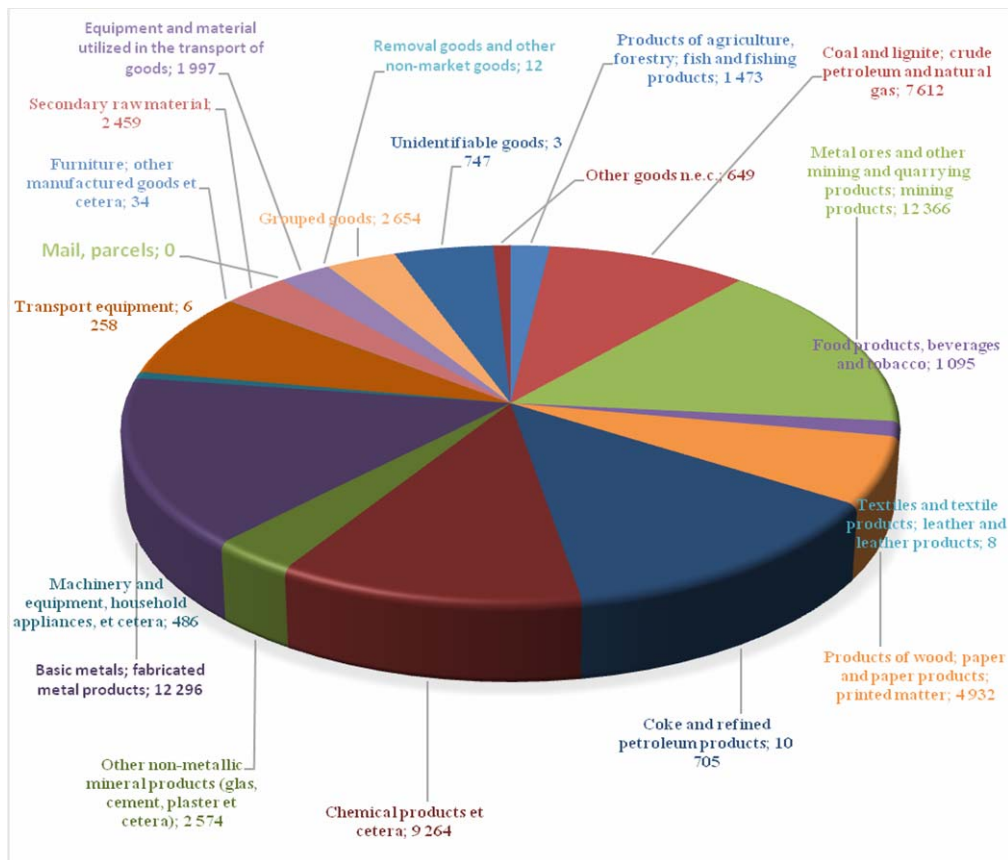


Fig. 5. Transport performance in 2015, by mode of transport and product division (in million tonne-kilometres) [20]

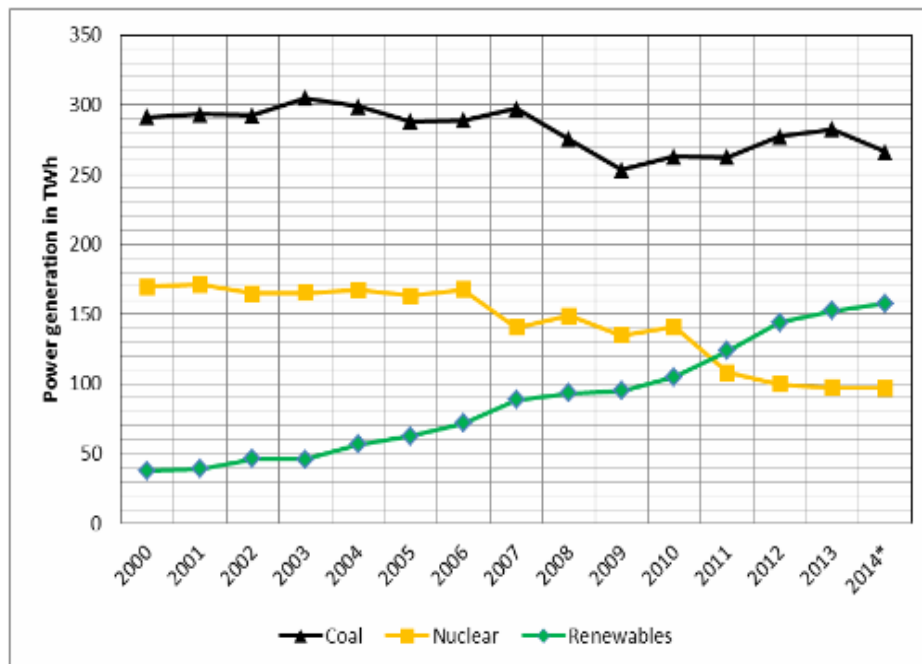


Fig. 6: Development of power generation from coal (lignite and hard coal), nuclear and renewable energy sources (in terawatt-hours, 2014 data partly estimated) [2]



## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

It is visible in Figure 5 that a significant proportion of rail goods is linked to heavy industry, such as mining, coke, petroleum and chemical products. It is also clearly visible that the structure is not homogeneous, so if the transport of any product is terminated by chance, then the rail is able to continue to operate safely. However, if we examine the composition in a complex way, then it can be seen that each is related to heavy industry. Hereinafter we have to reckon with that in Germany the capacity of conventional power plants is permanently reduced, or they even want to abolish the operation of conventional coal-fired power plants. Currently the coal power plants are still dominant in the German energy production, the energy they produce was 44% of the electricity in 2014 (26% from lignite, and 18% from hard coal). The combustion of lignite causes the greatest greenhouse gas emission. In order to reduce emissions, the German government launched a process that will reduce carbon consumption in the country [17].

In Figure 6 the 3 main components of energy production of Germany are visible. It can be seen that the coal consumption is more and more reduced, while the renewable energies are

increased. On the long term the rail must reckon with this.

As a fifth step: we examine where Germany generates the largest part of GDP [8]. We assume that the rail also has an important role there. We can also confirm with the fact that Germany is built on heavy industry economy. Figure 7: “Germany’s GDP map” [4, 5, 7]. Based on the map we can have two important statements:

Firstly: where dispatch is done in North Germany, an outstanding value is not generated in terms of the country’s GDP. Its explanation is that we talk about port traffics. So there the goods only change modality [3].

Secondly: the dispatch point in South Germany are the most important for the German economy. The finished products are produced there, and the industrial centre of the country is also there.

A more detailed examination should also be carried out in connection with the dispatch locations to determine the high points in terms of dispatch.

As a sixth step: we examine in which regions, cities of Germany the dispatch of goods happens by rail (Figure 8).

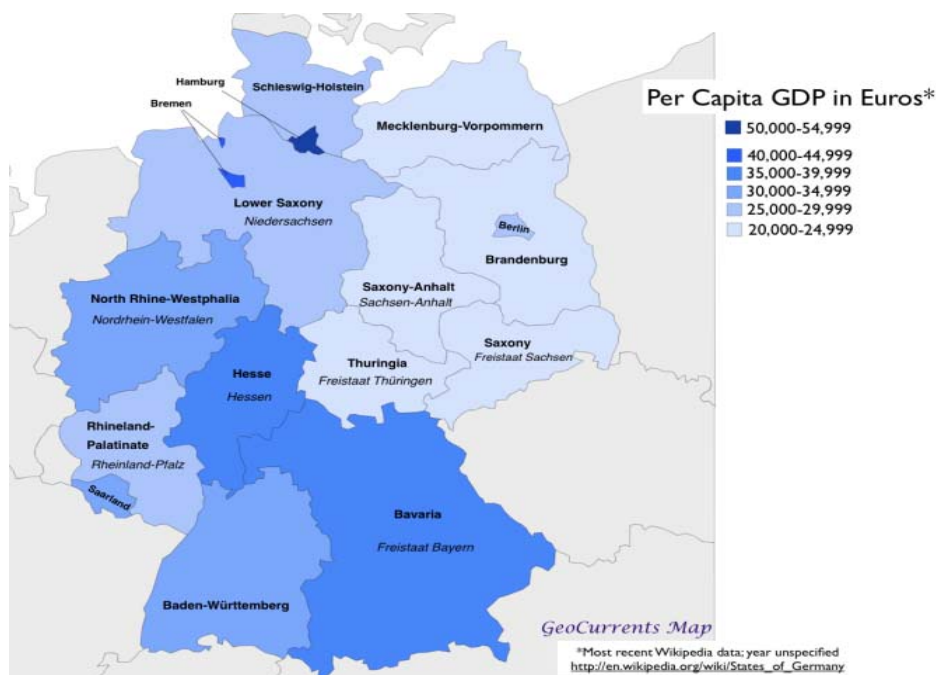


Fig. 7. GDP per capita of the German states [9, 16]

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

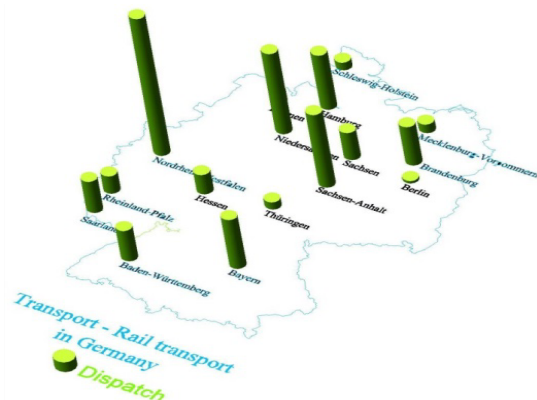


Fig. 8. Transport – Rail transport in Germany [14]

Table 1

**Regional breakdown [14]**

City	million tons
Baden-Württemberg	15.186
Bayern	24.621
Berlin	1.191
Brandenburg	19.286
Bremen	5.663
Hamburg	27.275
Hessen	9.385
Mecklenburg-Vorpommern	4.349
Niedersachsen	40.373
Nordrhein-Westfalen	69.002
Rheinland-Pfalz	8.726
Saarland	6.665
Sachsen	13.563
Sachsen-Anhalt	36.56
Schleswig-Holstein	3.77
Thüringen	3.556
Germany	289.171

**Conclusions**

As a first step: We examined the structure of rail market in Europe, and found that Germany plays a very important role both in terms of freight and passenger transport. There we chose Germany for further examination.

As a second step: we approached Europe's rail

network along the network aspects and found that the density of the railway network is the largest in Germany.

As a third step: we examined where the dispatch points in Germany are. We divided the points roughly into two main points. The first group is located in North Germany (sea traffic), the second group in South Germany.

As a fourth step: we examined the distributions by good types and came to the conclusion that we talk about goods traditionally with heavy industry. Fortunately, the type of goods is less concentrated, so if the distribution of any goods is terminated, then it will less affect the rail freight market.

As a fifth step: we examined Germany's GDP according to regional distributions, and found that the aforementioned South Germany area is the most powerful in the country. So the rail infrastructure is essential for the region [7, 22].

As a sixth step: by regions, we examined where and in what quantities dispatches happened. We found that we can divide the area of Germany into two main parts, the first is the northern part, which contains rather sea traffic, while the southern part is the capital strong part of Germany.

As a final conclusion it can be determined that the rail has a strong and outstanding role economically until today in Germany [10]. The rail passes along where the country's economy is the most powerful, it connects the northern and southern regions, which is very important for the economy. The economic goods produced can be easily and quickly forwarded to those points, where a greater demand is generated for that. In Figure 8, which illustrates the dispatch points, it is clearly visible that for example in Hamburg the dispatch of goods is great, but the country's GDP map shows that the GDP is small compared with those of the country, so in respect of this city the modality change of goods arriving by the sea is in the background of high dispatch rate.

During our research, we examined the railway's environment from an economic (GDP) and a network point of view, searched for the network's graph points, that is the dispatch places.

Conclusions can be drawn that the railway still plays a very important network connecting role in Germany. The railway creates the country's ideal economic centre of gravity. It is clear that the country can be divided into two major regions, the northern and the southern part.

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

The northern part's operations rather refer to trade, while the southern part clearly refers to domestic production. Presumably, this structure can be said to be optimal, since currently the rail market operating in Germany is highly ranked in Europe [4].

According to the study of H. Mitwallyova, V. Jankovic, the German rail freight market is

highly ranked mainly because it operates very efficiently in the EU rail freight market [11]. The EU15 members are much more effectively operating than the later connecting EU Member States, except for Estonia [18]. The explanation for this is they employ less employees for the same work, and use advanced technologies and IT systems

## LIST OF REFERENCE LINKS

1. Albers, S. Competitive Dynamics Across Industries: An Analysis of Inter-Industry Competition in German Passenger Transportation [Electronic resource] / S. Albers, C. Heuermann // *Schmalenbach Business Review*. – 2013. – Vol. 65. – P. 431–453. – Available at: <https://ssrn.com/abstract=2339966>. – Title from the screen. – Accessed : 14.03.2017.
2. Bajczuk, R. The uncertain future of the coal energy industry in Germany [Electronic resource] / R. Bajczuk // *Ośrodek Studiów Wschodnich im. Marka Karpia. Commentary*. – 2015. – No. 188. – Available at: <https://www.osw.waw.pl/en/publikacje/osw-commentary/2015-10-20/uncertain-future-coal-energy-industry-germany>. – Title from the screen. – Accessed : 14.03.2017.
3. Biermann, F. Bremen's and Hamburg's port position: Transport infrastructure and hinterland connections within the North Range / F. Biermann, M.-O. Teuber, J. Wedemeier // *Intern. Business and Global Economy*. – 2015. – No. 34. – P. 78–89. doi: 10.4467/23539496IB.13.006.3979.
4. Duleba, Sz. A középés felsővezetői döntéseket támogató AHP módszer, és alkalmazása logisztikai szolgáltatók kiválasztására / Sz. Duleba // *Vezetéstudomány*. – 2006. – Évf. 37, sz. 9. – P. 56–60.
5. GDP Growth Rate [Electronic resource] // *Trading Economics Germany*. – 2017. – Available at: <http://www.tradingeconomics.com/germany/gdp-growth>. – Title from the screen. – Accessed : 14.03.2017.
6. Haucap, J. Development of rail freight in Europe: What regulation can and cannot do: Germany Case Study [Electronic resource] / J. Haucap, B. Pagel. – Belgium : Centre on Regulation in Europe (CERRE), 2014. – 22 p. – Available at: [http://www.cerre.eu/sites/cerre/files/141211\\_CERRE\\_RailFreight\\_DE\\_Case\\_Study\\_Final.pdf](http://www.cerre.eu/sites/cerre/files/141211_CERRE_RailFreight_DE_Case_Study_Final.pdf). – Title from the screen. – Accessed : 14.03.2017.
7. Kilian, F. Accelerating a Shift from Road to Rail Freight Transport in Germany – Three Scenarios [Electronic resource] / F. Kilian, J. Hartwig, C. Doll // *Transport Research Arena : Proc. 5<sup>th</sup> Conf., April 14–17, 2014, Paris, France*. – Paris, 2014. – Available at: <https://trid.trb.org/view.aspx?id=1315327>. – Title from the screen. – Accessed : 14.03.2017.
8. Lehmann, R. Forecasting GDP at the Regional Level with Many Predictors / R. Lehmann, K. Wohlrabe // *German Economic Review*. – 2013. – Vol. 16. – Iss. 2. – P. 226–254. doi: 10.1111/geer.12042.
9. Lewis, M. W. Geographical patterns in the German Federal Election of 2013 [Electronic resource] / M. W. Lewis // *GeoCurrents*. – 2013. – Sept. 28. – Available at: <http://www.geocurrents.info/geopolitics/elections/geographical-patterns-german-federal-election-2013#ixzz4aqLwGC00>. – Title from the screen. – Accessed : 14.03.2017.
10. Loo, B. P. Y. Sustainable Railway Futures: Issues and Challenges / B. P. Y. Loo, C. Comtois. – New York : Routledge, 2015. – 225 p.
11. Mitwallyova, H. The Influence of Railway Infrastructure on the Live in Selected European Countries / H. Mitwallyova, V. Jankovic // *Intern. J. of Business and Management*. – 2015. – Vol. III, No. 2. – P. 18–26. doi:10.20472/BM.2015.3.2.002.
12. Ozkan, T. Railway Transport Liberalization: A Case Study of Various Countries in the World / T. Ozkan, G. Yanginlar, S. Kalayci // *J. of Management and Sustainability*. – 2016. – Vol. 6, No. 4. – P. 140–148. doi: 10.5539/jms.v6n4p140.
13. Pham, V. The Liberalization of Rail Transport in the European Union [Electronic resource] / V. Pham. – New London, Connecticut, 2013. – 58 p. – Available at: <http://digitalcommons.conncoll.edu/econhp/10/>. – Title from the screen. – Accessed : 14.03.2017.
14. Rail transport [Electronic resource] // *Statistische Ämter des Bundes und der Länder*. – Available at: [http://www.statistik-portal.de/Statistik-Portal/en/en\\_jb16\\_jahrtab41.asp](http://www.statistik-portal.de/Statistik-Portal/en/en_jb16_jahrtab41.asp). – Title from the screen. – Accessed : 17.03.2017.

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

15. Rail transport of goods by country in 2014 [Electronic resource] // Eurostat. Statistics Explained. – 2016. – Febr. 22. – Available at: [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Rail\\_transport\\_of\\_goods\\_by\\_country\\_in\\_2014\\_-\\_in\\_billion\\_tkm.png](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Rail_transport_of_goods_by_country_in_2014_-_in_billion_tkm.png). – Title from the screen. – Accessed : 14.03.2017.
16. Scale of Analysis Applied to Germany [Electronic resource] // Germany's Geography. – 2015. – Mar. 20. – Available at: <https://geogermanykat.wordpress.com/tag/gdp-per-capita/>. – Title from the screen. – Accessed : 17.03.2017.
17. Seidenglanz, D. Regional Railway Transport in Czech, Austrian and German Decentralised and Regionalised Transport Markets / D. Seidenglanz, T. Nigrin, J. Dujka // Review of Economic Perspectives. – 2015. – Vol. 15. – Iss. 4. – P. 431–450. doi: 10.1515/revecp-2015-0029.
18. Study on the cost and Contribution of the Rail Sector: Final Report [Electronic resource]. – London : Steer Davies Gleave, 2015. – Available at: <http://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/modes/rail/studies/doc/2015-09-study-on-the-cost-and-contribution-of-the-rail-sector.pdf>. – Title from the screen. – Accessed : 14.03.2017.
19. Transport infrastructure at regional level [Electronic resource] // Eurostat. Statistics Explained. – 2010. – Oct. 20. – Available at: [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:Transport\\_infrastructure\\_at\\_regional\\_level&oldid=39465](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:Transport_infrastructure_at_regional_level&oldid=39465). – Title from the screen. – Accessed : 17.03.2017.
20. Transport performance in 2015, by mode of transport and product division (NST-2007) [Electronic resource] // Destatis. Statistische Bundesamt. – Available at: <https://www.destatis.de/EN/FactsFigures/EconomicSectors/TransportTraffic/GoodsTransport/Tables/ModeoftransportProductdivisionB.html>. – Title from the screen. – Accessed : 17.03.2017.
21. Wyman, O. Assessment of European Railways: Characteristics and Crew-Related Safety / O. Wyman. – New York, 2016. – 75 p.
22. Ziegler, D. Beyond the Leading Regions: Agricultural Modernization and Rural Industrialization in North-Western Germany / D. Ziegler // Regions, Industries, and Heritage. Perspectives on Economy, Society, and Culture in Modern Western Europe. – New York, 2015. – P. 148–169. doi: 10.1057/9781137333414\_10.

Б. ФАРКАС<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Транспортне машинобудування та автомобілебудування», Будапештський університет технологій і економіки, Műegyetem rkp., 3, Будапешт, Угорщина, H-1111, тел. +36 1 (463) 10 51, ел. пошта [farkas.balint@mail.bme.hu](mailto:farkas.balint@mail.bme.hu), ORCID 0000-0001-5388-9905

## ПРЕДСТАВЛЕННЯ НАЙБІЛЬШ ПОТУЖНОЇ ЗАЛІЗНИЦІ ЄС ТА ПІДТРИМКА ЇЇ РОБОТИ ЗА ДОПОМОГОЮ ЕКОНОМІЧНОГО АНАЛІЗУ

**Мета.** Наукове дослідження має за мету представлення економічних відносин та огляд мережі однієї з найпотужніших залізниць (на прикладі Німеччини), а також підтвердження того, що дана залізниця має стратегічно важливе значення для зв'язків між економічними регіонами. **Методика.** У статті обрана країна з найвищою продуктивністю серед країн ЄС. Таким чином, автор представляє однорідність та узгодженість у даній країні. У статті аналізується, де в цій країні найбільша кількість вантажів перевозиться за допомогою залізниці. Потім ці дані порівнюються з картою валового внутрішнього продукту (ВВП) та знаходиться зв'язок між залізничною мережею і ВВП країни. **Результати.** Залізниця створює ідеальний економічний центр країни. Вочевидь, що країну можна розділити на два основних регіони – північний та південний. **Наукова новизна.** Зв'язок системи залізниць та ВВП із економічної точки зору вивчається рідко. Дана методика може використовуватися в якості корисної бази для проведення економічного аналізу будь-якого регіону, де цікавляться питанням важливості залізниць. **Практична значимість.** У будь-якому економічному або географічному регіоні можна визначити важливість залізниці та показати її роль для розвитку даного економічного регіону.

*Ключові слова:* конкуренція; залізничний транспорт; вантажний транспорт; ВВП

Б. ФАРКАС<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup> Каф. «Транспортное машиностроение и автомобилестроение», Будапештский университет технологий и экономики, Műegyetem rkp. 3, Будапешт, Венгрия, H-1111, тел. +36 1 (463) 10 51, эл. почта farkas.balint@mail.bme.hu, ORCID 0000-0001-5388-9905

## ПРЕДСТАВЛЕНИЕ САМОЙ МОЩНОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ ЕС И ПОДДЕРЖКА ЕЕ РАБОТЫ С ПОМОЩЬЮ ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

**Цель.** Научное исследование имеет своей целью представление экономических отношений и обзор сети одной из самых мощных железных дорог (на примере Германии), а также подтверждение того, что данная железная дорога имеет стратегически важное значение для связей между экономическими регионами. **Методика.** В статье выбрана страна с самой высокой производительностью из стран ЕС. Таким образом, автор представляет однородность и согласованность в данной стране. В статье анализируется, где в этой стране наибольшее количество грузов перевозится с помощью железной дороги. Затем эти данные сравниваются с картой валового внутреннего продукта (ВВП) и находится связь между железнодорожной сетью и ВВП страны. **Результаты.** Железная дорога создает идеальный экономический центр страны. Очевидно, что страну можно разделить на два основных региона – северный и южный. **Научная новизна.** Связь системы железных дорог и ВВП с экономической точки зрения изучается редко. Данная методика может использоваться в качестве полезной базы для проведения экономического анализа любого региона, в котором интересуются важностью железных дорог. **Практическая значимость.** В любом экономическом или географическом регионе можно определить важность железной дороги и показать ее роль для развития данного экономического региона.

**Ключевые слова:** конкуренция; железнодорожный транспорт; грузовой транспорт; ВВП

### REFERENCES

1. Albers, S., & Heuermann, C. (2013). Competitive Dynamics Across Industries: An Analysis of Inter-Industry Competition in German Passenger Transportation. *Schmalenbach Business Review*, 65, 431-453. Retrieved from <https://ssrn.com/abstract=2339966>
2. Bajczuk, R. (2015). The uncertain future of the coal energy industry in Germany. *Ośrodek Studiów Wschodnich im. Marka Karpia. COMMENTARY*, 188. Retrieved from <https://www.osw.waw.pl/en/publikacje/osw-commentary/2015-10-20/uncertain-future-coal-energy-industry-germany>
3. Biermann, F., Teuber, M.-O., & Wedemeier, J. (2015). Bremen's and Hamburg's port position: Transport infrastructure and hinterland connections within the North Range. *International Business and Global Economy*, 34, 78-89. doi: 10.4467/23539496IB.13.006.3979
4. Duleba, S. (2016). A közép- és felsővezetői döntéseket támogató AHP módszer, és alkalmazása logisztikai szolgáltatók kiválasztására. *Vezetéstudomány*, 37(9), 56-60.
5. Trading Economics. (2017). *Germany GDP Growth Rate*. Retrieved from <http://www.tradingeconomics.com/germany/gdp-growth>
6. Haucap, J., & Pagel, B. (2014). *Development of rail freight in Europe: What regulation can and cannot do: Germany Case Study*. Belgium: Centre on Regulation in Europe (CERRE). Retrieved from [http://www.cerre.eu/sites/cerre/files/141211\\_CERRE\\_RailFreight\\_DE\\_Case\\_Study\\_Final.pdf](http://www.cerre.eu/sites/cerre/files/141211_CERRE_RailFreight_DE_Case_Study_Final.pdf)
7. Kilian, F., Hartwig, J., & Doll, C. (2014). Accelerating a Shift from Road to Rail Freight Transport in Germany – Three Scenarios. *Transport Research Arena: Proceedings 5th Conference, April 14-17, 2014, Paris, France*. Retrieved from <https://trid.trb.org/view.aspx?id=1315327>
8. Lehmann, R., & Wohlrabe, K. (2013). Forecasting GDP at the Regional Level with Many Predictors. *German Economic Review*, 16(2), 226-254. doi: 10.1111/geer.12042
9. Lewis, M. W. (September 28, 2013). Geographical patterns in the German Federal Election of 2013. *GeoCurrents*. Retrieved from <http://www.geocurrents.info/geopolitics/elections/geographical-patterns-german-federal-election-2013#ixzz4aqLwGC00>

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

10. Loo, B. P. Y., & Comtois, C. (2015). *Sustainable Railway Futures: Issues and Challenges*. New York: Routledge.
11. Mitwallyova, H., & Jankovic, V. (2015). The Influence of Railway Infrastructure on the Live in Selected European Countries. *International Journal of Business and Management International*, III(2), 18-26. doi:10.20472/BM.2015.3.2.002
12. Ozkan, T., Yanginlar, G., & Kalayci, S. (2016). Railway Transport Liberalization: A Case Study of Various Countries in the World. *Journal of Management and Sustainability*, 6(4), 140-148. doi: 10.5539/jms.v6n4p140
13. Pham, V. (2013). *The Liberalization of Rail Transport in the European Union* [Honors Thesis]. London, Connecticut: Connecticut College. Retrieved from <http://digitalcommons.conncoll.edu/econhp/10/>
14. Federal Statistical Office and the statistical Offices of the Lande. (2016, July 11). *Rail Transport*. Retrieved from [http://www.statistik-portal.de/Statistik-Portal/en/en\\_jb16\\_jahrta41.asp](http://www.statistik-portal.de/Statistik-Portal/en/en_jb16_jahrta41.asp)
15. Eurostat. (2016, February 22). *Rail Transport of Goods by Country in 2014*. Retrieved from [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Rail\\_transport\\_of\\_goods\\_by\\_country\\_in\\_2014\\_-\\_in\\_billion\\_tkm.png](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Rail_transport_of_goods_by_country_in_2014_-_in_billion_tkm.png)
16. Germany's Geography. (2015, March 20). *Scale of Analysis Applied to Germany*. Retrieved from <https://geogermanykat.wordpress.com/tag/gdp-per-capita/>
17. Seidenglanz D., Nigrin, T., & Dujka, J. (2015). Regional Railway Transport in Czech, Austrian and German Decentralised and Regionalised Transport Markets. *Review of Economic Perspectives*, 15(4), 431-450. doi: 10.1515/revecp-2015-0029
18. Steer Davies Gleave. (2015). *Study on the Cost and Contribution of the Rail Sector: Final Riport*. London: Steer Davies Gleave. Retrieved from <http://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/modes/rail/studies/doc/2015-09-study-on-the-cost-and-contribution-of-the-rail-sector.pdf>
19. Eurostat. (2010, October 20). *Transport Infrastructure at Regional Level*. Retrieved from [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:Transport\\_infrastructure\\_at\\_regional\\_level&oldid=39465](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:Transport_infrastructure_at_regional_level&oldid=39465)
20. Destatis. Statistische Bundesamt. (n. d.). *Transport performance in 2015, by mode of transport and product division (NST-2007)*. Retrieved from <https://www.destatis.de/EN/FactsFigures/EconomicSectors/TransportTraffic/GoodsTransport/Tables/ModeoftransportProductdivisionB.html>
21. Wyman, O. (2016). *Assessment of European Railways: Characteristics and Crew-Related Safety* [Expert Report]. New York, NY.
22. Ziegler, D. (2015). Beyond the Leading Regions: Agricultural Modernization and Rural Industrialization in North-Western Germany. In J. Czipka, K. Oerters & N. Thorade (Eds.), *Regions, Industries, and Heritage* (pp. 148-169). New York, NY: Palgrave Macmillan UK. doi: 10.1057/9781137333414\_10

*Dr. habil. Duleba Szabolcs, Budapest University of Technology and Economics (Hungary);  
Prof. S. V. Myamlin, D. Sc. (Tech.) (Ukraine) recommended this article to be published*

Accessed: Dec. 21, 2016

Received: March 16, 2017



# ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

UDC 629.424.1.018-82:004.318

I. V. ZHUKOVYTSKYI<sup>1\*</sup>, I. A. KLIUSHNYK<sup>2\*</sup>

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

<sup>2\*</sup>Dep. «Electronic Computing Machines», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 89, e-mail klugran@i.ua, ORCID 0000-0001-9939-0755

## CHOICE OF THE OPTIMAL PARAMETERS OF MEASURING THE SHAFT ROTATION FREQUENCY OF THE HYDRAULIC TRANSMISSION OF THE LOCOMOTIVE USING MICROCONTROLLER

**Purpose.** The article provides for finding solution to the problem of developing and improving the means for measuring tachometric data of the previously created information and measuring system for testing hydraulic locomotive transmission by substantiating the optimal sensor design and signal processing algorithms. At the same time first of all it is necessary to start from the possibility of modifying the already existing test bench for hydraulic locomotive transmissions at the Dnipropetrovsk diesel locomotive repair plant «Promteplovoz». **Methodology.** In the work, the researchers proposed a methodology for modifying the sensor design and the algorithm for processing its signals. It is grounded on previous developments of tachometric sensor of the optical type on the basis of D-2MMU-2 sensor of the microprocessor automated test bench system of hydraulic locomotive transmission in the locomotive repair plant conditions. Selection of the necessary measurement algorithm and the number of sensor teeth is substantiated by calculating instrumental and methodological errors. Also, the studies aimed at identifying the source of interference in the measurement of rotational speed are described and solution for its elimination has been found. **Findings.** For the designed rotation speed sensor of the optical type based on the existing D-2MMU-2 sensor, the authors analyzed the dependence of the methodological and instrumental errors. Based on the obtained data more rational variant of the rotation speed calculation algorithm is proposed, and the number of teeth of the sensor disk is justified. Further, the main source of measurement interference was established and a method for improving the hardware of the hydraulic locomotive test bench was proposed. **Originality.** There were conducted the studies according to the methodological and instrumental errors of the designed rotation speed of sensor. The mechanisms of interference filtering arising from the sensor rotation speed fixing were proposed. Additional studies have shown the need for a hardware revision of signal conditioner scheme. **Practical value.** Conducted studies make it possible to establish a rational number of sensor disk teeth, which allows improving the measurement algorithm. It was also performed a hardware improvement of signal conditioner scheme from the sensor, helping to get rid of interferences. The results of measurements in studies are the initial data to perform further studies in order to determine the technical condition of hydraulic transmission UGP 750-1200 during factory testing after repair.

**Key words:** tachometer sensor; 2MMU-D-2; hydraulic transmission; hydraulic transmission test; testbench; information-measuring system

### Introduction

Today in Ukraine, the hydraulic transmission is tested using the outdated test-benches designed in Soviet times, in particular at the repair plants of

diesel locomotives and military equipment with hydraulic transmission. Also, there is no standardization of the production of these test-benches.

As part of the work for improvement and modernization of the existing hydraulic transmis-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

sion test-bench at DZRT «Promteplovoz» plant it was revealed that the installed thereon analogue control devices are out-of-date. In the first stage of development in accordance with the plant test program the most necessary and critical 13 process parameters were selected. Information about which received from the sensors is processed by the microcontroller and PC [9].

Information about the rotation frequency of the drive motor, the generator, the turbine shaft is measured using D-2MMU-2 tachometer sensors [6], which transmit the pre-processed analogue signal to a special converter and then to ATMELE microcontroller for its further processing and transmission by USB 2.0 interface to the computer [9].

D-2MMU-2 sensor is nothing but an alternator, which has a critical flaw – at relatively low speeds (established experimentally at about  $80 \text{ min}^{-1}$ ) the voltage amplitude produced by the alternator is not sufficient for the normal error-free measurements (at speeds of about  $60 \text{ min}^{-1}$ , the amplitude is about 1 V, and at  $2000 \text{ min}^{-1}$  – 40 V). It is clear that at very low speeds the amplitude will be several tens of millivolts. To measure such a low voltage in the plant conditions is practically impossible, since, firstly, long communication lines from the test-bench to the measuring equipment may have low voltage blanking and, secondly, at the plant there is a large number of different sources of electromagnetic interferences, which may be laid on communication lines and erroneously recorded as the beginning of rotary motion on the test-bench.

On the basis of available equipment of hydraulic transmission testbench it was designed the rotation frequency sensor of optical type based on the existing sensor 2MMU D-2 [13]. According to the results of plant tests using the sensor prototype it was established the necessary and sufficient time for scanning the control sensor microcontroller, which allowed making changes in the measurement algorithm.

### Purpose

In the calculations, it was found that changes in instrumental and methodological errors [4], which may be a result of missing and/or averaging the averaging, require further investigation. Also, as a result of the tests, the measurement statistics were obtained, which indicates the presence of interfer-

ence that requires the development of filtering mechanisms. It is necessary to identify the exact nature of the interference, which in turn can simplify, and, perhaps, completely eliminate the filtering mechanisms by making corrections to the hardware and software part of both the sensor and its interface circuit with the computer of the test bench.

To improve the designed sensor [13] (in order to choose a rational number of the disk teeth and the optimal algorithm for calculating the rotational frequency), it is necessary to calculate the instrumental and methodological errors that arise during the measurements. Obviously, the instrumental error should increase in proportion to the increase in the number of teeth (due to inaccuracy in their manufacture), and the methodological error on the contrary should fall with the increase in the number of teeth.

### Methodology

To calculate the instrumental error, let us represent the calculation of the rotation frequency  $\omega$  using the known formula:

$$\omega = \frac{L}{2\pi R\tau} \cdot 60 [\text{min}^{-1}], \quad (1)$$

where  $\omega$  – is the measured rotation frequency [ $\text{min}^{-1}$ ];  $L$  – arc length between the teeth [mm];  $R$  – distance from the disc center to the middle of the tooth height [mm];  $\tau$  – propagation time of the infrared ray of optocoupler of the arc  $L$  (period of the signal) [sec].

If the measurement error  $\tau$  is neglected, then the relative measurement error [13] has the form:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_L}{L}, \quad (2)$$

where  $\Delta_L$  – is the difference between the actual and theoretical length of the arc  $L$  [mm].

Substituting (1) in (2), it is obtained a formula for calculating the relative error (instrumental), taking into account the dependence on the number of teeth:

$$\varepsilon_{inst} = \frac{\Delta_L N}{2\pi R},$$

where  $N$  – is the number of teeth of the sensor disk.

When using the formula (1) for measuring the rotational frequency the acceleration that may oc-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

cur is not taken into account, as a result of which a methodological error arises. To calculate the methodological error, we will calculate the rotational frequency using the following formula:

$$\omega = \frac{1}{\tau N} \cdot 60 \text{ [min}^{-1}\text{]}. \quad (3)$$

Without considering the instrumental error, the actual rotational frequency can be expressed in terms of the measured rotational frequency at the end of the next measurement period (under the condition of uniform acceleration) according to the formula:

$$\omega_{act} = \omega_{meas} + aT \text{ [min}^{-1}\text{]}, \quad (4)$$

where  $\omega_{act}$  – actual rotational frequency [min<sup>-1</sup>];  $\omega_{meas}$  – measured rotational frequency [min<sup>-1</sup>];  $a$  – acceleration [min<sup>-1</sup>/s<sup>2</sup>];  $T$  – delay time introduced by the measurement algorithm [sec].

It follows from (1) that  $T = \tau$ .

It was calculated and established that the performance of all assembler commands involved in the measurements is quite small value. The influence of this error  $\varepsilon_{\Delta}$  is illustrated in Fig. 1.

As it can be seen from Fig. 1, under the given technical conditions, this error is extremely small and it can be neglected.

In this case, the absolute methodological error will have the following form:

$$\Delta = \omega_{act} - \omega_{meas} \text{ [min}^{-1}\text{]}.$$

Taking into account (3) and (4), the formula for the relative (methodological) error is:

$$\varepsilon_{meth} = \frac{a \cdot 60}{\omega_{meas} n \left( \omega_{meas} + \frac{a \cdot 60}{\omega_{meas} n} \right)}.$$

The graphs of the dependence of the instrumental and methodological errors on the number of teeth in the disk with different input parameters are shown in Fig. 2 and Fig. 3.

As it can be seen from Fig. 2, approximately starting from the value of the rotational frequency equal to 200 min<sup>-1</sup>, it is enough to use a wheel with one tooth (intersection of methodological and instrumental errors is the optimum point). Fig. 3 shows that at  $\omega_{meas} = 20 \text{ min}^{-1}$ , to minimize the error it is sufficient to use about 9 teeth. The acceleration  $a$  was chosen as high as possible.

Summarizing the obtained result, and also in order to simplify the calculating algorithm of rotational frequency, it was decided to modify the calculation algorithm as follows: up to 50 min<sup>-1</sup> (valid at the average acceleration  $a = 1.15 \text{ min}^{-1}/\text{s}^2$  [13]) to perform calculations as earlier, taking into account each period of the signal from the sensor (for a disc of 10 teeth). Starting from the rotational frequency greater than 50 min<sup>-1</sup> it was decided to take into account the duration of ten signal periods from the sensor as one measurement period, i.e. simulate a single-tooth disc. This condition practically does not contradict the conclusions made in the work [13], as there it was justified the sufficiency of using every 8<sup>th</sup> sample of the rotational frequency. In the process of testing the projected sensor the interferences were detected (Fig. 4).

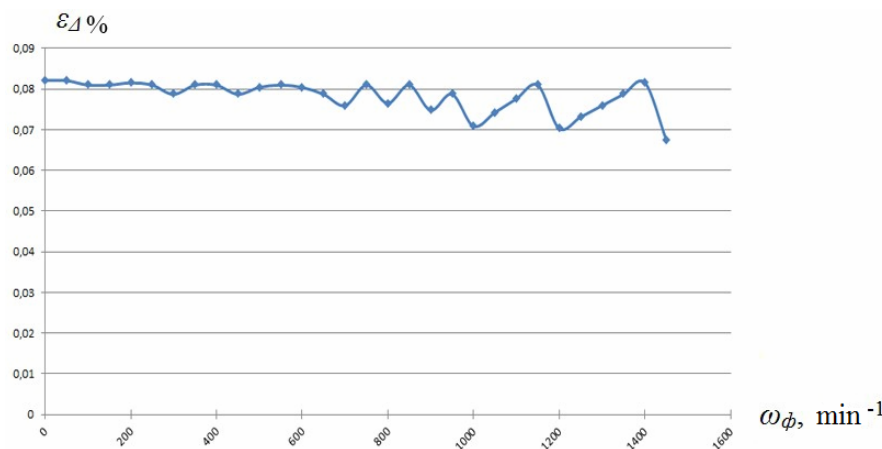


Fig. 1. Dependence of the deviation  $\varepsilon_{\Delta}$  of the measured rotational frequency from the actual rotational frequency introduced by the execution time of the assembler commands of the microcontroller

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ



Fig. 2. The graph of the dependence of the instrumental and methodological errors on the number of teeth in the disk at  $\omega_{meas} = 200 \text{ min}^{-1}$ ,  $a = 10 \text{ min}^{-1}/\text{s}^2$ ,  $\Delta_L = 2 \text{ mm}$

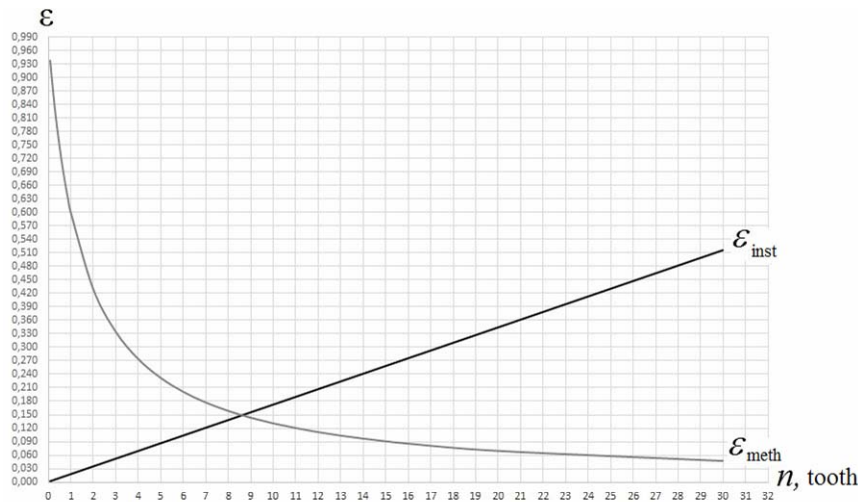


Fig. 3. The graph of the dependence of the instrumental and methodological errors on the number of teeth in the disk at  $\omega_{meas} = 20 \text{ min}^{-1}$ ,  $a = 10 \text{ min}^{-1}/\text{s}^2$ ,  $\Delta_L = 2 \text{ mm}$

As can be seen from Fig. 4, there is some kind of interferences in the signal from the sensor, as indicated by the spectrum of the signal obtained using the fast Fourier transform [1, 5].

These low-frequency interferences are easily filtered, for example, by arbitrary finite impulse response (FIR) filter [5, 11]. For this purpose, the FIR filter of the 10<sup>th</sup> order was used filtering the frequencies up to 10 Hz. As one can see from Fig. 4 has filtered the supposed interferences partially. However, there are visible residual beatings of unknown origin. Of course it is impossible to assert that this interference is of a different nature or it is the specificity of the hydraulic transmission opera-

tion (high-precision reference sensor is not available at the factory). These residual interferences can also be easily filtered by moving average algorithm [12] for example, as it is shown in Fig. 5.

But the expediency of such an action is extremely doubtful. Firstly, it is unknown whether this is the interference (presumably, in the plant's environment there would be more high-frequency interferences). Secondly, it is possible that such deviations in the signal can be caused by some fault of the software or hardware parts of the designed test bench. As a result, it is necessary to conduct additional studies.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

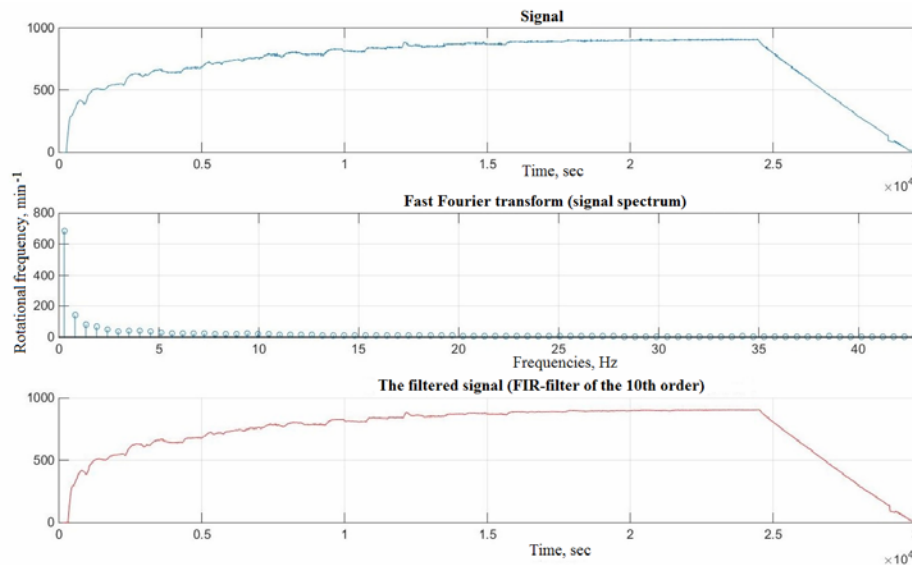


Fig. 4. Interferences obtained during sensor tests

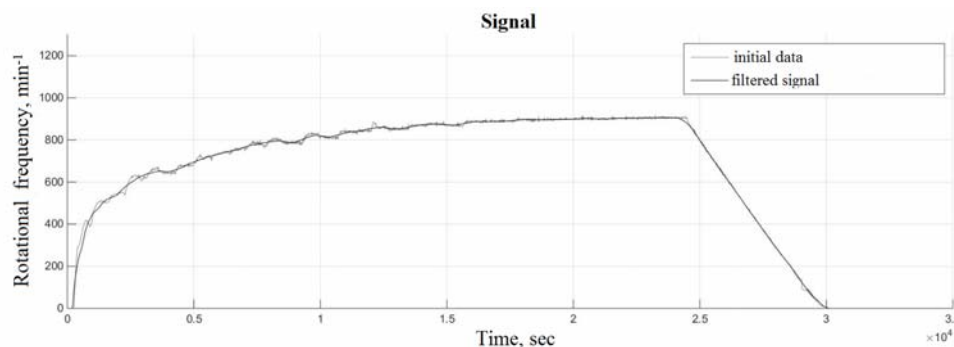


Fig. 5. Filtration of interferences using the moving average algorithm

As a result of studies the errors in the program part of the stand were not found. But a potential source of interference was found in the hardware (electronic) part of the stand.

The pulse driver (which go to the input of the microcontroller) was nothing but a Schmitt trigger CD40106BM [8] manufactured by Texas Instruments. And, as it is known, such triggers have a wide range of thresholds for both operation and release of the logical unit. This effect is shown in Fig. 6 taken from the official documentation.

Since the fronts of the incoming pulses from the sensor are quite heavily overloaded (as it is shown in Fig. 7), the signal at the output of the driver (Schmidt trigger CD40106BM) will always be of unequal duration, taking into account the specificity of its operation shown in Fig. 6.

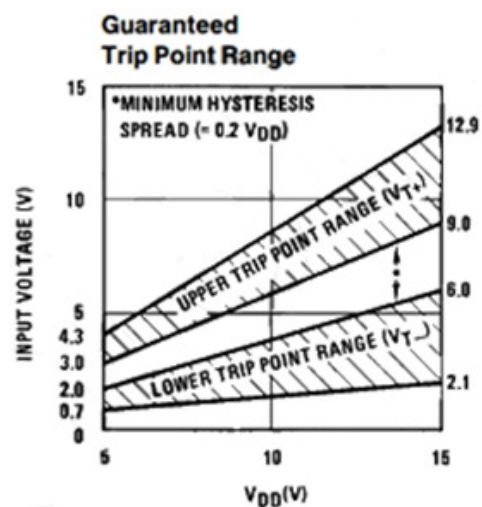


Fig. 6. Range of thresholds for operation and release of the Schmitt trigger CD40106BM [8]

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

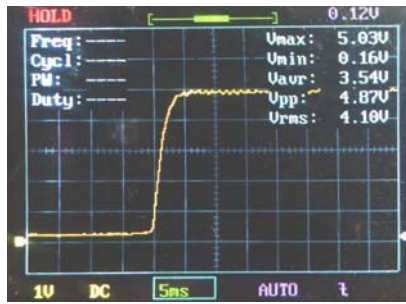


Fig. 7. Oscillogram of the front of the signal coming from the sensor

Analysis of the existing microcircuits of single-pass Schmitt triggers showed that they have similar characteristics, as well as for the Schmitt trigger CD40106BM. The way out of this situation is the use of two-input Schmitt triggers, where it is possible to set a fixed operation voltage due to the use of backward communication. The study of the market of existing microcircuits of two-input Schmitt triggers and operational amplifiers was conducted. As a result, it was found that the use of microcircuits of two-input Schmitt triggers is not rational: the operational amplifier makes it possible to set operating voltage more flexible and accurate with minimal deviations, and its cost does not exceed the cost of the Schmitt trigger. Therefore, it was decided to make own pulse driver using the operational amplifier LM124 [10].

The driver is constructed according to the scheme shown in Fig. 8

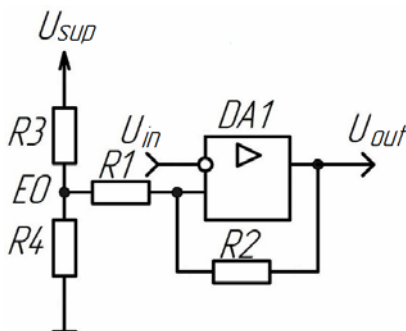


Fig. 8. Scheme of the pulse driver on the operational amplifier

To calculate the driver [3, 7], the following input conditions are accepted:

The supply voltage  $U_{sup} = 4.7$  V;

The operate voltage  $U_{op} = 3$  V;

The maximal voltage at the output of the amplifier, the received one 1-2 V less than the supply voltage  $U_{max} = 3.46$  V;

The minimum voltage at the output of the amplifier is  $U_{min} = 0.3$  V.

The driver is constructed according to the scheme in Fig. 8.

To calculate the positive feedback resistor  $R2$ , it is necessary to determine the hysteresis  $\Delta U$  of the amplifier. It has been experimentally established that  $\Delta U = 0.3$  V is sufficient for stable operation. Resistor  $R1$  was selected with a nominal of 39 kOhm. Accordingly, based on the results of calculations,  $R2 = 452.4$  kOhm.

To form the bias voltage  $E0$  of the operating point of the amplifier switching, it is calculated by the formula:

$$E0 = U_{op} - \frac{\Delta U}{2}.$$

Thus,  $E0 = 2.85$  V. Resistor  $R4$  was selected with a nominal value of 3.3 kOhm. Correspondingly, according to the results of calculations  $R3 = 2142.11$  Ohm.

To check the accuracy of calculations, it is also necessary to calculate the operating and release voltages of the operational amplifier. To do this, the speed of switching  $a_{sw}$ , is required, which for the selected amplifier is 0.1 V/ms [3, 7]. The operating voltage  $U_{0 \rightarrow 1}$  is calculated by the formula:

$$U_{0 \rightarrow 1} = U_{max} \frac{R1}{R1 + R2} + E0 \frac{R2}{R1 + R2} + a_{sw}.$$

The release voltage  $U_{1 \rightarrow 0}$  is calculated by the formula:

$$U_{1 \rightarrow 0} = U_{min} \frac{R1}{R1 + R2} + E0 \frac{R2}{R1 + R2} - a_{sw}$$

According to the results of calculations,  $U_{0 \rightarrow 1} = 3$  V, and  $U_{1 \rightarrow 0} = 2.55$  V. Simulation of this calculated circuit of the driver confirmed the accuracy of calculations. The oscillograms of the operation simulation are shown in Fig. 9.

Real tests of the new pulse driver were also carried out. The graph of the performed measurements is shown in Fig. 10. As can be seen from Fig. 10 there is practically no interference in the results obtained. This allows us to talk about identifying and complete eliminating the source of data distortion in the developed hydraulic transmission testing system. In this case, the application of digital filtering algorithms is not necessary.



## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

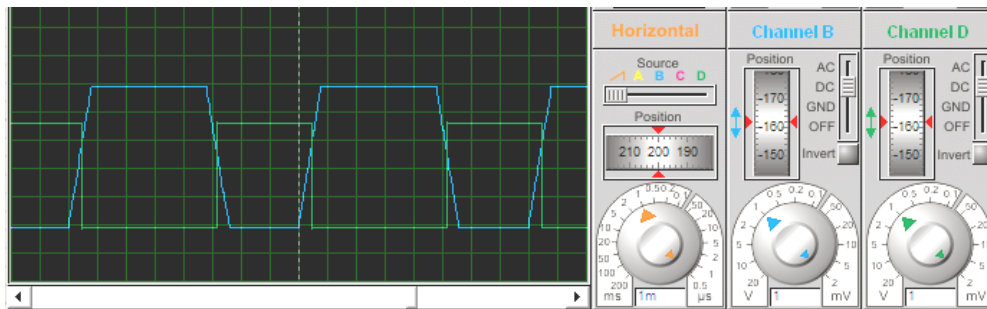


Fig. 9. The oscillograms of the driver operation simulation

## Findings

For the projected optical sensor of the rotational frequency based on the existing D-2MMU-2 sensor, the analysis of the methodological and instrumental errors was performed. Based on the data obtained, a more rational variant of the frequency calculation algorithm was proposed, and the num-

ber of teeth of the sensor disk was justified. The nature of the interferences that occur during data collection was investigated. As a result, the main source of measurement distortion was established and the method for improving the hardware of the hydraulic locomotive test bench, which eliminated this source, was proposed.

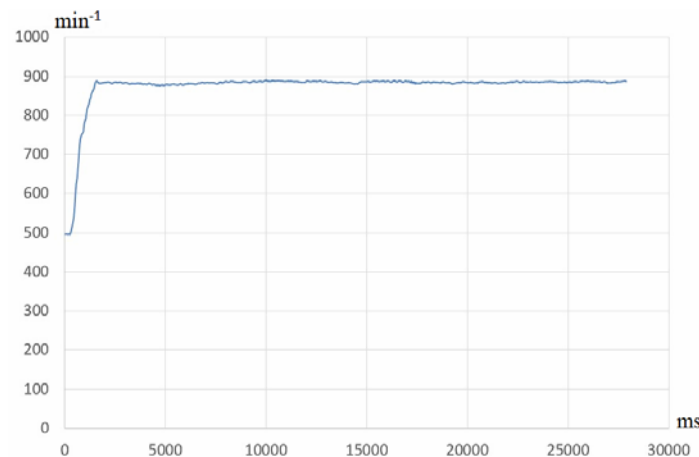


Fig. 10. The graph of the performed measurements of the rotational frequency using the pulse driver based on the operational amplifier

## Originality and Practical Value

The studies of the dependence of the methodological and instrumental errors of the designed rotational frequency sensor were conducted. Rational mechanisms for filtering the interferences that occur when fixing the rotational frequency have been proposed. Additional studies have shown the need for hardware refinement of the signal conditioner circuit. The conducted researches allowed establishing a rational number of the sensor disk teeth, which made it possible to improve the measurement algorithm. It was also proposed hardware improvement of the signal conditioner circuit from

the sensor, which made it possible to get rid of interferences. The results of the measurements during the studies are the initial data for further research to determine the technical state of the hydraulic transmission UGP 750-1200 during the factory post-repair tests.

## Conclusions

The dependence of the instrumental and methodological errors of the developed tachometric sensor of the optical type was investigated. Based on the studies carried out, it is proposed to modify the algorithm for calculating the rotational frequency as follows: up to 50 min<sup>-1</sup> (valid at the

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

average acceleration  $a = 1.15 \text{ min}^{-1}/\text{s}^2$  [13]) to perform calculations taking into account every second period of the signal from the sensor (for 10 teeth disk), and starting from the rotational frequency greater than  $50 \text{ min}^{-1}$  to take into account the duration of ten periods of the signal from the sensor as one period, i.e. to simulate a disk with one tooth. It

was found that the use of a 10-tooth disc is rational. In order to eliminate distortions in the measurements, calculation and testing of the pulse driver from the sensor based on the operational amplifier LM124 was performed on the basis of the used Schmitt trigger CD40106BM.

## LIST OF REFERENCE LINKS

1. Воскобойников, Ю. Е. Фильтрации сигналов и изображений: Фурье и вейвлет алгоритмы (с примерами в Mathcad) : монография / Ю. Е. Воскобойников, А. В. Гочаков, А. Б. Колкер ; Новосиб. гос. архитектур.-строит. ун-т (Сибстрин). – Новосибирск : НГАСУ, 2010. – 188 с.
2. Жуковицький, І. В. Вдосконалення методів та засобів вимірювання частоти обертання вала гідравлічної передачі тепловоза з використанням мікроконтролера / І. В. Жуковицький, І. А. Ключник // Сучасн. інформ. і комунік. технології на трансп., в пром-сти і освіті : тез. X Міжнародн. наук.-практ. конф. (14.12–15.12.2016 рр.) / Дніпропетр. нац. ун-т ж.-д. трансп. – Дніпропетровськ, 2016. – С. 46–47.
3. Мамий, А. Р. Операционные усилители / А. Р. Мамий, В. Б. Тлячев. – Майкоп : АГУ, 2005. – 192 с.
4. Рабинович, С. Г. Погрешности измерений : науч. изд. / С. Г. Рабинович. – Ленинград : Энергия, 1978. – 261 с.
5. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов : учеб. пособие / А. Б. Сергиенко. – 2-е изд. – Санкт-Петербург : Питер, 2007. – 750 с.
6. Тахометры магнитоиндукционные дистанционные ТМи [Electronic resource] // ООО «Саранские приборы». – 2016. – Available at: <http://sibspz.ru/pribory-dlya-izmereniya-parametrov-dvizheniya-takhometry/takhometry-magnitoindukcionnye-distantsionnye-tmi>. – Title from the screen. – Accessed : 28.12.2016.
7. Carter, B. Op Amps for Everyone / B. Carter. – 2nd ed. – Texas, USA : Elsevier Science, 2003. – 472 с.
8. CD40106BM/CD40106BC. Hex Schmitt Trigger [Electronic resource] // Texas Instruments. – 2016. – Available at: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd40106bm.pdf>. – Title from the screen. – Accessed : 28.12.2016.
9. Information-measuring Test System of Diesel Locomotive Hydraulic Transmissions / I. V. Zhukovytsky, I. A. Kliushnyk, O. B. Ochkasov, R. O. Korenyuk // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 5 (59). – С. 53–65. doi: 10.15802/stp2015/53159.
10. LMx24-N, LM2902-N. Low-Power, Quad-Operational Amplifiers [Electronic resource] // Texas Instruments. – 2016. – Available at: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2902-n.pdf>. – Title from the screen. – Accessed : 28.12.2016.
11. Merry, R. J. E. Optimal higher-order encoder time-stamping / R. J. E. Merry, M. J. G. van de Molengraft, M. Steinbuch // Mechatronics. – 2013. – Vol. 23. – Iss. 5. – P. 481–490. doi: 10.1016/j.mechatronics.2012.10.011.
12. Zhang, L. An open embedded hardware and software architecture applied to industrial robot control / L. Zhang, P. Slaets, H. Bruyninckx // IEEE Intern. Conf. on Mechatronics and Automation. – 2012. – P. 1822–1828. doi: 10.1109/ICMA.2012.6285098.
13. Zhukovytsky, I. V. Use of microcontroller for measuring shaft speed of diesel locomotive hydraulic transmission / I. V. Zhukovytsky, I. A. Kliushnyk // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 5 (65). – С. 43–53. doi: 10.15802/stp2016/83990.

І. В. ЖУКОВИЦЬКИЙ<sup>1\*</sup>, І. А. КЛЮШНИК<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Електронні обчислювальні машини», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта ivzhuk@mail.ru, ORCID 0000-0002-3491-5976

<sup>2\*</sup>Каф. «Електронні обчислювальні машини», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта klugran@i.ua, ORCID 0000-0001-9939-0755

## ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ВАЛА ГІДРАВЛІЧНОЇ ПЕРЕДАЧІ ТЕПЛОВОЗА З ВИКОРИСТАННЯМ МІКРОКОНТРОЛЕРА

**Мета.** Стаття передбачає знаходження рішення задачі розробки та удосконалення засобів вимірювання тахометричних даних раніше створеної інформаційно-вимірювальної системи випробувань гідравлічних передач тепловозів шляхом обґрунтування оптимальної конструкції датчика та алгоритмів обробки сигналу від нього. При цьому відштовхуватися необхідно, в першу чергу, від можливості модифікації вже існуючого стенду випробувань гідравлічних передач тепловозів на Дніпропетровському заводі по ремонту тепловозів «Промтепловоз». **Методика.** У роботі дослідниками була запропонована методика модифікації конструкції датчика та алгоритму обробки його сигналів. Вона спирається на попередні розробки тахометричного датчика оптичного типу на основі датчика Д-2ММУ-2 мікропроцесорної автоматизованої системи стендових випробувань гідравлічних передач тепловозів в умовах тепловозоремонтного заводу. Обґрунтовано вибір необхідного алгоритму вимірювань і кількості зубців датчика шляхом розрахунків інструментальної та методичної похибок. Також описані дослідження, спрямовані на виявлення джерела перешкод при вимірах частоти обертання та знайдено рішення щодо його усунення. **Результати.** Для спроектованого датчика частоти обертання оптичного типу на основі вже існуючого датчика Д-2ММУ-2 авторами було виконано аналіз залежності методичної та інструментальної похибок. Запропоновано, на основі отриманих даних, більш раціональний варіант алгоритму розрахунку частоти обертання, а також обґрунтована кількість зубців диска датчика. Далі було встановлено основне джерело перешкод вимірів та був запропонований спосіб удосконалення апаратної частини стенду випробувань гідравлічних передач тепловозів. **Наукова новизна.** Були проведені дослідження залежності методичної та інструментальної похибок спроектованого датчика частоти обертання. Запропоновані механізми фільтрації перешкод, що виникають при фіксації частоти обертання датчиком. Додаткові дослідження показали необхідність апаратного доопрацювання схеми формувача сигналу. **Практична значимість.** Проведені дослідження дозволили встановити раціональну кількість зубців диска датчика, що дало можливість удосконалити алгоритм вимірювань. Також було виконано апаратне поліпшення схеми формувача сигналу від датчика, що дозволило позбутися перешкод. Результати вимірювань при дослідженнях є вихідними даними для виконання подальших досліджень із метою визначення технічного стану гідравлічної передачі УГП 750-1200 під час заводських післяремонтних випробувань.

**Ключові слова:** тахометричний датчик; Д-2ММУ-2; гідравлічна передача; випробування гідропередач; випробувальний стенд; інформаційно-вимірювальна система

И. В. ЖУКОВИЦКИЙ<sup>1\*</sup>, И. А. КЛЮШНИК<sup>2\*</sup>

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

<sup>2\*</sup>Каф. «Электронные вычислительные машины», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, эл. почта klugran@i.ua, ORCID 0000-0001-9939-0755

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ ТЕПЛОВОЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА

**Цель.** Статья предусматривает нахождение решения задачи разработки и усовершенствования средств измерения тахометрических данных ранее созданной информационно-измерительной системы испытаний гидравлических передач тепловозов путем обоснования оптимальной конструкции датчика и алгоритмов обработки сигнала от него. При этом отталкиваться необходимо, в первую очередь, от возможности модификации уже существующего стенда испытаний гидравлических передач тепловозов на Днепропетровском заводе по ремонту тепловозов «Промтепловоз». **Методика.** В работе исследователями была предложена методика модификации конструкции датчика и алгоритма обработки его сигналов. Она опирается на предыдущие разработки тахометрического датчика оптического типа на основе датчика Д-2ММУ-2 микропроцес-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

сорной автоматизированной системы стендовых испытаний гидравлических передач тепловозов в условиях тепловозоремонтного завода. Обоснован выбор необходимого алгоритма измерений и количества зубьев датчика путем расчетов инструментальной и методической погрешностей. Также описаны исследования, направленные на выявление источника помех при измерениях частоты вращения, и найдено решение по его устранению. **Результаты.** Для спроектированного датчика частоты вращения оптического типа на основе уже существующего датчика Д-2ММУ-2 авторами был выполнен анализ зависимости методической и инструментальной погрешностей. Предложен, на основе полученных данных, более рациональный вариант алгоритма расчёта частоты вращения, а также обосновано количество зубьев диска датчика. Далее был установлен основной источник помех измерений и был предложен способ усовершенствования аппаратной части стенда испытаний гидравлических передач тепловозов. **Научная новизна.** Были проведены исследования зависимости методической и инструментальной погрешностей спроектированного датчика частоты вращения. Предложены механизмы фильтрации помех, возникающих при фиксации частоты вращения датчиком. Дополнительные исследования показали необходимость аппаратной доработки схемы формирователя сигнала. **Практическая значимость.** Проведённые исследования позволили установить рациональное количество зубьев диска датчика, что дало возможность усовершенствовать алгоритм измерений. Также было выполнено аппаратное улучшение схемы формирователя сигнала от датчика, что позволило избавиться от помех. Результаты измерений при исследованиях являются исходными данными для выполнения дальнейших исследований с целью определения технического состояния гидравлической передачи УГП 750-1200 во время заводских послеремонтных испытаний.

**Ключевые слова:** тахометрический датчик; Д-2ММУ-2; гидравлическая передача; испытания гидропередач; испытательный стенд; информационно-измерительная система

## REFERENCES

1. Voskoboynikov, Y. Y., Gochakov, A. V., & Kolker, A. B. (2010). *Filtratsii signalov i izobrazheniy: Fure i veyvlet algoritmy (s primerami v Mathcad)*. Novosibirsk: NSUACE.
2. Zhukovytskyi, I. V., & Kliushnyk, I. A. (2016). Vdoskonalennia metodiv ta zasobiv vymiriuvannia chastoty obertannia vala hidravlichnoi peredachi teplovoza z vykorystanniam mikrokontrolera. *Proceedings of the X International Conference «Modern Information and Communication Technologies on a Transport, in Industry and Education»*, Dec. 14-15, 2016, Dnipro, Ukraine. 46-47.
3. Mamiy, A. R., & Tlyachev, V. B. (2005). *Operatsionnyye usiliteli*. Maikop: ASU.
4. Rabinovich, S. G. (1978). *Pogreshnosti izmereniy*. Leningrad: Energiya.
5. Sergienko, A. B. (2007). *Tsifrovaya obrabotka signalov* (2nd ed.). St. Petersburg: Piter.
6. *Takhometry magnitoinduksionnyye distantsionnyye TMI*. (n.d.) Retrieved from <http://sibspz.ru/pribory-dlya-izmereniya-parametrov-dvizheniya-takhometry/takhometry-magnitoinduksionnyye-distantsionnyye-tmi>
7. Carter, B. (2003). *Op Amps for Everyone* (2nd ed.). Texas, USA: Elsevier Science.
8. *CD40106BM/CD40106BC. Hex Schmitt Trigger*. (2011). Dallas, Texas: Texas Instruments Incorporated. Literature Number: SNOS353B. Retrieved from <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd40106bm.pdf>
9. Zhukovytskyi, I. V., Kliushnyk, I. A., Ochkasov, O. B., & Korenyuk, R. O. (2015). Information-Measuring Test System of Diesel Locomotive Hydraulic Transmissions. *Science and Transport Progress*, 5(59), 53-65. doi: 10.15802/stp2015/53159
10. *LMx24-N, LM2902-N. Low-Power, Quad-Operational Amplifiers*. (2016). Dallas, Texas: Texas Instruments Incorporated. Retrieved from <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2902-n.pdf>
11. Merry, R. J. E., Van de Molengraft, M. J. G., & Steinbuch, M. (2013). Optimal higher-order encoder time-stamping. *Mechatronics*, 23(5), 481-490. doi: 10.1016/j.mechatronics.2012.10.011
12. Zhang, L., Slaets, P., & Bruyninckx, H. (2012). An open embedded hardware and software architecture applied to industrial robot control. *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Aug. 5-8, 2012. 1822-1828. doi: 10.1109/ICMA.2012.6285098
13. Zhukovytskyi, I. V., & Kliushnyk, I. A. (2016). Use of microcontroller for measuring shaft speed of diesel locomotive hydraulic transmission. *Science and Transport Progress*, 5(65), 43-53. doi 10.15802/stp2016/83990

*Prof. V. V. Skalozub, D. Sc. (Tech.), (Ukraine); Prof. V. V. Tkachov, D. Sc. (Tech.), (Ukraine) recommended this article to be published*

Accessed: Oct. 19, 2016

Received: Feb. 22, 2017

УДК 656.225:004.896

Г. І. КИРИЧЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Управління процесами перевезень», Державний економіко-технологічний університет транспорту,  
вул. Лукашевича, 19, Київ, Україна, 03049, тел. +38 (044) 452 12 02, ел. пошта kirichenko@detut.edu.ua,  
ORCID 0000-0002-6883-1877

## МЕТОДИКА СТВОРЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ДОСТАВКОЮ ВАНТАЖІВ НА ЗАЛІЗНИЦІ

**Мета.** Наукова робота має за мету аналіз функціонування існуючої інформаційної системи залізниці, як сховища даних, та розгляд шляхів переходу до інтелектуальної системи управління, у т. ч. з використанням семантичного підходу. Наразі необхідна зміна парадигми автоматизованого управління перевезеннями, що обумовлює зміну моделі управління експлуатаційною роботою залізниці. Для розробки та впровадження нової системи класу Business Intelligence необхідне створення формалізованих знань про перевізний процес залізниці, у т. ч. у вигляді онтологій, як моделі та засобу формалізації знань. Нові знання потребують використання термінів та понять, що відображають нові процеси та об'єкти управління в експлуатаційній роботі. **Методика.** При формалізації знань необхідно абстрагуватись від класичних визначень, таких як сортувальна, вантажна, технічна або дільнична станції, залізничний вузол, розвинений залізничний вузол і т. ін. Уніфіковані мови моделювання для проектування автоматизованих систем використовують поняття: категорії об'єктів, діаграми класів, станів, послідовності, діяльності, компонентів, відношень між властивостями тощо. Ці поняття дозволяють формалізувати знання, привести до однотипних представлень та використовувати їх для моделювання процесів управління доставкою вантажу. **Результати.** Дані про час здійснення подій процесу доставки вантажу, відхилення у плані-графіку враховуються в теоретико-множинній моделі сценаріїв процесу доставки. Один із концептів моделі відхилення від плану (з бази знань системи АСКВПУЗ–Є) дозволяє врахувати вплив можливих факторів та умов реальної експлуатаційної роботи. **Наукова новизна.** Розглянуті шляхи формалізації знань про перевізний процес як передумови формування інтелектуального інформаційного забезпечення системи управління. Побудовано теоретико-множинні моделі управління доставкою вантажу для складання сценаріїв процесу доставки, наведені приклади використання засобів об'єктно-орієнтованого моделювання для алгоритмізації технологічних процесів. **Практична значимість.** Автором запропоновані нові терміни та поняття, що відображають логістичні бізнес-процеси та дозволяють перейти до формалізації знань та створення засад інтелектуальної системи управління доставкою вантажів на залізниці.

**Ключові слова:** інтелектуальна система управління; формалізовані знання; засоби проектування; автоматизовані системи; експлуатаційна робота; термінологія залізниці; процес доставки вантажу

### Вступ

Управління вантажними перевезеннями залізниці вже не існує без автоматизованої системи. Облік роботи підрозділів і всієї залізниці, фінансова та облікова звітність, технологічні (суто залізничні) документи, розрахункові документи за надані послуги та інше здійснюється в інформаційній базі – єдиній автоматизованій системі управління вантажними перевезеннями Укрзалізниці (АСК ВП УЗ–Є). Але ця система, що містить величезний обсяг даних про всі операції з об'єктами управління, залишається по суті інформаційною. Існуючі авто-

матизовані технології, що використовуються при управлінні процесами перевезень, є значною мірою, системами збору та передачі даних, що часто здійснюються людиною, а отже із відставанням від реального часу виконання операції, з наступною їх обробкою для складання технологічних, облікових, фінансових документів, звітів про виконану роботу та іншої документації [1, 14, 15].

Інформаційна система залізниці являє собою гігантське сховище даних, що описують виконану роботу, і лише констатують процеси, що вже відбулись. Значна кількість довідок, звітів використовується для аналізу роботи за-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

лізниці. Так, наприклад, персонал дирекцій та залізниць України, що відповідає за планування роботи на добу, починає свій робочий день з четвертої години ранку. В плануванні роботи, як і у більшості процесів управління залізничними перевезеннями вантажів, не дивлячись на тотальне впровадження комп'ютерних технологій на всіх робочих місцях, використовуються підходи, що базуються на евристичних методах, власному досвіді управлінців та дисципліні виконання наказів. З іншого боку, від залізниці, як від сфери обслуговування, бізнес-оточення вимагає прозорості дій, дотримання логістичних принципів при доставці вантажів, що пов'язано з точним прогнозуванням, та подальшим дотриманням встановлених часових параметрів договору між учасниками перевезень. Це все зумовлює необхідність переходу від інформаційної системи, як сховища даних та системи розрахунків документів і звітів, до інтелектуальної системи (ІС). У контексті зазначеного серед основних функцій ІС [2, 9] особливо важливі задачі, які базуються на системі підтримки прийняття рішення (СППР) диспетчерським апаратом, задачі планування та прогнозу виконання процесу перевезень, а також управління доставкою вантажів.

В той же час, однією з основних тенденцій розвитку ІС сьогодні, як показує аналіз світових і вітчизняних досліджень [10, 17, 18], є використання автоматизованої розробки програмного забезпечення на основі об'єктно-орієнтованих моделей предметної області та певних семантичних конструкцій. Актуальним для підвищення сервісів у бізнес-процесах є також впровадження семантичних технологій. У світі вже існує значна кількість програмних продуктів класу Business Intelligence (BI) [3, 19], програмних засобів та технологій, що спрямовані на вибір обґрунтованих рішень на підставі інтелектуального аналізу даних, наприклад, Data mining [21]. Функціонування BI технологій спрямовано на накопичення знань та генерування нових.

Всі ці засоби та системи використовують формалізовані знання про предметну область (ПрО). Такі знання використовуються при плануванні роботи в реальному режимі часу, моделюванні, прогнозу розвитку ситуацій та при розробці СППР.

**Мета**

Метою цієї роботи є аналіз функціонування існуючої інформаційної системи залізниці, як сховища даних, розгляд шляхів переходу до інтелектуальної системи управління, у тому числі з використанням семантичного підходу. Враховуючи сучасні задачі економіки, бізнесу, рівень розвитку технологій у світі, необхідна зміна парадигми автоматизованого управління перевезеннями. Для розвитку існуючої системи АСК ВП УЗ–Є, з можливою трансформацією архітектури та функціональних властивостей системи або розробки та впровадження нової системи рівня VI, необхідно створення формалізованих знань про перевізний процес залізниці, у тому числі у вигляді онтологій, як моделі і засобу формалізації знань [3, 12, 16]. Онтології – бази знань (БЗ) спеціального виду із семантичною інформацією певної ПрО. Компоненти, з яких складаються онтології, залежать від парадигми подання.

**Методика**

При формалізації знань необхідно абстрагуватись від класичних визначень, таких як сортувальна або вантажна, технічна, ділянкова, тупикова станція, залізничний вузол, розвинений залізничний вузол і т. ін. Та й у реальному житті не існує сортувальної станції без якоїсь вантажної роботи. І навпаки. Крім того, опис процесів, що надається при розробці систем працюючими, має суб'єктивний характер і часто не відображає суті подій, що відбуваються в дійсності [8].

З іншого боку, існують уніфіковані мови моделювання для проектування автоматизованих систем використовуються, що оперують такими поняттями, як категорії об'єктів, діаграми класів, станів, послідовності, діяльності, компонентів, відношень між властивостями, тощо [5, 20]. Ці поняття дозволяють формалізувати технологічні процеси, привести до однотипних представлень основних об'єктів залізниці та наочно показати їх взаємодію.

Технологія або сценарій послідовності станів чи операцій характеризується побудовою графічного зображення, орієнтованого на візуалізацію та формалізацію процесу, в тому числі засобами UML [5] для наступного накладання на часову вісь.



## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

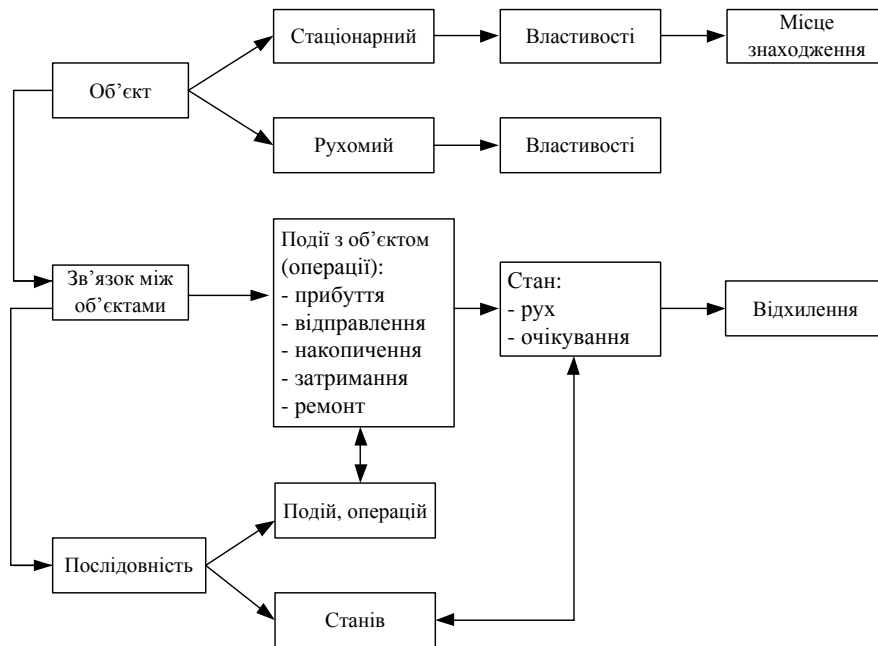


Рис. 1. Категорії уявлень для складання діаграм класів, станів, послідовностей

Fig. 1. Representation categories for diagramming the classes, states, sequences

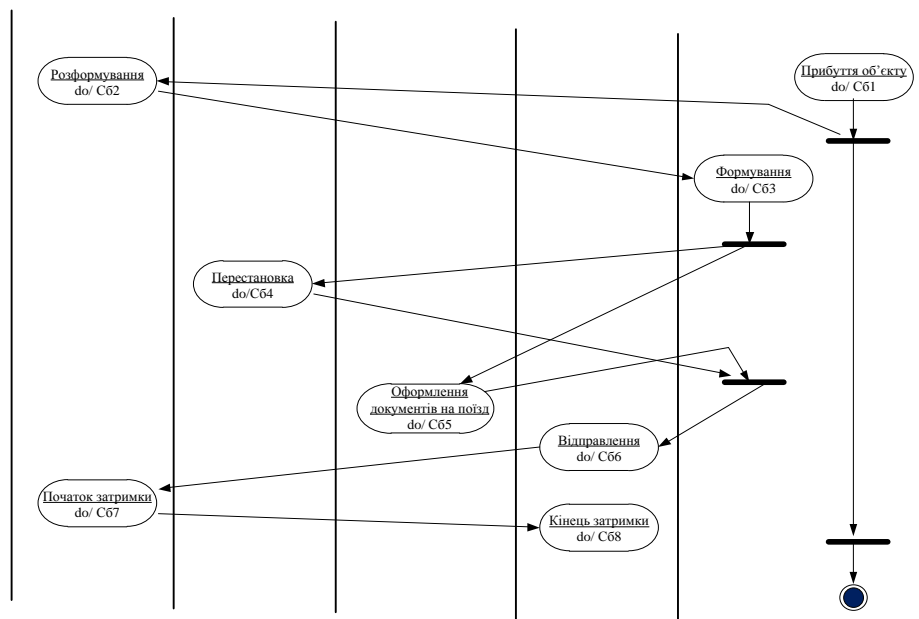


Рис. 2. Діаграма діяльності (сценарій засобами UML) з рухомим об'єктом управління на стаціонарному об'єкті

Fig. 2. Activity diagram (scenario by means of UML) with a moving control object on immovable object

Абстрагування від специфіки залізниці наразі являє собою найбільшу складність у розумінні етапів переходу до інтелектуальної системи управління процесами вантажних перевезень. Здійснити такий перехід можливо

лише змінивши парадигму управління експлуатаційною роботою залізниці при перевезенні вантажів. Проблема полягає у тому, що залізниця, яка існує на гроші своїх клієнтів, ефективність роботи вимірює в показниках, що

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

не мають прямого відношення до якості обслуговування отримувачів послуг, не відображають ефективність логістичних процесів при перевезенні вантажів. Зміна парадигми управління експлуатаційною роботою, що дозволить оперувати формалізованими знаннями, пов'язана значною мірою, зі зміною понять та термінології.

Основна маса термінів і їх визначень у сфері транспортної системології створювались в 60-70-х роках минулого століття. Тезаурус залізничних перевезень складався ще на сотню років раніше. На сьогодні, за цей проміжок часу транспортна наука і практика значно розвинулася. Тому виникає необхідність перегляду термінологічної системи [4, 7], що пов'язано з теоретичними і емпіричними дослідженнями в сфері транспорту.

Оскільки проблема суттєва і багаторівнева, а термінів багато, розглянемо частину з них, а саме: термінологію, яка відсутня, але необхідна для створення системи, у тому числі автоматизованої, управління доставкою вантажу, яка є актуальним напрямком реформування діяльності залізниці. Організація перевезення «точно в строк» є необхідною умовою забезпечення якості обслуговування клієнтів залізниці, дотримання фінансових умов у договорах з отримувачами послуг. Для прогнозування реальних термінів доставки при наданні послуги використовується моделювання процесів [11, 13] з використанням вже формалізованих знань на підставі нової термінології.

Визначення 1. Доставкою вантажу (ДВ) називаються цілеспрямовані зміни навколишнього положення вантажу, впорядковані в часі, як результат діяльності окремих або паралельних систем.

Визначення 2. Планування ДВ здійснюється попереднім складанням сценарію доставки вантажу за нормативними документами або евристично, виходячи з достатнього досвіду особи, що складає сценарій (експедитор, диспетчер, логіст та ін.).

Визначення 3. Сценарій доставки вантажу (СДВ) – це можливий варіант реалізації гіпотетичної, логічної послідовності ситуацій процесу доставки вантажу у вигляді декларативно-графічного опису, складеного евристичним методом на основі експертної оцінки.

Зазначимо, що СДВ не є функцією часу, тобто послідовність ситуацій не накладена на тимчасову вісь, табл. 1.

Таблиця 1

## Перелік подій для складання сценаріїв процесу доставки

Table 1

## The list of events for compiling the scripts of delivery process

Події з об'єктом	СЦ 1	СЦ 2	...	СЦ-ст N
1. Прибуття $Cб_1$	×	×		×
2. Розформування $Cб_2$		×		×
3. Формування $Cб_3$		×		×
4. Перестановка вагона з вантажем на відправлення $Cб_4$				×
5. Подача локомотива $Cб_5$				×
6. Відправлення вантажу $Cб_6$	×	×		×
7. Початок затримки вагона з вини клієнта $Cб_7$				×
8. Кінець затримки вагона $Cб_8$				×

При прогнозуванні часових характеристик ситуацій СДВ вона перетвориться в планову реалізацію процесу доставки вантажу (план-графіка). Приклад такого план-графіку наведений на рис 3.

Визначення 4. План-графік доставки вантажу (ГДВ) – затверджений план-графік у вигляді планової послідовності ситуацій та подій, з зазначенням часу їх виконання ( $КТij$ ), або із зазначенням часових інтервалів між подіями.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Перелік робочих операцій	Тривалість виконання операцій у часі					
	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$\dots$	$t_{13}$	$t_{14}$
1 Надходження заявки на порожні вагони від клієнта-відправника вантажу						
2 Подача порожніх вагонів на під'їзні шляхи клієнта-відправника вантажу						
3 Завантаження вагонів на під'їзному шляху клієнта-відправника вантажу						
...						
13 Накопичення вагонів на станції приймання і формування поїзда						
14 Знаходження вагонів у поїзді до відправлення новому клієнту-відправнику вантажу						
Загальний час, $t_{ij}$						

Рис. 3. План-графік виконання технологічних операцій з визначеними КЧТ

Fig. 3. Scheduled plan for the implementation of technological operations with the determined control-time points

При розробці плану-графіка визначаються планові значення контрольно-часових точок (КЧТ) [6, 10]. Ці точки визначають час початку  $tn$  і час закінчення  $tn+1$  кожної технологічної операції,  $t_{ij}$  – час здійснення  $i$ - операції.

Визначення 5. Процес доставки вантажу (ПДВ) – послідовність фактичних подій з об'єктом доставки (вантажем, вагоном), при переміщенні його у часі та просторі ( $KЧТ^\phi$ ).

Аналіз фактичних реалізацій ПДВ показав, що вони унікальні – нема двох реалізацій проце-

су доставки вантажу, які б повторили в точності один одного.

Визначення 6. Відхилення у графіку доставки вантажу (Відхилення ГДВ). У Процесі ДВ здійснюється контроль за відхиленням ( $\Delta KЧТ$ ) фактичних значень часу ( $KЧТ^\phi$ ) від визначених планом-графіком ( $KТij$ ) періодично, з потрібною для кожної ситуації частотою.

Визначення 7. Управління доставкою вантажу – заходи, які спрямовані на дотримання ГДВ, а саме: часових параметрів зобов'язань, встановлених договором з клієнтом та мінімізацію відхилень ( $\Delta KЧТ$ ) при проходженні контрольно-часових точок або у часових інтервалах між запланованими подіями.

### Результати

Дано для контролю доставки вантажу відповідно ГДВ за таблицями АСК ВП УЗ–Є мають вигляд, наведений у табл. 2. Запис інформації здійснюється періодично, з потрібною для кожної ситуації частотою. Дані  $\Delta KЧТ$ ,  $\Delta t$  накопичуються в інформаційній базі для наступної участі у моделях, які використовуються для прогнозування ГДВ, дані якого максимально наближені до реальних умов експлуатаційного процесу.

Номенклатура об'єктів і суб'єктів сценарного відображення ДВ являє собою близько 35–40 множин, що містять формалізовані елементи, які у свою чергу є теж множинами. Теоретико-множинна модель [10] процесу доставки має вигляд:

$$M_1: On \times Ob \times Cb \times Cu \times Ct \times T \rightarrow KЧТ^n \times T$$

де  $On$  – множина операцій ПДВ;

$Ob$  – множина стаціонарних об'єктів (залізничних колій і споруд, ділянок);

$Cb$  – множина суб'єктів управляючих і приймаючих рішення по ПДВ;

$Cu$  – множина СДВ, сценаріїв процесів доставки вантажів;

$Ct$  – множина просторових станів вантажів;

$T$  – реальний час.

Розкриття моделі  $Cu$  за множиною СДВ має вигляд:

$$M_2: On \times S \times D \times t_n \rightarrow Cu ;$$

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

$$M3: Ob \times \Delta T \times T \rightarrow On \times T ;$$

$$M4: D \times On \times I \rightarrow Cm ,$$

де  $S$  – множина ситуацій ПДВ;

$D$  – множина подій процесу доставки вантажів,  $Cbi$ ;

$\Delta T$  – множина інтервалів часу виконання операцій ПДВ;

$t_i$  – множина інтервалів часу між подіями:

$$t_n = t_i \pm \Delta t_i^n ,$$

$\Delta t_i^n$  – середні (прогнозовані) відхилення від нормативного часу, за даними  $\Delta KCT$  по подіях;

$I$  – інформація.

Таблиця 2

## Склад даних про час здійснення подій

Table 2

## Data composition on time of events

Події з об'єктом $Cbi$	Нормативний час подій, операцій $t_i$	T факт.	$\Delta t$
Прибуття	—	20:02	—
Розформування	25 хв	40 хв	15 хв
Формування	8 год 50 хв	10 год 15 хв	1 год 25 хв
Перестановка вагону з вантажем на відправлення	30 хв	27 хв	–3 хв
Подача локомотива	40 хв	1 год 20 хв	40 хв
Відправлення вантажу	20 хв	35 хв	15 хв

Управління доставкою вантажу, що направлено на дотримання ГДВ, а саме часових параметрів зобов'язань, встановлених договором з клієнтом, потребує визначення максимально реального часу подій з об'єктом управління. Дані про час здійснення подій ПДВ, відхилення у ГДВ враховуються в моделі процесу достав-

ки. Один з концептів моделі – середнє (прогнозоване) відхилення з бази знань системи АСК ВП УЗ–Є – дозволяє врахувати вплив можливих факторів та умови реальної експлуатаційної роботи.

## Наукова новизна та практична значимість

Розглянуті шляхи формалізації знань про перевізний процес як передумови формування інтелектуального інформаційного забезпечення системи управління. Побудовано теоретико-множинні моделі управління доставкою вантажу для складання сценаріїв доставки та визначення КЧТ процесу доставки, наведені приклади використання засобів об'єктно-орієнтованого моделювання для алгоритмізації технологічних процесів. Запропоновані нові терміни та поняття, що відображають логістичні бізнес-процеси, об'єкти управління в експлуатаційній роботі та дозволяють перейти до формалізації знань.

## Висновки

Для формування бази знань інтелектуального інформаційного забезпечення системи управління, зокрема процесами управління доставкою вантажу, існуюча автоматизована система залізниці АСК ВП УЗ–Є потребує нарощування функціональних властивостей системи. Створення та використання формалізованих знань про перевізний процес залізниці, у тому числі у вигляді онтологій, дозволить розробку та впровадження інтелектуальних, рівня ВІ, систем, що реалізують підтримку прийняття рішення, управління в реальному часі, задовольняють сучасним вимогам бізнес-процесів та учасників транспортного ринку. Функціонування системи управління з можливістю роботи у відкритому розподіленому інформаційному просторі створить умови постійного оновлення знань, що надходять із зовнішнього середовища, та взаємодії із сучасними програмними продуктами світу. Для цього, в першу чергу, необхідно переосмислення власне залізничних технологій та пов'язаної з ними термінології.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Башлаев, В. К. О создании сетевой автоматизированной системы управления грузовыми перевозками Украины / В. К. Башлаев, С. Ю. Цейтлин, В. В. Великодний // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2007. – Вип. 17. – С. 18–21.
2. Вернигора, Р. В. Перспективы создания интеллектуальной системы поддержки принятия оперативных решений по управлению работой поездных локомотивов на железнодорожном полигоне / Р. В. Вернигора, Л. О. Ельникова // Сучасні проблеми розвитку інтелектуал. систем трансп. : тези Міжнар. наук.-практ. конф. (27.01–31.01.2014). – Дніпропетровськ, 2014. – С. 23.
3. Гладун, А. Я. Семантичні технології: принципи та практики / А. Я. Гладун, Ю. В. Рогушина. – Київ : ВД «АДЕФ-Україна», 2016. – 308 с.
4. Гладун, А. Я. Формирование тезауруса предметной области как средства моделирования информационных потребностей пользователя при поиске в Интернете / А. Я. Гладун, Ю. В. Рогушина // Вестн. компьют. и информ. технологий. – 2007. – № 1. – С. 26–33.
5. Горбова, О. В. Удосконалення методів техніко-експлуатаційної оцінки роботи залізничних станцій : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.20 / Горбова Олександра Вікторівна ; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпро, 2016. – 21 с.
6. Кириченко, Г. І. Розробка методу контрольно-часових точок для контролю графіків доставки вантажу / Г. І. Кириченко, С. М. Овчаренко // Проблеми транспорту : зб. наук. пр. / Нац. трансп. ун-т. – Київ, 2013. – Вип. 10. – С. 112–118.
7. Козаченко, Д. М. Методи збору даних про функціонування залізничних станцій / Д. М. Козаченко, Р. В. Вернигора, О. В. Горбова // Транспортні системи та технології перевезень : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2014. – Вип. 8. – С. 58–64. doi: 10.15802/tst2014/38087.
8. Ломотько, Д. В. Аналіз теоретичних підходів щодо оцінки ефективності роботи залізниць України / Д. В. Ломотько, Т. В. Бутко, О. В. Розсоха // Залізничний транспорт України. – 2012. – № 2. – С. 36–38.
9. Ломотько, Д. В. Методологія формування інтелектуальної транспортної системи на залізничному транспорті / Д. В. Ломотько, Т. В. Бутко // Науч. тр. SWorld. – Иваново, 2012. – Т. 2, № 1. – С. 45–46.
10. Моделювання сценаріїв переміщення вантажу у ланцюгах доставки / Г. І. Кириченко, О. Г. Стрелко, Ю. А. Бердниченко [та ін.] // Транспортні системи та технології перевезень : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпро, 2016. – Вип. 12. – С. 32–37. doi: 10.15802/tst2016/85882.
11. Павлишенко, Б. М. Групування текстових даних на основі моделі семантичного контексту / Б. М. Павлишенко // Вост.-Европ. журн. передових технологій. – 2011. – Т. 5, вып. 2 (53). – С. 234–247.
12. Петрашевский, О. Л. Адаптация методологии концептуально-логического отображения и проектного моделирования транспортных систем к задачам управления проектами / О. Л. Петрашевский, В. В. Данилевский, Н. Н. Цымбал // Проблеми транспорту : зб. наук. пр. / Нац. трансп. ун-т. – Київ, 2010. – Вип. 7. – С. 56–60.
13. Системный тезаурус процессов мультимодальной доставки грузов / А. И. Кириченко, В. В. Габа, С. И. Ивашук, О. В. Петриковец // Проблеми транспорту : зб. наук. пр. / Нац. трансп. ун-т. – Київ, 2013. – Вип. 10. – С. 186–196.
14. Цейтлін, С. Ю. Передумови створення аналітичної системи. Створення централізованої бази даних фінансово-економічних систем / С. Ю. Цейтлін, С. В. Подоляк, І. Д. Васишин // Сучасні інформ. та комунікац. технології на трансп., в пром-сті та освіті : тези IX міжнар. наук.-практ. конф. (16.12–17.12.2015). – Дніпропетровськ, 2015. – С. 97.
15. Цейтлін, С. Ю. Создание электронного архива учётных и отчётных форм данных в АСК ВП УЗ–Е / С. Ю. Цейтлін, Л. А. Коваленко, М. В. Николенко // Сучасні інформ. та комунікац. технології на трансп., в пром-сті та освіті : тези IX міжнар. наук.-практ. конф. (16.12–17.12.2015). – Дніпропетровськ, 2015. – С. 41.
16. Cognos: crowdsourcing search for topic experts in microblogs / S. Ghosh, N. Sharma, F. Benevenuto [et al.] // Proc. of the 35<sup>th</sup> Intern. ACM SIGIR Conf. on Research and Development in Information Retrieval (12.08–16.08.2012). – Portland, Oregon, USA, 2012. – P. 575–590. doi:10.1145/2348283.2348361.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

17. Di Noia, T. Semantic Matchmaking as Non-Monotonic Reasoning A. Description Logic Approach / T. Di Noia, E. Di Sciascio, F. M. Donini // J. of Artificial Intelligence Research. – 2007. – No. 29. – P. 269–307.
18. Fernandez-Loppez, M. Methontology: From Ontological Art Towards Ontological Engineering / M. Fernandez-Loppez, A Gomez-Perez, N. Juristo // Proc. of the Spring Symposium on Ontological Engineering of AAAI. – California : Stanford University, 1997. – P. 33–40.
19. Use of textual and conceptual profiles for personalized retrieval of political documents / E. Vicente-López, L. M. de Campos, J. M. Fernández-Luna, F. Juan // Knowledge-Based Systems. – 2016. – Vol. 112. – P. 127–141. doi: 10.1016/j.knosys.2016.09.005.
20. Using personalization to improve XML retrieval / L. M. De Campos, J. M. Fernandez-Luna, J. F. Huete, E. Vicente-Lopez // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 2014. – Vol. 26. – Iss. 5. – P. 1280–1292. doi: 10.1109/tkde.2013.75.
21. Witten, I. H. Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques / I. H. Witten, F. Eibe, M. A. Hall. – 3rd ed. – Burlington : Morgan Kaufmann, 2011. – 664 p.

А. И. КИРИЧЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Управление процессами перевозок», Государственный экономико-технологический университет транспорта, ул. Лукашевича, 19, Киев, Украина, 03049, тел. +38 (044) 452 12 02, эл. почта kirichenko@detut.edu.ua, ORCID 0000-0002-6883-1877

## МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДОСТАВКОЙ ГРУЗОВ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ

**Цель.** Научная работа имеет своей целью анализ функционирования существующей информационной системы железной дороги, как хранилища данных, и рассмотрение путей перехода к интеллектуальной системе управления, в т. ч. с использованием семантического подхода. Сейчас необходима смена парадигмы автоматизированного управления перевозками, что обуславливает изменение модели управления эксплуатационной работой железной дороги. Для разработки и внедрения новой системы класса Business Intelligence необходимо создание формализованных знаний о перевозочном процессе железной дороги, в том числе в виде онтологий, как модели и средства формализации знаний. Новые знания нуждаются в использовании терминов и понятий, отражающих новые процессы и объекты управления в эксплуатационной работе. **Методика.** При формализации знаний необходимо абстрагироваться от классических определений, таких как сортировочная, грузовая, техническая или участковая станции, железнодорожный узел, развитой железнодорожный узел и т. п. Унифицированные языки моделирования для проектирования автоматизированных систем используют понятия: категории объектов, диаграммы классов, сословий, последовательности, деятельности, компонентов, отношений между свойствами. Эти понятия позволяют формализовать знания, привести к однотипным представлениям и использовать их для моделирования процессов управления доставкой груза. **Результаты.** Данные о времени совершения событий процесса доставки груза, отклонения в плане-графике учитываются в теоретико-множественной модели сценариев процесса доставки. Один из концептов модели отклонения от плана (с базы знаний системы АСК ВП УЗ–Е) позволяет учесть влияние возможных факторов и условия реальной эксплуатационной работы. **Научная новизна.** Рассмотрены пути формализации знаний о перевозочном процессе как предпосылки формирования интеллектуального информационного обеспечения системы управления. Построены теоретико-множественные модели управления доставкой груза для составления сценариев процесса доставки, приведены примеры использования средств объектно-ориентированного моделирования для алгоритмизации технологических процессов. **Практическая значимость.** Автором предложены новые термины и понятия, отражающие логистические бизнес-процессы, позволяющие перейти к формализации знаний и созданию основ интеллектуальной системы управления доставкой грузов на железной дороге.

**Ключевые слова:** интеллектуальная система управления; формализованные знания; средства проектирования; автоматизированные системы; эксплуатационная работа; железнодорожная терминология; процесс доставки груза

H. I. KYRYCHENKO<sup>1\*</sup><sup>1\*</sup>Dep. «Management of Transportation Process», State Economy and Technology University of Transport, Lukashevych St., 19, Kyiv, Ukraine, 03049, tel. +38 (044) 452 12 02, e-mail kirichenko@detut.edu.ua, ORCID 0000-0002-6883-1877

## CREATION PRINCIPLES OF INTELLIGENT AUTOMATED DELIVERY MANAGEMENT SYSTEMS AT THE RAILWAY

**Purpose.** The paper is aimed to analyze the functioning of the existing railway informational system, as the data storage, consideration of the ways to changeover to intelligent management system, including the application of semantic approach. It is necessary to change the paradigm of automated traffic management; this determines changing the paradigm in railway operation management. The development and introduction of new Business-Intelligence-type system requires the formalized knowledge on railway transportation process to be implemented, including in the form of ontology as the model and means to formalize the knowledge. New knowledge requires using the terms and concepts to describe the new processes and management objects in railway operations.

**Methodology.** Formalizing the knowledge one should abstract away from classical definitions such as marshaling or freight station, train station, division station, dead-end station, railway junction, railway hub etc. Unified Modeling Languages for engineering the automated systems use the definitions: the objects' categories, the class diagrams, statechart diagrams, sequence diagrams, activity diagrams, component diagrams, link diagrams in properties etc. These concepts enable formalizing the knowledge, bringing to homogeneous representing and using them for modeling the management processes of goods delivery. **Findings.** The data on timing the events of goods delivery process, breakings of schedule are taken into account in set-theoretical model on scripting scenarios for goods delivery process. One of the concepts in the model on breaking of schedule (from the knowledge base of the system ASK VPUZ-E enables to take into account the influence of possible factors and the real railway operations conditions.

**Originality.** The ways to formalize knowledge on railway transportation process as the major premise to form intelligent informational software for management system were analyzed. The set-theoretical models on goods delivery management for scripting goods delivery process' scenarios have been developed in the paper, the examples of using the means of object-oriented modeling to construct algorithm for technological processes have been given as well. **Practical value.** The author suggests new terms, definitions and concepts describing the logistic business processes and enabling to changeover to formalizing the knowledge and to forming the conditions of intelligent management system of goods delivery on railways.

**Keywords:** intelligent management system; formalized knowledge; means of engineering; automated systems; railway operations; railways terminology; goods delivery process

## REFERENCES

1. Bashlaiev, V. K., Tseitlin, S. Y., & Velykodnyi, V. V. (2007). About the network of automated control system creating of Ukrainian freight transport. *Science and Transport Progress*, 17, 18-21.
2. Vernigora, R. V., Yelnikova, L. O. (2014). Perspektivy sozdaniya intellektualnoy sistemy podderzhki priyatiya operativnykh resheniy po upravleniyu rabotoy poezdnykh lokomotivov na zheleznodorozhnom poligone. *Abstracts of the International Conference «Modern Problems of Intelligent Transport Systems Development»*, January 27-31, 2014, Dnipropetrovsk. 23-24. Dnipropetrovsk, Ukraine: DNURT.
3. Hladun, A. Y., & Rohushyna, Y. V. (2016). Semantichni tekhnolohii: pryntsypy ta praktyky. Kyiv: TOV VD «ADEF-Ukrayna».
4. Gladun, A. Y., & Rogushina, Y. V. (2007). Formirovaniye tyezaurusa pryedmyetnoy oblasti kak sryedstva modyelirovaniya informatsionnykh potrebnostyey polzovatyelya pri poisky v intyernyetye. *Vestnik komp'uternykh i informatsionnykh tekhnologii*, 1, 26-33.
5. Gorbova, O. V. (2016). *The improving of methods in technical-service of railway station's operation*. (PhD thesis). Available from Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipropetrovsk.
6. Kyrychenko, H. I., & Ovcharenko, S. M. (2013). Rozrobka metodu kontrolno-chasovykh tochk dlia kontroliu hrafikiv dostavky vantazhu. *Transport Problems*, 10, 112-118.
7. Kozachenko, D. M., Vernyhora, R. V., & Horbova, O. V. (2014). Methods of data collection on the functioning of the railway stations. *Transport Systems and Transportation Technologies*, 8, 58-64. doi: 10.15802/tst2014/38087



## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

8. Lomotko, D. V., Butko, T. V., & Rozsokha, O. V. (2012). Analiz teoretychnykh pidkhodiv shchodo otsinky efektyvnosti roboty zaliznyts Ukrainy. *Railway Transport of Ukraine*, 2, 36-38.
9. Lomotko, D. V., & Butko, T. V. (2012). Metodolohiia formuvannia intelektualnoi transportnoi systemy na zaliznychnomu transporti. *Research Bulletin SWorld*, 2(1), 45-46.
10. Kyrychenko, H. I., Strelko, O. H., Berdnychenko, Y. A., Petrykovets, O. V., & Kyrychenko, O. A. (2016). Scenarios modeling of cargo movement in the supply chains. *Transport Systems and Transportation Technologies*, 12, 32-37. doi: 10.15802/tstt2016/85882
11. Pavlyshenko, B. M. (2011). Text data grouping on the base of semantic context model. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5, 2(53), 234-247.
12. Petrashevskiy, O. L., Danylevskiy, V. V., & Tsymbal, N. N. (2010). Adaptatsiya metodologii kontseptualnologicheskogo otobrazheniya i proektnogo modelirovaniya transportnykh sistem k zadacham upravleniya proektami. *Transport Problems*, 7, 56-60.
13. Kyrychenko, A. I., Haba, V. V., Yvashchuk, S. Y., & Petrykovets, O. V. (2013). Sistemnyy tezaurus protsesov multimodalnoy dostavki gruzov. *Transport Problems*, 10, 186-196.
14. Tseitlin, S. Y., Podoliak, S. V., & Vasylyshyn, I. D. (2015). Peredumovy stvorennia analitychnoi systemy. Stvorennia tsentralizovanoi bazy danykh finansovo-ekonomichnykh system. *Abstracts of the International Conference «Modern information and communication technologies on a transport, in industry and education», December 16-17, 2015, Dnipropetrovsk*. 97. Dnipropetrovsk, Ukraine: DNURT.
15. Tseitlin, S. Y., Kovalenko, L. A., & Nikolenko, M. V. (2015). Sozdaniye elektronnoho arkhiva uchetykh i otchetnykh form dannykh v ASK VP UZ-Ye. *Abstracts of the International Conference «Modern information and communication technologies on a transport, in industry and education», December 16-17, 2015, Dnipropetrovsk*. 41. Dnipropetrovsk, Ukraine: DNURT.
16. Ghosh, S., Sharma, N., Benevenuto, F., Ganguly, N., & Gummadi, K. (2012). Cognos: crowdsourcing search for topic experts in microblogs. *Proceedings of the 35th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval, August 12-16, 2012, Portland, Oregon, USA*. 575-590. doi:10.1145/2348283.2348361
17. Di Noia, T., Di Sciascio, E., & Donini, F. M. (2007). Semantic Matchmaking as Non-Monotonic Reasoning: A Description Logic Approach. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 29, 269-307.
18. Fernandez-López, M., Gomez-Perez, A., & Juristo, N. (1997). Methontology: From Ontological Art Towards Ontological Engineering. *Proceedings of the Spring Symposium on Ontological Engineering of AAAI*. Stanford University, California, 33-40.
19. Vicente-López, E., De Campos, L. M., Fernández-Luna, J. M., & Huete, J. F. (2016). Use of textual and conceptual profiles for personalized retrieval of political documents. *Knowledge-Based Systems*, 112, 127-141. doi: 10.1016/j.knosys.2016.09.005
20. De Campos, L. M., Fernandez-Luna, J. M., Huete, J. F., & Vicente-Lopez, E. (2014). Using personalization to improve XML retrieval. *Knowledge and Data Engineering*, 26 (5), 1280-1292.
21. Witten, I. H., Frank, E., & Hall, M. A. (2011). *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques* (3rd ed.). Burlington: Morgan Kaufmann.

Стаття рекомендована до друку д.т.н., проф. О. Л. Петрашевським (Україна); д.т.н., проф. І. В. Жуковицьким (Україна)

Надійшла до редколегії: 14.11.2016

Прийнята до друку: 03.03.2017

## UDC 656.225

D. M. KOZACHENKO<sup>1\*</sup>, R. V. VERNIGORA<sup>2\*</sup>, R. S. RUSTAMOV<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.dit.edu.ua, ORCID 0000-0003-2611-1350

<sup>2\*</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 15 12, e-mail rv.vernigora@gmail.com, ORCID 0000-0001-7618-4617

<sup>3\*</sup>The Regional Branch of the «Odesa Railroad» PJSC «Ukrzaliznytsia», Panteleymonivska St., 19, Odesa, Ukraine, tel. +38 (048) 727 30 96, e-mail rustamovrsh@gmail.com, ORCID 0000-0002-5860-1840

## CREATION OF EXPORT-ORIENTED NETWORK OF GRAIN ELEVATORS IN UKRAINE

**Purpose.** The scientific paper highlights improving the efficiency of export rail transportation of grain cargoes in Ukraine by introducing shipper routing and concentration of loading at the terminal grain elevators. **Methodology.** According to the experience of the USA and Canada, one of the most effective ways to reduce costs in the grain-to-port supply chain is a shipper routing of the rail traffic. Shipper routing for transportation of grain cargoes involves the concentration of their loading on the multiple junctions. The junctions are proposed to be selected with the use of cluster analysis methods. For the formation of the grain loading concentration areas the authors used methods of set theory and multi-criteria optimization. **Findings.** Based on agglomerative cluster analysis algorithm, the junctions on a network of Ukrainian railways are selected and the areas of possible concentration of grain loading are formed. DSU-algorithm allowed distinguishing the overlapping and non-overlapping areas of concentration. The problem of selecting non-overlapping areas of the grain loading concentration is formalized as the problem of multiobjective integer programming with boolean variables. The solution of this problem by a modified simplex algorithm allows selecting on the railway network of Ukraine 24 districts of possible grain loading concentration, which cover 70 stations and at minimal additional cost provide routing of about 7.5 million tons of grain per year. **Originality.** The originality of the work lies in the fact that the authors developed the mathematical procedure for selection of junctions and concentration areas of grain loading at the Ukrainian railway network, taking into account the economic efficiency of the process. **Practical value.** Application of the developed method of grain loading concentration for the formation of unit trains will significantly reduce the logistics costs in the supply chain of grain to Ukrainian ports for export and, consequently, increase its competitiveness in foreign markets.

**Keywords:** grain export; elevators; rail transportation; shipper routing; loading concentration

### Introduction

Grain is one of the main export goods of Ukraine. Over the period from 2006 to 2016, the share of its value in the total value of goods exported from Ukraine increased from 3.5 to 16.5%. In 2015/2016 marketing year among grain exporters, Ukraine, with an indicator of 38.7 million tons, took the third place, behind the United States (78.5 million tons) and the European Union (52.2 million tons). Significant volumes of grain were exported by Argentina (36.2 million tons), the Russian Federation (34.6 million tons), Canada (27.7 million tons) and other countries [14]. One of the ways to increase the competitiveness of domestic grain in the world market is to build an effective logistics system. For Ukraine, this task is espe-

cially important, as the share of logistics costs in the cost of domestic grain is about 35%; for comparison, the share of logistics costs in the grain cost in the European Union is 12 – 16%, the United States – 9 % [10].

In 2016 in Ukraine, about 97% of grain exports were made through seaports, while 63% of grain cargo was delivered to sea ports by rail. Therefore, increasing the efficiency of grain cargo transporting by rail and water transportation is one of the key tasks that must be addressed to reduce logistics costs. The need to develop logistic schemes for the grain delivery to ports with the participation of rail transport is also conditioned by the need to increase Ukraine's energy independence. The railway

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

transport of Ukraine performs about 90% of the turnover of electric power with the use of domestic energy carriers. On the contrary, 72% of oil products consumed in Ukraine are used for the needs of motor transport; while 80% of oil products are imported by Ukraine [4].

Significant progress in reducing the cost of grain transportation was achieved in the US and Canada in the late 20th, early 21<sup>st</sup> century.

Changes in grain logistics in the United States began in 1972–1973 in response to a sharp increase in demand for grain in the world market [25]. These changes led to a change in the number, capacity and location of elevators throughout the country, improvement of the technology of grain transportation by railways and their tariff systems. Similar changes have occurred since the 1980s in Canada.

Prior to the reform process, the logistics system for grain delivery by the North American railways was similar to that operating on the Ukrainian railways. Empty carriages for the transportation of grain were sent to technical stations, where from the groups of 1 to 25 wagons were approached to the loading stations. After loading, the wagons were sent to technical stations for making up of trains according to the composition plan. In 1965, the USA began to use technology to transport grain for export to seaports by route shipments [23]. The efficiency of grain transportation by routes is connected with a reduction of station costs, the more rational use of the capacity of wagons and the throughput and carrying capacity of railways. At the same time, this technology requires the development of access roads and loading capacity of elevators [20].

Further technical and technological innovations, state policy aimed at market development led to a change in the volume, quality and cost of railroad services associated with the transportation of grain. The end of the 1970s – the beginning of the 1980s was the period of economic deregulation of the railway transport. The US Congress adopted a number of documents, the most important of which were: “Railroad Revitalization and Regulatory Reform Act” of 1976 [24] and “Staggers Rail Act” of 1980 [28]. These laws significantly simplified for the railways the procedure for closing inactive areas and also gave considerable freedom in the for-

mation of tariff policy. As a result, inactive areas, which constituted about 20% of the network, were closed, in addition a significant number of low-activity sections were converted into railways, independent of the 1st class railways [29]. Tariff policy of railways has also undergone significant changes. The railways switched from tariffing of freight in proportion to the ton of cargo to single-car rate, multiple-car rates, unit train and multiple origin unit train rates, stimulating shippers, on the one hand, to the maximum loading of wagons, and, on the other hand, to the concentration of grain traffic. In the 1990s, the Burlington Northern railway (BNSF after 1996) introduced the technology of grain transportation by shuttle train [22]. This technology implies the use of a special tariff, which is lower than that for the transportation of grain by group shipments by 46–52%. At the same time, the shipper must be able to ensure loading of the train of 75–120 cars during the limited time (about 15 hours) [27]. Trains move between the points of loading and unloading according to a rigid schedule in accordance with the contract for 6–9 months, without remarshaling and uncoupling of train locomotives at the loading station [26]. In response to changes in grain transportation conditions in the United States, there were significant changes in grain production and storage systems. Between 1980 and 1998, the number of agricultural enterprises decreased by 15%, while their size increased by 11%. The total number of elevators decreased due to a significant reduction in the number of country elevators, while the number of terminal elevators increased, and the number of terminal elevators increased, ensuring the shipment of grain to the railway transport in lots sufficient for the formation of routes [21]. Technical specifications for elevators that provide shipment of grain lots for the formation of routes are presented in [25]. The average distance of to-elevator grain delivery by farmers increased from 19 to 51.5 km [22].

In general, despite the fact that the cost of grain production in the USA, as a rule, is higher than in the main competing countries, the effective logistics system ensures its competitiveness in world markets.

The logistic system of grain transportation in Canada underwent similar changes. In response to discounts provided by railways when increasing

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

the amount of shipment, there occurred a consolidation of elevators. Between 1994 and 2003, the number of grain elevators decreased by 62%, while their total loading capacity decreased by only 8%.

The domestic logistics system for the export of grain cargo is characterized by the dispersion of the grain loading over a large number of railway stations. So, at present in Ukraine grain loading is carried out at 630 stations, however, as the analysis of statistical data showed, for about 420 stations (67%) the volumes of average daily grain loading do not exceed 1 wagon. In addition, the loading at some stations is extremely uneven: for example, only 24 stations (4%) conducted the grain loading on more than half of the days a year, while 50% of the stations spent no more than 34 days a year for grain loading [9, 15].

The negative result of this is a significant turnover of wagons, which in 2016 was about 9.9 days [17], inefficient use of locomotive traction at the initial and final stages of transportation, significant operating costs associated with car servicing at stations. The existence of such a logistics system is possible because of the absence in Ukraine of differentiated tariff rates for wagon, group and route shipments, as well as the availability of stand-by grain hoppers in the 2000s. However, the combination of such factors as sharp increase in grain production, critical wear of grain carriers and stiffer competition in the world grain markets make it necessary to improve the logistics infrastructure and technologies for grain transportation. In these conditions, the experience of the USA and Canada can be used in Ukraine, which consists in increasing the loading capacity of elevators, on the one hand, and using routes for the grain transportation with special tariffs, on the other hand.

### Purpose of the study

The purpose of the study is to develop a methodology for the formation of a network of grain loading concentration areas to ensure the shipper routing of rail transportation of grain to the seaports of Ukraine for export.

### Methodology

The choice of terminal elevators (junctions) and grain loading concentration areas is a very complex multivariate and multifactor optimization task.

At the same time, it is necessary to take into account the existing infrastructure of the junctions and the possibilities for its development, the volumes of grain loading at the stations, the additional costs associated with storing grain, unit train loading, delivering grain to junctions by road and the costs of transporting grain by rail to ports.

#### *Formulation and formalization of the problem.*

The task of determining the areas of possible grain loading concentration and the corresponding junctions, where the grain will be loaded in unit trains, can be formulated as follows.

There are a lot of  $S$  grain loading stations on the railway range  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_i, s_z\}$ , where  $z$  – is the total number of grain loading stations. The distances  $l_{ij}$  between each pair of stations  $s_i$  and  $s_j$  ( $s_i, s_j \in S$ ) can be represented by the distance matrix  $L$  [16]:

$$L = \begin{vmatrix} 0 & l_{12} \dots & l_{1j} \dots & l_{1z} \\ l_{21} & 0 \dots & l_{2j} \dots & l_{2z} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_{i1} & l_{i2} & l_{ij} \dots & l_{iz} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_{z1} & l_{z2} \dots & l_{zj} \dots & 0 \end{vmatrix}$$

Each element of the set  $S$  (station) is characterized by a number of parameters and can be represented by the structure:

$$s_i = \{I, N, c, q, p, T, K\}, \quad (1)$$

where  $I$  – station identifier (ECP code) [16];  $N$  – station name [16];  $c$  – station class;  $q$  – average annual volume of grain loading, wag.;  $p$  – capacity of the elevator facility for one-time storage of grain, ths. tons;  $T$  – vector characterizing the distance from the station to the main seaports;  $K$  – vector characterizing the volume of additional capital investments for the development of the station infrastructure when loading grain unit trains.

Each element of the vector  $T$  is the number of the tariff zone corresponding to the distance from the given station  $s_i$  ( $s_i \in S$ ) to one of the seaports where grain is transshipped for export [7]:

$$T_i = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$$

Each element of the vector  $K$  corresponds to a certain amount of additional capital investments

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

that are required for the development of the station (elevator and railway) infrastructure with the weekly loading of 1, 2 and 3 unit trains, respectively:

$$K_i = \{k_1, k_2, k_3\}.$$

Average annual volumes of grain loading  $q_i$  for each station are determined on the basis of statistical processing of the data obtained from UFACS-UZ-E (Unified Freight Automated Control System of UZ). Data on the class of each station and the capacity of its elevator facility can be obtained from TIS of the stations using AWS TIS.

On the basis of the indicated initial data it is necessary:

- from the set  $S$  to select a subset  $S^*$  ( $S^* \subset S$ ) of the junctions  $s_u^*$  ( $s_u^* \in S^*$ ,  $u=1, 2, \dots, m$ ), where grain loading of unit trains will be carried out;
- for each junction  $s_u^*$  (type U) to determine the loading concentration area  $R_u$  ( $u=1, 2, \dots, m$ ), i.e. a set of stations  $s_v \in S$  (type V), from which the delivery of grain by road to the junction  $s_u^*$  will be organized:

$$R_u = \{I_r, Q_r, s^*, s_1, s_2, \dots, s_v, \dots, s_f\}, \quad s_v \in S,$$

where  $I_r$  – identifier of the concentration area;  $Q_r$  – total annual grain loading at all stations of the area, wag.

When forming loading concentration areas, it is necessary to observe the following conditions:

- the distance from U-station  $s_u^*$  of the area  $R_u$  to any V-station of the area  $s_v$  ( $s_v \in R_u$ ) must not exceed the maximum specified value  $l_{\max}$  (when solving this task it is assumed that  $l_{\max}=30$  km):

$$(\forall s_v \in R_u)(\forall s_u^* \in R_u)(l_{uv} \leq l_{\max}), \\ v=1, 2, \dots, f_u, \quad u=1, 2, \dots, m$$

- the total annual volume of the grain shipped at the concentration area stations  $R_u$  must be not less than the minimum specified value  $Q_{\min}$  (when solving this task, it is assumed that  $Q_{\min}=3000$  wag/year, which ensures the shipment of at least 1 unit train with grain per week):

$$(\forall R_u)(Q_r \geq Q_{\min}), \quad u=1, 2, \dots, m \quad (2)$$

And, finally, the solution of the task of selecting junctions and areas of grain loading concentra-

tion should ensure minimum total costs associated with the routing of grain transportation for export to ports. In aggregate, these costs can be represented as

$$\sum_{u=1}^m E_u^{\text{road}} + \sum_{u=1}^m E_u^{\text{st}} + \sum_{u=1}^m E_u^{\text{utr}} + \\ + \sum_{u=1}^m E_u^{\text{cl}} + \sum_{u=1}^m E_u^{\text{inf}} \rightarrow \min \quad (3)$$

where  $E_u^{\text{road}}$  – additional costs for transportation of grain to the junction of the area  $R_u$  by road, mln. UAH;  $E_u^{\text{st}}$  – additional costs for grain storage at the junction of the area  $R_u$  for making up a unit train, mln. UAH;  $E_u^{\text{utr}}$  – costs for transportation of grain to ports by unit trains from a junction of the area  $R_u$ , mln. UAH;  $E_u^{\text{cl}}$  – costs for carload transportation of grain to ports from the stations of the area  $R_u$ , mln. UAH;  $E_u^{\text{inf}}$  – additional reduced costs associated with the development of elevator and rail infrastructure of the junction of the area  $R_u$ , mln. UAH.

The article describes the developed methodology for solving this problem, which is based on the methods of cluster analysis, set theory and multi-criteria optimization.

## Findings

*Determination of junctions for loading of unit trains based on the cluster analysis.* The solution of this problem involves the separation of the initial set of grain loading stations  $S$  into two subsets –  $S^*$ , which includes junctions of possible loading concentration (U-stations), and  $S'$ , which includes stations where the loading of grain routes is impractical. Considering the significant number of grain loading stations (more than 600), cluster analysis methods can be used effectively to obtain these subsets [6, 13].

Cluster analysis is a method of grouping (classifying) multidimensional objects, based on the representation of the results of individual observations by points of a suitable geometric space with the subsequent allocation of clusters of these points. The task of cluster analysis methods is to select such homogeneous spaces in the original multidimensional data that the objects within the

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

cluster are “similar” in a certain sense to each other, and objects from different clusters are “not similar”.

To select the set of junctions  $S^*$ , an agglomerate algorithm of direct classification was used [6]. In agglomeration algorithms, unlike divisive algorithms, each classifiable object in the beginning is a separate cluster. At each step of the algorithm, the two closest clusters are combined. This happens until the number of clusters reaches the certain, in most cases, the predetermined value (in our case, two clusters). It is advisable to use divisive algorithms when the initial population must be divided into a sufficiently large number of clusters (more than 10) [13], which does not correspond to the conditions of the problem of grain loading station classification.

An important factor in the effectiveness of cluster analysis is the choice of parameters by which the classification of objects (in this case, railway stations) is performed. As noted in [6], with the increase in the number of indicators used to classify objects, its quality is reduced. In this connection, from the set of parameters characterizing the freight station (2), based on the methods of dispersion analysis and Sheffe multiple comparisons [1], and taking into account the expert estimates, the following informative parameters were singled out: station class –  $c$ , annual volume of grain loading –  $q$ , available capacity of elevator infrastructure –  $p$ , additional costs for the development of elevator and railway infrastructure to ensure the loading of grain unit trains –  $k_1, k_2, k_3$ . It should be noted that obtaining of specific values of the vector  $k_1, k_2, k_3$  in monetary terms for each station is a very laborious task. In this connection, the authors used parameterized dimensionless values  $k_1, k_2, k_3$  in the range  $[0; 1]$ ; while  $k_j=0$  means that additional funds are not required for the station infrastructure development to form  $j$  of grain unit trains per week, and  $k_j=1$  – formation of  $j$  of grain unit trains per week at a given station is impractical due to the need for significant investments in infrastructure, in the rest of the cases –  $0 < k_j < 1$ . The specific values of the parameters  $k_1, k_2, k_3$  for each station are determined expertly on the basis of the analysis of its infrastructure.

Since the information parameters of the stations selected for classification are measured in different

units and have different ranges of values, we carried out their standardization. For this purpose, the effectiveness of several methods for standardizing data considered in [3, 13, 19] was researched. Herewith, the “reference” classification was performed expertly, during which a set of 35 grain loading stations were divided into two clusters:  $U$ -stations and  $V$ -stations. The effectiveness of each of the standardization methods was evaluated according to two criteria: probability of erroneous classification –  $P_{er}$  (as compared to a “reference”) and value of the total intragroup dispersion –  $D_{gr}$ . The studies performed on a computer with the help of the “Statistica” package showed that the best results ( $P_{er}=4-7\%$ ) were obtained with the standardization of data by maximum and by range, the worst results were obtained with standardization by dispersion.

During classification, an important role is also played by the choice of the distance between the individual objects. The distance between the two objects  $a$  and  $b$  is the value of the distance  $d_{ab}$ , which is the greater, the less similar are the objects  $a$  and  $b$ . When choosing the method of classification to obtain the training sample, we compared 6 distances in order to determine the most suitable for the solution of the problem posed [6, 13, 19]: the Euclidean distance, the Manhattan distance, the Brey-Curtis distance, the Chebyshev distance, the Canberra distance, the power distance.

To select the most effective distance with the help of the “Statistica” package, their comparative analysis was performed while classifying the “reference” set of stations. The effectiveness of each distance was also assessed by the indicators  $P_{er}$  and  $D_{gr}$ . The study of the distance effectiveness showed that the best quality of the classification of grain loading stations was obtained using the “Canberra” distance ( $P_{er}=3-5\%$ ). The worst results were obtained using the Chebyshev distance ( $P_{er}=30-35\%$ ).

At each step of the agglomeration algorithm of the cluster analysis, two clusters are combined, the distance between which is minimal. This raises the problem of determining the distances between individual clusters. The method of calculating this distance is determined by the adopted cluster strategy. When determining the most effective classification algorithm, we studied seven cluster methods

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

[3, 6, 19]: “nearest neighbor”, “furthest neighbor”, “group mean”, “centroid”, “quadratic”, “flexible”, Ward's method. The comparative analysis of the application of these methods for the classification of the “reference” set of grain loading stations, performed with the help of the “Statistica” package, showed that the closest results to the “reference” classification were obtained using the “flexible” unification method and Ward's method ( $P_{er} = 5–7\%$ ). The worst results were obtained using the methods of “nearest” and “furthest” neighbor ( $P_{er} = 25–35\%$ ).

Thus, using the agglomeration cluster analysis method based on the “flexible” unification method and the “Canberra” distance between objects, the initial set of grain loading stations  $S$  was divided into two subsets –  $S^*$ , which includes the junctions of possible loading concentration ( $U$ - Station) – 43 stations in total, and  $S'$ , which includes the stations where the loading of grain unit trains is not relevant – 587 stations in total.

*Determination of areas of possible grain load-*

*ing concentration.* Based on the found subset of junction stations  $S^*$  the areas of possible grain loading concentration  $R_u$  (5) are formed, according to the territorial proximity of  $V$ -stations to the junction  $U$ -station (6). For each junction station  $s_u^*$  at the first step of the formation procedure of the corresponding area  $R_u$  (5):  $Q_r = q_u, f = 0, (Q_r \in R_u, f \in R_u, q_u \in s_u^*)$ . Next, the  $i$ -th row of the distance matrix  $L$  (1) corresponding to the station  $s_u^*$  is analyzed and those stations  $s_j \in S$  ( $j=1, 2, \dots, z$ ), for which the condition  $l_{ij} \leq l_{\max}$  (6) is true, are included in the set  $R_u$ . At the same time for the area  $R_u$  the following parameters are recalculated:

$$Q_r = Q_r + q_j, f = f + 1, (q_j \in s_j).$$

With the help of this procedure, the set  $R = \{R_1, R_2, \dots, R_u, \dots, R_m\}$  was formed, which includes 43 areas ( $m=43$ ) of the possible grain loading concentration (Table 1).

Table 1

Areas of possible grain loading concentration

No.	Region	Junction station $s_u^*$	Total loading, wag / year	Loading at station $s_u^*$ , wag / year	Stations of loading concentration area $R_u$
1	2	3	4	5	6
1	Chernihiv	Linovitsyi	9831	2288	Priluki, Piryatin
2	Cherkasy	Drabovo-Baryat.	8897	2905	Palmira, Maryanovka, Grebenka
3	Chernihiv	Priluki	8496	5675	Linovitsyi, Galka
4	Poltava	Grebenka	8325	365	Drabovo-Baryatinskaya, Maryanovka, Piryatin, Lazorki
5	Poltava	Yuskovtsyi	8175	1077	Sula, Belovodyi, Andreyashevka, Lokhvitsa
6	Cherkasy	Uman	8148	1151	Hristinovka, Potash
7	Cherkasy	Palmira	8119	3089	Drabovo-Baryatinskaya, Zolotonosha-1
8	Poltava	Romodan	7895	3110	Mirgorod, Horol, Sencha
9	Poltava	Piryatin	7708	1868	Maryanovka, Linovitsy, Lazorki, Grebenka



## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Continuation of table 1

10	Cherkasy	Maryanovka	7676	2538	Drabovo-Baryatinskaya, Piryatin, Grebenka
11	Cherkasy	Nosovka	7353	2426	Nezhin, Bobrovitsyi
12	Sumy	Toropilovka	7121	5016	Sumy, Syrovatka, Basyi, Golovashevka
13	Sumy	Sumy	7121	1047	Toropilovka, Syrovatka, Basyi, Golovashevka
14	Sumy	Syrovatka	7010	590	Basyi, Toropilovka, Sumy, Boromlya
15	Cherkasy	Hristinovka	6876	5134	Uman, Monastyrishche
16	Poltava	Mirgorod	6813	3273	Romodan, Gogolevo, Melashenkovo
17	Poltava	Sula	6744	4417	Yuskovtsyi, Andreyashevka Lohvitsa, Sencha
18	Kirovohrad	Aleksandriya	5875	732	Koristovka, Korolevka, Pantaevka, Schastlivaya
19	Cherkasy	Monastyrishche	5725	591	Hristinovka
20	Kirovohrad	Korolevka	5632	708	Schastlivaya, Koristovka, Aleksandriya
21	Sumy	Belovodyi	5495	1835	Romnyi, Yuskovtsyi, Andreyashevka
22	Cherkasy	Zolotonosha 1	5214	2125	Zolotonosha 1, Palmira
23	Poltava	Horol	4768	1108	Romodan, Veselyiy Podol, Petrovka
24	Sumy	Romnyi	4418	2154	Belovodyi, Andreyashevka
25	Kirovohrad	Novoukrainka	4221	1537	Pomoshnaya, Kapustino, Pletenyiy Tashlyik
26	Kiev	Ustinovka	4106	866	Fastov-1, Belaya Tserkov
27	Poltava	Seleshchina	4105	1683	Karlovka, Bozhkov
28	Poltava	Karlovka	4020	2251	Seleshchina, Lannaya
29	Kiev	Yagotin	3911	3911	–
30	Cherkasy	Gorodishche	3823	418	Korsun, Signaevka, Tsvetkovo
31	Kirovohrad	Koristovka	3758	2075	Aleksandriya, Korolevka, Pantaevka
32	Vinnitsia	Kryzhopol	3640	1197	Vapnyarka, Knyazhevo, Popelyuhi
33	Lugansk	Starobelsk	3570	3570	–

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

End of the table 1

34	Kirovohrad	Pomoshnaya	3498	1563	Novoukrainka, Lyudmilovka
35	Poltava	Reshetilovka	3494	3064	Fedunka, Sagaydak, Brateshki, Umantseva
36	Vinnytsia	Vapnyarka	3423	1494	Knyazhevo, Kryizhopol
37	Vinnytsia	Knyazhevo	3423	732	Vapnyarka, Kryizhopol
38	Khmelnitsky	Kamenets-Podol.	3248	3248	—
39	Kharkiv	Savintsy	3163	1955	Zakomelskaya, Balakleya
40	Kharkiv	Zakomel'skaya	3149	824	Savintsyi, Izyum
41	Poltava	Globino	3108	2237	Veselyiy Podol, Rublevka
42	Cherkasy	Kamenka	2948	880	Im. Tarasa Shevchenko, Fundukleevka
43	Kirovohrad	Kapitanovka	2833	350	Signaevka, Novomirgorod, Serdyukovka

In total  $m=43$  areas included  $n=82$  stations: 43 junction ( $U$ -stations) and 39 non-junction ( $V$ -stations). The condition (6) is not fulfilled for the remaining non-junction stations, i.e. they are located from the nearest junction station at a distance greater than  $l_{\max}$ .

For each formed concentration area  $R_u$  ( $R_u \subset R$ ) the condition (7) is checked i.e. the sufficiency of the total annual volume of grain loading at the stations of the area for sending of at least one grain unit train per week from the corresponding junction station  $s_u^*$ . If the condition (7) is not fulfilled, then this area is excluded from further calculations. As can be seen from Table 1, the total volumes of annual grain loading in concentration areas on the basis of Kamenka and Kapitanovka stations are less than  $Q_{\min}=3000$  wag/year; therefore, the areas  $R_{42}$  and  $R_{43}$  are excluded. Thus, in the list of  $m=41$  area there are  $n=76$  stations (41 junction  $U$ -station and 35 non-junction  $V$ -stations). It should also be noted that some areas include only junction stations:  $R_{29}$  (Yagotin),  $R_{33}$  (Starobelsk) and  $R_{38}$  (Kamenets-Podolskiy), own grain loading at which exceeds  $Q_{\min}$ .

*Selection of effective areas of grain loading concentration.* Analysis of Table 1 shows that the majority of the obtained sets  $R_u$  ( $u=1, 2, \dots, 41$ ) are overlapping, i.e. one or several elements (stations) of one set (area) are simultaneously elements of

other sets (areas). For example, Lazorka non-junction station belongs to the areas  $R_4$  (Grebenska) and  $R_9$  (Piryatin), while Linovitsyi junction, in addition to the  $R_1$  area, is also part of the areas  $R_3$  (Priluki) and  $R_9$  (Piryatin). At the same time, there are several disjoint sets, the elements of which are part of only one set, for example,  $R_{11}$  (Nosovka),  $R_{29}$  (Yagotin).

Thus, in the resulting set  $R$  it is necessary to select the subset  $R^*$ , all of  $m^*$  elements of which (loading concentration areas  $R_u$ ,  $u=1, 2, \dots, m^*$ ) are mutually disjoint sets. Herewith, the total volume of grain loading in the final subset  $R^*$  must be the maximum, and the total amount of costs associated with the concentration of grain loading and the making up of grain unit trains must be minimal (3), i.e.:

$$\begin{cases} Q(R^*) \rightarrow \max \\ E(R^*) \rightarrow \min \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \sum_{i=1}^{m^*} Q_{r(i)} \rightarrow \max \\ \sum_{i=1}^{m^*} E_i \rightarrow \min \end{cases} \quad (4)$$

The required subset  $R^* \subset R$  is the union of disjoint sets  $R_u^*$  ( $u=1, 2, \dots, m^*$ ), for which the objective function (4) reaches an extremum.

To solve this problem, the following procedure was developed. Initially, disjoint and overlapping

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

subsets  $R_u$  ( $u=1, 2, \dots, m$ ) are distinguished in the original set  $R$  (Table 1). For this purpose, one of the DSU (disjoint set union) algorithms can be used [2, 12]. The result of this algorithm is the matrix  $G = |g_{uv}|$  ( $u=1, 2, \dots, m$ ;  $v=1, 2, \dots, m$ ), where each row  $u$  and column  $v$  correspond to a certain set (concentration area)  $R_u$  and  $R_v$ , respectively (Table 1), and each element of the matrix  $g_{uv}$  is a list of stations  $s_i$  ( $s_i \in S$ ), which are simultaneously included in the areas (sets) of  $R_u$  and  $R_v$ . In case if  $g_{uv} = \{\emptyset\}$ , the sets  $R_u$  and  $R_v$  are disjoint and are included in the resulting subset  $R^* \subset R$ . If  $g_{uv} \neq \{\emptyset\}$ , then the sets  $R_u$  and  $R_v$  are overlapping; herewith the following options are possible:

- common elements of the sets  $R_u$  and  $R_v$  are only junction  $U$ -stations (for example, areas of concentration  $R_{32}$  – Kryzhopol,  $R_{36}$  – Vapnyarka,  $R_{37}$  – Knyazhevo);

- common elements of the sets  $R_u$  and  $R_v$  are only non-junction  $V$ -stations (for example, Andreashevka station for the areas  $R_{17}$  – Sula and  $R_{24}$  – Romnyi);

- common elements of the sets  $R_u$  and  $R_v$  are both junction and non-junction stations (for example, the areas  $R_{12}$  – Toropilovka and  $R_{24}$  – Sumy).

It is necessary to redistribute common elements for all pairs of overlapping sets  $R_u$  and on their basis to form such sets  $R_u^*$ , that the objective function (4) reaches an extremum. The above problem (4) can be solved by methods of the optimal set partitioning theory [8]; however, these methods are rather laborious and require a considerable amount of computation. The specificity of this problem allows us to obtain a solution by more simple methods.

We transform the matrix  $G$  into the matrix  $X = |x_{ut}|$  ( $u=1, 2, \dots, m$ ;  $t=1, 2, \dots, n$ ), in which each row  $u$  corresponds to a certain set (area)  $R_u$  (Table 1), and each column  $t$  – to a definite  $U$ -station or  $V$ -station. Each element of the matrix is the Boolean variable  $x_{ut} = \{0; 1\}$ , which takes the values  $x_{ut} = 1$ , if the station  $s_t$  can be included in the concentration area  $R_u$  ( $s_t \in R_u$ ), and  $x_{ut} = 0$  otherwise ( $s_t \notin R_u$ ). Each station  $s_t$  corresponds to a certain value of the average annual amount of grain loading  $q_t$  (1), as well as a certain parameter  $e_{ut}$ , which characterizes the value of additional costs when the station  $s_t$  is included in the loading concentration area  $R_u$ . The objective function

(4) in this case takes the following form:

$$\begin{cases} \sum_{u=1}^m \sum_{t=1}^n q_t x_{ut} \rightarrow \max \\ \sum_{u=1}^m \sum_{t=1}^n e_{ut} x_{ut} \rightarrow \min \end{cases} \Rightarrow \left( \begin{cases} \sum_{u=1}^m \sum_{t=1}^n q_t x_{ut} \\ - \sum_{u=1}^m \sum_{t=1}^n e_{ut} x_{ut} \end{cases} \right) \rightarrow \max \quad (5)$$

It should be noted that determining the values of the parameter  $e_{ut}$  for each grain loading station directly in monetary terms is a very complex and time-consuming task. In this connection we accepted the parameterized scale of values  $e_{ut} \{1; 10\}$ , when  $e_{ut} = 1$  corresponds to the minimum level of additional costs when including station  $s_t$  into the concentration area  $R_u^*$ , and  $e_{ut} = 10$  – to the maximum. The specific values of  $e_{ut}$  for each station at the stage of preliminary calculations are determined expertly.

Let us state the constraints of the problem:

$$(\forall s_t) \left( \sum_{u=1}^m x_{ut} \leq 1 \right), t = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$(\forall R_u^*) \left( \sum_{t=1}^n q_t x_{ut} \geq Q_{\min} \vee \sum_{t=1}^n q_t x_{ut} = 0 \right), u = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

$$(\forall s_t \notin R_u) (x_{ut} = 0), u = 1, 2, \dots, m; t = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

The constraint (6) means that each station  $s_t$  can be included in not more than one concentration area  $R_u^*$ , but it can be included in no area. The constraint (7) determines that the total volume of loading for each concentration area  $R_u^*$  must not be less than  $Q_{\min}$  (2), otherwise this region is excluded, and the stations included in it are redistributed among other areas. The constraint (8) excludes the possibility of adding the station  $s_t$  to the area  $R_u^*$ , if this is not provided in the original set  $R$  (see Table 1).

The problem (5)-(8) in the above formulation is a multi-criteria (vector) optimization problem [18]; herewith, the peculiarities of the problem make it possible to assign it to problems of integer-linear programming with Boolean variables [11], for the solution of which it is expedient to transfer to a one-criterion optimization problem. For this purpose, we used the method of linear convolution with the standardization of criteria [5]; the objec-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

tive function (11) in this case takes the following form:

$$(w_q \sum_{u=1}^m \sum_{t=1}^n q_t^0 x_{ut} - w_e \sum_{u=1}^m \sum_{t=1}^n e_{ut}^0 x_{ut}) \rightarrow \max ,$$

where  $q_t^0, e_{ut}^0$  – normalized values of the parameters of grain loading stations;  $w_q, w_e$  – weight coefficients of the optimization criteria, the specific

values of which (in the range [0; 1]) are determined expertly

The resulting problem was solved with the help of the simplex method, modified for problems with Boolean variables [11]. As a result, the subset  $R^*$ , was formed, which is a union of disjoint sets  $R_u^*$ ; each such set  $R_u^*$  corresponds to a certain area, where the grain loading concentration is the most effective (Table 2).

Table 2

Effective areas of grain loading concentration

No.	Multiple junction $s_u^*$	Stations of loading concentration area $R_u^*$	Total loading, wag/year
1	Drabovo-Baryatinskaya	Maryanovka, Grebenka	5808
2	Priluki	Galka	6208
3	Uman	Potash	3014
4	Romodan	Horol, Sencha	4622
5	Piryatin	Linovitsyi, Lazorki	4805
6	Nosovka	Nezhin, Bobrovitsyi	7353
7	Toropilovka	Sumy, Syirovatka, Basyi, Golovashevka	7121
8	Hristinovka	Monastyirische	5725
9	Mirgorod	Gogolevo, Melashenkovo	3703
10	Sula	Yuskovtsyi, Lohvitsa	5911
11	Aleksandriya	Koristovka, Korolevka, Pantaevka, Schastlivaya	5875
12	Zolotonosha 1	Zolotonosha-1, Palmira	5214
13	Romnyi	Belovodyi, Andreyashevka	4418
14	Ustinovka	Fastov-1, Belaya Tserkov	4106
15	Karlovska	Seleschina, Lannaya	4020
16	Yagotin	–	3911
17	Gorodishche	Korsun, Signaevka, Tsvetkovo	3823
18	Kryzhopol	Vapnyarka, Knyazhevo, Popelyuhi	3640
19	Starobelsk	–	3570
20	Pomoshnaya	Novoukrainka, Lyudmilovka	3498
21	Reshetilovka	Fedunka, Sagaydak, Brateshki, Umantsevka	3494
22	Kamenets-Podolskiy	–	3248
23	Zakomel'skaya	Savintsyi, Izyum	3149
24	Globino	Veselyiy Podol, Rublevka	3108

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

In the final solution, 70 stations are included in 24 grain loading concentration areas, which, with minimal additional costs, provides the maximum total volume of grain loading by unit trains with 109344 wag. per year.

### Originality and practical value

The originality of the work lies in the fact that the authors, based on the modern mathematical apparatus of cluster analysis, set theory and multi-criteria optimization, developed the methodology for the formation of grain loading concentration areas on the Ukrainian railways network that takes into account both infrastructure-technological and economic factors.

Application of the developed method of grain loading concentration for the formation of unit trains will significantly reduce the logistics costs in the supply chain of grain to Ukrainian ports for export and, consequently, increase its competitiveness in foreign markets.

### Conclusions

The performed researches allow drawing the following conclusions.

1. Ukraine is one of the world's largest grain exporters. At the same time, one of the main problems in the export of Ukrainian grain is a high

share of logistics costs, which reaches 35% of the final cost of production.

2. More than 95% of the grain is exported through the seaports of Ukraine, whereto the delivery is carried out mainly by rail transport by carload. One of the ways to reduce costs in the logistics chain of grain delivery to ports is the routing of rail traffic. The experience of the USA and Canada shows that the introduction of grain unit trains allows reducing the share of logistics costs up to 9%.

3. To organize the shipper routing of grain transportation by rail it is necessary to form a network of terminal elevators for grain loading concentration. Delivery of grain from linear to terminal elevators can be carried out by road.

4. The selection of junction stations and grain loading concentration areas is a complex task, which is proposed to be solved on the basis of cluster analysis, set theory and multi-criteria optimization.

5. Using the developed methodology, there are selected 24 areas of possible grain loading concentration on the Ukrainian rail network, which cover 70 stations and, with a minimum additional cost, provide for about 110,000 ths. wag. per year of unit trains (more than 7 million tons of grain).

### LIST OF REFERENCE LINKS

1. Алгоритмы: построение и анализ / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест, К. Штайн. – Москва : ООО «И. Д. Вильямс», 2013. – 1328 с.
2. Андерсон, Т. В. Введение в многомерный статистический анализ / Т. В. Андерсон. – Москва : Физматгиз, 1963. – 360 с.
3. Ахо, А. Построение и анализ вычислительных алгоритмов / А. Ахо, Дж. Хопкрофт, Дж. Ульман. – Москва : Мир, 1979. – 536 с.
4. Вернигора, Р. В. Оценка уровня профессиональной подготовки дежурных по станции с использованием компьютерных тренажеров / Р. В. Вернигора, В. В. Малашкин // Транспортні системи і технології перевезень : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2015. – Вип. 10. – С. 29–37.
5. Дюрбан, Б. Кластерный анализ / Б. Дюрбан, П. Оделл. – Москва : Книга по требованию, 2012. – 128 с.
6. Енергетичний баланс України за 2015 рік [Electronic resource] / Державна служба статистики України. – Available at: [http://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2016/ener/en\\_bal/Bal\\_2015\\_u.zip](http://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2016/ener/en_bal/Bal_2015_u.zip). – Title from the screen. – Accessed : 03.03.2017.
7. Зак, Ю. А. Прикладные задачи многокритериальной оптимизации / Ю. А. Зак. – Москва : Экономика, 2014. – 455 с.
8. Збірник тарифів на перевезення вантажів залізничним транспортом у межах України та пов'язані з ними послуги. – Київ : ТОВ «Інпрес», 2009. – 200 с.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

9. Киселева, Е. М. Модели и методы решения непрерывных задач оптимального разбиения множеств: линейные, нелинейные, динамические задачи : монография / Е. М. Киселева, Л. С. Коряшкина. – Киев : Наук. думка, 2013. – 607 с.
10. Козаченко, Д. М. Удосконалення технічного забезпечення та технологій експортних перевезень зернових вантажів в Україні / Д. М. Козаченко, Р. Г. Коробйова, Р. Ш. Рустамов // Вісн. Дніпропетр. держ. аграрно-економ. ун-ту. – 2015. – № 4. – С. 121–127.
11. Колодійчук, В. А. Ефективність логістики зерна та продуктів його переробки : монографія / В. А. Колодійчук. – Львів : Укр. бестселер, 2015. – 574 с.
12. Корбут, А. А. Дискретное программирование / А. А. Корбут, Ю. Ю. Финкельштейн. – Москва : Наука, 1969. – 368 с.
13. Мандель, И. А. Кластерный анализ / И. А. Мандель. – Москва : Финансы и статистика, 1988. – 215 с.
14. Обзор рынка зерновых [Electronic resource]. – Available at: <http://www.igc.int/downloads/gmrsummary/gmrsummr.pdf>. – Title from the screen. – Accessed : 03.03.2017.
15. Рустамов, Р. Ш. Оценка перспектив развития зерновой логистики в Украине / Р. Ш. Рустамов // Транспортні системи і технології перевезень : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2014. – Вип. 8. – С. 127–133.
16. Тарифное руководство № 4 железных дорог Украины. – Киев : Логос, 2001. – 403 с.
17. Укрзалізниця оцінює дефіцит зерновозов в 500–1000 вагонів щоденно [Electronic resource]. – Available at: [http://cfts.org.ua/news/2016/10/06/ukrzaliznytsya\\_otsenivaet\\_defitsit\\_zernovozov\\_v\\_500\\_1000\\_vagonov\\_ezhesutochno\\_36864](http://cfts.org.ua/news/2016/10/06/ukrzaliznytsya_otsenivaet_defitsit_zernovozov_v_500_1000_vagonov_ezhesutochno_36864). – Title from the screen. – Accessed : 03.03.2017.
18. Штойер, Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения / Р. Штойер. – Москва : Радио и связь, 1992. – 504 с.
19. Энслейн, К. Статические методы для ЭВМ / К. Энслейн. – Москва : Наука, 1986. – 464 с.
20. Hauser, R. J. Implicit Values of Multiple Car Grain Loading Facilities in Iowa and Nebraska / R. J. Hauser, J. Beaulieu, C. P. Baumel // North Central J. of Agricultural Economics. – 1984. – Vol. 6. – Iss. 2. – P. 80–90. doi: 10.2307/1349253.
21. Hyland, M. Analytical models of rail transportation service in the grain supply chain: Deconstructing the operational and economic advantages of shuttle train service / M. Hyland, H. Mahmassani, L. Mjahed // Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review. – 2016. – Vol. 93. – P. 294–315. doi: 10.1016/j.tre.2016.06.008.
22. Ndembe, E. Hard Red Spring Wheat Marketing: Effects of Increased Shuttle Train Movements on Railroad Pricing in the Northern Plains / E. Ndembe // J. of the Transportation Research Forum. – 2015. – Vol. 54, No. 2. – P. 101–115.
23. Nightengale, E. A. Some Effects of Recent Changes in the Railway Grain-Rate Structure on Interregional Competition and Regional Development / E. A. Nightengale, J. Davidson, H. Ottoson // Transportation Problems and Policies in the Trans-Missouri West. – Lincoln : University of Nebraska Press, 1967. – P. 77–102.
24. Railroad Revitalization and Regulatory Reform Act of 1976 [Electronic resource] : Public Law 94-210, § 801. – Available at: <http://www.legisworks.org/GPO/STATUTE-90-Pg31.pdf>. – Title from the screen. – Accessed : 03.03.2017.
25. Sarmiento, C. Spatial Modeling in Technology Adoption Decisions: The Case of Shuttle Train Elevators / C. Sarmiento, W. Wilson // American J. of Agricultural Economics. – 2005. – Vol. 87. – Iss. 4. – P. 1034–1045. doi: 10.1111/j.1467-8276.2005.00786.x.
26. Schnake, L. D. Inland grain elevator operating costs and capital requirements [Electronic resource] / L. D. Schnake, C. Jr. Stevens // Kansas Agricultural Experiment Station. – 1983. – Bulletin 644. – P. 1–32. – Available at: <https://www.ksre.k-state.edu/historicpublications/pubs/SB644.pdf>. – Title from the screen. – Accessed : 03.03.2017.
27. Sparger, A. A comprehensive rail rate index for grain [Electronic resource] / A. Sparger, M. Prater. – Available at: <http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/147348/2/Rail%20Rate%20Index.pdf>. – Title from the screen. – Accessed : 03.03.2017.
28. Staggers Rail Act of 1980 [Electronic resource] : Public Law 96-448. – Available at: <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/STATUTE-94/pdf/STATUTE-94-Pg1895.pdf>. – Title from the screen. – Accessed : 03.03.2017.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

29. Wilson, W. U.S. grain handling and transportation system: factors contributing to the dynamic changes in the 1980s and 1990s [Electronic resource] / W. Wilson ; Dept. of Agricultural Economics, Agricultural Experiment Station, North Dakota State University. – Fargo, North Dakota, 1998. – 27 p. – Available at: <http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/23081/1/ae98004.pdf>. – Title from the screen. – Accessed : 03.03.2017.

Д. М. КОЗАЧЕНКО<sup>1\*</sup>, Р. В. ВЕРНИГОРА<sup>2\*</sup>, Р. Ш. РУСТАМОВ<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](mailto:kozachenko@upr.dit.edu.ua), ORCID 0000-0003-2611-1350

<sup>2\*</sup>Каф. «Станції та вузли», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 12, ел. пошта [rv.vernigora@gmail.com](mailto:rv.vernigora@gmail.com), ORCID 0000-0001-7618-4617

<sup>3\*</sup>Регіональна філія «Одеська залізниця ПАТ «Укрзалізниця», вул. Пантелеймонівська, 19, Одеса, Україна, 65012, тел. +38 (048) 727 30 96, ел. пошта [rustamovrsh@gmail.com](mailto:rustamovrsh@gmail.com), ORCID 0000-0002-5860-1840

## СТВОРЕННЯ ЕКСПОРТНО-ОРІЄНТОВАНОЇ МЕРЕЖІ ЕЛЕВАТОРІВ В УКРАЇНІ

**Мета.** В науковій роботі необхідно дослідити питання підвищення ефективності експортних залізничних перевезень зернових вантажів в Україні за рахунок впровадження відправницької маршрутизації та концентрації навантаження зерна на вузлових елеваторах. **Методика.** Як свідчить досвід США й Канади, одним із ефективних напрямків зниження витрат у логістичному ланцюзі доставки зерна в порти є відправницька маршрутизація залізничних перевезень. Відправницька маршрутизація перевезень зернових вантажів передбачає концентрацію їх навантаження на вузлових станціях. Вибір вузлових станцій пропонується здійснювати з використанням методів кластерного аналізу. Для формування районів концентрації навантаження зерна використані методи теорії множин і багатокритеріальної оптимізації. **Результати.** На основі агломеративного алгоритму кластерного аналізу на мережі залізниць України виділені вузлові станції та сформовані райони можливої концентрації навантаження зерна. З використанням DSU-алгоритму виділені пересічні й непересічні райони концентрації. Задача вибору непересічних районів концентрації навантаження зерна формалізована як задача багатокритеріального цілочислового програмування з булевими змінними. У результаті розв'язання цієї задачі за допомогою модифікованого симплекс-методу на мережі залізниць України виділено 24 райони можливої концентрації навантаження зерна, які охоплюють 70 станцій та при мінімальних додаткових витратах забезпечують відправницьку маршрутизацію близько 7,5 млн т. зерна в рік. **Наукова новизна.** На основі сучасного математичного апарату авторами розроблена методика вибору вузлових станцій та районів концентрації навантаження зернових вантажів на мережі залізниць України з урахуванням економічної ефективності процесу. **Практична значимість.** Застосування розробленої методики концентрації навантаження зерна для формування відправницьких маршрутів дозволить суттєво знизити логістичні витрати в ланцюзі постачання українського зерна в морські порти на експорт і, відповідно, підвищити його конкурентоспроможність на зовнішніх ринках.

**Ключові слова:** експорт зерна; елеватори; залізничні перевезення; відправницька маршрутизація; концентрація навантаження

Д. Н. КОЗАЧЕНКО<sup>1\*</sup>, Р. В. ВЕРНИГОРА<sup>2\*</sup>, Р. Ш. РУСТАМОВ<sup>3\*</sup>

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

<sup>2\*</sup>Каф. «Станции и узлы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 12, эл. почта [rv.vernigora@gmail.com](mailto:rv.vernigora@gmail.com), ORCID 0000-0001-7618-4617

<sup>3\*</sup>Региональный филиал «Одесская железная дорога» ПАО «Укрзалізниця», ул. Пантелеймоновская, 19, Одесса, Украина, 65012, тел. +38 (048) 727 30 96, эл. почта [rustamovrsh@gmail.com](mailto:rustamovrsh@gmail.com), ORCID 0000-0002-5860-1840



## СОЗДАНИЕ ЭКСПОРТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ СЕТИ ЭЛЕВАТОРОВ В УКРАИНЕ

**Цель.** В научной работе необходимо рассмотреть вопрос повышения эффективности экспортных железнодорожных перевозок зерновых грузов в Украине за счет внедрения отправительской маршрутизации и концентрации погрузки зерна на узловых элеваторах. **Методика.** Как свидетельствует опыт США и Канады, одним из эффективных направлений снижения расходов в логистической цепи доставки зерна в порты является отправительская маршрутизация железнодорожных перевозок. Отправительская маршрутизация перевозок зерновых грузов предусматривает концентрацию их погрузки на узловых станциях. Выбор узловых станций предлагается осуществлять с использованием методов кластерного анализа. Для формирования районов концентрации погрузки зерна использованы методы теории множеств и многокритериальной оптимизации. **Результаты.** На основе агломеративного алгоритма кластерного анализа на сети железных дорог Украины выделены узловые станции и сформированы районы возможной концентрации погрузки зерна. С использованием DSU-алгоритма выделены пересекающиеся и непересекающиеся районы концентрации. Задача выбора непересекающихся районов концентрации погрузки зерна формализована как задача многокритериального целочисленного программирования с булевыми переменными. В результате решения этой задачи с помощью модифицированного симплекс-метода на сети железных дорог Украины выделено 24 района возможной концентрации погрузки зерна, которые охватывают 70 станций и при минимальных дополнительных расходах обеспечивают отправительскую маршрутизацию около 7,5 млн т. зерна в год. **Научная новизна.** На основе современного математического аппарата авторами разработана методика выбора узловых станций и районов концентрации погрузки зерновых грузов на сети железных дорог Украины с учетом экономической эффективности процесса. **Практическая значимость.** Применение разработанной методики концентрации погрузки зерна для формирования отправительских маршрутов позволит существенно снизить логистические расходы в цепи поставки украинского зерна в морские порты на экспорт и, соответственно, повысить его конкурентоспособность на внешних рынках.

**Ключевые слова:** экспорт зерна; элеваторы; железнодорожные перевозки; отправительская маршрутизация; концентрация погрузки

### REFERENCES

1. Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C. (2013). *Introduction to Algorithms* (3rd ed.). Moscow: I. D. Vilyams.
2. Anderson, T. V. (1963). *Vvedeniye v mnogomernyy statisticheskiy analiz*. Moscow: Fizmatgiz.
3. Aho, A. V., Hopcroft, J. E., & Ullman, J. D. (1979). *The design and analysis of computer algorithms*. Moscow: Mir.
4. Vernigora, R. V., & Malashkin, V. V. (2015). Assessment training level of railway dispatchers using computer simulators. *Transport Systems and Transportation Technologies*, 10, 29-37. doi: 10.15802/tstt2015/57063
5. Duran, B. S., & Odell, P. L. (2012). *Cluster Analysis*. Moscow: Kniga po trebovaniyu.
6. State Statistics Service of Ukraine. (2016). Energy balance of Ukraine for 2015 year. Retrieved from [http://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2016/energ/en\\_bal/Bal\\_2015\\_u.zip](http://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2016/energ/en_bal/Bal_2015_u.zip)
7. Zak, Y. A. (2014). *Prikladnyye zadachi mnogokriterialnoy optimizatsii*. Moscow: Ekonomika.
8. Ministry of Infrastructure of Ukraine. (2009). *Zbirnyk taryfiv na perevezennia vantazhiv zaliznychnym transportom u mezhakh Ukrainy ta poviazani z nymy posluhy*. Kyiv: TOV «Inpres».
9. Kiseleva, Y. M., & Koryashkina, L. S. (2013). *Modeli i metody resheniya nepreryvnykh zadach optimalnogo razbieniya mnozhestv: lineynyye, nelineynyye, dinamicheskiye zadachi*. Kyiv: Naukova dumka.
10. Kozachenko, D. M., Korobyova, R., & Rustamov, R. (2015). Improving of technical means and technologies of grain transportation for export in Ukraine. *Visnyk Dnipropetrovs'kogo derzhavnogo agrarno-ekonomichnogo universytetu*, 4, 121-127.
11. Kolodiichuk, V. A. (2015). *Efektivnist lohistyky zerna ta produktiv yoho pererobky*. Lviv: Ukrainskyi bestseller.
12. Korbut, A. A., & Finkelshteyn, Y. Y. (1969). *Diskretnoye programmirovaniye*. Moscow: Nauka.
13. Mandel, I. A. (1988). *Klasternyy analiz*. Moscow: Finansy i statistika.
14. International Grains Council. (2016 November, 24). *Obzor rynka zernovykh*. Retrieved from <http://www.igc.int/downloads/gmrsummary/gmrsummr.pdf>

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

15. Rustamov, R. (2014). The assessment of the prospects for the development of grain logistics in Ukraine. *Transport Systems and Transportation Technologies*, 8, 127-133. doi: 10.15802/tstt2014/38101
16. Ministry of Infrastructure of Ukraine. (2001). *Tarifnoye rukovodstvo №4 zheleznykh dorog Ukrainy*. Kyiv: Logos.
17. Centre for Transport Strategies. (2016 October, 06). *Ukrzaliznytsya otsenivayet defitsit zernovozov v 500-1000 vagonov ezhesutochno*. Retrieved from [http://cfts.org.ua/news/2016/10/06/ukrzaliznytsya\\_otsenivaet\\_defitsit\\_zernovozov\\_v\\_500\\_1000\\_vagonov\\_ezhesutochno\\_36864](http://cfts.org.ua/news/2016/10/06/ukrzaliznytsya_otsenivaet_defitsit_zernovozov_v_500_1000_vagonov_ezhesutochno_36864)
18. Shtoyer, R. (1992). *Mnogokriterialnaya optimizatsiya. Teoriya, vychisleniya i prilozheniya*. Moscow: Radio i svyaz.
19. Ensley, K. (1986). *Staticheskiye metody dlya EVM*. Moscow: Nauka.
20. Hauser, R. J., Beaulieu, J., & Baumel, C. P. (1984). Implicit Values of Multiple Car Grain Loading Facilities in Iowa and Nebraska. *North Central Journal of Agricultural Economics*, 6(2), 80-90. doi: 10.2307/1349253
21. Hyland, M., Mahmassani, H., & Mjahed L. (2016). Analytical models of rail transportation service in the grain supply chain: Deconstructing the operational and economic advantages of shuttle train service. *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*, 93, 294-315. doi: 10.1016/j.tre.2016.06.008
22. Ndembe, E. (2015). Hard Red Spring Wheat Marketing: Effects of Increased Shuttle Train Movements on Railroad Pricing in the Northern Plains. *Journal of the Transportation Research Forum*, 54(2), 101-115.
23. Nightengale, E. A., Davidson, J., & Ottoson, H. (1967). Some Effects of Recent Changes in the Railway Grain-Rate Structure on Interregional Competition and Regional Development. *Transportation Problems and Policies in the Trans-Missouri West*, 77-102.
24. Railroad Revitalization and Regulatory Reform Act, Public Law 94-210, § 801. (1976). Retrieved from <http://www.legisworks.org/GPO/STATUTE-90-Pg31.pdf>
25. Sarmiento, C., & Wilson, W. W. (2005). Spatial Modeling in Technology Adoption Decisions: The Case of Shuttle Train Elevators. *American Journal of Agricultural Economics*, 87(4), 1034-1045. doi: 10.1111/j.1467-8276.2005.00786.x
26. Schnake, L. D., & Stevens, C. A. (1983). Inland grain elevator operating costs and capital requirements. *Bulletin: Kansas Agricultural Experiment Station*, 644. Retrieved from <https://www.ksre.k-state.edu/historicpublications/pubs/SB644.pdf>
27. Sparger, A., & Prater M. E. (2013). A comprehensive rail rate index for grain. *U.S. Department of Agriculture*. doi: 10.9752/TS060.04-2013
28. Staggers Rail Act, Public Law 96-448. (1980). Retrieved from <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/STATUTE-94/pdf/STATUTE-94-Pg1895.pdf>
29. Wilson, W. W. (1998). *U.S. grain handling and transportation system: factors contributing to the dynamic changes in the 1980s and 1990s*. Fargo, North Dakota: Department of Agricultural Economics, Agricultural Experiment Station, North Dakota State University. Retrieved from <http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/23081/1/ae98004.pdf>

*Prof. V. I. Bobrovskiy, D. Sc. (Tech.), (Ukraine), Prof. O. M. Ogar, D. Sc. (Tech.), (Ukraine) recommended this article to be published*

Accessed: Dec. 15, 2016

Received: March 24, 2017

## УДК 656.224(73)

Р. Г. КОРОБЬЕВА<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Управление эксплуатационной работой», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 70, эл. почта rgkorobyova@rambler.ru, ORCID 0000-0002-6424-1079

ПРОБЛЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК НА  
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ США

**Цель.** В работе необходимо провести исследование организации работы железнодорожного транспорта США при выполнении пассажирских перевозок. **Методика.** Исследования выполнены на основании анализа литературных источников и отчетных данных о пассажирских перевозках в США. **Результаты.** Негативными тенденциями в работе пассажирского комплекса железных дорог Украины являются падение объемов перевозок, прогрессирующее старение подвижного состава и общая убыточность этого вида деятельности для Укрзализныци. В этой связи актуальной задачей для отечественного железнодорожного транспорта является проведение реформ отрасли. В связи с этим был изучен опыт организации пассажирских перевозок на железных дорогах США, особенностью которых является крайне высокая степень конкуренции между видами транспорта. В результате выполненного анализа условий работы железных дорог США и Украины установлены общие условия функционирования железных дорог обеих стран, связанных с обеспечением перевозки пассажиров. Установлено, что общими условиями выполнения железнодорожных пассажирских перевозок для США и Украины является дотационность этого вида деятельности и совместное использование инфраструктуры для перевозки грузов, и пассажиров. В этой связи, при разработке подходов к реформированию пассажирского хозяйства железных дорог Украины, целесообразным является использование опыта США по оценке общественной эффективности железнодорожного транспорта, влияния пассажирских перевозок на условия пропуска грузовых поездов, совместного использования железнодорожной инфраструктуры грузовыми и пассажирскими компаниями. **Научная новизна.** В работе автором установлены общие тенденции в развитии пассажирских железнодорожных перевозок в США и в Украине. **Практическая значимость.** Установленные в результате исследования методы организации работы пассажирского комплекса железнодорожного транспорта США могут быть адаптированы для решения проблем в развитии пассажирских перевозок на железных дорогах Украины.

*Ключевые слова:* железнодорожный транспорт; пассажирские перевозки; железнодорожная инфраструктура

## Введение

Железнодорожный транспорт является одним из основных перевозчиков пассажиров в Украине. Негативными тенденциями в работе пассажирского комплекса железных дорог Украины являются падение объемов перевозок, прогрессирующее старение подвижного состава и общая убыточность этого вида деятельности для Укрзализныци. В этой связи актуальной задачей для отечественного железнодорожного транспорта является проведение реформ отрасли. Необходимо отметить, что те же проблемы организации пассажирских перевозок, которые стоят в настоящее время перед железнодорожным транспортом Украины, возникали и на железнодорожном транспорте других стран. В частности показательным для Украины может быть опыт железных дорог США, особен-

ностью которых является крайне высокая степень конкуренции между видами транспорта.

Эксплуатационная длина сети железнодорожных дорог США составляет 225 тыс. км [27]. Доля двухпутных и многопутных линий составляет порядка 10 %. Преобладающим видом тяги является тепловозная, с помощью которой осуществляются перевозки на 99 % сети. В США развито тяжеловесное движение грузовых поездов. При этом средний вес грузового поезда брутто составляет 5,6 тыс. т. Железнодорожная инфраструктура в подавляющем большинстве случаев находится в частной собственности грузовых железных дорог. Грузовые железнодорожные перевозки являются важнейшей отраслью экономики страны. На долю железнодорожного транспорта в США приходится около 29 % национального грузооборота [27]. В целом, перевозку грузов в США

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

выполняют около 560 железнодорожных компаний. При этом они классифицируются на следующие классы: компании I класса, региональные компании, локальные операторы и S&T операторы. Основным объемом грузовых перевозок выполняют железные дороги I класса, на долю которых приходится 69 % грузооборота отрасли. К компаниям I класса относятся семь железных дорог: BNSF Railway Company, Canadian Pacific Railway, CN, CSX Transportation, Kansas City Southern Railway Company, Norfolk Southern Railway Company и Union Pacific Railroad.

Национальная железнодорожная пассажирская корпорация Amtrak обслуживает более 500 пунктов в 46 штатах США, округе Колумбия и трех провинциях Канады, общая протяженность её маршрутов составляет 34 тыс. км. Скорость поездов Amtrak достигает 241 км/час. В течение 2016 финансового года корпорацией было перевезено 31,3 млн. пассажиров [7]. Пассажирские перевозки в региональном и пригородном сообщении, кроме Amtrak, обеспечивают еще 18 железнодорожных операторов. Региональные и пригородные перевозки пассажиров, как и пассажирские перевозки дальнего следования, выполняются преимущественно на линиях компаний, занимающихся грузовыми перевозками. В целом на долю дальних и пригородных железнодорожных перевозок в США приходится около 0,3 % национального пассажирооборота [9].

Отличием в организации рынка железнодорожных перевозок Украины от США является то, что в Украине этот рынок находится в монопольном состоянии. Как грузовые, так и пассажирские перевозки на сети осуществляются государственной монополией – Укрзализныцей. По аналогии с США в Украине железнодорожный транспорт является одним из основных перевозчиков грузов, однако он играет гораздо более важную роль при перевозке пассажиров. На долю железнодорожного транспорта в 2016 году приходилось 57,9 % грузооборота [2] и 36,1 % пассажирооборота [5] всех видов транспорта. Грузовые перевозки являются прибыльными и доходы от них обеспечивают содержание инфраструктуры, в тоже время пассажирские перевозки являются убыточными. Необходимо отметить, что на законодательном уровне в Украине [6] предусмотрены механиз-

мы поддержки железнодорожных пассажирских перевозок как со стороны государственного, так и местных бюджетов. Однако за время независимости эти механизмы не использовались и, фактически, покрытие убытков от пассажирских перевозок осуществляется исключительно за счет прибыльных грузовых, что существенно снижает привлекательность железнодорожного транспорта для инвестиций.

### Цель

Целью работы является исследование организации работы железнодорожного транспорта США при выполнении пассажирских перевозок.

### Методика

Исследования выполнены на основании анализа литературных источников и отчетных данных о пассажирских перевозках в США.

### Результаты

Анализ истории железных дорог США [8] показывает, что изначально они представляли собой частные компании, которые перевозили как грузы, так и пассажиров. Пик пассажирооборота железнодорожного транспорта в США приходится на 20-е годы XX века. Наибольшее число перевезенных пассажиров железнодорожным транспортом США было достигнуто в 1944–1945 гг., когда, в связи с потребностями военной экономики, гражданский автомобильный транспорт был существенно ограничен в топливе и других материальных ресурсах. После 1945 г. происходило устойчивое снижение объема пассажирских перевозок, которые стали убыточными для частных железнодорожных компаний, как в дальнем, так и в пригородном сообщении. К этому привели две основные причины. Во-первых, в отличие от своих основных конкурентов – перевозчиков автомобильного и авиационного транспорта, которые пользовались общественной инфраструктурой и имели возможность привлечения средств из федерального и местных бюджетов для ее развития, железнодорожные перевозчики в США, выполняющие перевозки на собственной инфраструктуре, были ограничены в привлечении общественных средств. Более того, государственные инвестиции, вложенные

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

в развитие железнодорожной сети в конце XIX – начале XX веков, были возвращены железнодорожными компаниями в течение Второй мировой войны. Во-вторых, железные дороги сильно уступали развивающимся авиационному и автомобильному видам транспорта в скорости и мобильности перевозок, а также в гибкости сервиса. Для уменьшения финансовых потерь от убыточных пассажирских перевозок железнодорожные компании начали выделять подразделения, выполняющие пассажирские перевозки в отдельные предприятия, которые, впоследствии, прекращали свою деятельность. В ответ на быстрое падение объемов пассажирских перевозок в 1970 году был принят закон о железнодорожных пассажирских перевозках, которым была создана Национальная железнодорожная корпорация (Amtrak). Этим же законом было разрешено федеральному правительству использовать линии частных железнодорожных компаний для выполнения пассажирских перевозок. Обеспечение финансовой устойчивости Amtrak достигалось за счет государственных дотаций [17]. Многие компании, выполняющие региональные и пригородные перевозки, перешли в собственность местных администраций, которые субсидируют перевозки из своих бюджетов. Как правило, пригородные компании выполняют перевозки с использованием инфраструктуры грузовых железных дорог. Развитие современных городских рельсовых систем связано со специальным посланием Конгрессу Президента Кеннеди в 1962 г., касающегося поддержки развития городского общественного транспорта. Тяжелые рельсовые системы в городах, предназначенные для массовой перевозки пассажиров, получают электропитание от третьего рельса и функционируют на отдельной инфраструктуре. Легкие рельсовые системы функционируют как на выделенной, специально созданной инфраструктуре, так и на бывшей инфраструктуре железных дорог; кроме того, имеются линии, работающие в системе городского движения, а также линии, имеющие выход на железнодорожную сеть. Таким образом, в США в настоящее время различают следующие виды железнодорожных пассажирских перевозок [8]:

- городские перевозки (urban rail transit);
- пригородные перевозки (commuter rail);

– пассажирские железнодорожные перевозки (passenger rail).

В целом характерными особенностями пассажирских железнодорожных перевозок в США является их дотационность и использование пассажирскими компаниями для перевозок инфраструктуры грузовых компаний. Эти факторы и определяет основные направления научных исследований в данной сфере.

С дотационностью пассажирских перевозок связаны исследования, направленные на:

- обоснование поддержки железнодорожного транспорта со стороны федерального и местных бюджетов;

- обоснование целесообразности развития железнодорожного транспорта.

Совместное использование железнодорожной инфраструктуры различными компаниями вызвало необходимость выполнения исследований в вопросах:

- влияния пассажирских перевозок на пропускную способность железнодорожных направлений;

- исследование требований к инфраструктуре для совмещенного движения грузовых и пассажирских поездов.

Практически с момента своего создания концепция государственной компании Amtrak критикуется в различных статьях [28]. Основными аргументами в ее поддержку являются.

Во-первых, несмотря на наличие значительных запасов нефти, основную ее часть США импортирует. В этой связи железнодорожный транспорт рассматривается как более энергоэффективный для экономики США по сравнению с автомобильным и авиационным.

Во-вторых, функционирование автомобильного транспорта связано с высокой аварийностью. В этих условиях железнодорожный транспорт рассматривается как более безопасный.

В-третьих, не все граждане США имеют возможность управлять автомобилями в связи с возрастом, особенно в условиях старения населения, а также в связи с состоянием здоровья. В этих условиях железнодорожный транспорт обеспечивает мобильность населения с ограниченными возможностями.

В-четвертых, автомобильный и авиационный транспорт являются основными источниками загрязнения окружающей среды. Поэтому поддержка железнодорожного транспорта

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

обеспечивает меньшую нагрузку на экологию.

И, наконец, высокая провозная способность железнодорожного транспорта позволяет уменьшить загрузку городских улиц и уменьшить число пробок на дорогах.

В настоящее время в США происходит дискуссия о целесообразности создания сети скоростных и высокоскоростных железных дорог, аналогичной европейской [12, 13]. В частности в [26] приведена методика оценки эффективности создания высокоскоростной сети. При технико-экономическом обосновании ее развития предлагается учитывать расходы на строительство и эксплуатацию сети, расходы, связанные с выбросами CO<sub>2</sub>, расходы, связанные с перегрузкой автотранспортной сети, расходы, связанные с транспортными происшествиями. Необходимо отметить, что в трудах украинских ученых [1] рассматривались вопросы о необходимости оценки влияния железнодорожного транспорта на социальные и экологические проблемы общества, однако данная методика требует дальнейшего совершенствования.

Учитывая то, что в США пассажирские перевозки преимущественно выполняются на железнодорожной инфраструктуре, принадлежащей грузовым компаниям, и управляются диспетчерским аппаратом этих компаний, возникает значительное число вопросов, связанных с предоставлением инфраструктуры для перевозок.

Актуальность проблемы оценки пропускных способностей железнодорожных линий связана с повышением веса отправительских маршрутов, увеличением объемов перевозок интермодальными поездами, увеличением числа и повышением скоростей движения пассажирских поездов. Американским ученым известна методика определения пропускной способности в поездах (вагонах), традиционная для государств ЕС и СНГ [2, 21], однако такой подход критикуется из-за сложности его применения для оценки изменения качественных показателей работы железных дорог и, соответственно, экономических потерь в условиях, когда поток поездов является неоднородным и часть поездов следует без соблюдения графика. В этой связи, на железных дорогах США в качестве критерия для оценки уровня заполнения пропускной способности элемента транспортной инфраструктуры используется время его проследования при движении поезда в потоке по

сравнению с чистым временем проследования данного элемента.

Эмпирические функции для оценки связи между пропускной способностью и величиной задержки поездов начали применяться с 60-х годов XX века.

В [15] для оценки связи между временем хода поезда  $T$  и пропускной способностью железнодорожной линии  $C$  предложено использовать гиперболу

$$T = T_A - \frac{C(T_0 - T_A)}{V - C}; \quad T_A \leq T_0, \quad V < C,$$

где  $T_0$  – время хода при отсутствии других поездов в потоке;  $T_A$  – горизонтальная асимптота времени хода;  $V$  – объем перевозок.

Основная сложность применения эмпирических моделей связана с определением их параметров. В этой связи целый ряд исследований направлен на построение аналитических моделей, в которых для расчетов используются параметры поездов и участков. В общем случае продолжительность движения поезда  $i$ -й категории предлагается оценивать с помощью выражения [18]

$$T_i = T_{0,i} + \sum_{j=1}^k M_{ij} D_{ij},$$

где  $T_{0,i}$  – чистое время хода по участку поезда  $i$ -й категории;  $M_{ij}, D_{ij}$  – число и продолжительность задержки поезда  $i$ -й категории поездом  $j$ -й категории;  $k$  – число категорий поездов.

Развитие компьютерной техники привело к созданию разнообразных имитационных моделей пропуска потоков поездов по железнодорожной инфраструктуре, которые в настоящее время и являются основным методом исследования данной проблемы [20]. В качестве примеров исследований могут быть представлены работы [24], где исследуются вопросы влияния числа и скорости пассажирских поездов на задержки грузовых, а также [23], где исследуются вопросы задержек в потоке из трех типов поездов: пассажирские, интермодальные грузовые и отправительские маршруты. В настоящее время работа железных дорог США преимущественно направлена на перевозку массовых грузов отправительскими маршрутами. Учитывая, что минимальные расходы при таких перевозках

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

достигаются при отправлении поездов полной массы и длины, то движение на железных дорогах организовывается без жесткого соблюдения графика движения поездов и оперативном решении конфликтных ситуаций между поездами диспетчерским аппаратом. Поэтому в основу программных комплексов, моделирующих пропуск потока поездов, положены алгоритмы выбора приоритета отправления поездов на перегоны [16]. Усложнение структуры поездопотока рассматривается американскими учеными как одна из основных причин увеличения затрат времени на доставку грузов и снижения эффективности использования подвижного состава. В этой связи выполняются исследования по эффективности организации движения поездов по графику [11].

Проблемы совместного пропуска грузового и пассажирского поездопотоков характерны и для Украины. Особенно острыми они стали после организации ускоренного движения. При этом, в соответствии с применяемым в Украине подходом, влияние ускоренного пассажирского движения на пропускную способность железнодорожных линий оценивается коэффициентом съема [3]. В то же время, влиянию ускоренных поездов на задержки поездов других категорий в отечественной науке уделяется гораздо меньшее внимание и данная проблема требует дополнительного исследования.

Задачи повышения пропускной способности также актуальны для железных дорог Украины. В условиях ориентации грузопотоков на морские порты, а также перевозок пассажиров в направлении черноморских курортов и обратно одним из методов повышения пропускной способности железных дорог может быть обезличенное использование путей на двухпутных участках.

Существенным преимуществом организации смешанного грузового и пассажирского движения является снижение расходов на создание новой транспортной инфраструктуры. Однако совместный пропуск пассажирских и грузовых поездов по одной инфраструктуре вызывает целый ряд проблем, связанных с изменениями требований к конструкции пути, его содержанию и организации перевозок. Достаточно острой как для условий Украины, так и для условий США является разработка требований к инфраструктуре, обеспечивающей по-

вышение скоростей движения пассажирских поездов в условиях тяжеловесного движения грузовых поездов. Одними из наиболее острых при этом являются вопросы проследования криволинейных участков в плане. В этой связи в США выполняются исследования вопросов установления рационального возвышения наружного рельса [25]. Повышение скорости пассажирских перевозок на существующей инфраструктуре достигается, как правило, за счет выполнения отдельных проектов по реконструкции и модернизации инфраструктуры. В [14] представлена методика, основанная на использовании генетических алгоритмов, отбора проектов, обеспечивающая оптимальное снижение продолжительности перевозок и уменьшение эксплуатационных расходов.

Другим важным вопросом смешанного использования железнодорожной инфраструктуры для грузового и пассажирского движения является специализация инфраструктуры для выполнения перевозок. В соответствии с этим в США выделяют три вида совместного использования инфраструктуры [22]:

- совместное использование путей, когда пассажирские и грузовые поезда следуют по одним и тем же путям;

- совместная полоса отчуждения, когда пассажирские и грузовые поезда следуют по разным путям, оси которых расположены на расстоянии до 25 футов (7,62 м);

- совместное использование коридора, когда пассажирские и грузовые поезда следуют по разным путям, оси которых расположены на расстоянии от 25 до 200 футов (7,62–60,96 м).

Исследования в данной области связаны с формализацией взаимоотношений между грузовыми железнодорожными компаниями и пассажирскими перевозчиками при разных способах совместного использования инфраструктуры.

Интерес к задачам разделения пассажирского и грузового движения по разным направлениям возник в Украине при введении ускоренного движения. В частности, эта проблема освещена в работе [4]. Однако, учитывая то, что как грузовые, так и пассажирские перевозки осуществляются Укрзализныцей, проблемы совместного использования инфраструктуры пока не являются критическим. В то же время, процессы реформирования железнодорожной отрасли уже привели к созданию Украинской



## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

железнодорожной скоростной компании (УЗШК) и подразумевают создание других пассажирских компаний как в составе Укрзализныци, так и независимых от нее. В этих условиях актуальность проблемы специализации инфраструктуры для выполнения грузовых и пассажирских перевозок и разработке требований к взаимодействию грузовых и пассажирских перевозчиков будет повышаться.

### Научная новизна и практическая ценность

Научная новизна работы состоит в том, что в ней установлены общие тенденции в развитии пассажирских железнодорожных перевозок в США и в Украине.

Практическая ценность работы состоит в том, что установленные в результате исследования методы организации работы пассажирского комплекса железнодорожного транспорта США могут быть адаптированы для решения проблем в развитии пассажирских перевозок на железных дорогах Украины.

### Выводы

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

– пассажирские железнодорожные перевозки в США и Украине имеют ряд общих черт, основными из которых являются их дотационность и совместное использование инфраструктуры с грузовыми перевозчиками;

– одной из основных причин сокращения пассажирооборота железнодорожного транспорта как в Украине, так и в США является проигрыш экономической конкуренции альтернативным видам транспорта; преодоление указанной проблемы в США достигнуто за счет создания пассажирских перевозчиков, совершенствования методов оценки влияния разных видов транспорта на экономическую, социальную и экологическую сферы жизни общества и разработки методов поддержки пассажирских железнодорожных перевозок за счет средств федерального и местных бюджетов;

– совместное использование железнодорожной инфраструктуры пассажирскими и грузовыми поездами приводит к ухудшению условий пропуска последних; для оценки влияния увеличения числа и скорости пассажирских поездов на эксплуатационные расходы, связанные с грузовыми перевозками по аналогии с железными дорогами США необходимо разработать методы оценки неоднородности потока поездов на качественные показатели работы железных дорог.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бараш, Ю. С. Роль залізничного транспорту України в забезпеченні сталого розвитку суспільства / Ю. С. Бараш, І. П. Корженевич // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 24. – С. 201–206.
2. Вантажні перевезення у 2016 році [Електронний ресурс] / Державна служба статистики України. – Режим доступу: [http://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2016/tr/vp/vp\\_u/vp1216\\_u.zip](http://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2016/tr/vp/vp_u/vp1216_u.zip). – Загл. с экрана. – Проверено : 31.03.2017.
3. Козаченко, Д. М. Дослідження коефіцієнтів зйому в умовах прискореного та швидкісного руху пасажирських поїздів / Д. М. Козаченко, О. Ю. Папахов, Н. О. Логвінова // Вісн. Акад. митної служби України. Серія: Технічні науки. – 2014. – № 2 (52). – С. 110–116.
4. Курган, Н. Б. Оптимизация работы пути при перераспределении грузовых и пассажирских потоков на сети железных дорог Украины / Н. Б. Курган, М. А. Заяц // Проблемы проектирования и строительства железных дорог : межвуз. сб. науч. тр. / Дальневост. гос. ун-т путей сообщения. – Хабаровск, 2011. – С. 27–38.
5. Пасажирські перевезення у 2016 році [Електронний ресурс] / Державна служба статистики України. – Режим доступу: [http://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2016/tr/pp/pp\\_u/pp1216\\_u.zip](http://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2016/tr/pp/pp_u/pp1216_u.zip). – Загл. с экрана. – Проверено : 31.03.2017.
6. Про залізничний транспорт [Електронний ресурс] : Закон України від 04.07.96 р. № 274/96-ВР. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/273/96-вр>. – Загл. с экрана. – Проверено : 31.03.2017.
7. Amtrak National Facts [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.amtrak.com/national-facts>. – Загл. с экрана. – Проверено : 10.01.2017.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

8. Brock, T. J. An Overview of US Commuter Rail [Електронний ресурс] / T. J. Brock, R. R. Souleyrette. – 2013. – Режим доступа: [http://www.ktc.uky.edu/files/2013/10/Commuter-Rail-Report\\_FINAL-KTC\\_13\\_18\\_.pdf](http://www.ktc.uky.edu/files/2013/10/Commuter-Rail-Report_FINAL-KTC_13_18_.pdf). – Загл. с экрана. – Проверено : 31.03.2017.
9. Bureau of Transportation Statistics. National Transportation Statistics; «Table 1-40: U.S. Passenger-Miles (Millions)» [Електронний ресурс]. – Режим доступа: [https://www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov.b/files/publications/national\\_transportation\\_statistics/html/table\\_01\\_40.html](https://www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov.b/files/publications/national_transportation_statistics/html/table_01_40.html). – Загл. с экрана. – Проверено : 10.01.2017.
10. Bureau of Transportation Statistics. National Transportation Statistics; «Table 1-50: U.S. Ton-Miles of Freight» [Електронний ресурс]. – Режим доступа: [http://www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov.bts/files/publications/national\\_transportation\\_statistics/html/table\\_01\\_50.html](http://www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov.bts/files/publications/national_transportation_statistics/html/table_01_50.html). – Загл. с экрана. – Проверено : 31.03.2017.
11. Harrod, S. A tutorial on fundamental model structures for railway timetable optimization / S. Harrod // *Surveys in Operations Research and Management Science*. – 2012. – Vol. 17, № 2. – P. 85–96. doi: 10.1016/j.sorms.2012.08.002.
12. Johnson, B. E. American intercity passenger rail must be truly high-speed and transit-oriented / B. E. Johnson // *J. of Transport Geography*. – 2012. – Vol. 22. – P. 295–296. doi:10.1016/j.jtrangeo.2012.01.018.
13. Lane, B. W. On the utility and challenges of high-speed rail in the United States / B. W. Lane // *J. of Transport Geography*. – 2012. – Vol. 22. – P. 282–284. doi:10.1016/j.jtrangeo.2012.01.030.
14. Model for optimal selection of projects to improve running time and operating cost efficiency on passenger rail corridors / H. Tang, C. T. Dick, B. M. Caughron, X. Feng, Q. Wang, C. P. L. Barkan. // *Transportation Research Record: J. of the Transportation Research Board*. – 2016. – № 2546. – P. 33–42. doi: 10.3141/2546-05.
15. Mosher, W. W. A Capacity Restraint Algorithm for Assigning Flow to a Transportation Network / W. W. Mosher // *Highway Research Record*. – 1963. – Vol. 6. – P. 78.
16. Mu, S. Efficient dispatching rules on double tracks with heterogeneous train traffic / S. Mu, M. Dessouky // *Transportation Research. Part B: Methodological*. – 2013. – Vol. 51. – P. 45–64. doi: 10.1016/j.trb.2013.02.004.
17. O'Dea, W. P. The role of the passenger train in the United States: A cost comparison of the common carriers / W. P. O'Dea // *Transportation Research. Part A: General*. – 1991. – Vol. 25. – Iss. 6. – P. 429–442. doi: 10.1016/0191-2607(91)90020-q.
18. Petersen, E. R. Over-the-Road Transit Time for a Single Track Railway / E. R. Petersen // *Transportation Science*. – 1974. – Vol. 6. – P. 65–76.
19. Plant, J. Handbook of Transportation Policy and Administration (Public Administration and Public Policy) / J. F. Plant, V. R. Johnston, C. E. Ciocirlan. – Boca Raton : CRC Press, 2007. – 656 p.
20. Pouryousef, H. Hybrid simulation approach for improving railway capacity and train schedules / H. Pouryousef, P. Lautala // *J. of Rail Transport Planning & Management*. – 2015. – Vol. 5. – Iss. 4. – P. 211–224. doi: 10.1016/j.jrtpm.2015.10.001.
21. Pouryousef, H. Railroad capacity tools and methodologies in the U.S. and Europe / H. Pouryousef, P. Lautala, T. White // *J. of Modern Transportation March*. – 2015. – Vol. 23. – Iss. 1. – P. 30–42.
22. Resor, R. R. Shared-Use Corridors: Survey of Current Practice and Recommendations for the Future / R. R. Resor, T. R. Hickey // *Transportation Research Record: J. of the Transportation Research Board*. – 2005. – № 1930. – P. 38–43. doi: 10.3141/1930-05.
23. Shih, M.-C. Impact of Passenger Train Capacity and Level of Service on Shared Rail Corridors with Multiple Types of Freight Trains / M.-C. Shih, C. T. Dick, C. P. L. Barkan // *Transportation Research Record: J. of the Transportation Research Board*. – 2015. – № 2475. – P. 63–71. doi: 10.3141/2475-08.
24. Sogin, S. Simulating the effects of higher speed passenger trains in single track freight networks / S. Sogin, C. P. L. Barkan, Mohd Rapik Saat // *Proc. of the 2011 Winter Simulation Conf.* – Phoenix, AZ, United States, 2011. – P. 3684–3692. doi: 10.1109/WSC.2011.6148061.
25. Superelevation Optimization for Mixed Freight and Higher-Speed Passenger Trains [Електронний ресурс] / C. T. Dick, L. Sehgal, C. J. Ruppert Jr., S. Gujran // *Proc. of the American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association Annual Conf.* – Orlando, FL, 2016. – Режим доступа: <http://railtec.illinois.edu/articles/Files/Conference%20Proceedings/2016/Dick-et-al-2016-AREMA.pdf>. – Загл. с экрана. – Проверено : 31.03.2017.
26. The full cost of high-speed rail: an engineering approach / D. Levinson, J. M. Mathieu, D. Gillen, A. Kanafani // *The Annals of Regional Science*. – 1997. – Vol. 31. – Iss. 2. – P. 189–215.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

27. Types of Railroads [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <https://www.aar.org/todays-railroads/our-network?t=typesofrailroads> – Загл. с екрана. – Проверено :10.01.2017.
28. Vranich, J. Help Passenger Rail by Privatizing Amtrak [Електронний ресурс] / J. Vranich, E. L. Hudgins ; Cato Institute. – 2001. – Режим доступа: <https://object.cato.org/sites/cato.org/files/pubs/pdf/pa419.pdf>. – Загл. с екрана. – Проверено : 31.03.2017.

Р. Г. КОРОБІЙОВА<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 70, ел. пошта [rgkorobyova@rambler.ru](mailto:rgkorobyova@rambler.ru), ORCID 0000-0002-6424-1079

## ПРОБЛЕМИ ОРГАНІЗАЦІЇ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ НА ЗАЛІЗНИЦЯХ США

**Мета.** В роботі необхідно провести дослідження організації роботи залізничного транспорту США при виконанні пасажирських перевезень. **Методика.** Дослідження виконані на підставі аналізу літературних джерел та звітних даних про пасажирські перевезення в США. **Результати.** Негативними тенденціями в роботі пасажирського комплексу залізниць України є падіння обсягів перевезень, прогресуюче старіння рухомого складу та загальна збитковість цього виду діяльності для Укрзалізниці. У зв'язку з цим актуальним завданням для вітчизняного залізничного транспорту є проведення реформ галузі. У зв'язку з цим було вивчено досвід організації пасажирських перевезень на залізницях США, особливістю яких є вкрай високий ступінь конкуренції між видами транспорту. За підсумками виконаного аналізу умов роботи залізниць США та України встановлені загальні умови функціонування залізниць обох країн, пов'язаних із забезпеченням перевезення пасажирів. Встановлено, що загальними умовами виконання залізничних пасажирських перевезень для США й України є дотаційність цього виду діяльності та спільне використання інфраструктури для перевезення вантажів і пасажирів. У зв'язку з цим, при розробці підходів до реформування пасажирського господарства залізниць України, доцільним є використання досвіду США щодо оцінки суспільної ефективності залізничного транспорту, впливу пасажирських перевезень на умови пропуску вантажних поїздів, спільного використання залізничної інфраструктури вантажними та пасажирськими компаніями. **Наукова новизна.** В роботі автором встановлені загальні тенденції у розвитку пасажирських залізничних перевезень в США та в Україні. **Практична цінність.** Встановлені в результаті дослідження методи організації роботи пасажирського комплексу залізничного транспорту США можуть бути адаптовані для вирішення проблем розвитку пасажирських перевезень на залізницях України.

*Ключові слова:* залізничний транспорт; пасажирські перевезення; залізнична інфраструктура

Р. Н. KOROBIOVA<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Management of Operational Work», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 70, e-mail [rgkorobyova@rambler.ru](mailto:rgkorobyova@rambler.ru), ORCID 0000-0002-6424-1079

## ISSUES OF ORGANIZING THE PASSENGER TRANSPORTATION ON US RAILWAYS

**Purpose.** The paper focuses on a study of the US railway transport organization management during passenger transportation. **Methodology.** Studies were carried out on the basis of the analysis of literature sources and reporting data on passenger transportation in the USA. **Findings.** Negative trends in the work of the passenger complex of the Ukrainian railways are the slowdown in the volumes of transportation, the progressive aging of the rolling stock and the overall activity running at a loss for Ukrzaliznytsia. In this regard, the actual task for domestic rail transport is the implementation of industry reforms. Therefore, the paper presented the study of the experience of organizing the passenger transportation on US railways, whose peculiarity is the extremely high degree of competition between modes of transport. As a result of the conducted analysis for working conditions of the US and Ukrainian railways, the general conditions for the functioning of the railways in both countries connected with passenger transportation

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

securing have been established. It was found that general condition for execution of railway passenger transportation for the United States and Ukraine is the subsidization of this activity and combined use of infrastructure for the freight and passengers' transportations. In this connection, when developing approaches to reforming the passenger economy of Ukraine's railways, it is advisable to use the experience of the United States in assessing the social effectiveness of rail transport, the impact of passenger transportation on the conditions of freight trains handling, and combined use of railway infrastructure by freight and passenger companies. **Originality.** The author determined the general trends in the development of passenger railway transportation in the US and Ukraine. **Practical value.** The resulted methods of organizing the operation of the US railway passenger transportation complex can be adapted to solve problems in the development of passenger transportation on the Ukrainian railways.

*Keywords:* railway transport; passenger transportation; railway infrastructure

## REFERENCES

1. Barash, Y. S., & Korzhenevych, I. P. (2008). The role of railway transport of ukraine in ensuring a well-established development society. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 24, 201-206.
2. State Statistics Service of Ukraine. (2016). *Cargo Transportation, 2016*. Retrieved from [http://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2016/tr/vp/vp\\_u/vp1216\\_u.zip](http://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2016/tr/vp/vp_u/vp1216_u.zip)
3. Kozachenko, D. M., Papakhov, A. Y., & Lohvinova, N. O. (2014). Research shot coefficient under accelerated and high-speed passenger trains. *Journal of the Ukrainian Academy of Customs, Issue Technical sciences*, 2 (52), 110-116.
4. Kurgan, N. B., & Zayats, M. A. (2011). Optimizatsiya raboty puti pri pereraspredelenii gruzovykh i passazhirskikh potokov na seti zheleznykh dorog Ukrainy. *Problemy proektirovaniya i stroitelstva zheleznykh dorog* (pp. 27-38). Khabarovsk: Far Eastern State Transport University.
5. State Statistics Service of Ukraine. (2016). *Passenger Transportation, 2016*. Retrieved from [http://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2016/tr/pp/pp\\_u/pp1216\\_u.zip](http://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2016/tr/pp/pp_u/pp1216_u.zip)
6. Pro zaliznychnyi transport: Zakon Ukrainy 1996, number 273-96-vr (1996). Retrieved from <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/273/96-vp>
7. Amtrak. (2016). *Amtrak National Facts*. Retrieved from <https://www.amtrak.com/national-facts>
8. Brock, T. J., & Souleyrette, R. R. (2013). *An Overview of US Commuter Rail: Final report*. Lexington, KY: University of Kentucky, Kentucky Transportation Center. Retrieved from [http://www.ktc.uky.edu/files/2013/10/Commuter-Rail-Report\\_FINAL-KTC\\_13\\_18\\_.pdf](http://www.ktc.uky.edu/files/2013/10/Commuter-Rail-Report_FINAL-KTC_13_18_.pdf)
9. Bureau of Transportation Statistics. (n.d.). *National Transportation Statistics: U.S. Passenger-Miles*. Retrieved from [https://www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov.b/files/publications/national\\_transportation\\_statistics/html/table\\_01\\_40.html](https://www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov.b/files/publications/national_transportation_statistics/html/table_01_40.html)
10. Bureau of Transportation Statistics. (2011). *National Transportation Statistics: U.S. Ton-Miles of Freight*. Retrieved from [http://www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov.bts/files/publications/national\\_transportation\\_statistics/html/table\\_01\\_50.html](http://www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov.bts/files/publications/national_transportation_statistics/html/table_01_50.html)
11. Harrod, S. (2012). A tutorial on fundamental model structures for railway timetable optimization. *Surveys in Operations Research and Management Science*, 17(2), 85-96. doi: 10.1016/j.sorms.2012.08.002
12. Johnson B. E. (2012). American intercity passenger rail must be truly high-speed and transit-oriented. *Journal of Transport Geography*, 22, 295-296. doi:10.1016/j.jtrangeo.2012.01.018
13. Lane B. W. (2012). On the utility and challenges of high-speed rail in the United States. *Journal of Transport Geography*, 22, 282-284. doi: 10.1016/j.jtrangeo.2012.01.030
14. Tang, H., Dick, C. T., Caughron, B. M., Feng, X., Wang, Q., & Barkan, C. P. L. (2016). Model for optimal selection of projects to improve running time and operating cost efficiency on passenger rail corridors. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2546, 33-42. doi: 10.3141/2546-05
15. Mosher, W. W. (1963). A Capacity Restraint Algorithm for Assigning Flow to a Transportation Network. In *Traffic Assignment, Serial Highway Research Record*, 6 (pp. 41-70). Highway Research Board.
16. Mu, S., & Dessouky, M. (2013). Efficient dispatching rules on double tracks with heterogeneous train traffic. *Transportation Research Part B: Methodological*, 51, 45-64. doi: 10.1016/j.trb.2013.02.004
17. O'Dea, W. P. (1991). The role of the passenger train in the United States: A cost comparison of the common carriers. *Transportation Research Part A: General*, 25(6), 429-442. doi: 10.1016/0191-2607(91)90020-q

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

18. Petersen, E. R. (1974). Over-the-Road Transit Time for a Single Track Railway. *Transportation Science*, 8 (1), 65-76. doi: 10.1287/trsc.8.1.65
19. Plant, J., Johnston, V. R., & Ciocirlan, C. E. (2007). *Handbook of Transportation Policy and Administration (Public Administration and Public Policy)*. CRC Press.
20. Pouryousef, H., & Lautala, P. (2015). Hybrid simulation approach for improving railway capacity and train schedules. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 5(4), 211-224. doi: 10.1016/j.jrtpm.2015.10.001
21. Pouryousef, H., Lautala, P., & White, T. (2015). Railroad capacity tools and methodologies in the U.S. and Europe. *Journal of Modern Transportation*, 23(1), 30-42. doi: 10.1007/s40534-015-0069-z
22. Resor, R. R., & Hickey, T. R. (2005). Shared-Use Corridors: Survey of Current Practice and Recommendations for the Future. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1930, 38-43. doi: 10.3141/1930-05
23. Shih, M.-C., Dick, C. T., & Barkan, P. L. C. (2015). Impact of Passenger Train Capacity and Level of Service on Shared Rail Corridors with Multiple Types of Freight Trains. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2475, 63-71. doi: 10.3141/2475-08
24. Sogin, S., Barkan, C. P. L., Saat, M. R. (2011). Simulating the effects of higher speed passenger trains in single track freight networks. *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference, Dec. 11-14*, 3684-3692. doi: 10.1109/WSC.2011.6148061
25. Dick, C. T., Sehgal, L., Ruppert Jr., C. J., & Gujuran, S. (2016). Superelevation Optimization for Mixed Freight and Higher-Speed Passenger Trains. *Proceedings of the American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association Annual Conference, Orlando, FL, August 28-31*. Retrieved from <http://railtec.illinois.edu/articles/Files/Conference%20Proceedings/2016/Dick-et-al-2016-AREMA.pdf>
26. Levinson, D., Mathieu, J. M., Gillen, D., & Kanafani, A. (1997). The full cost of high-speed rail: an engineering approach. *The Annals of Regional Science*, 31(2), 189-215. doi: 10.1007/s001680050045
27. Association of American Railroads. (n.d.). *Types of railroads*. Retrieved from <https://www.aar.org/todays-railroads/our-network?t=typesofrailroads>
28. Vranich, J., Hudgins, E. L. (2001). *Help Passenger Rail by Privatizing Amtrak: Policy analysis*. Washington: Cato Institute. Retrieved from <https://object.cato.org/sites/cato.org/files/pubs/pdf/pa419.pdf>

Стаття рекомендована к публікації д.т.н., проф. В. І. Бобровским (Україна); д.т.н., проф. Д. В. Ломотко (Україна)

Поступила в редколлегию: 15.12.2016

Принята к печати: 24.03.2017

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

UDC 629.423.32:621.3.066.6

O. Y. BALIICHUK<sup>1\*</sup>, L. V. DUBYNETS<sup>2</sup>, O. L. MARENYCH<sup>3</sup>, D. V. USTYMENKO<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Electric Engineering and Electromechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail baliichukaleksei@mail.ru, ORCID 0000-0003-0119-1446

<sup>2</sup>Dep. «Electric Engineering and Electromechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, mona.shelley@gmail.com, ORCID 0000-0003-0319-4544

<sup>3</sup>Dep. «Electric Engineering and Electromechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, mona.shelley@gmail.com, ORCID 0000-0003-3602-5851

<sup>4</sup>Dep. «Electric Engineering and Electromechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

### INFLUENCE OF CONTACTOR CONTACT PRESSURE IN POWER CIRCUITS OF ELECTRIC STOCK ON THEIR PLASTIC DEFORMATION AND FUSING

**Purpose.** The work is aimed at conducting the study to obtain the results that will quantify the influence of contactor contact pressure in power circuits of electric stock on the highest current value  $I_d$ , that does not cause plastic deformation of contacts; and on the current value  $I_{fs}$  – incipient fusion of contacts taking into account the operation conditions. Therefore, such a study targeted to establish the contact fusing causes is relevant. **Methodology.** The paper proposes an engineering method for determining the currents  $I_d$  and  $I_{fs}$ , taking into account the value of contact pressure, electrodynamic forces of contact repulsion  $F_{e.d.r}$ , as well as the pressure influence on the values of such forces. **Findings.** Taking the contactors 1SVAD8 (locomotive ChS8) and 7SP1 (locomotive ChS4) as an example, the authors conducted the calculations and found that the peak pressure force increases the currents  $I_d$  and  $I_{fs}$  for these contactors by 11.8%; 15.5%; 11.8%; and 15.4% respectively (compared with the specified currents at the minimum pressure force). Influenced by  $F_{e.d.r}$  the pressure force of contacts for 1SVAD8 contactor decreased by 13.8...31.8%, and for 7SP1 contactor the value  $F_{e.d.r}$  may be greater than the pressure force. This can lead to spontaneous shutdown of the closed contactor that is not provided by the control circuit. Ensuring during operation the maximum allowable pressure force of the contacts  $F_c$  slightly affects the value  $F_{e.d.r}$ , compared with the case when  $F_c$  has the minimum permissible value (in event of a fault in the heating circuit  $F_{e.d.r}$  for contactors 1SVAD8 and 7SP1 is reduced by only 2.45% and 2.59% respectively). **Originality.** The authors for the first time presented a quantitative assessment of influence of contactor contact pressure in power circuits of electric stock on their plastic deformation and fusing using the proposed engineering method. **Practical value.** The results obtained during the research allow solving the problem for developing measures aimed

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

to improve the reliability of the heating circuits of electric locomotives ChS8 and ChS4. The proposed method of determining  $I_d$  and  $I_{fs}$  can be used to quantify the influence of pressure of the main electric contacts mounted in power circuits of electric stock of all series, if during the operation there are cases of plastic deformation, fusing, welding of such contacts, in order to improve the reliability of power circuits.

**Keywords:** contact pressure; plastic deformation current, fusing; pressure force; repulsion; shock current; contact resistance

### Introduction

Practice shows that there are cases in operation when power contacts of contactors in power circuits of electric stock are fused and sometimes welded. For example, the above effects were recorded during the operation of the electric locomotives ChS8 when the contacts of 1SVAD8 type contactor in the heating circuit of carriages were fused before the short circuit (SC) response time in the given circuit. The time of SC inception until the short-circuit response is 0.08 sec [1, 2].

### Purpose

The work is aimed at conducting the study to obtain the results that will quantify the influence of contactor contact pressure in power circuits of electric stock on the highest current value  $I_d$ , that does not cause plastic deformation of contacts; and on the current value  $I_{fs}$  – incipient fusion of contacts taking into account the operation conditions. Therefore, the study targeted to establish the contact fusing causes is relevant.

### Methodology

We know that contact performance is determined by thermal processes in them [4, 5, 7, 10–12, 17–22]. Herewith the crucial is relationship between the energy losses in the contact connection  $A_l$  and the heat dispersion energy  $A_{hd}$ , which is output into the environment during the same time. The currents that are larger than the nominal ones significantly hinder the work of contacts. This gives rise to phenomena that can lead to dangerous consequences. The increasing current, for example, in SC mode in the heating coil under consideration,  $(dI/dt) > 0$  causes  $\Delta A = A_l - A_{hd}$ , which can lead to overheating of contacts. A certain value of unbalanced energy  $\Delta A$  can initiate plastic deformation of the contact surfaces and even fusing of these surfaces.

The main indicator of the quality of contact connection is voltage drop  $\Delta U_c$  on it

$$\Delta U_c = I r_c, \quad (1)$$

where  $I$  – current through contacts,  $r_c$  – contact resistance.

The current rapid changes, peculiar to SC mode, lead to increase of the electrodynamic forces that reduce contact pressure, while this reduction increases the contact resistance  $r_c$ . Higher  $r_c$  further increases  $\Delta U_c$ , caused by the rise in current.

The ratio between the currents  $I_d$  (the highest current which does not cause plastic deformation of contacts),  $I_{fs}$  (incipient fusion current) and the currents at certain modes in the heating circuit of the electric locomotives ChS8, ChS4 are specified in [1, 2]. This study raises the problem to study quantitatively the dependence of contact resistance  $r_c$  of the contactors 1SVAD8 (locomotive ChS8) [13] and 7SP1 (locomotive ChS4) [15] on the contact pressure force at different operation modes of heating circuits [9].

Let us consider first the influence of the value of the contact pressure force  $F_c$ , caused by the springs, of 1SVAD8-type contactor on the current value  $I_d$  in nominal mode. The contact pressure force  $F_c$  for this contactor may be in the range of 80 N to 100 N [13]. Transition resistance at nominal mode [14, 16] is as follows:

$$r_{c \text{ nom}} = \frac{\rho_t}{2} \sqrt{\frac{\pi \cdot \sigma_{cr}}{F_c \cdot c}}, \quad (2)$$

where  $\rho_t$  – specific electrical resistance of contact materials at nominal mode, Ohm · cm;

$\sigma_{cr}$  – specific crease-resistance of contact materials;

$c$  – the number of contact points;

$F_c$  – contact pressure force, N.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Specific electric resistance  $\rho_t$  of contact materials at nominal mode (when permissible excess temperature of contacts at ambient temperature of 40 °C by DSTU 2773-94 does not exceed 80 °C):

$$\rho_t = \rho_0 (1 + \chi_{sr} T), \quad (3)$$

where  $\rho_0$  – specific resistance at 0 °C, Ohm·cm;

$\chi_{sr}$  – temperature coefficient of specific resistance,  $1/\text{degree} \cdot 10^3$ ;

$$T = 40 \text{ °C} + 80 \text{ °C} = 120 \text{ °C}.$$

Material of the contacts is silver (silver lining).

$$\rho_{0s} = 1.5 \text{ mkOhm} \cdot \text{cm} = 1.5 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm} \cdot \text{cm};$$

$$\chi_{rs} = 4 \frac{1}{\text{degree} \cdot 10^3}; \quad c = 3 \text{ (for surface contacts);}$$

specific crease-resistance for silver contacts  $\sigma_{cr.s} = 303 \cdot 10^2 \text{ N/cm}^2$  [13, 15, 16]. Then:

$$\rho_{t.s} = 1.5 \cdot 10^{-6} (1 + 0.48) = 2.22 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm} \cdot \text{cm},$$

According to (2) when  $F_c = 80 \text{ N}$ :

$$r_{c \text{ nom.s}} = \frac{2.22 \cdot 10^{-6}}{2} \sqrt{\frac{\pi \cdot 303 \cdot 10^2}{80 \cdot 3}} = 22.1 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm}$$

According to [6]

$$I_d = \frac{0.56 \cdot \Delta U_s}{r_{c \text{ nom}}}, \quad (4)$$

where  $\Delta U_s$  – voltage drop in the contact that corresponds to material softening. For silver  $\Delta U_{sc} = 0.09 \text{ V}$  [14]. In figures:

$$I_{ds} = \frac{0.56 \cdot 0.09}{22.1 \cdot 10^{-6}} = 2280 \text{ A}$$

When  $F_c = 100 \text{ N}$ :

$$r_{c \text{ nom.s}} = \frac{2.22 \cdot 10^{-6}}{2} \sqrt{\frac{\pi \cdot 303 \cdot 10^2}{100 \cdot 3}} = 19.76 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm}$$

$$I_{ds} = \frac{0.56 \cdot 0.09}{19.76 \cdot 10^{-6}} = 2550 \text{ A}$$

Thus, ensuring of the maximum pressure force  $F_c = 100 \text{ N}$  during operation of the contactor 1SVAD8 increases the value of current  $I_{ds}$ , that does not cause plastic deformation of contacts by  $\frac{2550 - 2280}{2280} \cdot 100 \% = 11.8 \%$  compared to the

current value  $I_{dc}$  at the minimum allowable value of the pressure force  $F_c = 80 \text{ N}$ .

For contactor 7SP1 [13, 15, 16]:

– contact pressure force  $F_c$  may be in the range of 90 N to 120 N;

– contact material is cadmium copper;

–  $c = 2$  (for linear contacts);

$$- \chi_{rcp} = 2.6 \frac{1}{\text{degree} \cdot 10^3};$$

$$- \sigma_{cr.cp} = 505 \cdot 10^2 \text{ N/cm}^2;$$

$$- \rho_{0cp} = 2.15 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm} \cdot \text{cm}.$$

Then

$$\rho_{t.cp} = 2.15 \cdot 10^{-6} \left( 1 + \frac{2.6 \cdot 120}{1000} \right) = 2.82 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$$

When  $F_c = 90 \text{ N}$ :

$$r_{c \text{ nom.cp}} = \frac{2.82 \cdot 10^{-6}}{2} \sqrt{\frac{\pi \cdot 505 \cdot 10^2}{90 \cdot 2}} = 41.85 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm}$$

$$\Delta U_{scp} = 0.12 \text{ V [6].}$$

$$I_{dcp} = \frac{0.56 \cdot 0.12}{41.85 \cdot 10^{-6}} = 1605 \text{ A}$$

When  $F_c = 120 \text{ N}$ :

$$r_{c \text{ nom.cp}} = \frac{2.82 \cdot 10^{-6}}{2} \sqrt{\frac{\pi \cdot 505 \cdot 10^2}{120 \cdot 2}} = 36.24 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm}$$

$$I_{dcp} = \frac{0.56 \cdot 0.12}{36.24 \cdot 10^{-6}} = 1854 \text{ A}$$

Thus, ensuring of the maximum pressure force  $F_c = 120 \text{ N}$  during operation of the contactor 7SP1 in nominal mode increases the value of current  $I_{dcp}$ , that does not cause plastic deformation of

contacts by  $\frac{1854 - 1605}{1605} \cdot 100 \% = 15.5 \%$  com-

pared to the current value  $I_{dcp}$  at the minimum allowable value of the pressure force  $F_c = 90 \text{ N}$ .

Further, we consider the effect of the force  $F_c$  on the current value  $I_{fs}$ . For contactor 1SVAD8:

– fusion temperature for silver is  $T_{fs.s} = 960 \text{ °C}$  [16];

$$- \Delta U_{fs.s} = 0.37 \text{ V [6];}$$

At the beginning of fusion according to (3):

$$\rho_{fst} = 1.5 \cdot 10^{-6} \left( 1 + \frac{4 \cdot 960}{1000} \right) = 7.26 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm} \cdot \text{cm}.$$



## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

When  $F_c = 80$  N according to (2):

$$r_{c \text{ nom. fs.s}} = \frac{7.26 \cdot 10^{-6}}{2} \sqrt{\frac{\pi \cdot 303 \cdot 10^2}{80 \cdot 3}} = 72.27 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm}$$

$$I_{fs.s} = \frac{0.58 \cdot \Delta U_{fs.s}}{r_{c \text{ nom. fs.s}}} [6]$$

In figures

$$I_{fs} = \frac{0.58 \cdot 0.37}{72.27 \cdot 10^{-6}} = 2969 \text{ A}$$

When  $F_c = 100$  N:

$$r_{c \text{ nom. fs.s}} = \frac{7.26 \cdot 10^{-6}}{2} \sqrt{\frac{\pi \cdot 303 \cdot 10^2}{100 \cdot 3}} = 64.64 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm}$$

$$I_{fs.s} = \frac{0.58 \cdot 0.37}{64.64 \cdot 10^{-6}} = 3320 \text{ A}$$

Thus, ensuring of the maximum pressure force  $F_c = 100$  N during operation of the contactor 1SVAD8 increases the fusion current by  $\frac{3320 - 2969}{2969} \cdot 100 \% = 11.8 \%$  compared to the fusion current value at the minimum allowable value of the pressure force  $F_c = 80$  N.

For contactor 7SP1:

– fusion temperature for copper

$$T_{fs.cp} = 1083 \text{ } ^\circ\text{C} [16];$$

–  $\Delta U_{fs.cp} = 0.43$  V [6];

At the beginning of fusion according to (3):

$$\rho_{fst.cp} = 2.15 \cdot 10^{-6} \left( 1 + \frac{2.6 \cdot 1083}{1000} \right) = 8.19 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm} \cdot \text{cm}.$$

When  $F_c = 90$  N:

$$r_{c \text{ nom. fs.cp}} = \frac{8.19 \cdot 10^{-6}}{2} \sqrt{\frac{\pi \cdot 505 \cdot 10^2}{90 \cdot 2}} = 121.5 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm}$$

According to (5):

$$I_{fs.cp} = \frac{0.58 \cdot 0.43}{121.5 \cdot 10^{-6}} = 2053 \text{ A}$$

When  $F_c = 120$  N:

$$r_{c \text{ nom. fs.cp}} = \frac{8.19 \cdot 10^{-6}}{2} \sqrt{\frac{\pi \cdot 505 \cdot 10^2}{120 \cdot 2}} = 105.2 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm}$$

$$I_{fs.cp} = \frac{0.58 \cdot 0.43}{105.2 \cdot 10^{-6}} = 2370 \text{ A}$$

Thus, ensuring of the maximum pressure force  $F_c = 120$  N during operation of the contactor 7SP1 increases the fusion current by

$$\frac{2370 - 2053}{2053} \cdot 100 \% = 15.4 \% \text{ compared to the}$$

fusion current value at the minimum allowable pressure force  $F_c = 90$  N.

Further we define the electrodynamic repulsion forces  $F_{e.d.r}$  between the contacts, under which the contact pressure is reduced, resulting in increased contact resistance  $r_c$ . It is necessary to assess the value of the forces  $F_{e.d.r}$  compared to the forces  $F_c$ . May the effect of  $F_{e.d.r}$  lead to contact breaking?

These forces are equal to [12]:

$$F_{e.d.r} = 2 \cdot 10^{-7} I \ln \left( \frac{D}{2r_0} \right), \quad (5)$$

where  $D$  and  $r_0$  are the sizes indicated in Fig. 1;

$I$  – current in heating circle at appropriate mode.

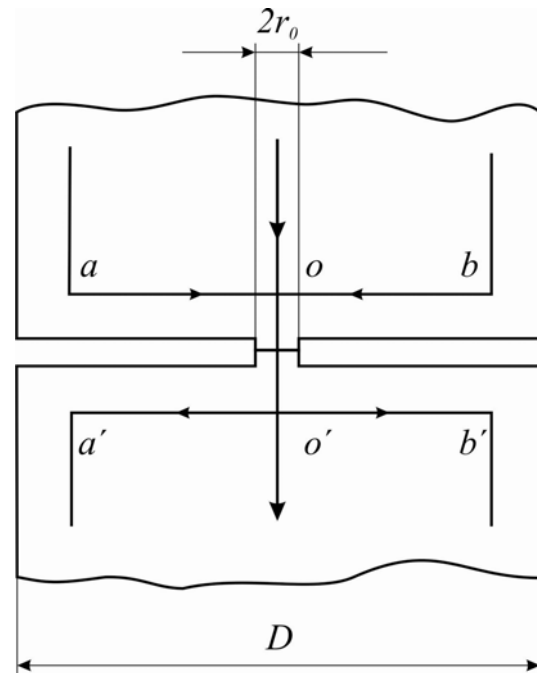


Fig. 1. Scheme of current flow lines in the contact

Fig. 1 shows a conventional scheme of the current lines approach to the contact point. At the sections  $ao - a'o'$  and  $ob - ob'$  the currents have opposite directions and there are the electrodynamic repulsion forces between them. In case of alternating current the electrodynamic repulsion force pulses with double frequency compared to the current frequency, varying from zero to the maximum

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

value without changing the sign (as in the expression (5) the current  $I$  is squared). Radius  $r_0$  of the creasing area (cm) is determined by the pressure force in the contacts and resistance  $\sigma_{cr.s}$  [12]:

$$r_0 = \sqrt{F_c / \pi \sigma_{cr.s}}. \quad (6)$$

The most (shock) values of  $F_{e.d.r}$  will be in SC mode when there is no load on the heating coil. [3] For electric locomotive ChS8 (contactor 1SVAD8) the shock currents  $i_{sh}$  during short circuit in the heating circle equal to [1, 2];

$$i'_{sh} = 3981.9 \text{ A when } U_1 = 19 \text{ kV}$$

$$i''_{sh} = 5239.8 \text{ A when } U_1 = 25 \text{ kV}$$

$$i'''_{sh} = 6078.7 \text{ A when } U_1 = 29 \text{ kV}.$$

$U_1$  is voltage in the contact network: the minimum allowable in operation (19 kV), nominal (25 kV), the maximum allowable (29 kV). SC took place at the time point, when,  $\alpha_0 - \varphi_c = \frac{\pi}{2}$ , where  $\alpha_0$  is the phase angle  $U_1$  for the first time point of SC.  $\varphi_c$  – is the angle between the vectors  $U_c$  та and  $I_c$  in SC mode.

$U_c$  and  $I_c$  are voltage and current in the traction transformer SC study during short-circuiting of heating coil. We consider the most difficult option when SC for  $\alpha_0 - \varphi_c = \frac{\pi}{2}$  is at the electric circuit section of from the heating coil clamp to the first electric furnace in the car. Such SC can result from the breakdown of high voltage cable lines, inter-car connection isolation (which is most likely), erroneous actions of service personnel, etc. [8].

For calculations we take the average of the contact pressure force  $F_c = 90 \text{ N}$ ,  $\sigma_{cr.s} = 303 \cdot 10^2 \text{ N/cm}^2$ ,  $D = 3 \text{ cm}$  [2].

According to (6):

$$r_0 = \sqrt{90 / \pi \cdot 303 \cdot 10^2} = 0.03 \text{ cm}.$$

According to (5):

$$F'''_{e.d.r} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 6078.7^2 \ln\left(\frac{3}{2 \cdot 0.03}\right) = 28.6 \text{ N}$$

when  $U_1 = 29 \text{ kV}$ .

$$F''_{e.d.r} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 5239.8^2 \ln\left(\frac{3}{2 \cdot 0.03}\right) = 21.5 \text{ N}$$

when  $U_1 = 25 \text{ kV}$ .

$$F'_{e.d.r} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 3981.9^2 \ln\left(\frac{3}{2 \cdot 0.03}\right) = 12.4 \text{ N}$$

when  $U_1 = 19 \text{ kV}$ .

Pressure force  $F_c = 90 \text{ N}$  under the influence of the forces  $F_{e.d.r}$  will decrease in the range from  $\frac{12.4}{90} \cdot 100 \% = 13.8 \%$  to  $\frac{28.6}{90} \cdot 100 \% = 31.8 \%$ .

Thus, under the influence of electrodynamic repulsion forces in this case the 1SVAD8 contactor contacts will not be disconnected, but the contact pressure is significantly reduced, leading to a substantial increase in contact resistance, instant increase in contact energy losses and therefore to increased contact fusing.

For electric locomotive ChS4 (contactor 7SP1) the shock currents  $i_{sh}$  in the same condition, that the short circuit is occurred at time point when

$$\alpha_0 - \varphi_c = \frac{\pi}{2}, \text{ equal to [1, 2]}$$

$$i'_{sh} = 7076.8 \text{ A when } U_1 = 19 \text{ kV}$$

$$i''_{sh} = 9313.4 \text{ A when } U_1 = 25 \text{ kV}$$

$$i'''_{sh} = 10801.7 \text{ A when } U_1 = 29 \text{ kV}.$$

For calculations we take  $F_c = 90 \text{ N}$ ,  $\sigma_{cr.cp} = 505 \cdot 10^2 \text{ N/cm}^2$ ,  $D = 3 \text{ cm}$  [2].

According to (6):

$$r_0 = \sqrt{90 / \pi \cdot 505 \cdot 10^2} = 0.024 \text{ cm}.$$

According to (5):

$$F'''_{e.d.r} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 10801.7^2 \ln\left(\frac{3}{2 \cdot 0.024}\right) = 96.5 \text{ N}$$

when  $U_1 = 29 \text{ kV}$ .

$$F''_{e.d.r} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 9313.4^2 \ln\left(\frac{3}{2 \cdot 0.024}\right) = 71.73 \text{ N}$$

when  $U_1 = 25 \text{ kV}$ .

$$F'_{e.d.r} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 7076.8^2 \ln\left(\frac{3}{2 \cdot 0.024}\right) = 41.3 \text{ N}$$

when  $U_1 = 19 \text{ kV}$ .

Thus, under the influence of electrodynamic repulsion forces ( $F'_{e.d.r} = 41.3 \text{ N} < F_c = 90 \text{ N}$  and

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

$F_{e.d.r}'' = 71.73 \text{ N} < F_c = 90 \text{ N}$ ) the 7SP1 contactor contacts will not be disconnected, but the contact pressure is significantly reduced, leading to a substantial increase in contact resistance, instant increase in contact energy losses and therefore to increased contact fusion.

However the electrodynamic repulsion force  $F_{e.d.r}''' = 96.5 \text{ N} > F_c = 90 \text{ N}$  and the contactor 7SP1 can disconnect liberally, bearing SC current. Thus a powerful electric arc arises that first of all will fuse the contacts. It should be noted that the scheme does not provide the circuit breaking by the contactors 1SVAD8 and 7SP1 in current. Given that on the electric locomotives ChS8 and ChS4 the currents  $i_{sh}'$ ,  $i_{sh}''$ ,  $i_{sh}'''$  are equal to several thousand amperes, it can be stated that for the time  $t = 0.08 \text{ sec}$  [2] (until the main switch deenergizes the circuit of the electric locomotive) the fusion process will pass its active phase. The fused metal, spraying in all directions, can cause a fire in the chamber, where contactors 1SVAD8 and 7SP1 are mounted.

Let us consider the effect of the contactor contacts pressure on the value of the electrodynamic repulsion forces at SC in the heating circuit. For example, we consider SC at  $U_1 = 25 \text{ kV}$ , when

$$\alpha_0 - \varphi_c = \frac{\pi}{2}.$$

Contactor 1SVAD8:  $i_{sh} = i_{sh}'' = 5239.8 \text{ A}$ . When  $F_c = 80 \text{ N}$  according to (6):

$$r_0 = \sqrt{80/\pi \cdot 303 \cdot 10^2} = 0.029 \text{ cm}.$$

$$F_{e.d.r} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 5239.8^2 \ln\left(\frac{3}{2 \cdot 0.029}\right) = 21.6 \text{ N}.$$

When  $F_c = 100 \text{ N}$

$$r_0 = \sqrt{100/\pi \cdot 303 \cdot 10^2} = 0.032 \text{ cm}.$$

$$F_{e.d.r} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 5239.8^2 \ln\left(\frac{3}{2 \cdot 0.032}\right) = 21.07 \text{ N}.$$

Thus ensuring of the maximum allowable pressure force  $F_c = 100 \text{ N}$  during operation of the contactor 1SVAD8 reduces the electrodynamic contact repulsion force  $F_{e.d.r}$  at SC in the heating circuit by  $\frac{21.6 - 21.07}{21.6} \cdot 100 \% = 2.45 \%$  compared to the

value  $F_{e.d.r}$  at the minimum allowable force  $F_c = 80 \text{ N}$ .

Contactor 7SP1:  $i_{sh} = i_{sh}'' = 9313.4 \text{ A}$ . When  $F_c = 90 \text{ N}$  according to (6):

$$r_0 = \sqrt{90/\pi \cdot 505 \cdot 10^2} = 0.024 \text{ cm}.$$

$$F_{e.d.r} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 9313.4^2 \ln\left(\frac{3}{2 \cdot 0.024}\right) = 71.3 \text{ N}$$

When  $F_c = 120 \text{ N}$

$$r_0 = \sqrt{120/\pi \cdot 505 \cdot 10^2} = 0.027 \text{ cm}.$$

$$F_{e.d.r} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 9313.4^2 \ln\left(\frac{3}{2 \cdot 0.027}\right) = 69.5 \text{ N}.$$

Thus ensuring of the maximum allowable pressure force  $F_c = 120 \text{ N}$  during operation of the contactor 7SP1 reduces the electrodynamic contact repulsion force  $F_{e.d.r}$  at SC in the heating circuit by  $\frac{71.3 - 69.5}{69.5} \cdot 100 \% = 2.59 \%$  compared to the value  $F_{e.d.r}$  at the minimum allowable force  $F_c = 90 \text{ N}$ . That is to say, both for contactor 1SVAD8 and for contactor 7SP1 ensuring of the maximum allowable pressure force  $F_c$  during operation does not significantly affect the value  $F_{e.d.r}$  compared to the case when  $F_c$  has the minimum allowable value.

## Findings

Taking the contactors 1SVAD8 (locomotive ChS8) and 7SP1 (locomotive ChS4) as an example, the authors conducted the calculations and found that the peak pressure force increases the currents  $I_d$  and  $I_{fs}$  for these contactors by 11.8 %; 15.5 %; 11.8 %; and 15.4 % respectively (compared with the specified currents at the minimum pressure force). Influenced by  $F_{e.d.r}$  the pressure force of contacts for 1SVAD8 contactor decreased by 13.8–31.8 %, and for 7SP1 contactor the value  $F_{e.d.r}$  may be greater than the pressure force; this can lead to spontaneous shutdown of the closed contactor that is not provided by the control circuit. Ensuring during operation the maximum allowable pressure force of the contacts  $F_c$  slightly affects the value  $F_{e.d.r}$ , compared with the case

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

when  $F_c$  has the minimum permissible value (in event of a fault in the heating circuit  $F_{e.d.r}$  for contactors 1SVAD8 and 7SP1 is reduced by only 2.45 % and 2.59 % respectively).

### Originality and practical value

The paper for the first time presented a quantitative assessment of influence of contactor contact pressure in power circuits of electric stock on their plastic deformation and fusing using the proposed engineering method.

The results obtained during the research allow solving the problem for developing measures aimed to improve the reliability of the heating circuits of electric locomotives ChS8 and ChS4. The proposed method of determining  $I_d$  and  $I_{fs}$  can be used to quantify the influence of pressure of the main electric contacts mounted in power circuits of electric stock of all series, if during the operation there are cases of plastic deformation, fusing, welding of such contacts, in order to improve the reliability of power circuits.

### Conclusions

1. The proposed method of determining the influence of the contact pressure of contactors in the power circuits of electric stock on their plastic de-

formation and fusing can be used for all series of electric locomotives and trains.

2. Ensuring the maximum allowable pressure force during operation of the contactors 1SVAD8 and 7SP1 increases the value of current that does not cause plastic deformation of contacts, respectively by 11.8 % and 15.5 %, compared with the value of this current at the minimum allowable value of the pressure force. Herewith the fusion current of the contacts increases respectively by 11.8 % and 15.4 %.

3. The electrodynamic contact repulsion forces during SC in the heating circuits of the electric locomotives ChS8 (contactor 1SVAD8) at the contact network voltage of 19 kV, 25 kV, 29 kV are respectively equal to 12.4 N, 21.5 N, 28.6 N, which leads to a significant increase in contact resistance, instant increase in contact energy losses and therefore to increased contact fusing. These forces in the heating circuit of the electric locomotives ChS4 (contactor 7SP1) are equal to 41.4 N (at 19 kV), 71.73 N (at 25 kV) and at 29 kV the repulsion force is 96.5 N, that is more than the minimum allowable pressure force of 90 N. Therefore, the contactor 7SP1 can disconnect liberally, bearing SC current, and that is not envisaged by the scheme.

4. The results of the research can be used in the development of measures to improve the reliability of power circuits of the electric stock.

### LIST OF REFERENCE LINKS

1. Дослідження процесу короткого замикання у колі опалення електровоза ЧС8 / Л. В. Дубинець, О. О. Карзова, О. Л. Маренич, Є. Р. Сушкевич // Гірни. електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. / Нац. гірн. ун-т. – Дніпропетровськ, 2011. – № 86. – С. 159–167.
2. Дослідження та розробка заходів щодо підвищення надійності захисту кіл опалення пасажирських електровозів змінного струму : звіт про НДР / Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна ; кер. Дубинець Л. В. ; вик. : Устименко Д. В., Маренич О. О. – Дніпропетровськ, 2010. – 44 с. – Бібліогр.: с. 42. – № ДР 0110U006290.
3. Дубинець, Л. В. Електричні машини. Трансформатори. Асинхронні машини : навч. посібник для вузів / Л. В. Дубинець, О. І. Момот, О. Л. Маренич. – Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2004. – 208 с.
4. Дугостойкий электроконтактный материал на основе меди для электроаппаратуры тягового подвижного состава / Л. А. Тимофеева, В. С. Морозов // Информ.-керуючі системи на залізн. трансп. – 2015. – № 6. – С. 37–41. doi: 10.18664/ikszt.v0i6.59967.
5. Загирняк, М. В. Электрические аппараты : учеб. пособие / М. В. Загирняк, Н. И. Кузнецов. – Кременчуг : Кременчуг. гос. политехн. ун-т, 2005. – 319 с.
6. Захарченко, Д. Д. Тяговые электрические аппараты : учеб. для вузов / Д. Д. Захарченко. – Москва : Транспорт, 1991. – 247 с.
7. Клименко, Б. В. Электричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс : навч. посібник / Б. В. Клименко. – Харків : Точка, 2012. – 340 с.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

8. Лапшин, Е. В. Электрические аппараты и цепи пассажирских вагонов / Е. В. Лапшин // Вагонный парк. – 2013. – № 6. – С. 14–21.
9. Маренич, О. О. Вплив відхилень параметрів привода електромагнітних контакторів електрорухомого складу від їх номінальних значень на надійність роботи контакторів / О. О. Маренич // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. 26. – С. 60–62.
10. Муравьев, Д. В. Анализ потерь мощности в электромагнитных контакторах типа МК электровозов постоянного и переменного тока / Д. В. Муравьев // Транспорт Урала. – 2016. – № 1 (48). – С. 46–52. doi: 10.20291/1815-9400-2016-1-46-52.
11. Муха, А. М. Підвищення надійності гібридних тягових електричних апаратів / А. М. Муха // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта : тез. докл. 73 Междунар. науч.-практ. конф. (23.05–24.05.2013) / Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна ; Науч.-произв. предприятие «Укртранскад». – Днепропетровск, 2013. – С. 129–130.
12. Нагрев силовых электрических контактов ударными токами короткого замыкания / А. М. Чалый, В. А. Дмитриев, М. А. Павлейно, О. М. Павлейно // Электронная обработка материалов. – 2013. – Т. 49, № 5. – С. 81–88.
13. Описание приборов «А» ЧС8. Комплект эксплуатационной документации к электровозу ЧС-8. – Киев, 2010. – 156 с.
14. Основы теории электрических аппаратов : учебник / под ред. И. С. Таева. – Москва : Высш. шк., 1987. – 352 с.
15. Пассажирские электровозы ЧС4 и ЧС4т / В. А. Каптелкин, Ю. В. Колесин, И. П. Ильин [и др.]. – 2-е изд., доп. и перераб. – Москва : Транспорт, 1975. – 384 с.
16. Таев, И. С. Электрические аппараты автоматики и управления : учеб. пособие для ВТУЗов / И. С. Таев. – Москва : Высш. шк., 1975. – 224 с.
17. Электрические и электронные аппараты : учебник : в 2 т. / под ред. А. Г. Годжелло, Ю. К. Розанова. – Москва : Изд. центр «Академия», 2010. – Т. 1 : Электромеханические аппараты. – 352 с.
18. A Novel Breaking Strategy for Electrical Endurance Extension of Electromagnetic Alternating Current Contactors / Z. Wu, G. Wu, C. Chen [et al.] // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – 2016. – Vol. 6. – Iss. 5. – P. 749–756. doi: 10.1109/TCPMT.2016.2542101.
19. Load influence on the response of AC-Contactors under power quality disturbances / A. Honrubia-Escribano, E. Gómez-Lázaro, A. Molina-Garcia, S. Martín-Martínez // Intern. J. of Electrical Power & Energy Systems. – 2014. – Vol. 63. – P. 846–854. doi: 10.1016/j.ijepes.2014.06.056.
20. Pressman, A. I. Switching Power Supply Design / A. I. Pressman. – New York : McGraw-Hill, Inc., 1999. – 677 p.
21. Tunaboylu, B. Electrical Characterization of Test Sockets With Novel Contactors / B. Tunaboylu // IEEE Transactions on Device and Materials Reliability. – 2014. – Vol. 14. – Iss. 1. – P. 580–582. doi: 10.1109/tdmr.2012.2209888.
22. Sterl, N. Power relays. EH-Schrack Components AG / N. Sterl. – Vienna, Austria : Tyco Electronics Austria GmbH G, 1997. – 137 p.

О. Ю. БАЛІЙЧУК<sup>1\*</sup>, Л. В. ДУБИНЕЦЬ<sup>2</sup>, О. Л. МАРЕНИЧ<sup>3</sup>, Д. В. УСТИМЕНКО<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта baliichukaleksei@mail.ru, ORCID 0000-0003-0119-1446

<sup>2</sup>Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта mona.shelley@gmail.com, ORCID 0000-0003-0319-4544

<sup>3</sup>Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта mona.shelley@gmail.com, ORCID 0000-0003-3602-5851

<sup>4</sup>Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

## ВПЛИВ НАТИСНЕННЯ КОНТАКТІВ КОНТАКТОРІВ У СИЛОВИХ КОЛАХ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ НА ЇХ ПЛАСТИЧНУ ДЕФОРМАЦІЮ ТА ПЛАВЛЕННЯ

**Мета.** У роботі необхідно провести дослідження для отримання результатів, які дозволять кількісно оцінити вплив натиснення контактів контакторів у силових колах електрорухомого складу на значення найбільшого струму  $I_d$ , що не викликає пластичної деформації контактів; та на значення струму  $I_{пл}$  – початку плавлення контактів із урахуванням умов експлуатації. Тому такі дослідження з метою встановлення причин розплавлення контактів є актуальними. **Методика.** Запропоновано інженерний метод визначення струмів  $I_d$  та  $I_{пл}$  із урахуванням величини натиснення контактів, визначення електродинамічних сил відштовхування контактів  $F_{с.д.в.}$ , а також впливу натиснення на значення таких сил. **Результати.** На прикладі контакторів 1SVAD8 (електровоз ЧС8) та 7SP1 (електровоз ЧС4) після проведених авторами розрахунків встановлено, що забезпечення максимальної сили натиснення збільшує струми  $I_d$  та  $I_{пл}$  для вказаних контакторів на 11,8 %; 15,5 %; 11,8 %; та 15,4 % відповідно (в порівнянні з вказаними струмами при мінімальній допустимій силі натиснення). Під впливом  $F_{с.д.в.}$  сила натиснення контактів контактора 1SVAD8 зменшується на 13,8...31,8 %, а для контактора 7SP1 значення  $F_{с.д.в.}$  може стати більше за силу натиснення. Це може призвести до самовільного відключення контактора під струмом, що не передбачено схемою керування. Забезпечення при експлуатації максимальної допустимої сили натиснення контактів  $F_k$  незначно впливає на значення  $F_{с.д.в.}$ , у порівнянні з випадком, коли  $F_k$  має мінімальне допустиме значення (при короткому замиканні у колі опалення  $F_{с.д.в.}$  для контакторів 1SVAD8 та 7SP1 зменшується всього на 2,45 % та 2,59 % відповідно). **Наукова новизна.** Авторами вперше дана чисельна оцінка впливу натиснення контактів контакторів у силових колах електрорухомого складу на їх пластичну деформацію та плавлення з використанням запропонованого інженерного методу. **Практична значимість.** Отримані в ході досліджень результати дозволяють вирішувати задачу по розробці заходів щодо підвищення надійності роботи кіл опалення електровозів ЧС8 та ЧС4. Запропонований метод із визначення  $I_d$  та  $I_{пл}$  може бути використаний для кількісної оцінки впливу натиснення головних контактів електроапаратів, що стоять у силових колах електрорухомого складу всіх серій, якщо при експлуатації мають місце випадки пластичної деформації, плавлення, зварювання контактів цих апаратів із метою підвищення надійності роботи силових кіл.

**Ключові слова:** натиснення контактів; струм пластичної деформації; плавлення; сила натиснення; відштовхування; ударний струм; опір контактів

А. Ю. БАЛИЙЧУК<sup>1\*</sup>, Л. В. ДУБИНЕЦЬ<sup>2</sup>, О. Л. МАРЕНИЧ<sup>3</sup>, Д. В. УСТИМЕНКО<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Електротехніка і електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта baliichukaleksei@mail.ru, ORCID 0000-0003-0119-1446

<sup>2</sup>Каф. «Електротехніка і електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта mona.shelley@gmail.com, ORCID 0000-0003-0319-4544

<sup>3</sup>Каф. «Електротехніка і електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта mona.shelley@gmail.com, ORCID 0000-0003-3602-5851

<sup>4</sup>Каф. «Електротехніка і електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

## ВЛИЯНИЕ НАЖАТИЯ КОНТАКТОВ КОНТАКТОРОВ В СИЛОВЫХ ЦЕПЯХ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ИХ ПЛАСТИЧЕСКУЮ ДЕФОРМАЦИЮ И ПЛАВЛЕНИЕ

**Цель.** В работе необходимо провести исследование для получения результатов, которые позволят количественно оценить влияние нажатия контактов контакторов в силовых цепях электроподвижного состава на значение наибольшего тока  $I_d$ , который не вызывает пластичной деформации контактов; и на значение тока  $I_{пл}$  – начала плавления контактов с учетом условий эксплуатации.

**Методика.** Предложен инженерный метод определения токов  $I_d$  и  $I_{пл}$  (с учетом значения давления контактов), электродинамических сил отталкивания контактов  $F_{э.д.о.}$ , а также влияния давления на значения таких сил. **Результаты.** На примере контакторов 1SVAD8 (электровоз ЧС8) и 7SP1 (электровоз ЧС4) после проведенных авторами расчетов установлено, что обеспечение максимальной силы давления увеличивает токи  $I_d$  и  $I_{пл}$  для указанных контакторов на 11,8 %; 15,5 %; 11,8 %; 15,4 % соответственно (в сравнении с указанными токами при минимально допустимой силе давления). Под влиянием  $F_{э.д.о.}$  сила давления контактов контактора 1SVAD8 уменьшается на 13,8...31,8 %, а для контактора 7SP1 значение  $F_{э.д.о.}$  может стать больше силы давления. Это может привести к самопроизвольному отключению контактора под током, что не предусмотрено схемой управления. Обеспечение при эксплуатации максимальной допустимой силы давления контактов  $F_k$  несущественно влияет на значение  $F_{э.д.о.}$ , в сравнении со случаем, когда  $F_k$  имеет минимальное допустимое значение (при коротком замыкании в цепи отопления  $F_{э.д.о.}$  для контакторов 1SVAD8 и 7SP1 уменьшается всего на 2,45 % и 2,59 % соответственно). **Научная новизна.** Авторами впервые дана количественная оценка влияния давления контактов контакторов в силовых цепях электроподвижного состава на их пластическую деформацию и плавление с использованием предложенного инженерного метода. **Практическая значимость.** Полученные при исследовании результаты позволяют решать задачу разработки мероприятий по повышению надежности работы цепей отопления электровозов ЧС8 та ЧС4. Предложенный метод по определению  $I_d$  и  $I_{пл}$  может быть использован для количественной оценки влияния давления главных контактов электроаппаратов, которые стоят в силовых цепях электроподвижного состава всех серий, если при эксплуатации имеют место случаи пластической деформации, плавления, сваривания контактов этих аппаратов с целью повышения надежности работы силовых цепей.

**Ключевые слова:** давление контактов; ток пластической деформации; плавление; сила давления; отталкивание; ударный ток; сопротивление контактов

### REFERENCES

1. Dubynets, L. V., Karzova, O. O., Marenych, O. L., & Sushkevych, Y. R. (2011). Doslidzhennia protsesu korotkoho zamykannia u koli opalennia elektrovoza ChS8. *Mining Electrical Engineering and Automation*, 86, 159-167.
2. Dubynets, L. V., Ustymenko, D. V., & Marenych, O. O. (2010). *Doslidzhennia ta rozrobka zakhodiv shchodo pidvyshchennia nadiinosti zakhystu kil opalennia pasazhyrskykh elektrovoziv zminnoho strumu*. [Manuscript]. No. DR 0110U006290. Dnipropetrovsk National University of Railway Transport, Dnipropetrovsk, Ukraine.
3. Dubynets, L. V., Momot, O. I., & Marenych, O. L. (2004). *Elektrychni mashyny. Transformatory. Asynkhronni mashyny*. Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport Press.
4. Timofeyeva, L. A., & Morozov, V. S. (2015). Arc-resistant copperbased electrocontact material for electrical equipment of traction rolling stock. *Informacijno-kerujuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, 6, 37-41. doi: 10.18664/ikszt.v0i6.59967
5. Zagirnyak, M. V., & Kuznetsov, N. I. (2005). *Elektricheskiye apparaty*. Kremenchuk: Kremenchuk State Polytechnic University Press.
6. Zakharchenko, D. D. (1991). *Tyagovyie elektricheskiye apparaty*. Moscow: Transport.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

7. Klymenko, B. V. (2012). *Elektrychni aparaty. Elektromekhanichna aparatura komutatsii, keruvannia ta zakhystu. Zahalnyi kurs*. Kharkiv: Tochka.
8. Lapshin, Y. V. (2013). Elektricheskiye apparaty i tsepi passazhirskikh vagonov. *Car Fleet*, 6, 14-21.
9. Marenych, O. O. (2009). The deviations effect of the parameters of the actuator of the electric rolling stock electromagnetic contactors from their nominal values on the reliability of contactors. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 26, 60-62.
10. Muravyov, D. V. (2016). Analysis of power losses in magnetic contactors of MK-type DC and AC locomotives. *Transport of the Urals*, 1(48), 46-52. doi: 10.20291/1815-9400-2016-1-46-52
11. Mukha, A. M. (2013). A reliability raising of hybrid traction electric apparatus. *Abstracts of the 73 International Scientific and Practical Conference "The Problems and Prospects of Railway Transport Development"*, May 23-24, 2013, Dnipropetrovsk. 129-130.
12. Chalyi, A. M., Dmitriyev, V. A., Pavlieino, M. A., & Pavlieino, O.M. (2013). Nagrev silnotochnykh elektricheskikh kontaktov udarnymi tokami korotkogo замыканиya. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 49(5), 81-88.
13. *Opisaniye priborov "A" ChS8: Komplekt ekspluatatsionnoy dokumentatsii k elektrovozu ChS-8*. (2010). Kyiv.
14. Taev, I. S. (Ed). (1987). *Osnovy teorii elektricheskikh apparatov*. Moscow: Vysshaya shkola.
15. Kaptelkin, V. A., Kolesin, Y. V., Ilin, I. P., Potapov, A. S., & Mokhovikov, D. I. (1975). *Passazhirskiyelektrovozy ChS4 i ChS4t* (2nd ed.). Moscow: Transport.
16. Taev, I. S. (1975). *Elektricheskiye apparaty avtomatiki i upravleniya*. Moscow: Vysshaya shkola.
17. Godzhello, A. G., & Rozanov, Y. K. (Eds). (2010). *Elektricheskiye i elektronnyye apparaty: Elektromekhanicheskiye apparaty* (Vol. 1). Moscow: Academia.
18. Wu, Z., Wu, G., Chen, C., Fang, Y., Pan, L., & Huang, H. (2016). A Novel Breaking Strategy for Electrical Endurance Extension of Electromagnetic Alternating Current Contactors. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 6(5), 749-756. doi: 10.1109/TCPMT.2016.2542101
19. Honrubia-Escribano, A., Gómez-Lázaro, E., Molina-García, A., & Martín-Martínez, S. (2014). Load influence on the response of AC-Contactors under power quality disturbances. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 63, 846-854. doi: 10.1016/j.ijepes.2014.06.056
20. Pressman, A. I. (1999). *Switching Power Supply Design*. New York, USA: McGraw-Hill, Inc.
21. Tunaboyle, B. (2014). Electrical Characterization of Test Sockets With Novel Contactors. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 14(1), 580-582. doi: 10.1109/tdmr.2012.2209888
22. Sterl, N. (1997). *Power relays. EH-Schrack Components AG*. Vienna, Austria: Tyco Electronics Austria GmbH.

*Prof. A. M. Mukha, D. Sc. (Tech.), (Ukraine); Prof. F. P. Shkrabets, D. Sc. (Tech.), (Ukraine) recommended this article to be published)*

Accessed: Dec. 14, 2016

Received: March 23, 2017



## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 625.113:514.18

В. Д. БОРИСЕНКО<sup>1\*</sup>, С. А. УСТЕНКО<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Комп'ютерна інженерія», Миколаївський національний університет імені В. О. Сухомлинського, вул. Нікольська, 24, Миколаїв, Україна, 54030, тел. +38 (0512) 71 30 25, тел. +38 (063) 304 75 26, ел. пошта borisenko.valery@gmail.com, ORCID 0000-0002-0857-0708

<sup>2\*</sup>Каф. «Комп'ютерна інженерія», Миколаївський національний університет імені В. О. Сухомлинського, вул. Нікольська, 24, Миколаїв, Україна, 54030, тел. +38 (063) 479 90 61, ел. пошта ustenko.s.a@gmail.com, ORCID 0000-0003-4968-1233

### МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНОЇ КРИВОЇ НА ОБМЕЖЕНІЙ ДІЛЯНЦІ МІСЦЕВОСТІ

**Мета.** У статті необхідно розглянути подальший розвиток методу геометричного моделювання перехідних кривих, які влаштовуються між прямолінійними та круговими ділянками залізничних колій та будуються на місцевостях, рельєф яких обумовлює певні обмеження на розміри перехідних кривих залізничного шляху. **Методика.** Рівняння перехідної кривої береться в параметричному вигляді, де параметром виступає довжина дуги модельованої кривої. Вихідними даними при моделюванні використовуються координати початкової точки перехідної кривої та кут нахилу в ній дотичної, радіус кола кругової ділянки та параметр, який є обмеженням при розміщенні ділянки залізничного шляху. Перехідна крива моделюється за умови, коли розподіл її кривини від довжини дуги – натурального параметра – підпорядковується кубичній залежності. Ця залежність містить чотири невідомих коефіцієнти, невідомою також є довжина дуги. Невідомі коефіцієнти кубичної залежності, довжина дуги перехідної кривої, координати кінцевої її точки, кут нахилу в ній дотичної визначаються в процесі моделювання перехідної кривої. Застосування граничних умов, положень диференціальної геометрії щодо розподілу кута дотичної до модельованої кривої (від початкової до кінцевої точок перехідної кривої та розрахунку координат кінцевої точки кривої) дозволяє звести задачу моделювання перехідної кривої до визначення довжини дуги цієї кривої. Безпосередньо довжина перехідної кривої знаходиться в процесі мінімізації відхилення центра кола кругової ділянки шляху від його поточного значення, яке виходить під час пошуку довжини дуги. **Результати.** Проведення обчислювального експерименту довело можливість моделювання перехідної кривої між прямолінійними та круговими рейками залізничного шляху на ділянці місцевості обмеженого розміру. **Наукова новизна.** Авторами розроблено метод геометричного моделювання перехідних кривих між прямолінійними та круговими ділянками залізничного шляху в умовах обмежених розмірів місцевості, на якій прокладаються рейки. Перехідна крива подається в натуральній параметризації зі застосуванням кубичної залежності розподілу кривини від довжини її дуги. **Практична значимість.** Запропонований метод моделювання перехідних кривих в умовах обмежених розмірів місцевості дозволяє з високою точністю отримувати ці криві в широкому діапазоні варіювання геометричних параметрів прямолінійних і кругових ділянок залізничної колії та параметра, який виступає обмеженням при моделюванні перехідної кривої. Метод можна рекомендувати в практику будівництва залізничних колій.

**Ключові слова:** геометричне моделювання; перехідна крива; обмежена ділянка; кривина кривої; кубічна залежність розподілу кривини

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

**Вступ**

У промислово розвинених країнах, до яких належить і Україна, залізничний транспорт належить до сфери матеріального виробництва, своєрідною продукцією якого є пасажирські, вантажні та змішані вантажо-пасажирські перевезення. За будь-яких обставин безпека руху залізничного транспорту є одним з найважливіших питань його експлуатації. При цьому особливі вимоги висуваються до геометрії залізничної колії.

Улаштування рейкової колії на кривих її ділянках має низку особливостей, зумовлених специфікою взаємодії колії і рухомого складу, змінами конфігурації колії на криволінійних ділянках і наявністю так званих перехідних кривих, які з'єднують кругові криві з прилягаючими прямими рейками або з'єднують кругові криві різних радіусів кривини. Відомо, що призначенням перехідних кривих є забезпечення плавної зміни кривини в місцях з'єднання ділянок колії з різними сталими кривинами рейок.

Проектантами залізничної колії особлива увага приділяється улаштуванню перехідних ділянок при високих швидкостях руху потягів, застосуванні колійних кривих малого радіуса, при русі рухомого складу великої ваги та значної бази між колесами. У сучасних умовах, коли швидкість пасажирських потягів сягає 200 км/год і більше, вимоги до якості перехідних кривих суттєво зростають.

Підвищення швидкості руху поїздів, їх вантажопідйомності та забезпечення безпеки руху на криволінійних ділянках колії значною мірою визначається геометричною досконалістю перехідних кривих цих ділянок. Геометричне моделювання перехідних кривих залізничних колій є важливим науково-технічним завданням.

Наукові дослідження в галузях прикладної та обчислювальної геометрії, комп'ютерної графіки останнім часом досягли значних успіхів у сфері аналітичного подання обводів і поверхонь різних технічних деталей та їх візуалізації за допомогою ЕОМ. Це дає можливість сподіватися, що застосування досягнень цієї галузі науки до геометричного моделювання перехідних кривих залізничної колії дозволить підвищити якість їх проектування і сприятиме

підвищенню безпеки руху на цих дуже важливих і одночасно небезпечних ділянках шляху.

Таким чином, розв'язання задачі, яка поставлена в цій роботі, а саме: вдосконалення методів геометричного моделювання перехідних кривих залізничної колії, є актуальним, воно має не тільки важливе теоретичне, й практичне значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основи теорії перехідних кривих на залізницях були закладені на початку минулого століття і набули подальшого розвитку в роботах вітчизняних і закордонних дослідників [1, 4, 8, 9, 12, 15–19, 22–25]. У цих роботах пропонується перехідні криві подавати клотоїдами, кардіоїдами, радіоїдами, параболоми різних степенів, лемніскадами Бернуллі, мажорантними, пружними, швидкісними та іншими математичними кривими.

У літературі приділено достатньо уваги питанню моделювання кривих ліній для різних практичних додатків, у тому числі і тих, які застосовуються при описі кривих, придатних для подання залізничної колії [2, 3, 11, 15, 20]. Автори цих робіт застосовують явну, неявну, параметричну форми опису кривих.

Моделюванню криволінійних обводів у натуральній параметризації присвячені публікації [3, 11, 13, 14]. У роботах [3, 14] розглянуті питання геометричного моделювання кривих ліній з кубічним розподілом кривини в залежності від довжини дуги.

Останніми роками в залізничній справі значна увага приділяється розробці проектів високошвидкісних залізничних шляхів. Про це свідчать, зокрема, наступні публікації вітчизняних науковців [5–7, 10]. Як вище відмічалось, підвищення швидкісного режиму руху поїздів вимагає застосування більш ретельних підходів до геометричного моделювання перехідних кривих, де одним із основних чинників є розподіл кривини кривої. Саме це послужило основним мотивом для розробки нового методу моделювання перехідних ділянок залізничних шляхів із застосуванням натуральної параметризації кривих, що їх подають.

**Мета**

Метою цієї статті є подальший розвиток методу геометричного моделювання перехідних

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

кривих залізничних колій, які будуються на місцевості, рельєф якої зумовлює певні обмеження на геометрію перехідної кривої, яка влаштовується між прямолінійною та круговою ділянками залізничної колії.

Зрозуміло, що питання моделювання перехідних кривих не є новим. Його вирішенню присвячено достатньо публікацій як у вітчизняній, так і зарубіжній літературі. Автори багатьох робіт, які розглядають це дуже важливе для залізничного транспорту питання, використовують різні математичні криві для забезпечення плавної, не стрибкоподібної зміни кривини в місцях переходу від прямолінійних ділянок шляхів до кругових.

Ця робота є продовженням досліджень, які виконуються авторами з геометричного моделювання кривих ліній із застосуванням заданих законів розподілу кривини та заданими значеннями кривини в граничних точках [3, 11, 13–15].

### Методика

У практиці будівництва залізничних шляхів непоодинокі випадки, коли у зв'язку з рельєфом місцевості або через інші які-небудь причинами необхідно прокладати колію на обмеженій за розмірами ділянці місцевості. Під обмеженням будемо розуміти наявну в розпорядженні проєктанта відстань від початку перехідної кривої на прямолінійній ділянці колії до дотичної, проведеної до кругової ділянки шляху. При цьому дотична до кругової ділянки проводиться перпендикулярно до передбачуваного продовження прямолінійної рейки шляху (рис. 1).

Автори цієї роботи пропонують моделювати плоскі перехідні криві з використанням їх натуральної параметризації, яка передбачає наявність залежностей декартових координат модельованої кривої від довжини її дуги.

Побудову перехідної ділянки шляху здійснюватимемо з використанням кривої, кривина якої описується кубічною залежністю від довжини її дуги  $s$ :

$$k(s) = as^3 + bs^2 + cs + d. \quad (1)$$

Коефіцієнти  $a$ ,  $b$ ,  $c$  і  $d$  цієї залежності визначаються в процесі моделювання кривої.

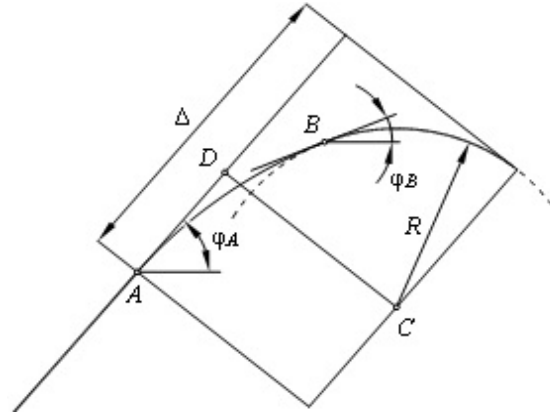


Рис. 1. До устрою перехідної кривої

Fig. 1. To the structure of the transition curve

При розв'язанні питання визначення невідомих коефіцієнтів залежності (1) за граничні умови приймається, що в початковій точці перехідної кривої її кривина дорівнює нулю, а в кінцевій точці – величині оберненій радіусу кругової ділянки шляху. Також приймається, що в початковій і кінцевій точках перехідної кривої похідна від її кривини по довжині дуги дорівнює нулю.

За означених граничних умов, можна встановити, що коефіцієнти  $c$  і  $d$  мають дорівнювати нулю.

Коефіцієнти  $a$  і  $b$  визначаються за умови, що відомі координати кінцевої точки прямолінійної ділянки шляху, кут його нахилу до горизонтальної осі, а також радіус кола, що описує кругову ділянку шляху.

Відомою є також і величина  $\Delta$ , яка обумовлюється обмеженими розмірами ділянки місцевості, де мають бути прокладені рейки залізничного шляху.

Відзначимо, що для побудови перехідної кривої необхідно, крім коефіцієнтів  $a$  і  $b$ , також знати довжину дуги  $S$  цієї кривої.

З диференціальної геометрії відомо, що диференціал кута, утвореного між дотичною до кривої та віссю абсцис, визначається добутком диференціала довжини дуги на її кривину

$$d\varphi = k(s)ds,$$

де  $k(s)$  – кривина кривої.

Інтегруванням цього виразу можна визначити залежність розподілу кута нахилу дотичної до кривої від довжини її дуги

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

$$\varphi(s) = \varphi(0) + \int_0^s k(s) ds,$$

де  $\varphi(0)$  – кут нахилу дотичної в початковій точці кривої, тобто в точці  $A$  (див. рис. 1).

З урахуванням граничних умов, які застосовуються до закону розподілу кривини для нашого випадку, остаточно отримаємо наступну залежність розподілу кута нахилу дотичної до кривої від її довжини:

$$\varphi(s) = \varphi_A + \frac{s^3}{RS^2} \left( 1 - \frac{s}{2S} \right), \quad (2)$$

де  $S$  – довжина дуги перехідної кривої між точками  $A$  і  $B$ , яка на початку моделювання є величиною невідомою.

Зазначимо, що на цьому кроці моделювання також невідомими є координати точки  $B$ . Але із залежності (2) можна при  $s = S$  знайти вираз для обчислення кута в кінцевій точці перехідної кривої:

$$\varphi_B = \varphi_A + \frac{S}{2R}. \quad (3)$$

Координати точки  $B$  – кінцевої точки перехідної кривої, яка подається в натуральній параметризації, визначаються за виразами:

$$\begin{aligned} x_B &= x_A + \int_0^S \cos \varphi(s) ds; \\ y_B &= y_A + \int_0^S \sin \varphi(s) ds. \end{aligned} \quad (4)$$

Аналізуючи вирази (2)–(4) можна прийти до висновку, що в них єдиною невідомою величиною є довжина дуги перехідної кривої  $S$ .

Довжину цієї дуги можна визначити числовим методом, зокрема, методом мінімізації функціонала, за який візьмемо відстань між центром  $C$  кола кругової ділянки та точкою  $C_0$ , яка визначається тимчасово під час роботи алгоритму мінімізації. Вказаний функціонал може бути записаним наступним чином

$$f = \sqrt{(x_C - x_{C'})^2 + (y_C - y_{C'})^2}. \quad (5)$$

Для мінімізації цього функціонала в роботі застосовано високоефективний алгоритм, запропонований Хуком–Дживсом [21].

Отже, задавшись деякою величиною довжини перехідної кривої, можна визначити за формулами (4) координати деякої проміжної точки  $B$ . За перше наближення довжини перехідної кривої береться частка від величини обмеження  $\Delta$ . Координати точки  $C$  – центра кола кругової ділянки визначаються за формулами:

$$\begin{aligned} x_C &= x_B + R \sin \varphi_B; \\ y_C &= y_B - R \cos \varphi_B. \end{aligned}$$

З іншого боку ці координати можна розраховувати за наступними виразами:

$$\begin{aligned} x_{C'} &= (y_A - y_C) \sin \varphi_A \cos \varphi_A + x_A \cos^2 \varphi_A + \\ &+ x_C \sin^2 \varphi_A + (\Delta - R) \cos \varphi_A; \\ y_{C'} &= y_C + (x_{C'} - x_C) \operatorname{tg} \varphi_A. \end{aligned}$$

На підставі запропонованого підходу до геометричного моделювання перехідних кривих на обмеженій ділянці розроблено програму розрахунків і візуалізації отриманих результатів на екрані ПЕОМ.

### Результати

На рис. 2 у графічному вигляді наведено результати розв'язання тестової задачі, пов'язаної з моделюванням перехідної кривої на обмеженій ділянці. Прямолинійна ділянка шляху має кут нахилу до осі  $x$ , який дорівнює  $60^\circ$ ; вона закінчується в точці  $A$ . Необхідно побудувати перехідну криву між прямолинійною та круговою ділянками колії. Радіус кругової ділянки дорівнює 500 м. Обмеженням для моделювання перехідної кривої виступає відрізок  $DM$ , який відповідає параметру  $\Delta$  (див. рис. 1). У розглянутому прикладі  $\Delta = 850$  м.

Результатом моделювання є побудована перехідна крива, яка починається в точці  $A$  і закінчується в знайденій точці  $B$ . Були розраховані координати точки  $C$ , яка є центром кругової ділянки шляху. Відрізок  $BE$ , дотичний до кола кругової ділянки, є додатковим візуальним підтвердженням того, що відрізок  $CB$ , проведений із точки  $B$  (точки початку кругової ділянки), є перпендикулярним до дотичної  $BE$ .

$$x_{C'} = 629,3143 \text{ м}, y_{C'} = 40,8105 \text{ м}.$$

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

7. Курган, М. Б. Перебудова кривих для впровадження швидкісного руху пасажирських поїздів / М. Б. Курган, М. А. Гусак, Н. П. Хмелевська // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 40. – С. 90–97.
8. Лагута, В. В. Удосконалення проектування кривих залізничної колії в плані : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.06 / Лагута Василь Васильович ; Дніпропетр. держ. техн. ун-т залізн. трансп. – Дніпропетровськ, 2002. – 18 с.
9. Лазарян, В. А. О форме переходной кривой (Теоретические основы выбора рациональной формы переходной кривой) / В. А. Лазарян // Динамика транспортных средств. – Киев : Наук. думка, 1985. – С. 10–24.
10. Миронов, В. С. Радиусы круговых кривых для скоростных железных дорог при использовании вагонов с наклоном кузова / В. С. Миронов, Т. А. Руденко // Вестн. трансп. Поволжья. – 2014. – № 3 (45). – С. 44–50.
11. Моделювання плоских кривих у натуральній параметризації / В. Борисенко, О. Агарков, К. Палько, М. Палько // Геометричне моделювання та інформаційні технології. – 2016. – № 1. – С. 21–27.
12. Проценко, А. И. Методика расчета на ЭВМ сложных железнодорожных кривых при текущем содержании пути / А. И. Проценко, В. Б. Бредюк // Сб. тр. Новосиб. ин-та инженеров трансп. – Новосибирск, 1971. – Вып. 130. – С. 48–53.
13. Устенко, С. А. Геометричне моделювання кривих ліній із заданою кривиною в граничних точках / С. А. Устенко, С. В. Діданов, О. Ю. Агарков // Прикладна геометрія та інженерна графіка : міжвідом. наук.-техн. зб. / Київ. держ. техн. ун-т буд-ва і архітектури. – Київ, 2011. – Вип. 87. – С. 404–409.
14. Устенко, С. А. Дослідження кривих ліній, заданих кубічним розподілом кривини / С. А. Устенко, С. В. Діданов, О. Ю. Агарков // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 2 (50). – С. 164–172. doi: 10.15802/stp2014/23797.
15. Устенко, С. А. Метод побудови просторової перехідної кривої / С. А. Устенко, С. В. Діданов // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 2 (44). – С. 124–128. doi: 10.15802/stp2013/11394.
16. Чернышев, М. А. Железнодорожный путь / М. А. Чернышев, З. Л. Крейнис. – Москва : Транспорт, 1985. – 302 с.
17. Шахунянц, Г. М. Проектирование железнодорожного пути / Г. М. Шахунянц. – Москва : Транспорт, 1972. – 140 с.
18. A numerical study of cubic parabolas on railway transition curves / T.-I. Shen, Ch.-H. Chang, K.-Yu. Chang, Ch.-Ch. Lu // J. of Marine Science and Technology. – 2013. – Vol. 21, No. 2. – P. 191–197. doi: 10.6119/JMST-012-0403-1.
19. Eliou, N. A new, simple and accurate transition curve type, for use in road and railway alignment design / N. Eliou, G. Kaliabetsos // European Transport Research Review. – 2014. – Vol. 6. – Iss. 2. – P. 171–179. doi 10.1007/s12544-013-0119-8.
20. Farin, G. Curves and surfaces for computer-aided geometric design: a practical guide / G. Farin. – 4<sup>th</sup> ed. – Academic Press Inc., 1997. – 447 p.
21. Hooke, R. "Direct Search" Solution of Numerical and Statistical Problems / R. Hooke, T. A. Jeeves // J. of the ACM. – 1961. – Vol. 8. – Iss. 2. – P. 212–229. doi: 10.1145/321062.321069.
22. Lipicnik, M. New form of Road/Railway Transition Curve / M. Lipicnik // J. of Transportation Engineering. – 1998. – Vol. 124. – Iss. 6. – P. 546–556. doi: 10.1061/(asce)0733-947x(1998)124:6(546).
23. Long, X.-Y. Dynamic analysis of railway transition curves / X.-Y. Long, Q.-C. Wei, F.-Y. Zheng // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: J. of Rail and Rapid Transit. – 2010. – Vol. 224. – Iss. 1. – P. 1–14. doi: 10.1243/09544097jrrt287.
24. Tari, E. A new transition curve with enhanced properties / E. Tari, O. Baykal // Canadian J. of Civil Engineering. – 2005. – Vol. 32. – Iss. 5. – P. 913–923. doi: 10.1139/l05-051.
25. Transition Curve Modelling with Kinematical Properties: Research on Log-Aesthetic Curves / A. Arslan, E. Tari, R. Ziatdinov, R. I. Nabiyev // Computer Aided Design & Applications. – 2014 – Vol. 11. – Iss. 5. – P. 509–517. doi: 10.1080/16864360.2014.902680.

В. Д. БОРИСЕНКО<sup>1\*</sup>, С. А. УСТЕНКО<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Комп'ютерна інженерія», Николаевский національний університет імені В. О. Сухомлинського,  
ул. Никольская, 24, Николаев, Украина, 54030, тел. +38 (0512) 71 30 25, тел. +38 (063) 304 75 26,  
эл. почта borisenko.valery@gmail.com, ORCID 0000-0002-0857-0708

<sup>2\*</sup>Каф. «Комп'ютерна інженерія», Николаевский національний університет імені В. О. Сухомлинського,  
ул. Никольская, 24, Николаев, Украина, 54030, тел. +38 (063) 479 90 61, эл. почта ustenko.s.a@gmail.com,  
ORCID 0000-0003-4968-1233

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОЙ КРИВОЙ НА ОГРАНИЧЕННОМ УЧАСТКЕ МЕСТНОСТИ

**Цель.** В статье необходимо рассмотреть дальнейшее развитие метода геометрического моделирования переходных кривых, которые размещаются между прямолинейными и круговыми участками железнодорожных путей и создаются на местностях, рельеф которых обуславливает определенные ограничения на размеры переходных кривых железнодорожного пути. **Методика.** Уравнение переходной кривой берется в параметрическом виде, где в качестве параметра указывается длина дуги моделируемой кривой. В качестве исходных данных при моделировании переходной кривой используются координаты начальной ее точки и угол наклона в ней касательной, радиус окружности круговой участка и параметр, который выступает в качестве ограничения при размещении участка железнодорожного пути. Переходная кривая моделируется при условии, что распределение ее кривизны от длины дуги – натурального параметра – описывается кубической зависимостью. Эта зависимость содержит четыре неизвестных коэффициента, неизвестной также является длина дуги. Коэффициенты кубической зависимости и длина дуги переходной кривой, координаты ее конечной точки, угол наклона в ней касательной определяются в процессе моделирования переходной кривой. Применение граничных условий, положений дифференциальной геометрии применительно к распределению угла наклона касательной к моделируемой кривой (от начальной до конечных точек переходной кривой и расчета координат конечной точки кривой) позволяет свести задачу моделирования переходной кривой к определению длины дуги этой кривой. Непосредственно длина переходной кривой находится в процессе минимизации отклонения центра окружности кругового участка пути от его текущего значения, получаемого при поиске длины дуги. **Результаты.** Проведенный вычислительный эксперимент доказал возможность моделирования переходной кривой между прямолинейными и круговыми рельсами железнодорожного пути на участке местности ограниченного размера. **Научная новизна.** Авторами разработан метод геометрического моделирования переходных кривых между прямолинейными и круговыми участками железнодорожного пути в условиях ограниченных размеров местности, на которой прокладываются рельсы. Переходная кривая представляется в натуральной параметризации с применением кубической зависимости распределения кривизны от длины ее дуги. **Практическая значимость.** Предложенный метод моделирования переходных кривых в условиях ограниченных размеров местности позволяет с высокой точностью получать эти кривые в широком диапазоне варьирования геометрических параметров прямолинейных и круговых участков железнодорожного пути и параметра, который выступает ограничением при моделировании переходной кривой. Метод можно рекомендовать в практику строительства железнодорожных путей.

**Ключевые слова:** геометрическое моделирование; переходная кривая; ограниченный участок; кривизна кривой; кубическая зависимость; распределение кривизны

V. D. BORISENKO<sup>1\*</sup>, S. A. USTENKO<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Computer Engineering», V. A. Suhomlinskiy Nikolayev National University, Nikolskaya St., 24, Nikolayev, Ukraine, 54030, tel. +38 (0512) 71 30 25, tel. +38 (063) 304 75 26, e-mail borisenko.valery@gmail.com, ORCID 0000-0002-0857-0708

<sup>1\*</sup>Dep. «Computer Engineering», V. A. Suhomlinskiy Nikolayev National University, Nikolskaya St., 24, Nikolayev, Ukraine, 54030, tel. + 38 (063) 479 90 61, e-mail ustenko.s.a@gmail.com, ORCID 0000-0003-4968-1233

## MODELING THE TRANSITION CURVE ON A LIMITED TERRAIN

**Purpose.** The article highlights further development of the method of geometric modelling of transition curves, which are placed between rectilinear and circular sections of railway tracks and are created in localities, the relief of which causes certain restrictions on the size of the transition curves of the railway track. **Methodology.** The equation of the transition curve is taken in parametric form, in which the length of the arc of the modelled curve is used as a parameter. As initial data in the modelling of the transition curve, the coordinates of its initial point and the angle of inclination in it are tangent, the radius of the circumference of the circular section and the parameter that is used as a constraint when placing a section of the railway track. The transition curve is modelled under the condition that the distribution of its curvature from the length of the arc - the natural parameter - is described by a cubic dependence. This dependence contains four unknown coefficients; the unknown is also the length of the arc. The coefficients of the cubic dependence and the length of the arc of the transition curve, the coordinates of its end point, the angle of inclination in it of the tangent are determined during the simulation of the transition curve. The application of boundary conditions and methods of differential geometry with respect to the distribution of the slope angle of the tangent to the simulated curve (from the initial to the end points of the transition curve and the calculation of the coordinates of the end point of the curve) allows us to reduce the problem of modelling the transition curve to determine the arc length of this curve. Directly the length of the transition curve is in the process of minimizing the deviation of the circumference of the circular path from its current value obtained when searching for the arc length. **Findings.** As a result of the computational experiment, the possibility of modelling a transition curve between a rectilinear and circular rail track in a region of a limited size has been proved. **Originality.** Authors developed a method for geometric modelling of transition curves between a rectilinear and circular section of a railway track in conditions of limited terrain size, on which rails are laid. The transition curve is represented in the natural parameterization, using the cubic dependence of the curvature distribution on the length of its arc. **Practical value.** The proposed method of modelling the transition curves in conditions of limited terrain size allows obtaining these curves with a high accuracy in a wide range of geometric parameters of rectilinear and circular sections of the railway track and a parameter that acts as a constraint in the modelling of the transition curve. The method can be recommended in the practice of building railways.

**Keywords:** geometric modelling; transition curve; limited area; the curvature of the curve; a cubic dependence; curvature distribution

## REFERENCES

1. Amelin, S. V., & Danovskiy, L. M. (1986). *Put i putevoye khozyaystvo*. Moscow: Transport.
2. Badaiev, S. Y., Borovik, Y. O. (2009). Kryvoliniyniy shment na osnovi intehranoi kryvoi. *Applied Geometry and Graphics*, 81, 213-217.
3. Borysenko, V. D., Ustenko, S. A., & Komar, V. S. (2008). Heometrychne modeliuvannia ploskoho kryvoliniinoho obvodu iz zastosuvanniam kubichnogo zakonu rozpodilu ioho kryvyny. *Applied Geometry and Graphics*, 79, 52-57.
4. Yelfimov, G. V. (1948). *Teoriya perekhodnykh krivyykh*. Moscow: Transzheldorizdat.
5. Kurhan, M. B., & Novik, R. B. (2014). Osnovni vymohy do vyboru radiusiv kryvykh pry proektuvanni vysokoshvydkisnykh mahistrlei. *Proceedings of the 74 International Scientific & Practical Conference The problems and prospects of railway transport development, May 15-16, 2014, Dnipropetrovsk*. 270-271.
6. Kurhan, M. B., Kurhan, D. M. (2014). Osnovni vymohy do vyboru formy i dovzhyny perekhidnykh kryvykh pry proektuvanni vysokoshvydkisnykh mahistrlei. *Proceedings of the 74 International Scientific & Practical Conference The problems and prospects of railway transport development, May 15-16, 2014, Dnipropetrovsk*. 253-254.
7. Kurhan, M. B., Husak, M. A., & Khmelevska, N. P. (2012). Reconstruction of curves for introduction of highspeed traffic of passenger train. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 40, 90-97.
8. Laguta, V. V. (2002). *Improvement of designing of the railway curves in a plan*. (PhD thesis). Available from Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipropetrovsk.
9. Lazaryan, V. A. (1985). O forme perekhodnoy krivoy (Teoreticheskiye osnovy vybora ratsionalnoy formy perekhodnoy krivoy). *Dinamika transportnykh sredstv* (pp. 10-24). Kyiv: Naukova dumka.



## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

10. Mironov, V. S., & Rudenko, T. A. (2014). Radii of circular curves for high-speed railways when using railway tilting cars. *Vestnik transporta Povolzhya*, 3(45), 44-50.
11. Borysenko, V., Agarkov, O., Palko, K., & Palko, M. (2016). Modeling of curves in the natural parametrization. *Heometrychne modelyuvannya ta informatsiini tekhnolohii*, 1, 21-27.
12. Protsenko, A. I., & Bredyuk V. B. (1971). Metodika rascheta na EVM slozhnykh zheleznodorozhnykh krivym pri tekushchem sodержanii puti. *Sbornik trudov NIIZHT*, 130, 48-53.
13. Ustenko, S. A., Didanov, S. V., & Aharkov, O. Y. (2011). Heometrychne modelyuvannya kryvykh liniy iz zadanoju kryvynoyu v hranychnykh tochkakh. *Applied Geometry and Graphics*, 87, 404-409.
14. Ustenko, S. A., Didanov, S. V., & Aharkov, O. Y. (2014). Investigation of curves set by cubic distribution of curvature. *Science and Transport Progress*, 2(50), 164-172. doi: 10.15802/stp2014/23797
15. Ustenko, S. A., & Didanov, S. V. (2013). Method of construction spatial transition curve. *Science and Transport Progress*, 2(44), 124-128. doi: 10.15802/stp2013/11394
16. Chernyshev, M. A., & Kreynis, Z. L. (1985). *Zheleznodorozhnyy put*. Moscow: Transport.
17. Shakhunyan, G. M. (1972). *Proyektirovaniye zheleznodorozhnogo puti*. Moscow: Transport.
18. Shen, T.-I, Chang, C.-H., Chang, K.-Y., & Lu, C. C. (2013). A numerical study of cubic parabolas on railway transition curves. *Journal of Marine Science and Technology*, 21(2), 191-197. doi: 10.6119/JMST-012-0403-1
19. Eliou, N., & Kaliabetsos, G. (2014). A new, simple and accurate transition curve type, for use in road and railway alignment design. *European Transport Research Review*, 6(2), 171-179. doi: 10.1007/s12544-013-0119-8
20. Farin, G. (1997). *Curves and surfaces for computer-aided geometric design: a practical guide* (4th ed.). London: Academic Press Inc.
21. Hooke, R., & Jeeves, T. A. (1961). Direct search solution of numerical and statistical problems. *Journal of the ACM*, 8(2), 212-229. doi: 10.1145/321062.321069
22. Lipicnik, M. (1998). New form of road/railway transition curve. *Journal of Transportation Engineering*, 124(6), 546-556. doi: 10.1061/(asce)0733-947x(1998)124:6(546)
23. Long, X.-Y., Wei, Q.-C., & Zheng, F.-Y. (2010). Dynamic analysis of railway transition curves. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 224(1), 1-14.
24. Tari, E., & Baykal, O. (2005). A new transition curve with enhanced properties. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32(5), 913-923. doi: 10.1139/l05-051
25. Arslan, A., Tari, E., Ziatdinov, R., & Nabiyeu, R. I. (2014). Transition Curve Modelling with Kinematical Properties: Research on Log-Aesthetic Curves. *Computer-Aided Design & Applications*, 11(5), 509-517. doi: 10.1080/16864360.2014.902680

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. І. І. Коваленком (Україна); д.т.н., проф. А. А. Ставинським (Україна); науковим комітетом X Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті-2016»

Надійшла до редколегії: 01.12.2016

Прийнята до друку: 02.03.2017

378.4:174.7-028.42

В. Г. ШЕРСТЮК<sup>1</sup>, М. В. ЖАРИКОВА<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Інформаційні технології», Херсонський національний технічний університет,  
Бериславське шосе, 24, Херсон, Україна, 73000, тел. +38 (050) 396 30 18, ел. пошта vgsherstyuk@gmail.com,  
ORCID 0000-0002-9096-2582

<sup>2\*</sup>Каф. «Інформаційні технології», Херсонський національний технічний університет,  
Бериславське шосе, 24, Херсон, Україна, 73000, тел. +38 (066) 065 77 48, ел. пошта marina.jarikova@gmail.com,  
ORCID 0000-0001-6144-480X

## СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ АКАДЕМИЧЕСКОЙ ЧЕСТНОСТИ ДЛЯ УКРАИНСКИХ УНИВЕРСИТЕТОВ

**Цель.** Статья посвящена разработке методики обеспечения академической добросовестности университета, в основу которой положена Web-ориентированная система поддержки академической честности, являющейся составной частью информационной системы управления образовательным процессом. Система поддержки направлена на установление академической честности как основной институциональной ценности, которая поможет уменьшить коррупцию, плагиат, другие виды академической нечестности. **Методика.** Методика решения поставленной задачи основана на построении информационной системы управления образовательным процессом со встроенными элементами управления качеством, а информационная подсистема поддержки академической добросовестности является ее неотъемлемым компонентом. **Результаты.** Предлагаемая информационная система позволяет реализовать уровни: мониторинга образовательного процесса; аудита внутренних процессов, необходимого для построения эффективной системы управления качеством; оценивания достижений участников образовательного процесса; формализации взаимодействия участников образовательного процесса. Система направлена на создание нового академического общества, основанного на принципах: 1) открытого доступа к информации, при котором доступ широкой общественности к информации гарантирует участие, формирование чувства ответственности и социального контроля; 2) прозрачности информации, под которой понимается ее актуальность, качество, достоверность; 3) ответственности всех участников образовательного процесса; 4) измеримости, при которой любое действие в образовательном процессе должно быть измеримо; 5) детальности описания действий, результатов и процессов; 6) поддержки, под которой понимаются автоматические средства реализации принципов открытого доступа к информации, ее прозрачности, ответственности всех участников образовательного процесса, измеримости, детальности, поддержки. Практическая реализация информационной системы основана на создании единого университетского хранилища информации. Для осуществления анализа такое хранилище должно быть организовано как гиперкуб, имеющий достаточное количество измерений, например, по студентам, преподавателям, дисциплинам, аудиториям, образовательным программам и планам. **Научная новизна.** Впервые предложена новая четырехуровневая концепция информационной системы поддержки академической добросовестности. **Практическая значимость.** Предложенная авторами система позволяет сократить проявления недобросовестности в академической среде и способствует интеграции украинских университетов в Европу. Представленные идеи будут реализованы в пилотном проекте информационной системы управления образовательным процессом для Херсонского национального технического университета.

**Ключевые слова:** академическая честность; добросовестность; система поддержки академической честности; прозрачность информации; открытый доступ к информации

### Введение

Учебные заведения призваны выполнять не только образовательные задачи. Важнейшей и при этом не менее сложной является воспитательная задача. Роль университетов, колледжей и других образовательных учреждений является определяющей, в том числе и в воспитании уважения к закону.

Именно в учебных заведениях произрастает новое поколение национальной элиты, некоторые представители которого уже через десяток лет неизбежно окажутся у власти. От них зависит будущее страны. Если мы хотим создать общество, которое будет признано в Европе, наши молодые специалисты должны не только получать профессиональные знания и навыки,

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

но и придерживаться законов и общепринятых моральных и этических правил и норм [1-5].

Таким образом, академическая добросовестность и честность имеет фундаментальное значение, поэтому должна стать основным принципом академической жизни.

Академическая этика означает академическую честность и предполагает, что студенты и преподаватели неукоснительно следуют кодексу чести, доверия, уважения и несут ответственность за свои действия, например, выполнение заданий, написание и публикацию работ, оценивание знаний и обмен ими в процессе обучения, преподавания и научных исследований. Развитие академической этики – это основное средство, с помощью которого университеты могут вносить реальный вклад в построение цивилизованного общества.

Вопросы культивирования академической порядочности в украинских университетах и других образовательных учреждениях особенно актуальны по следующим причинам [6]. Во-первых, есть убедительные свидетельства того, что за последние годы число проявлений академической недобросовестности значительно увеличилось, при этом списывание и плагиат уже в средних школах стал носить массовый характер. Следовательно, университетам придется все чаще иметь дело с проблемами, касающимися академической порядочности.

Во-вторых, имеет место «кризис порядочности» в обществе в целом, что порождает и «кризис академической порядочности» в университетах в частности. Опыт академической недобросовестности, который получают студенты в университетах, учит их и в дальнейшем, после окончания университетов, с легкостью не придерживаться норм и нарушать законы [7, 8].

Поэтому университеты, как и другие образовательные учреждения, часто являются последним шансом на преодоление «кризиса порядочности» и, следовательно, несут особую ответственность. Ведь понятно, что если привычки порядочности не будут привиты студентам прежде, чем они закончат учебные заведения и пойдут работать, то очень маловероятно, что данные привычки смогут быть развиты в них позже [9].

Значение академической этики в развитии общества подчеркивалось многими европей-

скими и американскими исследователями. С момента принятия Болонской хартии [10-12] европейские университеты пытаются определить этические цели высшего образования в условиях больших изменений, обусловленных развитием массового образования и новыми отношениями с правительствами.

Поведение студентов в университетах и колледжах должно основываться на четко прописанных моральных и этических нормах, которые в развитых странах принято называть кодексом чести. Американские университеты приобрели огромный опыт в создании таких кодексов чести, где основой этических отношений преподавателей и студентов является понятие «academic integrity» (академическая порядочность), которое, в свою очередь, определяют в терминах пяти фундаментальных ценностей [12, 15]:

- честности;
- доверия;
- справедливости;
- уважения;
- ответственности.

Однако, в украинских университетах отсутствуют стандарты академического поведения для студентов и преподавателей. Более того, в реальности преимущества имеют как раз те, кто умеет искусно списывать, заимствовать результаты чужого труда, договариваться. А умным и честным студентам, наоборот, учиться становится скучно и тяжело. Студенты обычно не только быстро адаптируются к коррумпированной университетской среде, но и выносят эти привычки из университетов после их окончания и несут их затем по жизни.

Выделим также следующие последствия проявлений академической недобросовестности [4]:

- нерациональное использование времени преподавателей, в том числе на борьбу с плагиатом, что снижает престижность их труда и качество обучения;
- академическая недобросовестность влечет за собой научную недобросовестность, что тормозит развитие научных исследований и существенно снижает их эффективность;
- академическая недобросовестность приводит к значительному снижению уровня конкурентоспособности как студентов, так и пре-

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

подавателей и ученых, которые реже участвуют в различных конкурсах и проектах, выигрывают гранты и т.д.;

– снижается престиж учебных заведений, допускающих академическую недобросовестность и не борющихся с ее проявлениями, а поэтому выпускающих большое число некомпетентных и невостребованных специалистов.

Хуже всего то, что новейшие достижения в области науки и технологий, в первую очередь информационных, существенно облегчают плагиат и заимствования, а разработанные программы борьбы с плагиатом пока недостаточно эффективны. Борьба за академическую добросовестность остается прерогативой отдельных украинских университетов, которым небезразлична их репутация. В то же время, в новом Законе о высшем образовании [5] проблема борьбы с академическим плагиатом как среди студентов, так и среди ученых поднята на национальный уровень.

Таким образом, созрела необходимость проведения обширных исследований и создания конкретных элементов системы борьбы с академической недобросовестностью, получившей широкую распространенность [9]. Сложность этой задачи обусловлена тем, что уже сформировалась генерация педагогов, привыкших достаточно свободно пользоваться научными заимствованиями.

### Цель

Цель данной статьи – предложить методику обеспечения академической добросовестности университета, в основу которой положена информационная система управления образовательным процессом, и представить разрабатываемую авторами Web-ориентированную информационную систему поддержки академической добросовестности.

Система направлена на установление академической честности как основной институциональной ценности, которая поможет уменьшить коррупцию, плагиат, другие виды академической нечестности, а также построить честное и добросовестное общество, что будет содействовать дальнейшей интеграции украинских университетов в Европу.

### Методика

Первопричины «кризиса академической порядочности» в университетах Украины, искажающих в первую очередь отношения между преподавателем и студентом, следует искать в следующих особенностях [3]:

1. Украинские студенты не имеют стандарта академического поведения, у них нет также и границы неприемлемости академического поведения.

2. Студенты не осуществляют самостоятельный выбор учебных дисциплин и преподавателей, их читающих, а соответственно, и не чувствуют ответственности за свой собственный выбор. Неудивительно, что они пытаются пройти курс обучения с минимальными усилиями.

3. Отсутствуют индивидуальные траектории обучения [10]. Студенты посещают вместе все занятия в течение пяти лет, что приводит к академическому паразитизму: слабые и ленивые студенты не посещают занятия, затем заимствуют конспекты у добросовестных студентов, списывают задачи, пользуются помощью хороших студентов во время экзаменов. При этом добросовестные студенты также подвергаются влиянию группы, становятся равнодушными к обучению и не пытаются максимально реализовать свой потенциал, так как вместо положительных, им навязывают отрицательные примеры поведения.

4. Избыточное “накачивание” лекциями и своего рода «дрессировка» не поощряют студента активно мыслить, решать проблемы, а в результате становится неинтересным и сам процесс обучения, построенный исключительно на запоминании, без какой-либо практической направленности и ответственности.

5. Студенты имеют законное право дважды пересдать экзамен, что снимает с преподавателя ответственность за добросовестность оценивания знаний. В итоге преподаватель посвящает значительную часть своего времени не хорошим студентам, которые смогли бы принести пользу обществу, а плохим, которые вряд ли смогут воспользоваться результатами своего обучения теперь или в будущем. Вследствие этого, преподаватели чувствуют неуважение со стороны слабых студентов, и всячески стараются не ставить плохим студентам неудовлетворительных оценок, чтобы затем не тратить на них свое время.

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Еще одной причиной неудовлетворительных этических отношений между преподавателем и студентом является перегрузка учебных планов, которая не способствует интеллектуальному развитию молодого человека, лишая его, так называемой творческой воли.

Вышеперечисленные причины не только искажают взаимоотношения между студентом и преподавателем, но и критически воздействуют на учебный процесс, снижая качество обучения. Конечно, в некоторых университетах Украины действуют самостоятельно разработанные модели управления качеством, но приемлемой эффективности они не обеспечивают [6].

Заметим, что новая редакция Закона Украины «О высшем образовании» [5] определяет совокупность процедур и мероприятий, составляющих систему обеспечения вузами качества образовательной деятельности:

«2) осуществление мониторинга и периодического пересмотра образовательных программ;

3) ежегодное оценивание соискателей высшего образования, научно-педагогических и педагогических работников высшего учебного заведения и регулярное обнародование результатов таких оценок на официальном сайте высшего учебного заведения, на информационных стендах и любым другим способом; ...

...5) обеспечение наличия необходимых ресурсов для организации образовательного процесса, в том числе самостоятельной работы студентов по каждой образовательной программе;

6) обеспечение наличия информационных систем для эффективного управления образовательным процессом; ...

...8) обеспечение эффективной системы предотвращения и выявления академического плагиата в научных работах работников высших учебных заведений и соискателей высшего образования; ...»

Таким образом, методика решения поставленной задачи может быть основана на построении информационной системы управления образовательным процессом со встроенными элементами управления качеством, а информационная подсистема поддержки академической добросовестности может являться ее неотъемлемым компонентом.

## Результаты

Современные университеты являются значительно более открытыми и динамичными организациями, значительно лучше приспособленными к современным информационным технологиям, чем замкнутые и негибкие учреждения из прошлых лет.

Сложившаяся практика использования информационных систем для управления образовательным процессом и учебными заведениями в целом позволяет констатировать, что не хватает интегрированных систем, которые бы объединяли подсистемы управления учебным процессом, студентами, кадрами и другими ресурсами. На сегодняшний день нет должной прозрачности между Единой государственной электронной базой в сфере образования и информационными системами, использующимися в университетах. В то же время, локализация зарубежных программных продуктов представляет собой непреодолимую проблему из-за специфики национального образовательного законодательства.

Предлагаемая информационная система (рис. 1) позволяет реализовать уровни:

А) мониторинга образовательного процесса;

Б) аудита внутренних процессов, необходимого для построения эффективной системы управления качеством;

В) оценивания достижений участников образовательного процесса;

Г) формализации взаимодействия участников образовательного процесса.

Система является инструментом создания нового академического общества, основанного на следующих принципах:

– открытого доступа к информации: доступ широкой общественности к информации гарантирует участие, формирование чувства ответственности и социального контроля;

– прозрачности информации: актуальность, качество, достоверность [1].

– ответственности всех участников образовательного процесса;

– измеримости: любое действие в образовательном процессе должно быть измеримо;

– детальности: имеется в виду обширное, но не избыточное описание действий, результатов и процессов;

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

– поддержки: автоматические средства реализации принципов.

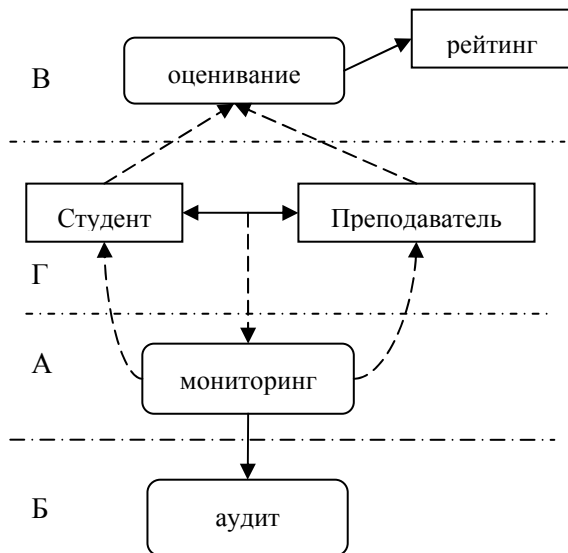


Рис. 1. Уровни информационной системы

Fig. 1. Levels of the information system

Мониторинг образовательного процесса используется лучшими университетами Украины, но методы и критерии его осуществления требует гармонизации с европейской практикой.

Рейтинговое оценивание студентов и преподавателей также распространено во многих учебных заведениях, но в большинстве из них конечные оценки не имеют практического значения, – они не служат инструментом анализа ситуации и мотивации. Более того, практически не проводится систематическая статистическая обработка накопленной информации, а уж ее обнародование и вовсе носит случайный характер.

Аудит образовательной деятельности университетов тесно связан с управлением качеством. Для обеспечения эффективности управления качеством требуется организовать глубокий анализ информации, получаемой в процессе мониторинга образовательной деятельности.

Практическая реализация информационной системы основана на создании единого университетского хранилища информации. Для осуществления анализа такое хранилище должно быть организовано как гиперкуб,

имеющий достаточное число измерений, например, по студентам, преподавателям, дисциплинам, аудиториям, образовательным программам и планам.

Важнейшей составляющей информационной системы управления образовательным процессом является информационная подсистема поддержки академической добросовестности, охватывающая часть процессов уровней В и Г.

Такая информационная подсистема должна быть основана на принципе открытости. Прозрачный подход, основанный на открытом доступе к информации об успеваемости студентов, позволит организовать образовательный процесс таким образом, что, например, сами студенты и преподаватели будут вносить вклад в предупреждение выставления незаслуженных оценок, а, следовательно, в обеспечение академической добросовестности и предупреждение коррупции [13].

Накапливание информации о различных формах участия преподавателей в образовательном процессе также даст возможность выполнения различных аналитических запросов.

Указанные источники информации будут открытыми для детального анализа и позволят проводить автоматические расчеты итоговых оценок студентов, а также рейтингов преподавателей в единой форме. Основной принцип – это широкая доступность информации и избавление от рутинной бумажной работы, которая занимает много времени и предоставляет возможность умышленного внесения ложной информации.

Открытость доступа может быть обеспечена путем построения веб-ориентированной информационной системы. Кроме того, может быть обеспечен единообразный стык для обмена информацией с Единой государственной электронной базой в сфере образования.

Информационная подсистема поддержки академической добросовестности встраивается в систему взаимоотношений студента и преподавателя (рис. 2), формализуя ряд процедур, например, выдачи студентам индивидуальных заданий или заданий в малых группах, и критериев, например, оценивания результатов выполнения заданий студентами.

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

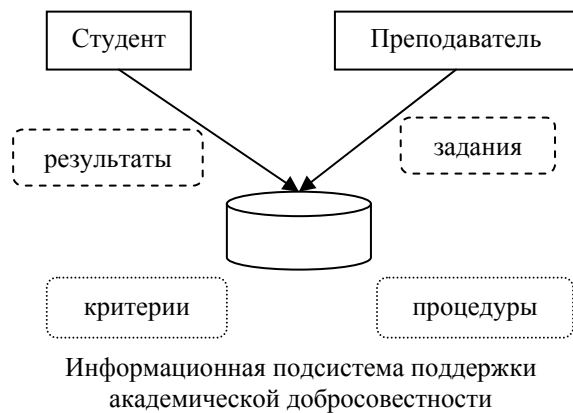


Рис. 2. Формализация взаимоотношений студента и преподавателя

Fig. 2. Formalization of the student-teacher relationship

Подсистема разрабатывается для преподавательского состава и студентов университетов, для аспирантов и исследователей, а также для школьных учителей и школьников.

Основная ее идея состоит в воспитании независимости, ответственности, честности, творческих способностей студентов и слушателей. Это приведет к сокращению риска плагиата и нечестности, что повысит качество образования и будет способствовать адаптации к Европейскому обществу.

Система поможет студентам осознать важность академической честности, необходимой для получения прочных знаний, предоставит всем участникам образовательного процесса возможность избежать коррупции, плагиата и других форм академической нечестности.

В дополнение к подсистеме поддержки академической добросовестности в университете необходимо создать систему этических правил, единую для преподавателей и студентов.

Не может быть двух моралей – отдельно для преподавателя и отдельно для студента, потому что это унижает студента и делает его пассивным. Напротив, знание всех правил создает условия, при которых студент учится быть самостоятельным и инициативным, потому что понимает, что именно этические нормы,

а не волюнтаризм администрации определяют его возможности, обязанности и права. Эти правила, которые можно объединить, например, в кодекс чести, должны быть такими, чтобы придерживаться этих правил было полезно всем.

Однако, кодекс чести нужно не только декларировать, но и разработать механизм его защиты. Каждый из участников образовательного процесса – администратор, преподаватель или студент – должен иметь как обязанности, так и развитые права для защиты собственных взглядов и поступков.

### Научная новизна и практическая значимость

Впервые предложена новая четырехуровневая концепция информационной системы поддержки академической добросовестности (рис. 1), которая позволяет сократить проявления добросовестности в академической среде и способствует интеграции украинских университетов в Европу.

### Выводы

Таким образом, в университете может быть создана модель отношений студентов и преподавателей, основанная на верховенстве этики и всецело поддерживаемая на институциональном уровне с использованием современных информационных систем.

Можно предположить, что наиболее сложной задачей будет обеспечить для преподавателей и администрации необходимость неукоснительного соблюдения этических норм кодекса чести. Эти категории участников образовательного процесса долгое время чувствовали себя теми, кто всегда прав, и изменить такую позицию будет гораздо труднее, чем у студентов [2].

Представленные идеи будут реализованы в пилотном проекте информационной системы управления образовательным процессом для Херсонского национального технического университета.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аллак, Ж. Коррупцированные школы, коррупцированные университеты: что можно сделать? / Ж. Аллак, М. Пуассон. – Париж : Международный Институт планирования образования, 2014. – 356 с.
2. Використання нашого потенціалу з найбільшою користю: консолідація Європейського простору вищої освіти [Електронний ресурс] : Бухарестське комюніке. – Бухарест, 2013. – Режим доступу: <http://nau.edu.ua/ua/menu/navchannya/bolonskij-proczes/buxarestske-komyun%D1%96ke.htmlht>. – Загл. с экрана. – Проверено : 23.02.2017.
3. Джонс, Р. М. Академічна корупція в Україні [Електронний ресурс] / Р. М. Джонс. – Режим доступу: <http://www.ji-magazine.lviv.ua/ji-junior/N32-1/johns.htm>. – Загл. с экрана. – Проверено : 23.02.2017.
4. Ефимова, Г. З. Анализ основных стратегий борьбы с проявлениями недобросовестности в науке и образовании [Електронний ресурс] / Г. З. Ефимова // Современные исследования социальных проблем. – 2013. – № 2 (22). – Режим доступу: <http://cyberleninka.ru/article/n/analiz-osnovnyh-strategiy-borby-s-proyavleniyami-nedobrosovestnosti-v-nauke-i-obrazovanii>. – Загл. с экрана. – Проверено : 23.02.2017.
5. Про вищу освіту [Електронний ресурс] : Закон України [ст. 6, п. 6]. – 2014. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1556-18>. – Загл. с экрана. – Проверено : 23.02.2017.
6. Рашкевич, Ю. М. Болонський процес та нова парадигма вищої освіти : монографія / Ю. М. Рашкевич. – Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2014. – 168 с.
7. Роль університету у розвитку лідерського потенціалу суспільства: концептуальні засади / О. Аарна, Д. Гудонієне, О. Гузар [та ін.] ; за заг. ред. С. Калашнікової. – Київ : Пріоритети, 2014. – 100 с.
8. Ромакін, В. В. Академічна етика як передумова верховенства права / В. В. Ромакін // Наук. пр. / Миколаїв. держ. гуманіт. ун-т ім. Петра Могили. – Миколаїв, 2005. – Т. 46, вип. 33. – С. 174–179.
9. Ромакін, В. В. Академічна чесність як політична проблема / В. В. Ромакін // Наук. пр. / Миколаїв. держ. гуманіт. ун-т ім. Петра Могили. – Миколаїв, 2002. – Вип. 12. – С. 165–170.
10. Шерстюк, В. Г. Сценарно-прецедентная модель тренажерно-обучающей интеллектуальной системы / В. Г. Шерстюк // Искусственный интеллект. – 2013. – № 4 (62). – С. 488–500.
11. Biggs, J. Teaching for quality learning at university / J. Biggs, C. Tang. – Maidenhead : McGraw-Hill International, 2011. – 36 p.
12. Compton, J. Inoculating Against Pro-Plagiarism Justifications: Rational and Affective Strategies / J. Compton, P. Michael // Journal of Applied Communication Research. – 2008. – No. 2. – P. 98–119.
13. Horn, L. Promoting responsible research conduct: a South African perspective / L. Horn // Journal of Academic Ethics. – 2017. – Vol. 15. – Iss. 1. – P. 59–72. doi: 10.1007/s10805-016-9272-8.
14. Kwiek, M. Knowledge Production in European Universities: States, Markets, and Academic Entrepreneurialism / M. Kwiek. – Berlin : Peter Lang, 2013. – 482 p.
15. Martin, B. Defending university integrity / B. Martin // International Journal for Educational Integrity. – 2017. – Vol. 13. – Iss. 1. – P. 1–14. doi: 10.1007/s40979-016-0012-z.

В. Г. ШЕРСТЮК<sup>1</sup>, М. В. ЖАРИКОВА<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Інформаційні технології», Херсонський національний технічний університет,  
Бериславське шосе, 24, Херсон, Україна, 73000, тел. +38 (050) 396 30 18, ел. пошта [vgsherstyuk@gmail.com](mailto:vgsherstyuk@gmail.com),  
ORCID 0000-0002-9096-2582

<sup>2\*</sup>Каф. «Інформаційні технології», Херсонський національний технічний університет,  
Бериславське шосе, 24, Херсон, Україна, 73000, тел. +38 (066) 065 77 48, ел. пошта [marina.jarikova@gmail.com](mailto:marina.jarikova@gmail.com),  
ORCID 0000-0001-6144-480X

## СИСТЕМА ПІДТРИМКИ АКАДЕМІЧНОЇ ЧЕСНОСТІ ДЛЯ УКРАЇНСЬКИХ УНІВЕРСИТЕТІВ

**Мета.** Стаття присвячена розробці методики забезпечення академічної чесності університету, в основу якої покладена Web-орієнтована система підтримки академічної чесності, яка є складовою частиною інформаційної системи управління освітнім процесом. Система підтримки спрямована на встановлення академічної чесності як основної інституційної цінності, яка допоможе зменшити корупцію, плагіат та інші види академічної нечесності. **Методика.** Методика вирішення поставленого завдання заснована на побудові інформаційної системи управління освітнім процесом із вбудованими елементами управління якістю, а



## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

інформаційна підсистема підтримки академічної сумлінності є її невід'ємним компонентом. **Результати.** Пропонована інформаційна система дозволяє реалізувати рівні: моніторингу освітнього процесу; аудиту внутрішніх процесів, необхідного для побудови ефективної системи управління якістю; оцінювання досягнень учасників освітнього процесу; формалізації взаємодії учасників освітнього процесу. Система спрямована на створення нового академічного суспільства, заснованого на принципах: 1) відкритого доступу до інформації, при якому доступ широкої громадськості до неї гарантує участь, формування почуття відповідності та соціального контролю; 2) прозорості інформації, під якою розуміється її актуальність, якість, достовірність; 3) відповідальності всіх учасників освітнього процесу; 4) вимірності, при якій будь-яка дія в освітньому процесі має вимірюватися; 5) детальності опису дій, результатів і процесів; 6) підтримки, під якою розуміються автоматичні засоби реалізації принципів відкритого доступу до інформації, її прозорості, відповідальності всіх учасників освітнього процесу, вимірності, детальності, підтримки. Практична реалізація інформаційної системи заснована на створенні єдиного університетського сховища інформації. Для здійснення аналізу таке сховище повинно бути організоване як гіперкуб, що має достатню кількість вимірювань, наприклад, по студентам, викладачам, дисциплінам, аудиторіям, освітнім програмам та планам. **Наукова новизна.** Вперше запропоновано нову чотирирівневу концепцію інформаційної системи підтримки академічної сумлінності. **Практична значимість.** Запропонована авторами система дозволяє скоротити прояви недобросовісності в академічному середовищі та сприяє інтеграції українських університетів у Європу. Представлені ідеї будуть реалізовані в пілотному проекті інформаційної системи управління освітнім процесом для Херсонського національного технічного університету.

*Ключові слова:* академічна чесність; сумлінність; система підтримки академічної чесності; прозорість інформації; відкритий доступ до інформації

V. G. SHERSTJUK<sup>1</sup>, M. V. ZHARIKOVA<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Dep. «Information Technologies», Kherson National Technical University, Beryslavske shosse, 24, Kherson, Ukraine, 73000, tel. +38 (050) 396 30 18, e-mail vgsherstyuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-9096-2582

<sup>2\*</sup>Dep. «Information Technologies», Kherson National Technical University, Beryslavske shosse, 24, Kherson, Ukraine, 73000, tel. +38 (066) 065 77 48, e-mail marina.jarikova@gmail.com, ORCID. 0000-0001-6144-480X

## ACADEMIC INTEGRITY SUPPORT SYSTEM FOR UKRAINIAN UNIVERSITIES

**Purpose.** The article is devoted to the development the methodology for providing academic integrity in the university. The methodology is based on Web-oriented academic integrity support system, developed by the authors, which enters into the information system of learning process control. Academic integrity support system is aimed at maintaining academic integrity as a basic institutional value, which will help to reduce corruption, plagiarism and other types of academic dishonesty. **Methodology.** The methodology of problem to solve is based on the development of the information system of education process control with the integral elements of quality control. The information subsystem of academic integrity support is its basic part. **Findings.** The proposed information system allows us to fulfill the following levels: educational process monitoring; audit of internal processes, which is necessary for developing the effective quality control system; assessment of achievements of educational process participants; formalization of the interaction of educational process participants. The system is aimed at the development of new academic society based on the following principles: 1) open access to the information, at which the access of wide audience to the information provides participation, forming the sense of responsibility and social control; 2) transparency of the information, by which its relevance, quality, reliability are meant; 3) responsibility of all members of educational process; 4) measurability, at which any action in educational process should be measured; 5) detail of describing the actions, results and processes; 6) support, which is meant by automatic tools of the realization of the principles of open access to the information, transparency of the information, responsibility of all participants of educational process, measurability, detail, support. The practical realization of information system is based on the development of a common repository of university information. The repository should be organized as a hypercube having abundance of dimensions, for example by students, teachers, courses, rooms, educational programs and plans. **Originality.** The new four-level concept of the information system of academic integrity support is first proposed. **Practical value.** The proposed system allows increasing dishonesty in academic society and gives rise to

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

the integration of Ukrainian universities into the Europe. The proposed ideas will be represented in the pilot project of information system of learning process control in Kherson National Technical University.

**Keywords:** academic integrity; work ethic; academic integrity support system; information transparency; open access to the information

## REFERENCES

1. Allak, Z., & Puasson, M. (2014). *Korrumpirovannyye shkoly, korrumpirovannyye universitety: chto mozhno sdelat ?* Paris: UNESCO. Retrieved from <http://unesdoc.unesco.org/images/0015/001502/150259r.pdf>
2. *Bukharestske Komuniike: Vykorystannia nashoho potentsialu z naibilshoiu korystiu: konsolidatsiia Yevropeiskoho prostoru vyshchoi osvity* (2013, April 2). Retrieved from <http://nau.edu.ua/ua/menu/navchannya/bolonskij-proczes/buxarestske-komyun%D1%96ke.html>
3. Dzhons, R. M. (2004). Akademichna koruptsiia v Ukraini. *Ji*, 32. Retrieved from <http://www.ji-magazine.lviv.ua/ji-junior/N32-1/johns.htm>
4. Efimova, G. Z. (2013). The analysis of crucial ways of struggle against the display of dishonesty in the field of science and education. *Modern Research of Social Problems*, 2(22). doi: 10.12731/2218-7405-2013-2-15
5. Pro Vyshchu Osvitu: Zakon Ukrainy 2014, № 1556-VII § rozdil 6 stattia 6. (2016). Retrieved from <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1556-18>
6. Rashkevych, Y. M. (2014). Bolonskyi protses ta nova paradyhma vyshchoi osvity. Lviv: Lviv Polytechnic National University.
7. Kalashnikova S. (Ed.). (2014). *Rol universytetu u rozvytku liderskoho potentsialu suspilstva: kontseptualni zasady*. Kyiv: Priorytety.
8. Romakin, V. V. (2005). Akademichna etyka yak peredumova verkhovenstva prava. *Naukovi pratsi*, 46(33), 174-179.
9. Romakin, V. V. (2002). Akademichna chesnist yak politychna problema. *Naukovi pratsi*, 12, 165-170.
10. Sherstyuk, V. G. (2013). Scenario-Case Model for Intelligent Training System. *Artificial Intelligence*, 4(62), 488-500.
11. Biggs, J., & Tang C. (2011). *Teaching for quality learning at university* (4th Revised ed.). Maidenhead: McGraw-Hill International.
12. Compton, J., & Pfau M. (2008). Inoculating Against Pro-Plagiarism Justifications: Rational and Affective Strategies. *Journal of Applied Communication Research*, 36(1), 98-119. doi: 10.1080/00909880701799329
13. Horn, L. (2016). Promoting responsible research conduct: A South African perspective. *Journal of Academic Ethics*, 15(1), 59-72. doi: 10.1007/s10805-016-9272-8
14. Kwiek, M. (2013). *Knowledge Production in European Universities: States, Markets, and Academic Entrepreneurialism*. Berlin: Peter Lang.
15. Martin, B. (2017). Defending university integrity. *International Journal for Educational Integrity*, 13(1), 1-14. doi: 10.1007/s40979-016-0012-z

*Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. В. И. Литвиненко (Украина); научным комитетом X Международной научно-практической конференции «Современные информационные и коммуникационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании-2016»*

Поступила в редколлегию: 27.12.2016

Принята к печати: 02.03.2017

## УДК 004.896

В. Г. ШЕРСТЮК<sup>1\*</sup>, И. В. СОКОЛ<sup>2</sup>, Е. Н. ТАРАСЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>\*Каф. «Информационные технологии», Херсонский национальный технический университет, Бериславское шоссе, 24, Херсон, Украина, 73000, тел. +38 (050) 396 30 18, эл. почта v\_sherstyuk@bigmir.net, ORCID 0000-0002-9096-2582

<sup>2</sup>Каф. «Судовождение», Морской институт последипломного образования имени контр-адмирала Ф. Ф. Ушакова, ул. Старообрядческая, 2, Херсон, Украина, 73000, тел. +38 (050) 714 28 60, эл. почта kherson.sokol@gmail.com, ORCID 0000-0002-7324-1441

<sup>3</sup>Каф. «Судовождение», Морской институт последипломного образования имени контр-адмирала Ф. Ф. Ушакова, ул. Старообрядческая, 2, Херсон, Украина, 73000, эл. почта katyatarasenko@bk.ru, ORCID 0000-0002-0906-5770

## СЦЕНАРНО-ПРЕЦЕДЕНТНЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ГЕТЕРОГЕННЫМ АНСАМБЛЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

**Цель.** Статья посвящена разработке метода интеллектуального координационного управления сложным гетерогенным ансамблем динамических объектов. **Методика.** Решение поставленной задачи основано на использовании сценарно-прецедентного подхода, представляющего активность динамических объектов в виде шаблонов, адаптируемых к изменяемым условиям внешней среды с помощью сценариев. Для адаптации сценариев используется алгоритм удовлетворения критически важных временных ограничений. Предложенный метод позволяет адекватно отражать накопленный опыт и знания по групповому управлению динамическими объектами, основываясь на использовании стереотипов подобных решений по управлению объектами в схожих ситуациях. Рассмотрены основные элементы решений прецедентов: управляющие воздействия, операции управления, сценарии, планы. **Результаты.** Реализована гибридная система управления, нижний уровень которой выполнен на основе гибридной системы БРИЗ и сочетает подсистему, основанную на прецедентах, с подсистемой, реализующей модель движения и являющейся ведущей, в то время как прецедентная подсистема является ведомой. Верхний и средний уровни системы управления выполнены в виде гибридной событийно-ориентированной системы МУССОН, включающей в себя сценарно-прецедентную подсистему, хранилище прецедентов и подсистему вычисления пространственных областей, основанную на модели. Сценарии и триггеры для каждого класса событий описаны с помощью языка описания сценариев SCDL. **Научная новизна.** Впервые предложена трехуровневая система координационного управления ансамблем динамических объектов, основанная на сценарно-прецедентном подходе, при этом на нижнем уровне реализуется управление отдельным динамическим объектом, на среднем уровне реализуется координация совместно движущихся объектов, а на верхнем уровне обеспечивается управление ходом выполнения миссии для ансамбля динамических объектов в целом. **Практическая значимость.** Предложенный подход не чувствителен к неточности и неполноте наблюдений, он позволяет снизить информационную нагрузку при анализе текущей ситуации, сократить затраты времени на принятие решений, повысив тем самым эффективность координации ансамбля динамических объектов в процессе выполнения миссии. Важным условием реализации сценарно-прецедентного метода управления является обеспечение достаточной компетенции, что позволит своевременно находить уместный прецедент и выбирать адекватное множество сценариев управления, а также синхронизация баз прецедентов каждого из динамических объектов по времени и содержанию.

**Ключевые слова:** динамический объект; ситуационное возмущение; координация; прецедент; сценарий; управляющее воздействие; прототип; ограничение; адаптация

### Введение

На сегодняшний день появились сложные технические системы, включающие множество (группы) пилотируемых и беспилотных динамических объектов (ДО), работающих совместно по некоторой заданной программе (миссии). Для решения многообразия сложных транспортных и поисково-спасательных задач, задач предотвращения и локализации чрезвычайных

ситуаций, а также широкого класса задач военного характера такие группы могут включать в себя воздушные, надводные, подводные, наземные и другие виды ДО.

Современные ДО не обязательно дистанционно управляются человеком-оператором или компьютерной программой. Они могут быть достаточно автономными, оснащенными сложными датчиками, исполнительными механизмами, бортовыми компьютерами для интеллектуально-

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

го управління. Таким образом, автономные ДО должны иметь возможность принимать свои собственные решения в динамичной, частично наблюдаемой и непредсказуемой среде.

Традиционно для координации групповых действий ДО в сложных, длительных, многоцелевых и многоэтапных операциях используются биоинспирированные методы, основанные на поведении роя или стаи (как у птиц или насекомых) [12]. Тем не менее, во многих случаях использование группы ДО в виде роя (стаи) является чрезмерно дорогим решением. Это особенно важно для военных применений, где стоимость универсальных ДО может быть весьма значительной.

Группы ДО могут быть организованы гораздо сложнее, чем рой; они могут основываться на определенном порядке построения и конкретных ролях для каждого ДО в этом порядке. В то же время, ДО должны автономно выбирать соответствующий сценарий активности в динамической среде в рамках своей роли.

Таким образом, группа может представлять собой упорядоченное множество ДО с различными ролями и функциями, которые совместно и одновременно выполняют свои сценарии активности в рамках заданной миссии для достижения поставленной цели. Из-за разнообразия функций, назначения и ролей ДО в группе такие группы называют гетерогенными ансамблями. В то же время, чем более сложной является структура и функции ансамбля, тем сложнее координация ДО. Проблема, которая рассматривается в данной статье, связана с координационным управлением гетерогенными ансамблями ДО.

В рамках ансамбля ДО должны быть в состоянии общаться, координироваться и сотрудничать друг с другом. Существует много подходов для управления ансамблями ДО и обширная литература по этому вопросу. При этом проблемы координации и сотрудничества ДО в ансамбле могут широко варьироваться от избегания столкновений до распределенного планирования [12].

Большинство исследователей уделяли внимание решению конкретных задач координации роя, используя простые наборы правил, имитирующие поведение в естественных системах [2, 5]. Такой подход требует лишь ограниченного

объема информации и является устойчивым к отдельным неудачам, тем не менее он опирается на установление консенсуса между ДО, что может занимать много времени, – неприемлемо много для приложений реального времени [6].

В более сложной форме координация и сотрудничество ДО требуют формального описания правил и процедур. В основном для этого используют подходы, основанные на моделях и правилах, а также методы алгоритмизации процедур взаимодействия [4].

Однако сложность взаимодействия ДО не позволяет использовать напрямую подход на основе моделей. В то же время априорное построение исчерпывающего множества правил координации не представляется возможным, а проверка этого множества неосуществима в системах реального времени, поэтому подход на основе правил также является неприемлемым. Хотя эти подходы и позволяют детально описывать и анализировать поведение группы ДО, но их трудно адаптировать к решению реальных задач навигации и взаимодействия в сложных условиях [1], так как в сложных навигационных условиях на стесненных участках пространства при высокой плотности ДО и интенсивности их перемещения возникают противоречия между значительным объемом информации, требующей немедленной обработки для принятия решений, и дефицитом имеющегося времени на принятие решений.

Теоретико-графовые структуры [3] иногда используются для упрощения набора правил взаимодействия, поэтому взаимодействия могут быть представлены в виде графов или виртуальных структур, где вершины рассматриваются как ДО, а ребра – как отношения между ними. Тем не менее при использовании данного подхода из-за его высокой вычислительной сложности трудно гарантировать достаточную производительность [4]. Другие возможные методы упрощения набора правил, такие как гибридизация, абстрагирование, статистическая оценка, временная логика также подвержены этому недостатку [7].

### Цель

Предположим, что ансамбль формируется из группы беспилотных ДО для определенной миссии путем применения ограничений на их

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

функции и роли. Тогда поведение ДО в этом ансамбле подчиняется общим правилам, специфичным для данного класса ДО, и ограничивается: его ролью в миссии, техническими характеристиками, определяющими его возможности, гидрометеорологическими факторами и действиями противодействующих противников.

Таким образом, активность каждого ДО должна следовать основным принципам: ДО должны быть осведомлены о своей роли в миссии; ДО должны осуществлять непрерывное наблюдение для предотвращения столкновений и использовать каналы коммуникаций для обеспечения стабильности ансамбля; ДО должен стремиться к достижению своих задач в миссии ансамбля.

Целью данной работы является разработка метода интеллектуального управления сложным ансамблем ДО для снижения риска аварийных ситуаций в условиях воздействия интенсивных динамических, навигационных и ситуационных возмущений в различных точках пространства.

### Методика

В статье предлагается использовать сценарно-прецедентный подход к координированному управлению гетерогенными ансамблями ДО, близкий к [8], и сценарий активности в качестве основных динамических составляющих прецедентов, в отличие от классического прецедентного подхода, где прецеденты рассматриваются как статические.

Подход на основе прецедентов предложен в [10] для решения проблемы координации в больших группах ДО на основе следующих предположений: активность взаимодействия ДО воспроизводима и повторяема; активность взаимодействия ДО не может быть описана в виде адекватных моделей или четко определенных правил и/или процедур.

Таким образом, мы можем описать активность взаимодействий ДО в виде шаблонов. Это означает, что существуют определенные стереотипы координации для схожих ситуаций, и если существует возможность накопления шаблонов группового взаимодействия для различных классов ситуаций, мы можем использовать данный подход.

Рассмотрим основные элементы предлагаемого подхода. Многими специалистами отмечается повторяемость действий по управлению ДО на уровне достигнутых навыков в аналогичных (типовых) сложившихся ситуациях [10], что позволяет использовать для обучения стереотипы решения различных задач предметной области. Как правило, повторяемость действий обусловлена наличием нормативных регуляторов и сложившихся стереотипов решений.

Например, известен стереотип уклонения «помеха справа – отворот влево» (рис. 1).

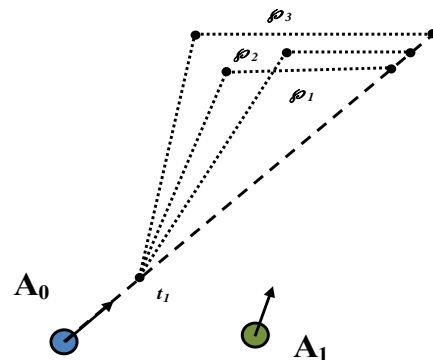


Рис. 1. Стереотип уклонения от помехи справа

Fig. 1. Deviation stereotype from obstacle at right

Прототип решения, соответствующий стереотипной ситуации, содержит последовательность (сценарий) применения ЛПР конкретных операций для решения поставленных задач.

На рис. 1 в момент времени  $t_1$  объект  $A_0$  отклоняется от запланированной траектории, уклоняясь от опасно движущегося объекта  $A_1$ . Маневр уклонения влево составляет прототип решения, состоящий из трех последовательных операций управления – повороты влево, вправо, снова влево. В зависимости от параметров операций, возможны различные варианты изменения траектории – на рис. 1 показаны три возможные множества допустимых скорректированных траекторий при различных установках органов управления (например, угла поворота) ДО.

Таким образом, прототип содержит сценарий применения операций для достижения необходимой цели (результата решения задачи) в заданной пространственной области.

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

При конкретизації прототипа в сценарій подставляють определенні значення параметрів, що необхідно для формування управляючих впливів на ДО [9]. Различні конкретизації одного і того ж прототипа представляють собою різні рішення задачі, існуючі різні рівні відповідності деякому еталонному рішення.

В залежності від значень параметрів ДО і зовнішньої середовищі в конкретний момент часу на сценарій активності можуть бути накладені явні і неявні обмеження (рис. 2): установок органів управління (максимально допустимий кут повороту  $\alpha_1$  для поточної швидкості руху  $v_1$ ); дотримання безпечної дистанції маневрування  $D_{\min}$ ; звуження простору маневрування ( $L_1$ ) і т.д.

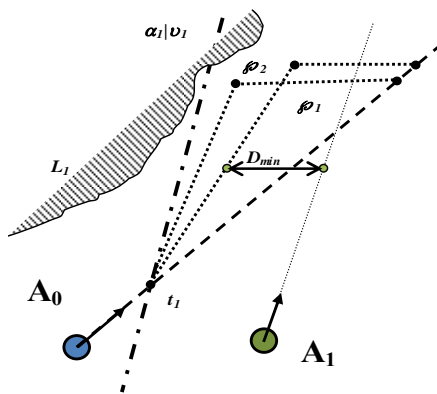


Рис. 2. Обмеження прототипу рішення задачі

Fig. 2. Limitations of solution problem prototype

Появлення в момент часу  $t$  впливу  $\omega_s$  (на рис. 1 –  $A_1$ ) створює для  $A_0$  проблемну ситуацію  $s(t) \in S$ , де  $S$  – множина можливих ситуацій предметної області.

Всяке впливу запланованої траєкторії потребує своєї компенсації, яка частіше за все може бути представлена як послідовність операцій управління  $M = [p_1, \dots, p_n]$ . Так, на рис. 2 послідовністю операцій управління є маневр ухилення.

В свою чергу, кожна операція управління  $p_i$  може бути представлена як вектор прилагованих управляючих впливів  $\bar{U} = \{u_1, \dots, u_m\}$  на множина виконавчих

механізмів ДО  $\Phi(A_0) = \{\phi_1, \dots, \phi_n\}$ , причому  $\{u_k, \dots, u_l\} \mapsto \phi_j$ . Далі, елементарне управляюче впливу  $u_l$  представляє собою зміну определенного параметра  $p_{\phi_j}^l$  відповідного органу управління  $\phi_j$ . Послідовність сюр'єктивних отображень  $f_{kj} : u_l \rightarrow \Delta p_{\phi_j}^l \rightarrow \Delta p^j$  дозволяє впливати на траєкторію активності ДО зміною деякого її параметра  $\Delta p^j$ .

В той же час неопределенність  $f_{kj}$  внаслідок стохастического впливу зовнішніх впливів, нестационарності і суттєвої нелінійності ДО перешкоджає обчисленню адекватних впливів  $u_l$  на ДО на основі його моделі.

Наличие впливів зовнішньої середовищі перешкоджає безпосередньому використанню передбачених шаблонів для определенных класів компенсацій. Виконання однієї і тієї ж послідовності операцій управління під впливом впливів  $\omega$  різної інтенсивності і напрямленості, а також при різних значеннях параметрів активності ДО потребує приложення управляючих впливів, різних по величині і складу. Обчислення необхідного вектора управляючих впливів  $\bar{U}$  є складною формалізуваною задачею [6].

Предположим, что в проблемной ситуации  $s(t)$  можно использовать для решения задачи некоторый прототип  $e_{s(t)}$  (прецедент [11]). Прецедент  $e_{s(t)}$  содержит решение  $r_{s(t)}$ , представляющее собой сценарий  $\Sigma_{s(t)}$  компенсации ситуационного воздействия  $\omega_s$ . При одновременных или пересекающихся во времени множественных ( $m$ ) ситуационных воздействиях решение  $s(t)$  может принимать вид последовательности сценариев (плана) решения задачи  $Pl_{s(t)} = [\Sigma_{s(t)}^1, \dots, \Sigma_{s(t)}^m]$ .

План  $Pl_{s(t)}$  содержит цель  $G_{s(t)} \in S$ . Для каждой проблемной ситуации  $s(t)$  возможно су-

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

уществование множества прецедентов  $E_{s(t)} = \{e_{s(t)}^1, \dots, e_{s(t)}^n\}$ , предоставляющих различные прототипы решений  $R = \{r_{s(t)}^1, \dots, r_{s(t)}^n\}$  для достижения одной и той же цели  $G_{s(t)}$ , отличающиеся по соответствию критериям управления  $Q_{s(t)}$ , по степени согласования с ограничениями  $B_{s(t)}$ , а также по оценке возможности достижения целевого состояния  $G_{s(t)}$ . Наиболее уместный прототип может быть выбран из множества  $R$  на основе заданной функции предпочтений  $\gamma(R)$ , учитывающей  $B_{s(t)}$ ,  $Q_{s(t)}$  и  $\mu(G_{s(t)})$ .

Конкретизация прототипа в прецеденте  $e_{s(t)}$  в момент времени  $t$  требует согласования сценария  $\Sigma_{s(t)}$  с множеством наложенных ограничений  $B_{s(t)}$  и наблюдаемым контекстом ситуации  $\text{Ctx}(s(t))$ , заданным на конечном множестве параметров активности, и поэтому может быть сведена к адаптации прецедента.

Исходя из представленных соображений, можно сформулировать следующие основные идеи сценарно-прецедентного подхода:

- прецедент  $e_{s(t)}$  есть прототип решения в проблемной ситуации  $s(t)$ ;

- поскольку процесс управления является целенаправленным, решение прецедента представляет собой план  $Pl_{s(t)} = [\Sigma_{s(t)}^1, \dots, \Sigma_{s(t)}^m]$ , ведущий к конечной цели управления  $G_{s(t)}$ ;

- план  $Pl_{s(t)}$  является композицией сценариев  $\Sigma_{s(t)}$ , каждый из которых направлен на компенсацию определенного возмущения  $\omega_s$ , действующего на траекторию активности ДО;

- сценарий  $\Sigma_{s(t)}$  представляет собой планируемую последовательность выполняемых последовательно или параллельно во времени операций управления  $[p_1, \dots, p_n]$ ;

- сценарий может содержать альтернатив-

ные последовательности операций управления, выбор одной из которых связан с актуальными на момент осуществления выбора  $t_z$  значениями параметров контекста ситуации  $\text{Ctx}(s(t_z))$ ;

- всякая операция управления  $p_i$  представлена вектором прилагаемых управляющих воздействий  $\bar{U} = \{u_1, \dots, u_m\}$  на множество исполнительных механизмов ДО  $\{\phi_1, \dots, \phi_n\}$ ;

- вследствие стохастических воздействий внешней среды, неполноты и неточности наблюдений, существенной динамики контекста ситуации претерпевает значительные изменения на временном интервале  $[t_1, t_2]$  выполнения сценария;

- выполнение сценария  $\Sigma_{s(t)}$  требует увязывания параметров управляющих воздействий с динамически изменяемыми параметрами ситуации и согласования с действующими в ситуации ограничениями  $B_{s(t)}$ , что требует проведения соответствующих расчетов на каждом шаге выполнения сценария при  $t_x \in [t_1, t_2]$ .

Согласно представленной интерпретации сценарий представляет собой адаптацию средств достижения поставленных целей к динамике среды. Если перенести данный подход к управлению отдельным ДО применительно к управлению ансамблем ДО, перечисленные принципы не изменятся – план  $Pl_{s(t)}$  будет состоять из множества сценариев  $\{\Sigma_{s(t)}^1, \dots, \Sigma_{s(t)}^m\}$  для каждого ДО, составляющего данный ансамбль. А описание ситуации  $s(t)$  будет задано как пространственная конфигурация  $V(t)$ , в которой каждый ДО представлен с помощью триады  $\langle \text{Pos}(A_i), t_i, \phi_j \rangle$ , где  $A_i$  – ДО;  $t_i$  – момент времени,  $\text{Pos}(A_i)$  – позиция ДО  $A_i$  в момент времени  $t_i$ ;  $\phi_j$  – функция, выполняемая ДО  $A_i$  в момент времени  $t_i$ .

## Результаты

Специфика проблемной области заставляет использовать в качестве хранимых в прецедентах решений сложные сценарии, допускающие



## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

адаптацію некоторого базового плана формирования управляющих воздействий в достаточно широких пределах на основе моделей совместного перемещения множества ДО.

Координационное управление гетерогенными ансамблями ДО представляет собой сложный многоуровневый процесс, включающий:

1) операционный (высший) уровень, решающий задачу выбора адекватного плана миссии  $Pl_{s(t)}$  (прецедента) на основе пространственной конфигурации  $V(t)$ . Схема выполнения миссии, заданная в виде множества сценариев  $\{\Sigma_{s(t)}^1, \dots, \Sigma_{s(t)}^m\}$ , подстраивается к  $V(t)$  в результате выполнения процесса адаптации прецедента и далее разбивается на сценарии  $\Sigma_{s(t)}^k$  для всех ДО с назначенной ролью  $k$ , при этом каждый из ДО начинает выполнять свой собственный сценарий;

2) координационный (средний) уровень, задача которого состоит в совместном выполнении сценариев  $\{\Sigma_{s(t)}^1, \dots, \Sigma_{s(t)}^m\}$ . На данном уровне каждый сценарий преобразуется в последовательность триад  $\langle Pos(A_i), t_i, \phi_j \rangle$ , принимая во внимание всю совокупность имеющихся навигационных, ситуационных и временных ограничений  $B_{s(t)}$ . В частности, этот уровень осуществляет контроль приемлемости для каждой позиции в триаде, так как всякая следующая позиция не должна попадать в область запрещенной или опасной активности [13]. Этот уровень также принимает наблюдаемые события и проверяет наличие изменений пространственной конфигурации. В случае имеющихся изменений об этом извещается операционный уровень, который запускает поиск нового плана миссии, основанного на новой пространственной конфигурации. В противном случае, уровень координации уточняет параметры позиции и времени для координации совместных действий ДО в соответствии со сценарием;

3) уровень управления отдельно взятым ДО (нижний), реализующий трансформацию маневров в управляющие воздействия низкого уровня  $\bar{U} = \{u_1, \dots, u_m\}$ . Данный уровень принимает последовательность триад на входе и ге-

нерирует значения параметров для исполнительных механизмов ДО на выходе.

Нижний уровень реализован в виде гибридной системы БРИЗ, сочетающей подсистему, основанную на прецедентах, с подсистемой, основанной на моделях. Последняя реализует модель движения и является ведущей, тогда как прецедентная подсистема является ведомой. Для адаптации сценариев используется алгоритм удовлетворения ограничений для соблюдения критически важных временных ограничений.

Верхний и средний уровни реализованы в виде гибридной событийно-ориентированной системы МУССОН [14], включающей в себя сценарно-прецедентную подсистему, хранилище прецедентов и подсистему, основанную на модели. Последняя используется для вычисления пространственных областей. Сценарии и триггеры для каждого класса событий написаны на языке описания сценариев SCDL, основанном на XML.

Прототип системы управления реализован с использованием языка программирования C++ в ОС Linux. Верхний и средний уровни этой системы основаны на веб-ориентированной геоинформационной системе реального времени, выполненной с использованием фреймворков Django/GeoDjango с PostgreSQL-совместимым движком базы данных.



Рис. 3. Фрагмент театра взаимодействия в ИС МУССОН

Fig. 3. Fragment of the theater of interaction in the IS MUSSON

Подсистема, основанная на моделях, использует многоагентную компьютерную модель совместной активности ДО, позволяющую, основываясь на наблюдаемых параметрах и логико-динамической модели нормативного регулятора, «проигрывать» возможные ситуа-



## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

ции и события, просчитывать реакции на принимаемые решения по управлению. Много-агентная система реализована на основе логико-когнитивных интеллектуальных агентов.

Процесс адаптации решений для текущей навигационной ситуации учитывает особенности пространственной конфигурации ДО, гидрометеорологические условия, временные и функциональные ограничения, поэтому требует выполнения совместного поиска в пространстве описания ситуации и на множестве имеющихся правил, описывающих проблемную область.

### Научная новизна и практическая значимость

Впервые предложена трехуровневая система координационного управления ансамблем динамических объектов, основанная на сценарно-прецедентном подходе, что позволяет снизить информационную перегрузку при анализе текущей ситуации, сократить затраты времени на принятие решений, повысив тем самым эффективность координации ансамбля динамических объектов в процессе выполнения миссии.

### Выводы

Анализ особенностей управления ДО показал возможность использования сценарно-прецедентного подхода, позволяющего рассматривать задачу управления ДО как задачу поиска решения по прецедентам, адаптируя к текущей ситуации хранящееся в прецеденте множество сценариев управляющих воздействий, представляющих план достижения целевого состояния.

Предлагаемый подход позволяет адекватно отражать накопленный опыт и знания по групповому управлению ДО в схожих ситуациях, а его идея состоит в том, что подобие ситуаций является основанием для использования подобных решений по управлению. Данный подход не чувствителен к неточности и неполноте наблюдений. Основным условием его реализации является синхронизация баз прецедентов каждого ДО по времени и содержанию. Другим условием является наличие достаточной компетенции, позволяющей находить уместный прецедент и выбрать адекватный набор сценариев управления.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шерстюк, В. Г. Модель вывода по прецедентам в интеллектуальной системе «Муссон» / В. Г. Шерстюк // Штучний інтелект. – 2015. – № 1/2. – С. 103–111.
2. A CBR system for autonomous robot navigation / R. Ros, R. López De Mántaras, C. Sierra, J. L. Arcos // Proc. of the 2005 Conf. on Artificial Intelligence Research and Development. – Amsterdam, 2005. – Vol. 131. – P. 299–306.
3. Distributed Decision and Control for Cooperative UAVs using Ad-Hoc Communication / Y. Ben-Asher, S. Feldman, P. Gurl, M. Feldman // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2008. – Vol. 16. – Iss. 3. – P. 511–516. doi: 10.1109/tcst.2007.906314.
4. Jadbabaie, A. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules / A. Jadbabaie, J. Lin, A. Morse // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2003. – Vol. 48. – Iss. 6. – P. 988–1001. doi: 10.1109/TAC.2003.812781.
5. Jaidee, U. Case-Based Goal-Driven Coordination of Multiple Learning Agents / U. Jaidee, H. Muñoz-Avila, D. W. Aha // Case-Based Reasoning Research and Development : Lecture Notes in Computer Science. – Berlin ; Heidelberg, 2013. – Vol. 7969. – P. 164–178. doi: 10.1007/978-3-642-39056-2\_12.
6. Lawton, J. R. T. A decentralized approach to formation maneuvers / J. R. T. Lawton, R. W. Beard, B. J. Young // IEEE Transactions on Robotics and Automation. – 2003. – Vol. 19. – Iss. 6. – P. 933–941. doi: 10.1109/tra.2003.819598.
7. Mataric, M. J. Designing and Understanding Adaptive Group Behaviors / M. J. Mataric // Adaptive Behavior. – 1995. – Vol. 4. – Iss. 1. – P. 51–80. doi: 10.1177/105971239500400104.
8. Michael, N. Control of Ensembles of Aerial Robots / N. Michael, V. Kumar // Proc. of the IEEE. – 2011. – Vol. 99. – Iss. 9. – P. 1587–1602. doi: 10.1109/jproc.2011.2157275.
9. Patlasov, O. M. The measurement methodology improvement of the horizontal irregularities in plan / O. M. Patlasov, S. O. Tokariyev // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 4 (58). – С. 121–129. doi: 10.15802/STP2015/49219.
10. Sherstjuk, V. G. Scenario-Case Coordinated Control of Heterogeneous Ensembles of Unmanned Aerial Vehicles / V. G. Sherstjuk // Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD) : Proc.

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

- of 2015 IEEE 3<sup>rd</sup> Int. Conf. (13.10–15.10.2015). – Kyiv, Ukraine, 2015. – P. 275–279. doi: 10.1109/apuavd.2015.7346620.
11. Sherstjuk, V. The case-scenario approach to control the dynamic objects / V. Sherstjuk // Pressing Issues and Priorities in Development of the Scientific and Technological Complex : Proc. of the Conf. – San Francisco, California (USA), 2013. – Vol. 17. – P. 97–103.
  12. Toner, J. Flocks, herds, and schools: A quantitative theory of flocking / J. Toner, T. Yuhai // Physical Review E. – 1998. – Vol. 58. – Iss. 4. – P. 4828–4858. doi: 10.1103/physreve.58.4828.
  13. Tošić, P. T. A Unified Framework for Reinforcement Learning, Co-Learning and Meta-Learning: How to Coordinate in Collaborative Multi-Agent Systems / P. T. Tošić, R. Vilalta // Procedia Computer Science. – 2010. – Vol. 1. – Iss. 1. – P. 2217–2226. doi: 10.1016/j.procs.2010.04.248.
  14. Zharikova, M. Threat Assessment Method for Intelligent Disaster Decision Support System / M. Zharikova, V. Sherstjuk // Advances in Intelligent Systems and Computing. – Berlin, 2016. – Vol. 512. – P. 81–99. doi: 10.1007/978-3-319-45991-2\_6.

В. Г. ШЕРСТЮК<sup>1\*</sup>, І. В. СОКОЛ<sup>2</sup>, К. М. ТАРАСЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Інформаційні технології», Херсонський національний технічний університет, Бериславське шосе, 24, Херсон, Україна, 73000, тел. +38 (050) 396 30 18, ел. пошта v\_sherstyuk@bigmir.net, ORCID 0000-0002-9096-2582

<sup>2</sup>Каф. «Судноводіння», Морський інститут післядипломної освіти імені контр-адмірала Ф. Ф. Ушакова, вул. Старообрядська, 2, Херсон, Україна, 73000, тел. +38 (050) 714 28 60, ел. пошта kherson.sokol@gmail.com, ORCID 0000-0002-7324-1441

<sup>3</sup>Каф. «Судноводіння», Морський інститут післядипломної освіти імені контр-адмірала Ф. Ф. Ушакова, вул. Старообрядська, 2, Херсон, Україна, 73000, ел. пошта katyatarasenko@bk.ru, ORCID 0000-0002-0906-5770

## СЦЕНАРНО-ПРЕЦЕДЕНТНИЙ ПІДХІД ДО УПРАВЛІННЯ ГЕТЕРОГЕННИМ АНСАМБЛЕМ ДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

**Мета.** Стаття присвячена розробці методу інтелектуального координаційного управління складним гетерогенним ансамблем динамічних об'єктів. **Методика.** Вирішення поставленого завдання засноване на використанні сценарно-прецедентного підходу, що подає активність динамічних об'єктів у вигляді шаблонів, які адаптуються до змінюваних умов зовнішнього середовища за допомогою сценаріїв. Для адаптації сценаріїв використовується алгоритм задоволення критично важливих обмежень за часом. Запропонований метод дозволяє адекватно використовувати накопичений досвід та знання щодо групового управління динамічними об'єктами, ґрунтуючись на використанні стереотипів подібних рішень із управління об'єктами в подібних ситуаціях. Розглянуто основні елементи рішень прецедентів: керуючі впливи, операції управління, сценарії, плани. **Результати.** Реалізовано гібридну систему управління, нижній рівень якої виконано на основі гібридної системи БРИЗ, що поєднує підсистему, засновану на прецедентах, із підсистемою, яка реалізує модель руху та є провідною, в той час як прецедентна підсистема є веденою. Верхній та середній рівні системи управління виконано у вигляді гібридної подійно-орієнтованої системи МУССОН, що включає в себе сценарно-прецедентну підсистему, сховище прецедентів та підсистему обчислення просторових областей, засновану на моделі. Сценарії та тригери для кожного класу подій описані за допомогою мови опису сценаріїв SCDL. **Наукова новизна.** Вперше запропоновано тривірневу систему координаційного управління ансамблем динамічних об'єктів, засновану на сценарно-прецедентному підході, при цьому на нижньому рівні реалізується управління окремим динамічним об'єктом, на середньому рівні реалізується координація об'єктів, що спільно рухаються, а на верхньому рівні забезпечується управління ходом виконання місії для ансамблю динамічних об'єктів у цілому. **Практична значимість.** Запропонований підхід є нечутливим до неточності та неповноти спостережень, він дозволяє знизити інформаційне навантаження при аналізі поточної ситуації, скоротити витрати часу на прийняття рішень, підвищивши тим самим ефективність координації ансамблю динамічних об'єктів у процесі виконання місії. Важливою умовою реалізації сценарно-прецедентного методу управління є забезпечення достатньої компетенції, що дозволяє своєчасно знаходити доречний прецедент та обирати адекватну множину сценаріїв управління, а також синхронізація баз прецедентів кожного з динамічних об'єктів за часом та змістом.

**Ключові слова:** динамічний об'єкт; ситуаційне збурення; координація; прецедент; сценарій; керуючий вплив; прототип; обмеження; адаптація

V. G. SHERSTYUK<sup>1\*</sup>, I. V. SOKOL<sup>2</sup>, E. N. TARASENKO<sup>3</sup><sup>1\*</sup>Dep. «Information Technologies», Kherson National Technical University, Beryslavske Shosse, 24, Kherson, Ukraine, 73000, tel. +38 (050) 396 30 18, e-mail v\_sherstyuk@bigmir.net, ORCID 0000-0002-9096-2582<sup>2</sup>Dep. «Navigation», Admiral Ushakov Maritime Institute of Postgraduate Education, Staroobryadcheska St., 2, Kherson, Ukraine, 73000, tel. +38 (050) 714 28 60, e-mail kherson.sokol@gmail.com, ORCID 0000-0002-7324-1441<sup>3</sup>Dep. «Navigation», Admiral Ushakov Maritime Institute of Postgraduate Education, Staroobryadcheska St., 2, Kherson, Ukraine, 73000, e-mail katyatarasenko@bk.ru, ORCID 0000-0002-0906-5770

## SCENARIO-CASE APPROACH TO THE CONTROL OF HETEROGENEOUS ENSEMBLES OF DYNAMIC OBJECTS

**Purpose.** The article is devoted to developing the method of intelligent coordination control of a complex heterogeneous ensemble of dynamic objects. **Methodology.** The method of solving this problem is based on the case-scenario approach presenting the activity of dynamic objects as templates that adapt to changing external conditions by using scenarios. The algorithm of satisfaction of critical time constraints was used to adapt scenarios. The proposed method can adequately reflect the experience and knowledge of control of a dynamic objects' group using similar decision stereotypes to control in similar situations. The main elements of case decisions such as control actions, operations, scenarios, and plans were described. **Findings.** The hybrid control system was implemented. The lower level of the system was developed based on the hybrid system BRIZ, which combining the subsystem based on cases with the subsystem that implements the movement model and so is master, while case subsystem is slave. The middle and top levels of the system were developed as the event-based hybrid system MUSSON, which includes case-scenario subsystem, storage subsystem and subsystem that calculating spatial regions based on the model. Scripts and triggers for each class of events were described by scripting language SCDL. **Originality.** The three-tier coordination control system for ensembles of dynamic objects based on case-scenario approach was proposed for the first time. The lower level is dedicated to control of separate dynamic objects, the second level is aimed to coordination of objects that jointly move, and the upper level provide the mission of the whole ensemble of dynamic objects. **Practical value.** The proposed approach is insensitive to inaccuracies and incomplete observations. It can reduce the information overload in the situation analysis, as well as decision-making time, thus increasing the efficiency of coordination of ensembles of dynamic objects during their mission's execution process. Important conditions for the implementation of scenario-case method are to ensure sufficient competence that allows to find appropriate case and choose an adequate set of scenarios in time, and to synchronize each dynamic object's case base in time and content.

**Keywords:** dynamic object; situational disturbance; coordination; case; scenario; control action; prototype; constraint; adaptation

### REFERENCES

1. Sherstyuk, V. G. (2015). Case inference model in the «Monsoon» intelligent system. *Artificial Intelligence*, 1-2, 103-111.
2. Ros, R., López De Mántaras R., Sierra C., & Arcos J. L. (2005). A CBR system for autonomous robot navigation. *Proceedings of the 2005 Conf. on Artificial Intelligence Research and Development*, 131, 299-306. Netherlands: IOS Press Amsterdam.
3. Ben-Asher, Y., Feldman S., Gurl P., & Feldman M. (2008). Distributed Decision and Control for Cooperative UAVs using Ad-Hoc Communication. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 16(3), 511-516. doi: 10.1109/tcst.2007.906314
4. Jadbabaie, A., Lin, J., & Morse, A. (2003). Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 48(6), 988-1001.
5. Jaidee, U., Muñoz-Avila H., & Aha, D. W. (ICCBR 2013). Case-Based Goal-Driven Coordination of Multiple Learning Agents. *Lecture Notes in Computer Science: Case-Based Reasoning Research and Development*, 7969, 164-178. doi: 10.1007/978-3-642-39056-2\_12
6. Lawton, J. R. T., Beard, R. W., & Young, B. J. (2003). A decentralized approach to formation maneuvers. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 19(6), 933-941. doi: 10.1109/tra.2003.819598
7. Mataric, M. J. (1995). Designing and Understanding Adaptive Group Behaviors. *Adaptive Behavior*, 4(1), 51-80. doi: 10.1177/105971239500400104

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

8. Michael, N., & Kumar, V. (2011). Control of Ensembles of Aerial Robots. *Proceedings of the IEEE*, 99(9), 1587-1602. doi: 10.1109/jproc.2011.2157275
9. Patlasov, O. M., & Tokariyev, S. O. (2015). The measurement methodology improvement of the horizontal irregularities in plan. *Science and Transport Progress*, 4(58), 121-129. doi 10.15802/STP2015/49219
10. Sherstjuk, V. G. (2015). Scenario-case coordinated control of heterogeneous ensembles of unmanned aerial vehicles. *Proc. of International Conference IEEE Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD), October 13-15, 2015*. 275-279. doi: 10.1109/apuavd.2015.7346620
11. Sherstjuk, V. (2013). The case-scenario approach to control the dynamic objects. *Pressing issues and priorities in development of the scientific and technological complex*, 17, 97-103. CA, USA: B&M Publishing.
12. Toner, J., & Yuhai, T. (1998). Flocks, herds, and schools: A quantitative theory of flocking. *Physical Review E*, 58(4), 4828-4858. doi: 10.1103/physreve.58.4828
13. Tošić, P. T., & Vilalta, R. (2010). A Unified Framework for Reinforcement Learning, Co-Learning and Meta-Learning: How to Coordinate in Collaborative Multi-Agent Systems. *Procedia Computer Science*, 1(1), 2217-2226. doi: 10.1016/j.procs.2010.04.248
14. Zharikova, M., & Sherstjuk, V. (2016). Threat Assessment Method for Intelligent Disaster Decision Support System. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 512, 81-99. doi: 10.1007/978-3-319-45991-2\_6

*Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. В. И. Литвиненко (Украина); научным комитетом X Международной научно-практической конференции «Современные информационные и коммуникационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании-2016»*

Поступила в редколлегию: 05.12.2016

Принята к печати: 01.03.2017

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.791.75

А. Г. БЕЛИК<sup>1</sup>, Б. В. ЕФРЕМЕНКО<sup>2\*</sup>, С. Л. МАКУРОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Металлургия и технология сварочного производства», Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500, тел. +38 (0629) 44 61 16, эл. почта alexbelick@yandex.ua, ORCID 0000-0002-3595-036X

<sup>2\*</sup>Каф. «ТМП и литейное производство», Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500, тел. +38 (0629) 44 65 21, эл. почта bodyaefr@gmail.com, ORCID 0000-0003-0438-6433

<sup>3</sup>Каф. «ТМП и литейное производство», Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500, тел. +38 (0629) 44 65 21, ORCID 0000-0002-1809-4143

### ОСОБЕННОСТИ МИКРОСТРУКТУРЫ ХРОМО-НИКЕЛЕВОГО ПОКРЫТИЯ, НАПЛАВЛЕННОГО ПОРОШКОВОЙ ЛЕНТОЙ ПЛ АН-111 С 50 % ПЕРЕКРЫТИЕМ

**Цель.** В работе предполагается провести исследование особенностей микроструктуры покрытия, полученного наплавкой порошковой лентой ПЛ АН-111 с 50 % перекрытием валиков. **Методика.** Износостойкий слой получен электродуговой наплавкой порошковой лентой ПЛ АН-111 на пластину из стали 09Г2С. Наплавка проводилась при следующих параметрах режима: сварочный ток 650–750 А; напряжение на дуге 30–34 В; скорость наплавки 32 м/ч. Микроструктуру исследовали с применением оптических микроскопов «Neophot-21» и «Nikon Eclipse M200», а также с использованием электронного сканирующего микроскопа JEOL JSM-6510 LV. Микротвердость структурных составляющих измеряли с помощью микротвердомера FM-300 (Future-Tech) при нагрузке 10–50 г. **Результаты.** Показано, что наплавка с перекрытием валиков приводит к формированию неоднородной по сечению микроструктуры, которая изменяется по зонам от аустенитной, свободной от карбидов, – до заэвтектической, содержащей первичные карбиды хрома. Выполнен анализ микротвердости структурных компонентов в различных зонах покрытия. Установлено, что твердость аустенита, карбидной эвтектики и карбидов  $M_7C_3$  варьируется в покрытии в пределах 3 100–3 850 МПа, 4 100–6 800 МПа, 12 100–15 100 МПа соответственно. **Научная новизна.** Авторами установлено, что формируемое при наплавке хромо-никелевое покрытие содержит, в основном, аустенитно-карбидную эвтектику с различной плотностью расположения и толщиной карбидных волокон в эвтектических колониях. Вдоль границы с основой залегает однофазный аустенитный слой, переходящий в слой с доэвтектической структурой. В зоне термического влияния от сплавления валиков зафиксирован распад аустенита с формированием зернистых карбидов, что приводит к повышенной растравляемости матрицы в местах обеднения по хрому. Над зоной сплавления валиков покрытие имеет заэвтектическую структуру с наличием крупных первичных карбидов хрома. **Практическая значимость.** Показано, что наплавка порошковой лентой ПЛ АН-111 с 50 % перекрытием валиков приводит к огрублению структуры за счет формирования резко выраженной заэвтектической структуры при наличии крупных первичных карбидов хрома, имеющих пониженную микротвердость.

**Ключевые слова:** наплавка; микроструктура; карбиды; аустенит; микротвердость; перекрытие валиков

#### Введение

Порошковая лента ПЛ АН-111 представляет собой материал для получения наплавленного гетерофазного покрытия на основе хрома и ни-

келя, предназначенного для использования в условиях интенсивного абразивного и газоабразивного изнашивания при повышенных температурах. Эта лента, в частности, успешно

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

применяется для наплавки защитных и контактных поверхностей конусов и чаш, а также контактных поверхностей тарелей и сидел клапанов засыпных аппаратов доменных печей [9]. Работоспособности покрытий в жестких условиях, характерных для эксплуатации доменной печи, способствует высокое содержание легирующих элементов, за счет чего обеспечивается абразивная (эрозионная) износостойкость, теплостойкость и устойчивостью к высокотемпературной коррозии [4, 10]. Преимуществом порошковых ленточных электродов является возможность введения в состав наполнителя легирующих элементов в широком диапазоне концентраций, высокая производительность процесса наплавки, а также получение минимального значения доли участия основного металла в наплавленном, что и определяет эксплуатационные характеристики покрытия. Наплавка порошковой лентой может производиться с нанесением валиков в один слой и в несколько слоев – с перекрытием и без перекрытия. При наплавке с перекрытием происходит частичное расплавление ранее нанесенного валика с перемешиванием металла в переходной диффузионной зоне [15]. Структура последующих валиков и переходных зон может существенно отличаться от структуры валика, наплавленного при первом проходе, приводя к неоднородности свойств покрытия [7] и к избирательному износу наплавленного металла [6]. До настоящего времени характер микроструктуры, формирующейся при перекрытии валиков, наплавленных высоколегированными хромоникелевыми сплавами, остается недостаточно изученной, что не позволяет совершенствовать процесс получения износостойких покрытий.

### Цель

Целью работы явилось исследование особенностей микроструктуры по сечению износостойкого слоя, полученного наплавкой порошковой проволокой ПЛ АН-111 с 50 % перекрытием валиков.

### Методика

Износостойкий слой получили электродуговой наплавкой порошковой лентой ПЛ АН-111 с таким номинальным химическим составом, масс. %:

C..... 5,0  
Cr ..... 40,0  
Mn..... 1,0  
Si ..... 2,0  
Ni ..... 40,0  
Fe ..... ост.

Покрывало наносилось на пластину толщиной 30 мм из стали 09Г2С.

Наплавка проводилась при следующих параметрах режима: сварочный ток – 650–750 А; напряжение на дуге – 30–34 В; скорость наплавки 32 м/ч. Наплавленные образцы остывали на спокойном воздухе, после чего их разрезали абразивным кругом с водяным охлаждением для получения сечения валика, перпендикулярного направлению наплавки. После шлифовки и полировки по стандартной методике поверхность шлифов подвергали длительному травлению при комнатной температуре в 4 % растворе азотной кислоты. Микроструктуру исследовали с применением оптических микроскопов «Neophot-21» и «Nikon Eclipse M200», а также с использованием электронного сканирующего микроскопа (СЭМ) JSM-6510 LV. Микротвердость структурных составляющих измеряли с помощью твердомера FM-300 (Future-Tech) при нагрузке 1–50 г с усреднением значений 5–7 замеров. Размер структурных составляющих определяли с использованием методик количественной металлографии [1].

### Результаты

Поперечное сечение наплавленного слоя представлено на рис. 1. Справа на рисунке показан валик № 1, полученный при первом проходе. Валик № 2 был наплавлен с 50 % перекрытием, то есть расстояние между вершинами валиков примерно соответствует половине их ширины. Анализ распределения микроструктуры производили вдоль линий Л1–Л6, разделяющих покрытие по длине на шесть примерно равных отрезков. Линии Л2 и Л4 соответствуют вершинам валиков, линия Л3 – средней части наплавленного покрытия. На линиях обозначены опорные точки, в которых проводили микроструктурное исследование и замеры микротвердости.

При травлении покрытия визуально было установлено наличие переходной зоны между валиками. Она располагается между линией Л3

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

и вершиной валика № 1 и имеет закругленную (с выпуклостью в сторону валика № 1) границу, показанную на рис. 1 штрихпунктирной линией. Эта зона возникла в результате сплавления валиков, а ее граница фактически обозначает границу распространения жидкой ванны в сто-

рону валика № 1. Линия Л1 соответствует части валика № 1, не затронутой повторным расплавлением, то есть она проходит в участках, сохранивших свою первоначальную структуру, характерную для наплавки в один проход (рис. 2).

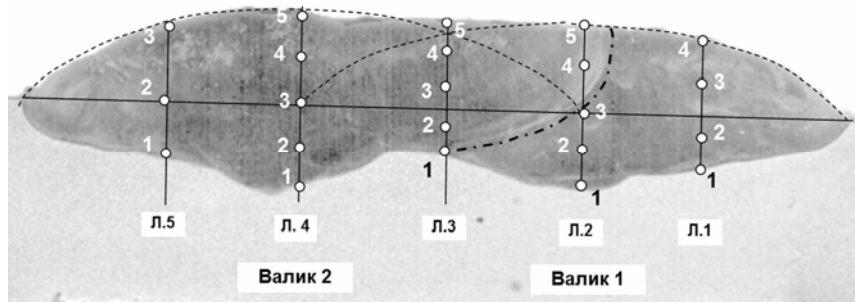
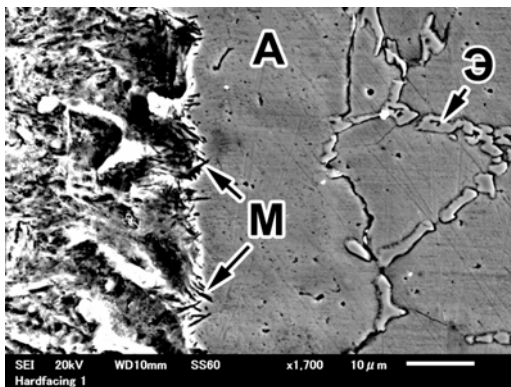
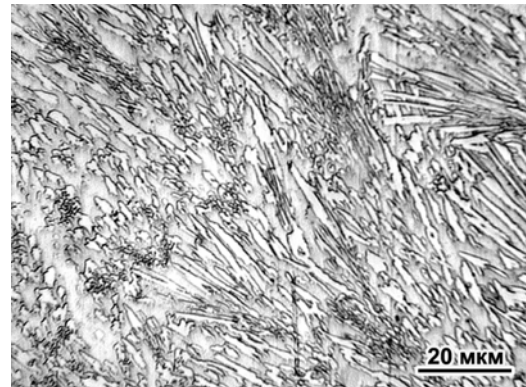


Рис. 1. Сечение наплавленного покрытия и участки анализа микроструктуры

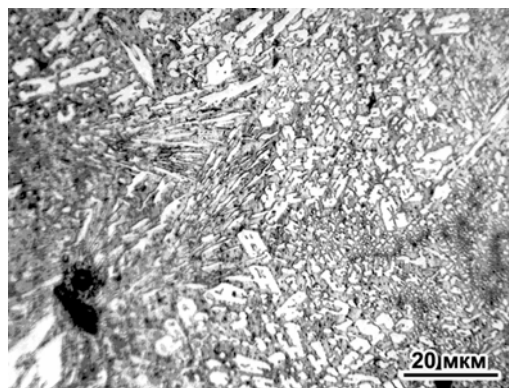
Fig. 1. Cross-section of surfaced coating and points for microstructure analysis



*a – a*



*б – б*



*в – в*

Рис. 2. Микроструктура валика вдоль линии Л1: граница сплавления (точка 1) (а), точка 2 (б), вершина валика (точка 3) (в) (А, М, Э – аустенит, мартенсит, эвтектика, соответственно)

Fig. 2. Microstructure of the bead along the line L1: boarder with substrate (point 1) (a), point 2 (b), the top of the bead (point 3) (c) (A, M, Э – austenite, martensite, eutectic correspondingly)

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

В точке 1, то есть у границы с основой, в покрытии располагается слой твердого раствора (никелевого аустенита) без карбидов шириной до 20 мкм (рис. 2, а) с микротвердостью 3 850 МПа (табл. 2). Причинами его формирования явились: а) перемешивание основного металла с наплавленным металлом при частичном растворении в основе углерода и легирующих элементов, б) быстрая кристаллизация, подавившая выделение карбидной фазы из жидкости. О насыщении основы (стали 09Г2С) углеродом и легирующими элементами свидетельствует игольчатый (высокоуглеродистый) мартенсит, залегающий непосредственно линии сплавления основного металла с наплавленным металлом (рис. 2, а).

За аустенитным слоем следует двухфазная структура, состоящая из аустенитных дендритов, по границам которых залегают карбидная эвтектика «аустенит +  $M_7C_3$ » со средней микротвердостью 4 550 МПа. Наличие дендритов твердого раствора указывает на то, что в зоне, примыкающей к границе сплавления с основой, покрытие имеет доэвтектическую структуру. Начинаясь как тонкая (2–3 мкм) сетка, эвтектика по мере удаления от границы трансформируется в достаточно крупные колонии поперечным се-

чением до 10 мкм, занимающие до 30–40 % площади микрошлифа (рис. 2, б). В точке 2 структура становится типично эвтектической, то есть без наличия избыточных фаз: она состоит из вытянутых эвтектических колоний, в которых карбидные волокна ориентированы вдоль направления теплоотвода к основе. Толщина волокон колеблется в пределах 1–7 мкм, микротвердость эвтектических колоний составляет 4 500 МПа. По мере продвижения к вершине валика (точка 3) в структуре появляются колонии с повышенной плотностью расположения карбидных волокон; их микротвердость (5 100 МПа) превышает микротвердость «разреженных» колоний (4 100 МПа). У самой поверхности (точка 4) структура состоит из эвтектических колоний повышенной твердости (6 800 МПа) с высокой плотностью карбидных волокон при некотором увеличении их поперечного сечения (рис. 2, в), что могло явиться следствием изменения условий кристаллизации. Наличие укрупненных карбидов в точке 4 позволило непосредственно измерить их микротвердость: в поперечном сечении она составила 15 100 МПа, что характерно для карбида  $M_7C_3$  [11, 14] и подтверждает его присутствие в структуре покрытия.

Таблица 1

Микротвердость (МПа) структурных составляющих в различных точках покрытия

Table 1

## Microhardness (MPa) of structural constituents in different coating points

Точка	Линия				
	1	2	3	4	5
1	а 3 850 / э 4 550	а 3 800 / э 4 820	а 3 810 / э 4 500	а 3 700 / э 4 730	а 3 650 / э 4 750
2	э 4 500	а 4 690 / э 4 650	э 4 900	э 4 700	э 4 530 / к 12 250
3	э 4 100–5 300	э 4 660	э 4 500	э 4 640	э 4 390/к 12 000/ а 3 100
4	э 6 800/к 15 100	э 4 510	э 4 200 /к 13 500	э 4 470 /к 12 000	–
5	–	э 4 410	э 5 510 / к 13 350/ а 3 370	э 4 390/к 12 100/ а 3 100	–

а, э, к – аустенит, карбидная эвтектика, первичный карбид, соответственно.

Линия 2 проходит вдоль центральной оси валика №1. Микроструктура в точке 1 на этой линии аналогична представленной на рис. 2, а то есть характеризуется однофазным аустенитным

слоем, переходящим в доэвтектическую структуру. Такое строение характерно для всего контура границы сплавления с основой и наблюдается в точках 1 на различных контрольных ли-

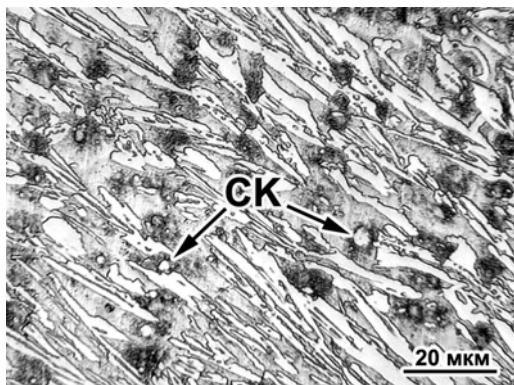


## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

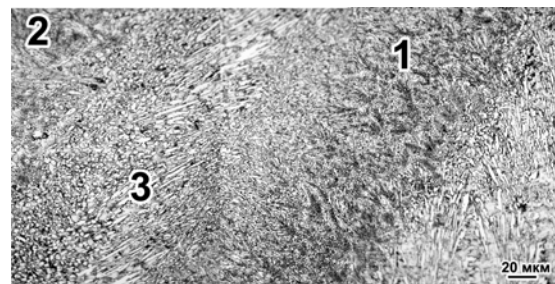
ниях. Точки 2 и 3 на линии Л2 находятся непосредственно под зоной перекрытия валиков; в этих точках структура представляет собой разреженную эвтектику, в промежутках между колониями которой залегают сферические карбиды размерами от 0,2 до 3 мкм (рис. 3, а). Вокруг сферических карбидов матрица сильно растравлена, что указывает на ее обеднение хромом.

Сфероидальные включения располагаются цепочками под определенным углом к карбидным волокнам, то есть к направлению теплоотвода. Такое расположение включений указывает на то, что они возникли в результате твердофазной реакции выделения из аустенита при тепловом воздействии со стороны зоны сплавления валиков (направления цепочек карбидов примерно соответствует фронту распространения тепла от зоны сплавления в направлении валика № 1). Выше точки 3 залегает граница распространения жидкой ванны при нанесении

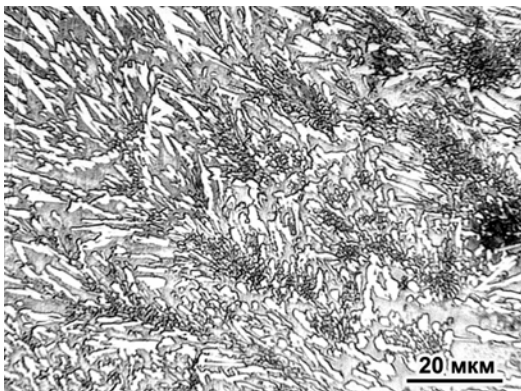
валика 2. Эта граница обозначена двумя концентрическими темными зонами (обозначены как 1 и 2 на рис. 3, б), разделенными более светлой зоной 3 со столбчатыми карбидами. Предположительно, характер строения этих зон обусловлен различной ориентацией карбидов относительно плоскости шлифа. Структура «темных» зон сформирована плотными эвтектическими колониями небольшой длины (15–25 мкм), близко расположенными друг от друга (рис. 3, в). В столбчатой зоне колонии более разрежены, а длина колоний увеличена до 25–60 мкм. В точках 4 и 5 (у поверхности) микроструктура наплавленного слоя имеет эвтектический характер с наличием утолщенных карбидных волокон (рис. 3, г), причем, в отличие от точек 2, 3 зернистые карбиды здесь не наблюдаются, что подтверждает высказанное выше предположение о причине их появления.



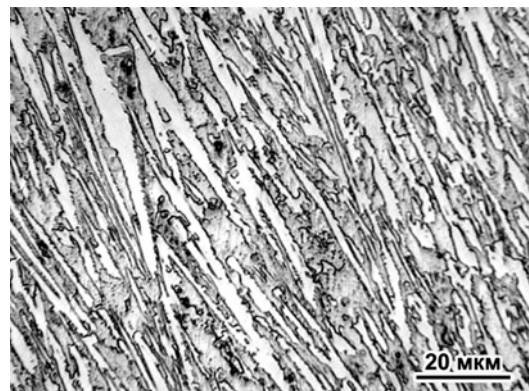
а – а



б – б



в – в



г – г

Рис. 3. Микроструктура вдоль линии Л2: точка 2 (а), переходная зона (б), «темная» полоса (в), вершина валика (точка 5) (г)

Fig. 3. Microstructure along the line L2: point 2 (a), transition zone (b), “dark” layer (c), the top of the bead (point 5) (d)

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

При переходе от валика № 1 к валику № 2 распределение микроструктуры по высоте покрытия претерпевает изменение. Если примерно на 25 % высоты (линия ЛЗ, точка 2) структура имеет характерный для валика 1 эвтектический вид с мелкими карбидными волокнами сечением 0,5–3,0 мкм (рис. 4, *а*), то уже в точке 3 присутствуют укрупненные карбиды с размером 5–15 мкм в поперечном сечении (рис. 4, *б*). В точке 4 и вплоть до самого верха покрытия вдоль линии ЛЗ структура имеет классический заэвтектический характер с наличием крупных первичных карбидов  $M_7C_3$  в виде гексагональных призм с центральной полостью (что является характерным признаком тригонального карбида хрома  $Cr_7C_3$  [12, 13]) (рис. 4, *в*). В поперечном сечении размер карбидов достигает

15–30 мкм, в длину – 40–90 мкм; микротвердость – 13 500 МПа. Окружающая первичные карбиды эвтектика имеет различную плотность карбидных волокон; более «разреженные» колонии имеют микротвердость 4 200–4 500 МПа, более плотные – 5 000–5 510 МПа, участки матрицы возле «разреженных» колоний имеют микротвердость 3 370 МПа.

В большей части валика № 2 (начиная с точки 3 по линии Л4 и точки 2 по линии Л5 до верха покрытия) присутствуют крупные первичные карбиды, размеры которых соответствуют представленным выше (рис. 4, *з*). Микротвердость карбидов составляет в среднем 12 000 МПа, твердость эвтектики вдоль линий Л4 и Л5 изменяется в пределах (4 390–4 730 МПа).

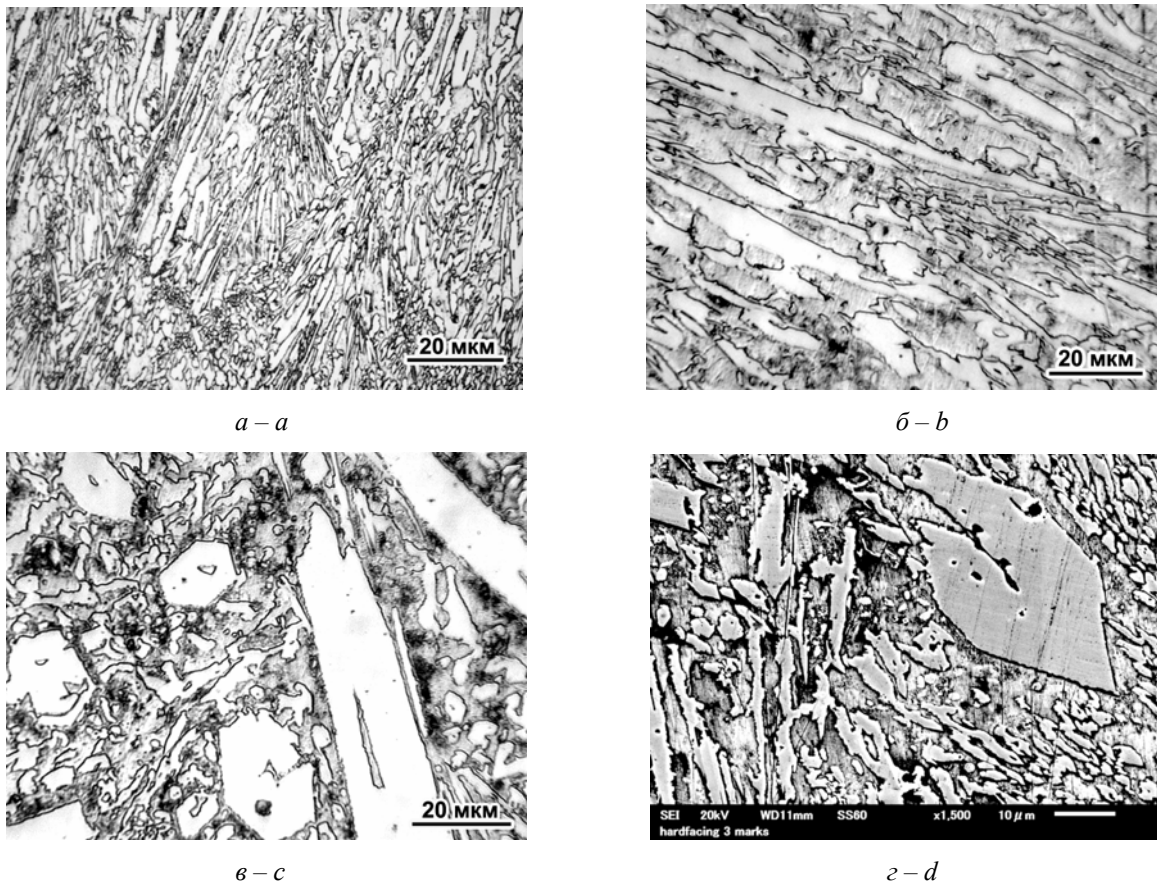


Рис. 4. Микроструктура вдоль линии ЛЗ (точки 2 (*а*), 3 (*б*), 4 (*в*), линия 5 (точка 2 (*з*))

Fig. 4. Microstructure along the line L3 (point 2 (*a*), point 3 (*b*), point 4 (*c*)), line 5 (point 2 (*d*))

При обобщении полученных данных была составлена карта распределения микроструктуры по сечению наплавленного покрытия. Как следует из рис. 5, в пределах покрытия можно

выделить четыре структурные зоны. В зоне 1 залегает узкий пограничный бескарбидный слой, сразу за которым следует слой, имеющий доэвтектическую структуру «дендриты + кар-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

бидная эвтектика», шириной до 100 мкм. Для зоны 2 характерно эвтектическое строение без визуально выявляемых дендритов, с наличием тонких карбидных включений, входящих в эвтектические колонии небольшой длины. В зоне 3 сохраняется эвтектическое строение, однако

отмечается укрупнение эвтектических карбидов с увеличением длины колоний. И, наконец, зона 4 представлена заэвтектической структурой с грубыми первичными карбидами и неоднородной (по плотности залегания карбидных включений) эвтектикой.

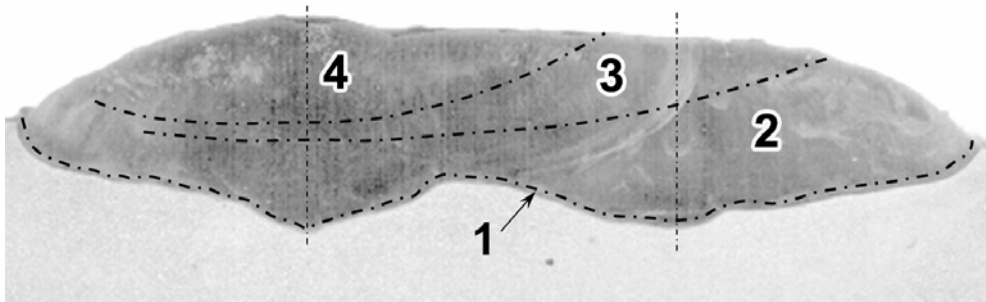


Рис. 5. Структурные зоны по сечению покрытия

Fig. 5. Structural zones in cross section of the coating

Формирование неоднородной структуры обусловлено особенностями кристаллизации при последовательном наплавлении валиков. При нанесении валика № 1 сварочная ванна охлаждалась достаточно быстро, что обеспечило большую степень переохлаждения расплава относительно температуры термодинамического равновесия «жидкость/твердая фаза». В этих условиях энергетически и кинетически более выгодным оказалось возникновение большого количества зародышей карбидов, что привело к формированию плотных эвтектических колоний с тонкими короткими карбидными волокнами при полном подавлении выделения первичных карбидов хрома. Фактически во всем сечении валика №1 (за исключением тонкой зоны вдоль границы сплавления с основой) возникла эвтектическая структура, состоящая из мелких колоний, ориентированных перпендикулярно границе сплавления. Поскольку выделение избыточной фазы (первичных карбидов) было заторможено, содержание хрома и углерода в эвтектике (то есть в карбидах и матрице) оказалось выше равновесного, что указывает на неравновесное состояние эвтектики. О метастабильности эвтектической структуры говорит тот факт, что при нанесении валика №2 в зоне термического влияния (под штрихпунктирной линией) из матричной фазы эвтектики выделились глобулярные карбиды, то есть прошел процесс, сопровождающийся снижением свободной химической энергии системы [5, 8].

Кристаллизация валика № 2 протекала в условиях замедленного теплоотвода в основу в связи с ее прогревом в результате наплавки валика № 1. Кроме того, отвод тепла в основу происходил через валик № 1. Известно, что легирование резко уменьшает коэффициент теплопроводности сплавов за счет искажений кристаллической решетки, приводящих к рассеиванию фононов. Поскольку металл наплавленного слоя представляет собой сложнолегированный твердый раствор, можно полагать, что его теплопроводность сильно понижена по сравнению с материалом основы – сталью 09Г2С. Таким образом, кристаллизация зоны перекрытия (между линиями Л2 и Л3) проходила замедленно. В результате в верхней части зоны перекрытия и в большей части валика №2 структура формировалась в условиях, приближенных к термодинамически равновесным, то есть путем выделения первичных карбидов с обеднением жидкости по углероду и хром и последующим превращением по реакции «L → аустенит +  $M_7C_3$ » [15]. Первичные карбиды, сформировавшиеся в валике №2, имеют микротвердость ~12 000 МПа, что ниже уровня, характерного для карбидов  $M_7C_3$ . Понижение твердости, вероятно, связано с влиянием никеля, который вследствие высокого содержания в покрытии мог частично заменить хром в решетке карбида, уменьшив ковалентную составляющую межатомной связи.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Наличие первичных карбидов в структуре наплавленного слоя может негативно отразиться на износостойкости покрытия за счет явления избирательного износа [1, 4]. Это связано с высокой хрупкостью массивных карбидных кристаллов, которые легко разрушаются и выкрашиваются в условиях статического (при абразивном изнашивании), либо динамического (при эрозионном изнашивании) контакта с абразивными частицами.

### Научная новизна и практическая значимость

Показано, что формируемое при наплавке Cr–Ni покрытие содержит, в основном, аустенито-карбидную эвтектику с различной плотностью расположения и толщиной карбидных волокон в эвтектических колониях. Перекрывание наплавленных валиков приводит к огрублению структуры с формированием резко выраженной заэвтектической структуры при наличии крупных первичных карбидов хрома. В зоне термического влияния от сплавления валиков зафик-

сирован распад аустенита с формированием зернистых карбидов и понижением коррозионной стойкости матрицы в местах обеднения по хрому.

### Выводы

1. Для покрытия, наплавленного порошковой лентой ПЛ АН-111 с 50 % перекрыванием валиков, характерна неоднородная аустенито-карбидная микроструктура, изменяющаяся от однофазной аустенитной до заэвтектической с варьированием микротвердости фазово-структурных составляющих в пределах 3 100–15 100 МПа.

2. Под зоной перекрывания выявлены сфероидальные карбиды, выделившиеся из твердого раствора в результате термического влияния от сплавления валиков.

3. Над зоной перекрывания и в большей части валика № 2 покрытие содержит крупные первичные карбиды  $M_7C_3$ , имеющие пониженную микротвердость.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вакуленко, І. О. Структурний аналіз в матеріалознавстві / І. О. Вакуленко. – Дніпропетровськ : Маковецький, 2010. – 124 с. doi: 10.15407/tpwj2014.06.14.
2. Ворончук, А. П. Порошковые ленты для износостойкой наплавки / А. П. Ворончук // Автоматическая сварка. – 2014. – № 6/7. – С. 75–78.
3. Дегтерёв, А. С. Структура, твердость и абразивный износ Fe–Cr–V–Mo–C покрытий, полученных плазменно-порошковой наплавкой / А. С. Дегтерёв, С. Ф. Гнусов // Техн. науки: от вопросов к решениям : сб. науч. тр. по итогам междунар. науч.-практ. конф. – Томск, 2016. – № 1. – С. 36–40.
4. Жудра, А. П. Наплавочные порошковые ленты / А. П. Жудра, А. П. Ворончук // Автоматическая сварка. – 2012. – № 1. – С. 39–44.
5. Нетребко, В. В. Влияние химического состава высокохромистых чугунов на обрабатываемость резанием / В. В. Нетребко // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 1 (61). – С. 122–130. doi: 10.15802/stp2016/61015.
6. Тарасов, В. В. Избирательный износ наплавленного заэвтектического хромистого сплава / В. В. Тарасов, П. Ф. Лаврик, В. Х. Мацука // Сварочное производство. – 1976. – № 9. – С. 28–29.
7. Теоретические и технологические основы наплавки. Свойства и испытания наплавленного металла / под ред. И. И. Фрумина. – Киев : Изд-во им. Е. О. Патона АН УССР, 1979. – 172 с.
8. Чабак, Ю. Г. Структурные изменения в комплекснолегированном белом чугуне при дестабилизирующем нагреве / Ю. Г. Чабак, В. Г. Ефременко, Р. Р. Станишевский // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 38. – С. 229–232.
9. Чигарев, В. В. Износостойкая наплавка порошковой лентой / В. В. Чигарев, А. Г. Белик, Т. Н. Филиппенко // Зб. наук. пр. нац. ун-ту кораблебудування. – Миколаїв, 2009. – № 3 (426). – С. 168–175.
10. Чигарев, В. В. Порошковые ленты для наплавки / В. В. Чигарев, А. Г. Белик // Сварочное производство. – 2011. – № 8. – С. 38–44.
11. Coronado, J. J. Effect of (Fe, Cr) $_7$ C $_3$  carbide orientation on abrasion wear resistance and fracture toughness / J. J. Coronado // Wear. – 2011. – Vol. 270. – Iss. 3–4. – P. 287–293. doi: 10.1016/j.wear.2010.10.070.
12. Effect of Ti–V–Nb–Mo addition on microstructure of high chromium cast iron / M. Youping, L. Xiulan, L. Yugao [et al.] // China Foundry. – 2012. – Vol. 9, No. 2. – P. 148–153.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

13. Growth characteristics of primary  $M_7C_3$  carbide in hypereutectic Fe-Cr-C alloy / L. Sha, Z. Yefei, X. Xiaolei [et al.] // Sci. Reports. – 2016. – Vol. 6. – P. 32941. doi: 10.1038/srep32941.
14. Jacudine, A. B. The wear behavior of high chromium white cast irons as a function of Silicon and Mischmetal / A. B. Jacudine, W. M. Rainforth // Wear. – 2001. – Vol. 250. – Iss. 1–2. – P. 449–461. doi: 10.1016/S0043-1648(01)00633-0.
15. Phase diagram calculation of high chromium cast irons and influence of its chemical composition / D. Li, L. Liu, Yu. Zhang [et al.] // Materials and Design. – 2009. – Vol. 30. – Iss. 2. – P. 340–345. doi: 10.1016/j.matdes.2008.04.061.
16. Wang, S.-H. A study of the abrasive wear behaviour of laser-clad tool steel coatings / S.-H. Wang, J.-Y. Chen, L. Xue // Surface & Coatings Technology. – 2006. – Vol. 200. – Iss. 11. – P. 3446–3458. doi: 10.1016/j.surfcoat.2004.10.125.

О. Г. БЕЛІК<sup>1</sup>, Б. В. ЄФРЕМЕНКО<sup>2\*</sup>, С. Л. МАКУРОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Металургія та технологія зварювального виробництва», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87500, тел. +38 (0629) 44 61 16, ел. пошта alexbelick@yandex.ua, ORCID 0000-0002-3595-036X

<sup>2\*</sup>Каф. «ТМП та ливарне виробництво», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87500, тел. +38 (0629) 44 65 21, ел. пошта bodyaefr@gmail.com, ORCID 0000-0003-0438-6433

<sup>3</sup>Каф. «ТМП та ливарне виробництво», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87500, тел. +38 (0629) 44 65 21, ORCID 0000-0002-1809-4143

## ОСОБЛИВОСТІ МІКРОСТРУКТУРИ ХРОМО-НІКЕЛЕВОГО ПОКРИТТЯ, НАПЛАВЛЕНОГО ПОРОШКОВОЮ СТРІЧКОЮ ПЛ АН-111 ІЗ 50 % ПЕРЕКРИТТЯМ

**Мета.** У роботі передбачається провести дослідження особливостей мікроструктури покриття, отриманого наплавленням порошковою стрічкою ПЛ АН-111 із 50 % перекриттям валиків. **Методика.** Зносостійкий шар отримано електродуговим наплавленням порошковою стрічкою ПЛ АН-111 на пластину зі сталі 09Г2С. Наплавка проводилась при таких параметрах режиму: зварювальний струм 650–750 А; напруга на дугі 30–34 В; швидкість наплавлення 32 м/ч. Мікроструктуру досліджували із застосуванням оптичних мікроскопів Neophot-21 та Nikon Eclipse M200, а також із використанням електронного скануючого мікроскопа JSM-6 510 LV. Мікротвердість структурних складових заміряли за допомогою мікротвердоміра FM-300 (Future-Tech) при навантаженні 10–50 мН. **Результати.** Показано, що наплавлення з перекриттям валиків призводить до формування неоднорідної по перетину мікроструктури, яка змінюється по зонах від аустенітної, вільної від карбідів, – до заевтектичної, що містить первинні карбіди хрому. Виконано аналіз мікротвердості структурних компонентів у різних зонах покриття. Встановлено, що твердість аустеніту, карбідної евтектики та карбідів  $M_7C_3$  варіюється в покритті у межах 3 100–3 850 МПа, 4 100–6 800 МПа, 12 100–15 100 МПа відповідно. **Наукова новизна.** Авторами встановлено, що хромо-нікелеве покриття, яке формується при наплавленні, містить, в основному, аустенітно-карбідну евтектику з різною щільністю розташування та товщиною карбідних волокон в евтектичних колоніях. Уздовж кордону з основою залягає однофазний аустенітний шар, що переходить у шар із доевтектичною структурою. У зоні термічного впливу від сплавлення валиків зафіксовано розпад аустеніту з формуванням зернистих карбідів, що призводить до підвищеної розтравлюваності матриці в місцях збіднення по хрому. Над зоною сплавлення валиків покриття має заевтектичну структуру з наявністю великих первинних карбідів хрому. **Практична значимість.** Показано, що наплавлення порошковою стрічкою ПЛ АН-111 із 50 % перекриттям валиків призводить до огрубіння структури за рахунок формування різко вираженої заевтектичної структури при наявності великих первинних карбідів хрому, які мають знижену мікротвердість.

*Ключові слова:* наплавка; мікроструктура; карбіди; аустеніт; мікротвердість; перекриття валиків

A. G. BELIK<sup>1</sup>, B. V. EFREMENKO<sup>2\*</sup>, S. L. MAKUROV<sup>3</sup><sup>1</sup>Dep. «Metallurgy and Technology of Welding», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87500, tel. +38 (0629) 44 61 16, e-mail alexbelick@yandex.ua, ORCID 0000-0002-3595-036X<sup>2\*</sup>Dep. «Theory of Metallurgical Processes and Foundry», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87500, tel. +38 (0629) 44 65 21, e-mail bodyaefr@gmail.com, ORCID 0000-0003-0438-6433<sup>3</sup>Dep. «Theory of Metallurgical Processes and Foundry», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87500, tel. +38 (0629) 44 65 21, ORCID 0000-0002-1809-4143

## MICROSTRUCTURE FEATURES OF CHROME-NICKEL COATING WELDED WITH FILLER WIRE PL AN-111 WITH A 50% OVERLAP

**Purpose.** The paper involves investigation of microstructure features of the coating welded with filler wire PL AN-111 with a 50% beads overlap. **Methodology.** Wear-resistant layer was formed by means of electric arc deposit welding using filler wire PL AN-111 on the plate from steel 09G2S. Deposit welding was conducted under the following parameters: welding current is of 650-750 A; arc voltage is of 30-34 V; welding speed is of 32 m/h. Microstructure was researched with application of optical microscopies “Neophot-21”, “Nikon Eclipse M200” and electron scanning microscopy JEOL JSM-6510 LV. Microhardness of structural constituents was measured with tester FM-300 (Future-Tech) under loading of 10-50 g. **Findings.** It is shown that the overlap of the beads leads to the formation of inhomogeneous microstructure in the cross section that varies by zones from free-carbide austenite to hypereutectic microstructure with primary chromium carbides. The analysis of the microhardness of the structural constituents in various coating areas was carried out. It was found that hardness of austenite, carbide eutectic and carbides  $M_7C_3$  varies in coatings in the range of 3 100-3 850 MPa, 4 100-6 800 MPa and 12 100-15 100 MPa, accordingly. **Originality.** Authors determined that Cr-Ni coating comprises substantially austenitic-carbide eutectic with different density and thickness of carbide fibers within eutectic colonies. Along the border “base/coating” a single-phase austenitic layer lies which turns into a layer with a hypoeutectic structure. In the heat affected zone from beads fusion austenite disintegration with the granular carbides formation was recorded. This leads to decreasing of matrix corrosion resistance due to chromium depletion. Above the zone of beads fusion, the coating has a hypereutectic structure with the presence of large primary chromium carbides. **Practical value.** It is shown that deposit welding with filler wire PL AN-111 with a 50% overlap of beads results in a coarsening of the structure due to formation of a hypereutectic structure comprising in the presence of large primary chromium carbides with lower microhardness.

**Keywords:** deposit welding; microstructure; carbides; austenite; microhardness; beads overlap

### REFERENCES

1. Vakulenko, I. O. (2010). *Strukturnyi analiz v materialoznavstvi*. Dnipropetrovsk: Makovetskyi.
2. Voronchuk, A. P. (2014). Flux-cored strips for wear-resistant surfacing. *The Paton Welding Journal*, 6-7, 75-78. doi: 10.15407/tpwj2014.06.14
3. Degterov, A. S., & Gnyusov, G. F. (2016). Struktura, tverdost i abrazivnyy iznos Fe-Cr-V-Mo-C pokrytiy, poluchennykh plazmenno-poroshkovoy naplavykoy. *Proceedings of the Scientific International Conference Tekhnicheskoe nauki: ot voprosov k resheniyam, October 25, 2016, Tomsk*. 36-40. Retrieved from <http://evansys.com/articles/tekhnicheskoe-nauki-ot-voprosov-k-resheniyam-sbornik-nauchnykh-trudov-poitogam-mezhdunarodnoy-nauch/seksiya-7-materialovedenie-i-metallurgicheskoe-oborudovanie/struktura-tverdost-i-abrazivnyy-iznos-fe-cr-v-mo-c-pokrytiy-poluchennykh-plazmenno-poroshkovoy-napla/>
4. Zhudra, A. P., & Voronchuk, A. P. (2012). Cladding flux-cored strips (Review). *The Paton Welding Journal*, 1, 34-38.
5. Netrebko, V. V. (2016). The influence of chemical composition of high-chromium cast irons on the machinability. *Science and Transport Progress*, 1(61), 122-130. doi: 10.15802/stp2016/61015
6. Tarasov, V. V., Lavrik, P. F., & Matsuka, V. H. (1976). Izbiratelnyy iznos naplavlennogo zaevteticheskogo khromistogo splava. *Svarochnoye proizvodstvo*, 9, 28-29.
7. Frumin, I. I. (Ed.). (1979). *Teoreticheskiye i tekhnologicheskoye osnovy naplavyki. Svoystva i ispytaniya naplavlennogo metalla*. Kyiv: Paton Publishing House.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

8. Chabak, U. H., Yefremenko, V. H., & Stanishevskyi, R. R. (2011). Structural changes have in complex alloying white iron during destabilizing heating. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 38, 229-232.
9. Chigarev, V. V., Belik, A. G., & Filippenko, T. N. (2009). Iznosostoykaya naplavka poroshkovoy lentoy. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia*, 3(426), 168-175.
10. Chigarev, V. V., & Belik, A. G. (2011). Flux-cored strips for welding. *Svarochnoye Proizvodstvo*, 8, 38-44.
11. Coronado, J. J. (2011). Effect of (Fe,Cr)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> carbide orientation on abrasion wear resistance and fracture toughness. *Wear*, 270(3-4), 287-293. doi: 10.1016/j.wear.2010.10.070
12. Ma, Y., Li, X., Liu, Y., Zhou, S., Dang, X. (2012). Effect of Ti-V-Nb-Mo addition on microstructure of high chromium cast iron. *China Foundry*, 9(2), 148-153.
13. Sha, L., Zhou, Y., Xing, X., Wang, J., Ren, X., & Yang, Q. (2016). Growth characteristics of primary M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> carbide in hypereutectic Fe-Cr-C alloy. *Scientific Reports*, 6, 32941. doi: 10.1038/srep32941
14. Jacudine, A. B., & Rainforth, W. M. (2001). The wear behavior of high chromium white cast irons as a function of Silicon and Mischmetal. *Wear*, 250(1-2), 449-461. doi: 10.1016/s0043-1648(01)00633-0
15. Li, D., Liu, L., Zhang, Y., Ye, C., Ren, X., Yang, Y., & Yang, Q. (2009). Phase diagram calculation of high chromium cast irons and influence of its chemical composition. *Materials and Design*, 30(2), 340-345. doi: 10.1016/j.matdes.2008.04.061
16. Wang, S.-H., Chen, J.-Y., & Xue, L. (2006). A study of the abrasive wear behaviour of laser-clad tool steel coatings. *Surface & Coatings Technology*, 200(11), 3446-3458. doi: 10.1016/j.surfcoat.2004.10.125

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. В. Н. Матвиенко (Украина); д.т.н., проф. И. А. Вакуленко (Украина)

Поступила в редколлегию: 05.12.2016

Принята к печати: 01.03.2017

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

УДК 621.867.52-034'64

В. И. ДЫРДА<sup>1</sup>, Ю. Н. ОВЧАРЕНКО<sup>2</sup>, С. В. РАКША<sup>3</sup>, А. А. ЧЕРНИЙ<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Институт геотехнической механики им. Н. С. Полякова НАН Украины, ул. Симферопольская, 2а, Днепро, Украина, 49005, тел. +38 (056) 246 01 51, +38 (056) 370 26 97, эл. почта vita.igtm@gmail.com, ORCID 0000-0001-7961-1442

<sup>2</sup>Каф. «Надежность и ремонт машин», Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет, ул. С. Ефремова, 25, Днепро, Украина, 49600, тел. +38 (056) 713 51 39, эл. почта ovcharenko.yu.m@dsau.dp.ua, ORCID 0000-0002-4306-4704

<sup>3</sup>Каф. «Прикладная механика и материаловедение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 47 15 18, эл. почта raksha@ukr.net, ORCID 0000-0002-4118-1341

<sup>4\*</sup>Каф. «Надежность и ремонт машин», Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет, ул. С. Ефремова, 25, Днепро, Украина, 49600, тел. +38 (067) 942 54 35, эл. почта sanek20.1984@gmail.com, ORCID 0000-0003-0691-5829

### ДИНАМИКА ВИБРОПИТАТЕЛЕЙ С НЕЛИНЕЙНОЙ УПРУГОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

**Цель.** Условием бесперебойной и эффективной работы каждой технологической линии является использование транспортирующих машин с высокими техническими характеристиками. Хорошо себя зарекомендовали на практике конструкции машин для транспортировки, которые используют в процессе работы вибрацию. Применение виброустановок требует оптимизации режимов их работы. В виде упругого звена все больше используют резинометаллические элементы, характеризующиеся нелинейностью демпфирующих свойств. Поэтому в работе необходим поиск новых, более совершенных методов расчета динамических характеристик вибромашин с учётом свойств резины как амортизационного материала. **Методика.** Рассмотрено динамику вибрационной машины, которая имеет в качестве упругих звеньев резинометаллические блоки и буферные амортизаторы, ограничивающие амплитуду колебаний рабочего органа. Предложенный метод определения амплитудно-частотной характеристики вибропитателя базируется на принципе Вольтера, который при расчетах демпфирующих свойств амортизаторов дает возможность учитывать упруго-наследственные свойства резины. При корректировке динамических жесткостей основных упругих связей и буферов вибропитателя, используя принцип наследственности свойств резины, определяют зависимость амплитуды колебаний рабочего органа машины. Такой метод получил название «интегро-операторный» с применением дробно-экспоненциальных ядер релаксации. **Результаты.** Используя выведенную формулу определения амплитуды, построено резонансную кривую нелинейной одномассной системы. Сопоставлением теоретических и практических результатов установлено, что использование предложенной методики расчета обеспечивает достаточно полное описание демпфирующих параметров резинометаллических изделий и одновременно является эффективным средством расчета амплитудно-частотных характеристик нелинейных колебательных систем. **Научная новизна.** Авторами усовершенствована методика определения демпфирующих характеристик резинометаллических изделий и амплитудно-частотных характеристик нелинейных колебательных систем путем введения в алгоритм расчета зависимостей, учитывающих упруго-наследственные свойства резин. **Практическая значимость.** Использование интегро-операторного метода с применением дробно-экспоненциальных ядер релаксации обеспечит повышение точности расчетов демпфирующих параметров резинометаллических изделий, амплитудно-частотных характеристик нелинейных колебательных систем и даст возможность еще больше оптимизировать режимы работы вибрационного оборудования. Изготовленные с учетом принципа наследственности свойств резины резинометаллические блоки для упругой подвески виб-



## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

ропитателя исключают вероятность ограничения производительности технологической линии в связи с низкой долговечностью деталей подвески питателя.

*Ключевые слова:* горные машины; эластомерные элементы; методы расчета; упруго-наследственные среды

### Введение

В настоящее время во многих областях народного хозяйства (транспорт, горнодобывающая, сельское хозяйство, металлургия и др.), широко используют вибрационные машины и комплексы различных типов.

Как показали научные исследования [1–10], опыт конструирования и внедрения в производство тяжелых машин вибрационного типа, проблема высокопроизводительного и безопасного выпуска и погрузки руды из очистных блоков может быть решена при использовании вибрационных питателей и комплексов (рис. 1, 2). В настоящее время имеются и другие технологии [6], однако вибровыпуск на сегодняшний день является по-прежнему актуальным.

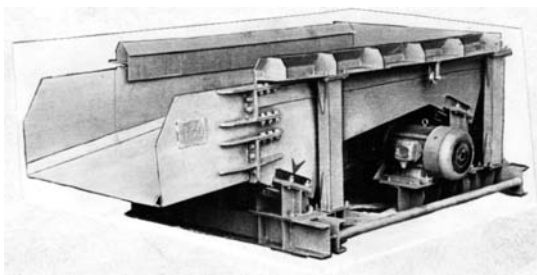


Рис. 1. Вибропитатель типа ВПР-4М с резиновой упругой подвеской (типа БРМ)

Fig. 1. Vibrating feeder type VPR-4M with rubber elastic suspension (type BRM)

Наиболее полно современным требованиям отвечает вибрационный выпуск, позволяющий выпускать горную массу крупностью до 1,2...1,4 м, с технической производительностью 1 500...2 000 т/ч и наработкой не ниже 1,2...1,5 млн т.

Общее понижение ведения горных работ и связанные с глубокими шахтами усложнения потребовали интенсификации и концентрации отработки блоков и залежей, применения высокопроизводительных систем разработки с массовой отбойкой руды скважинными зарядами ВВ, перехода на циклично-поточные и поточные технологии подземной добычи. Важнейшим сдерживающим фактором при этом являлось наличие зависаний выпускаемой крупнокусковой горной массы.



Рис. 2. Вибрационный питатель ВПР-4М в шахте при добыче урановой руды

Fig. 2. Vibrating feeder VPR-4M in the mine during extraction of uranium ore

Для ликвидации этого отрицательного эффекта и для интенсификации процесса в целом разработана и исследована оригинальная схема вибрационных секционированных питателей, позволяющих расширить зону воздействия вибрации на выпускаемый материал и превратить выпускное отверстие в выпускную щель, значительно превышающую максимальные размеры отдельных кусков выпускаемого материала. Новый метод секционирования использован в конструкциях вибрационных питателей малогабаритных типа ПВМ и питателей вибрационных секционированных типа ПВС.

Применение секционированных вибропитателей и комплексов, по сравнению с обычными машинами, позволило снизить объем горнопроходческих работ и потери руды в днищах блоков, увеличить производительность и надежность процесса за счет снижения в 25...60 раз количества зависаний без дополнительных энергетических затрат.

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Разработке вибрационных машин и комплексов способствовало следующее.

Во-первых, правильный выбор структурной схемы и использование новых методов динамических расчетов и рационального проектирования как машин в целом, так и отдельных их элементов; использование современных принципов и достижений в области технологии вибротранспортирования крупнокусковых материалов при значении режимов вибрации: амплитуд 3...5 мм и наименее энергоемкой частоты вынужденных колебаний 15,5...17,5 Гц.

Во-вторых, использование оригинальных и высоконадежных резиновых упругих звеньев: в питателях ПВМ-1,0/1,5, ПВГ-1,6/4,0 использована упругая опора, позволяющая реализовать направленные колебания; в остальных машинах использован новый тип упругой опоры с буферным элементом, позволяющим в несколько раз увеличить надежность упругой подвески питателя, работающего в условиях экстремальных динамических нагрузок, вызываемых ведением взрывных работ по отбойке, ликвидации зависаний и дроблению негабаритов, а также повысить производительность виброустановки на 15...20 % при одновременном снижении удельных энергозатрат на 10...12 %.

Для защиты рабочих органов от ударных нагрузок и абразивного износа использовалась резиновая футеровка. Элементы упругой подвески вибрационных машин (рис. 3), изготавливались из традиционных марки резин типа 2959 и новых, специально разработанных марок. Для изготовления буферных элементов и элементов упругой подвески машин использовалась резина 2959; для элементов подвески и поддерживающих элементов – 51-1562. Для упругой подвески вибропитателей и комплексов были разработаны также резиновые цилиндрические элементы.

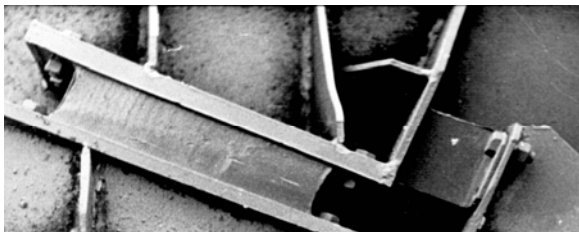


Рис. 3. Упругая подвеска вибропитателя ВПР-4М

Fig. 3. Elastic Suspension of vibrating feeder VPR-4M

В-третьих, применение оригинального двухвального вибровозбудителя позволило более рационально использовать энергию привода и повысить техническую производительность питателей на 30...35 % без дополнительных энергозатрат.

Применение вибрационных питателей и схем вибрационного выпуска, доставки и погрузки руды в подземных условиях позволило механизировать один из наиболее трудоемких и опасных процессов добычи и решить при этом следующие задачи:

- увеличить производительность выпуска и погрузки крупнокусковой горной массы в 2,5...3 раза и высвободить двух рабочих на выпуск;
- увеличить в несколько раз интенсивность отработки и уменьшить срок эксплуатации очистных блоков и горизонтов;
- уменьшить трудоёмкость и снизить себестоимость процесса выпуска и погрузки руды;
- повысить равномерность истечения горной массы из выпускных отверстий и снизить в 3...5 раз частоту зависаний крупнокускового материала; применение секционированных питателей снижает количество зависаний в 25...60 раз;
- увеличить размер кондиционного выемочного куска;
- практически исключить случаи травматизма на процесс выпуска и погрузки, занимающие до 60 % от всех случаев на подземных работах;
- механизировать процесс выпуска и погрузки и создать условия для осуществления малоотходной циклично-поточной технологии добычи;
- впервые в практике горного производства применить щелевой выпуск руды из очистного блока (без горизонта вторичного дробления) через отверстия большого сечения практически любого гранулометрического состава;
- снизить потери руды в днищах блоков и объём горнопроходческих работ.

### Цель

Целью данной работы является поиск новых, более совершенных методов расчета динамических характеристик вибромашин с учетом свойств резины, как амортизационного материала.

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

## Методика

Рассмотрим динамику вибродвиателя типа ВПР с инерционным приводом, упругая система которого включает элементы сдвига типа БРМ и буферные амортизаторы, как показано на рис. 3. Такая колебательная система имеет кусочно-линейную характеристику восстанавливающей силы упругих связей за счет постановки резиновых буферов с некоторым зазором  $e$ , рис. 4.

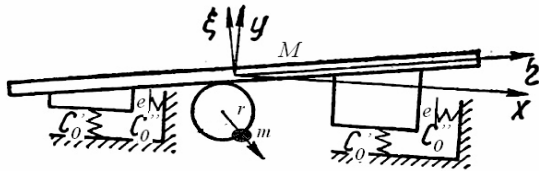


Рис. 4. Кинематическая схема вибродвиателя с круговым направлением вынуждающей силы:

$M$  – масса грузонесущего органа машины,  $C_0'$  и  $C_0''$  – приведенная динамическая жесткость основных упругих связей и буферов соответственно;  $m$  – масса неуравновешенных грузов вибратора, отнесенных на расстояние  $r$  от оси;  $e$  – зазор установки буферов

Fig. 4. Kinematic scheme of vibrating feeder with a circular direction of the driving force:

$M$  – is the weight of the vehicle's load bearing body,  $C_0'$  and  $C_0''$  the reduced dynamic stiffness of the main elastic bonds and buffers, respectively,  $m$  – the mass of the unbalanced loads of the vibrator, spaced by a distance  $r$  from the axis;  $e$  – buffer clearance

Уравнение движения рассматриваемой системы в случае идеальной упругости связей будет иметь вид

$$M\ddot{x} + U(x) = P \sin \omega t,$$

где  $P = mr\omega^2$  – амплитуда возмущающей силы;  $x$  – текущее значение перемещения грузонесущего органа машины;  $U(x)$  – функция восстанавливающей силы упругих связей:

$$U(x) = \begin{cases} C_0'x & \rightarrow -e \leq x \leq e; \\ C_0''x + (C_0' - C_0'')e & \rightarrow x > e; \\ C_0''x - (C_0' - C_0'')e & \rightarrow x < -e. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $M$  – масса грузонесущего органа машины,  $C_0'$  и  $C_0''$  – приведенная динамическая жесткость основных упругих связей и буферов соответственно,  $m$  – масса неуравновешенных

грузов вибратора, отнесенных на расстояние  $r$  от оси.

Согласно принципу Вольтера [8], для учета упруго-наследственных свойств материала связей в уравнении (1) следует заменить мгновенные жесткости операторами

$$C_t' = C_0' \left[ 1 - \chi Y_\alpha(-\beta) \right];$$

$$C_t'' = C_0'' \left[ 1 - \chi Y_\alpha(-\beta) \right].$$

Здесь  $Y_\alpha(-\beta, t - \tau)$  – экспоненциальная функция дробного порядка;

$$Y_\alpha(-\beta, t - \tau) = (t - \tau)^\alpha \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-\beta)^n (t - \tau)^{n(1+\alpha)}}{\Gamma[(n+1)(1+\alpha)]};$$

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\chi$  – реологические параметры резины;  $\Gamma$  – гамма-функция.

Тогда для коэффициента диссипации энергии и модуля упругости получим

$$\begin{aligned} \psi &= \frac{S}{S_0} = 2\pi B; \\ \frac{G(\omega)}{G_0} &= \sqrt{\left( \frac{P_1}{P_0} \right)^2 - \frac{\psi^2}{4\pi^2}} = 1 - A, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$A = \frac{\chi(\omega^k \cos \delta + \beta)}{\omega^{2k} + 2\beta\omega^k \cos \delta + \beta^2};$$

$$B = \frac{\chi\omega^k \sin \delta}{\omega^{2k} + 2\beta\omega^k \cos \delta + \beta^2};$$

$$-1 < \alpha < 0; \quad k = 1 + \alpha; \quad \frac{\chi}{\beta} = \lambda;$$

$$\beta = t_0^{-k}; \quad \delta = 0, 5\pi k.$$

Здесь  $t_0$  – обобщенное время релаксации,  $S$  – площадь гистерезисной петли,  $X_0$  и  $P_1$  – амплитуды перемещения и усилия соответственно;  $P_0$  – амплитуда усилия в предположении идеальной упругости материала;  $S_0$  – площадь треугольника со сторонами  $X_0$  и  $P_0$ , то есть полная энергия при идеальной упругости материала.

Соотношения (2) справедливы в случае применения произвольных ядер типа замкнуто-

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

го цикла и могут быть использованы для определения зависимостей  $A(\omega)$  и  $B(\omega)$ .

В этом случае для описания механической реакции материала достаточно располагать значениями трех параметров –  $\alpha$ ,  $\lambda$  и  $t_0$ , имеющих конкретный физический смысл:

$$\lambda = \frac{G_0 - G_\infty}{G_0}; \quad \alpha = 1 - \frac{4}{\pi} \arctg \frac{\psi_{\max}}{\pi \lambda}; \quad (3)$$

$$t_0 = [\omega(\psi_{\max})]^{-1},$$

где  $\psi_{\max}$  – максимальное значение технического коэффициента поглощения;  
 $G_\infty = \lim_{\omega \rightarrow 0} G(\omega)$ ;  $G_0 = \lim_{\omega \rightarrow \infty} G(\omega)$ .

Для определения реологических параметров  $\alpha$ ,  $\lambda$  и  $t_0$  по формулам (3) необходимо располагать достоверными экспериментальными данными о значениях  $G$  и  $\psi$  в весьма широком диапазоне частот.

Полученное при этом символическо-дифференциальное уравнение для удобства дальнейших выкладок целесообразно преобразовать к виду

$$M\ddot{x} + C_t''x + (C_t' - C_t'')f(x) = P \sin \omega t, \quad (4)$$

где

$$f(x) = \begin{cases} x & \rightarrow -e \leq x \leq e; \\ e & \rightarrow x > e; \\ -e & \rightarrow x < -e. \end{cases}$$

В первом приближении решение уравнения (4) имеет вид

$$x = a \sin(\omega t - \theta).$$

Амплитуда  $a$  вынужденных колебаний грузонесущего органа определяется при этом из трансцендентного характеристического уравнения

$$Ma\omega^2 \pm \sqrt{P^2 - \chi^2 B^2 F^2} = F(1 - \chi A), \quad (5)$$

где

$$F = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi U(a \sin \eta_1) \sin \eta_1 d\eta_1 =$$

$$= \frac{a}{\pi} [\pi C_0'' + (C_0' - C_0'')(2\eta_0 + \sin 2\eta_0)]; \quad (6)$$

$$\eta_1 = \omega t; \quad \eta_0 = \arcsin \frac{e}{a}. \quad (7)$$

В уравнениях (5)–(7) величины жесткостей упругих связей  $C_0'$  и  $C_0''$ , а также реологические параметры  $A$  и  $B$  могут зависеть от температуры нагрева резины.

## Результаты

На графике (рис. 5) показана амплитудно-частотная характеристика, рассчитанная по формуле (5) при следующих параметрах колебательной системы:  $M = 2\,000$  кг;  $C_0' = 1$  МН/м;  $C_0'' = 20$  МН/м;  $G_0 = 1$  МН/м;  $e = 0,005$  м.

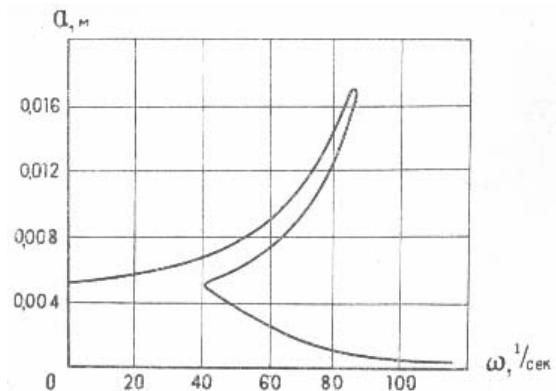


Рис. 5. Резонансная кривая нелинейной одномассной системы с упругим приводом

Fig. 5. Resonance curve of nonlinear one-mass system with elastic drive

## Научная новизна и практическая значимость

Усовершенствована методика определения демпфирующих характеристик резинометаллических изделий и амплитудно-частотных характеристик нелинейных колебательных систем путем введения в алгоритм расчета зависимостей, учитывающих упруго-наследственные свойства резин. Использование интегро-операторного метода с применением дробно-экспоненциальных ядер релаксации обеспечит повышение точности расчетов демпфирующих параметров резинометаллических изделий и амплитудно-частотных характеристик нелинейных колебательных систем и даст возможность еще больше оптимизировать режимы работы вибрационного оборудования.

**Выводы**

Таким образом, интегро-операторный метод в случае применения дробно-экспоненциальных ядер релаксации обеспечивает доста-

точно полное описание демпфирующих параметров резинометаллических изделий и одновременно является эффективным средством расчета амплитудно-частотных характеристик нелинейных колебательных систем.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Калганков, Є. В. Теоретичне та експериментальне дослідження довговічності гумової футеровки / Є. В. Калганков, І. М. Цаніді // Геотехнічна механіка : міжвідом. зб. наук. пр. / Ін-т геотехн. механіки НАН України. – Дніпропетровськ, 2014. – Вип. 116. – С. 180–185.
2. Козуб, Ю. Г. Нелинейное деформирование многослойных резинометаллических амортизаторов / Ю. Г. Козуб, Г. А. Козуб // Геотехническая механика : межведом. сб. науч. тр. / Ин-т геотехн. механики НАН Украины. – Днепропетровск, 2015. – Вип. 121. – С. 127–139.
3. Определение временных характеристик резиновых элементов машин с учётом развивающейся поврежденности / А. С. Кобец, С. П. Сокол, Т. Е. Твердохлеб [и др.] // Геотехническая механика : межведом. сб. науч. тр. / Ин-т геотехн. механики НАН Украины. – Днепропетровск, 2014. – Вип. 116. – С. 104–111.
4. Пат. 108758 Україна, МПК F 16 F 15/00, F 16 F 1/36. Буферний віброізолятор гірничого віброживильника ; заявник та патентовласник Дирда В. І., Пухальський В. М., Калганков Є. В., Лисиця М. І., Черний О. А. – № u201601664 ; заявл. 22.02.2016 ; опубл. 25.07.2016, Бюл. № 14. – 2 с.
5. Прикладная механика упруго-наследственных сред : в 3 т. / А. Ф. Булат, В. И. Дырда, В. Г. Карнаухов [и др.]. – Киев : Наук. думка, 2011–2014. – Т. 1–3.
6. Работнов, Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций / Ю. Н. Работнов. – Москва : Наука, 1966. – 752 с.
7. Работнов, Ю. Н. Элементы наследственной механики твердых тел / Ю. Н. Работнов. – Москва : Наука, 1977. – 384 с.
8. Разработка и широкое промышленное внедрение вибрационных машин и комплексов выпуска и доставки урановых руд при подземной добыче / А. Ф. Булат, В. И. Дырда, В. Н. Пухальский [и др.] // Геотехническая механика : межведом. сб. науч. тр. / Ин-т геотехн. механики НАН Украины. – Днепропетровск, 2015. – Вип. 121. – С. 12–21.
9. Расчет долговечности резиновых буферных амортизаторов тяжёлых горных вибропитателей / В. Н. Пухальский, Н. И. Лисица, Т. Е. Твердохлеб [и др.] // Геотехническая механика : межведом. сб. науч. тр. / Ин-т геотехн. механики НАН Украины. – Днепропетровск, 2014. – Вип. 116. – С. 143–157.
10. Суглобов, В. В. Обоснование центрирующей способности новой конструкции барабанов ленточного конвейера / В. В. Суглобов, С. В. Ракша, П. А. Гринько // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 1 (61). – С. 158–168. doi: 10.15802/stp2016/61039.
11. Экспериментальные исследования реологии резин / М. А. Дорохов, Г. Н. Агальцов, А. В. Новикова [и др.] // Геотехническая механика : межведом. сб. науч. тр. / Ин-т геотехн. механики НАН Украины. – Днепропетровск, 2015. – Вип. 121. – С. 207–214.
12. Gonca, V. Analytical and Experimental Research of Compressive Stiffness for Laminated Elastomeric Structures / V. Gonca, S. Polukoshko, A. Boyko // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 69. – P. 1388–1396. doi: 10.1016/j.proeng.2014.03.133.
13. Gonca, V. Projecting elastomeric shock absorbers with moving side stop [Електронний ресурс] / V. Gonca, J. Shvab, S. Noskov // 8<sup>th</sup> Intern. Daaam Baltic Conf. «Industrial Engineering» (19.04–21.04.2012). – Tallinn, Estonia, 2012. – P. 39–44. – Режим доступа: <http://innomet.ttu.ee/daaam12/proceedings/pdf/Gonca.pdf>. – Загл. с экрана. – Проверено : 16.01.2017.
14. Mathematical modeling of resonant linear vibratory conveyor with electromagnetic excitation: simulations and experimental results [Електронний ресурс] / Ž. V. Despotović, D. Urukalo, M. R. Lečić, A. Čosić // Applied Mathematical Modelling. – 2017. – Vol. 41. – P. 1–24. – Режим доступа: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X16304802>. – Загл. с экрана. – Проверено : 13.03.2017.
15. Study of The Stress-Strain State of The Shaking Conveyor Mechanism [Електронний ресурс] / A. Zhauyt, S. Mederbekkyzy, Y. Akimbek [et al.] // IOSR J. of Engineering (IOSRJEN). – 2016. – Vol. 06. – Iss. 10. – P. 53–60. – Режим доступа: [http://portal.kazntu.kz/files/publicate/2016-10-19-13030\\_0.pdf](http://portal.kazntu.kz/files/publicate/2016-10-19-13030_0.pdf). – Загл. с экрана. – Проверено : 13.03.2017.

В. І. ДИРДА<sup>1</sup>, Ю. М. ОВЧАРЕНКО<sup>2</sup>, С. В. РАКША<sup>3</sup>, О. А. ЧЕРНІЙ<sup>4\*</sup><sup>1</sup>Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України, вул. Сімферопольська, 2а, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 246 01 51, +38 (056) 370 26 97, ел. пошта vita.igtm@gmail.com, ORCID 0000-0001-7961-1442<sup>2</sup>Каф. «Надійність і ремонт машин», Дніпропетровський державний аграрно-економічний університет, вул. С. Єфремова, 25, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 713 51 39, ел. пошта ovcharenko.yu.m@dsau.dp.ua, ORCID 0000-0002-4306-4704<sup>3</sup>Каф. «Прикладна механіка та матеріалознавство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (0562) 47 15 18, ел. пошта raksha@ukr.net, ORCID 0000-0002-4118-1341<sup>4\*</sup>Каф. «Надійність і ремонт машин», Дніпропетровський державний аграрно-економічний університет, вул. С. Єфремова, 25, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (067) 942 54 35, ел. пошта sanek20.1984@gmail.com, ORCID 0000-0003-0691-5829

## ДИНАМІКА ВІБРОЖИВИЛЬНИКІВ ІЗ НЕЛІНІЙНОЮ ПРУЖНОЮ ХАРАКТЕРИСТИКОЮ

**Мета.** Умовою безперебійної та ефективної роботи кожної технологічної лінії є використання транспортуючих машин із високими технічними характеристиками. Добре себе зарекомендували на практиці конструкції машин для транспортування, які використовують у процесі роботи вібрацію. Використання віброустановок вимагає оптимізації режимів їх роботи. У вигляді пружної ланки все більше використовують гумо-металеві елементи, що характеризуються нелінійністю демпфуючих властивостей. Тому в роботі необхідно зробити пошук нових, більш сучасних методів розрахунку динамічних характеристик вібромашин із урахуванням властивостей гуми як амортизаційного матеріалу. **Методика.** Розглянуто динаміку вібраційної машини, яка має в якості пружних ланок гумометалеві блоки та буферні амортизатори, що обмежують амплітуду коливань робочого органу. Запропонований метод визначення амплітудно-частотної характеристики віброживильника базується на принципі Вольтера, який при розрахунках демпфуючих властивостей амортизаторів надасть змогу враховувати пружно-спадкові властивості гуми. При корегуванні динамічних жорсткостей основних пружних зв'язків і буферів віброживильника, використовуючи принцип спадковості властивостей гуми, визначають залежність амплітуди коливань робочого органу машини. Такий метод отримав назву «інтегро-операторний» із використанням дробово-експоненціальних ядер релаксації. **Результати.** Використовуючи виведену формулу визначення амплітуди, побудовано резонансну криву нелінійної одномасної системи. Встановлено, що використання запропонованої методики розрахунку забезпечить достатньо повний опис демпфуючих параметрів гумометалевих виробів й одночасно являтиметься ефективним засобом розрахунку амплітудно-частотних характеристик нелінійних коливальних систем. **Наукова новизна.** Авторами вдосконалена методика визначення демпфуючих характеристик гумометалевих виробів та амплітудно-частотних характеристик нелінійних коливальних систем шляхом введення в алгоритм розрахунку залежностей, що враховують пружно-спадкові властивості гуми. **Практична значимість.** Використання інтегро-операторного метода з застосуванням дробово-експоненціальних ядер релаксації забезпечить підвищення точності розрахунків демпфуючих параметрів гумометалевих виробів і амплітудно-частотних характеристик нелінійних коливальних систем та надасть можливість ще більше оптимізувати режими роботи вібраційного обладнання. Виготовлені з урахуванням принципу спадковості властивостей гуми гумометалеві блоки для пружної підвіски віброживильника виключать вірогідність обмеження продуктивності технологічної лінії у зв'язку з низькою довговічністю деталей підвіски живильника.

**Ключові слова:** гірничі машини; еластомірні елементи; методи розрахунку; пружно-спадкові середовища

V. I. DYRDA<sup>1</sup>, Y. N. OVCHARENKO<sup>2</sup>, S. V. RAKSHA<sup>3</sup>, A. A. CHERNII<sup>4\*</sup><sup>1</sup>M. S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the NAS of Ukraine, Simferopolska St., 2a, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (056) 246 01 51, +38 (056) 370 26 97, e-mail vita.igtm@gmail.com, ORCID 0000-0001-7961-1442<sup>2</sup>Dep. «Reliability and Repair of Machines», Dnipropetrovsk State Agrarian and Economic University, S. Yefremov St., 25, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (056) 713 51 39, e-mail ovcharenko.yu.m@dsau.dp.ua, ORCID 0000-0002-4306-4704<sup>3</sup>Dep. «Applied Mechanics and Material Science», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (0562) 47 15 18, e-mail raksha@ukr.net, ORCID 0000-0002-4118-1341<sup>4\*</sup>Dep. «Reliability and Repair of Machines», Dnipropetrovsk State Agrarian and Economic University, S. Yefremov St., 25, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (067) 942 54 35, e-mail sanek20.1984@gmail.com, ORCID 0000-0003-0691-5829

## DYNAMICS OF VIBRATION FEEDERS WITH A NONLINEAR ELASTIC CHARACTERISTIC

**Purpose.** Subject to the smooth and efficient operation of each production line, is the use of vehicles transporting high specification. It worked well in practice for transporting construction machines, which are used during the vibration. The use of vibration machines requires optimization of their operation modes. In the form of elastic link in them are increasingly using rubber-metallic elements, which are characterized by nonlinear damping properties. So it is necessary to search for new, more modern, methods of calculation of dynamic characteristics of the vibration machines on the properties of rubber as a cushioning material. **Methodology.** The dynamics of vibration machine that is as elastic rubber block units and buffer shock absorbers limiting the amplitude of the vibrations of the working body. The method of determining amplitude-frequency characteristics of the vibrating feeder is based on the principle of Voltaire, who in the calculations of the damping properties of the dampers will allow for elastic-hereditary properties of rubber. When adjusting the basic dynamic stiffness of the elastic ties and vibratory buffers, using the principle of heredity rubber properties, determine the dependence of the amplitude of the working body of the machine vibrations. This method is called integro-operator using the fractional-exponential kernels of relaxation. **Findings.** Using the derived formula for determining the amplitude of the resonance curve is constructed one-mass nonlinear system. It is established that the use of the proposed method of calculation will provide a sufficiently complete description of the damping parameters of rubber-metallic elements and at the same time be an effective means of calculating the amplitude-frequency characteristics of nonlinear vibration systems. **Originality.** The authors improved method of determining damping characteristics of rubber-metallic elements and the amplitude-frequency characteristics of nonlinear oscillatory systems by introducing the calculation algorithm of dependency, taking account of elastic-hereditary properties of rubber. **Practical value.** The use of integro-operator method with the use of fractional-exponential kernels of relaxation, thereby increasing the accuracy of the calculations of the damping parameters of rubber goods and the amplitude-frequency characteristics of nonlinear oscillatory systems and provide an opportunity to further optimize operation modes of vibratory equipment. Made with regard to the principle of heredity properties of rubber, rubber-elastic suspension units for vibratory feeder exclude the probability limit line speed in the low durability of suspension parts feeder.

**Keywords:** mining machines; elastomeric elements; methods for calculating; elastic-hereditary media

## REFERENCES

1. Kalgankov, Y. V., & Tsanidy, I. N. (2014). Theoretical and experimental studies of rubber linings durability. *Geo-Technical Mechanics*, 116, 180-185.
2. Kozub, Y. G., & Kozub, G. A. (2015). Nonlinear deformation of multilayer rubber-metal shock-absorbers. *Geo-Technical Mechanics*, 121, 127-139.
3. Kobets, A. S., Sokol, S. P., Tverdokhle, T. Y., Tolstenko, A. V., Kolbasin, V. A., & Cherniy, A. A. (2014). Determination of time characteristics for rubber elements of machines with taking into account developing damages. *Geo-Technical Mechanics*, 116, 104-111.
4. Dyrda, V. I., Puhalskiy, V. H., Kalgankov, Y. V., Lisitsa, N. I., & Chernii, A. A. (2016). *UA Patent No.108758*. Ukrainskyi instytut intelektualnoi vlasnosti (Ukrpatent). Retrieved from [http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&dbname=inv&lang=eng&chapter=biblio&sortby=\\_](http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&dbname=inv&lang=eng&chapter=biblio&sortby=_)
5. Bulat, A. F., Dyrda, V. I., Karnaukhov, V. G., Zvyagil'skiy, Y. L., & Kobets, A. S. (2011-2014). *Prikladnaya mekhanika uprugo-nasledstvennykh sred* (Vol. 1-3). Kyiv: Naukova dumka.

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

6. Rabortnov, Y. N. (1966). *Polzuchest elementov konstruksiy*. Moscow: Nauka.
7. Rabortnov, Y. N. (1977). *Elementy nasledstvennoy mekhaniki tverdykh tel*. Moscow: Nauka.
8. Bulat, A. F., Dyrda, V. I., Puhalskiy, V. H., Lisitsa, N. I., Chernii, A. A., & Zabolotnaya, E. Y. (2015). The development and widespread industrial implementation of vibrating machines and complexes of manufacture and delivery of uranium ore while underground mining. *Geo-Technical Mechanics*, 121, 12-21.
9. Puhalskiy, V. H., Lisitsa, N. I., Tverdokhle, T. E., Zabolotnaya, E. Y., & Cherniy, A. A. (2014). Calculation of durability of rubber buffer shock absorber in heavy mining vibratory feeders. *Geo-Technical Mechanics*, 116, 143-157.
10. Suglovov, V. V., Raksha, S. V., & Hryenko, P. A. (2016). Rationale for centering capacity of redesigned belt conveyor drums. *Science and Transport Progress*, 1(61), 158-168. doi: 10.15802/stp2016/61039
11. Dorokhov, M. A., Agaltsov, G. N., Novikova, A. V., Kalgankov, Y. V., Tsanidy, I. N., Cherniy, A. A., & Lutsenko, S. N. (2015). Experimental research of rubber rheology. *Geo-Technical Mechanics*, 121, 207-214.
12. Gonca, V., Polukoshko, S., & Boyko, A. (2014). Analytical and Experimental Research of Compressive Stiffness for Laminated Elastomeric Structures. *Procedia Engineering*, 69, 1388-1396. doi: 10.1016/j.proeng.2014.03.133
13. Gonca, V., Shvab, J., & Noskov, S. (2012). Projecting elastomeric shock absorbers with moving side stop. *Proceedings of the 8th International DAAAM Baltic Conference "INDUSTRIAL ENGINEERING", April 19-21, 2012, Tallinn, Estonia*. Retrieved from <http://innomet.ttu.ee/daaam12/proceedings/pdf/Gonca.pdf>
14. Despotović, Ž. V., Urukalo, D., Lečić, M. R., & Čosić, A. (2017). Mathematical modeling of resonant linear vibratory conveyor with electromagnetic excitation: simulations and experimental results. *Applied Mathematical Modelling*, 41, 1-24. doi: 10.1016/j.apm.2016.09.010
15. Zhauyt, A., Mederbekkyzy, S., Akimbek, Y., Narzulloyev, N., & Boribekov, K. (2016). Study of The Stress-Strain State of The Shaking Conveyor Mechanism. *IOSR Journal of Engineering*, 06(10), 53-60. Retrieved from [http://portal.kazntu.kz/files/publicate/2016-10-19-13030\\_0.pdf](http://portal.kazntu.kz/files/publicate/2016-10-19-13030_0.pdf)

Статья рекомендована к публикации к.т.н., доц. К. Ц. Главацким (Украина); д.т.н., проф. В. И. Самуся (Украина)

Поступила в редколлегию: 08.12.2016

Принята к печати: 02.03.2017



НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

УДК 621.825.72

В. О. ПРОЦЕНКО<sup>1\*</sup>, О. Ю. КЛЕМЕНТЬЄВА<sup>2\*</sup><sup>1\*</sup>Каф. «Транспортні технології», Херсонська державна морська академія, просп. Ушакова, 20, Херсон, Україна, 73000, тел. +38 (052) 22 35 69, ел. пошта eseu@ukr.net, ORCID 0000-0002-3468-4952<sup>2\*</sup>Каф. «Транспортні технології», Херсонська державна морська академія, просп. Ушакова, 20, Херсон, Україна, 73000, тел. +38 (052) 22 35 69, ел. пошта vesnyk\_ksma@ukr.net, ORCID 0000-0002-9592-6214

## ПІДВИЩЕННЯ РЕМОНТОПРИДАТНОСТІ МУФТ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ ЗАСТОСУВАННЯМ КАНАТНИХ ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

**Мета.** В роботі необхідно розглянути зниження трудомісткості технічного обслуговування приводів енергетичних установок засобів транспорту за рахунок розроблення конструкції муфти, що має низьку тривалість заміни пружного елемента, та обґрунтувати її основні силові та міцнісні параметри. **Методика.** При розробленні конструкції муфти з підвищеною ремонтпридатністю було використано критерій мінімальної середньої трудомісткості її відновлення. Конструктивно-силові параметри муфти визначено з використанням класичних методів та теорем статистики та математичного аналізу. Моделювання роботи муфт виконано чисельними методами для муфт конкретних виконань із використанням сучасних програмних комплексів. **Результати.** Авторами розроблено муфту з канатними пружними елементами, що має низьку трудомісткість заміни пружного елемента за рахунок універсальної конструкції затискних елементів та застосування пальців із відкритими пазами, в які послідовно може закладатися канат. Отримано залежності, що дозволяють визначати силові навантаження елементів муфти, а також виконувати підбір канатів та розрахунки міцності затискних елементів. Із використанням отриманих залежностей розраховано та сконструйовано муфту з канатними пружними елементами для заміни муфти Vulkan пропульсивної установки балкера проекту 2-95A/R. Укрупнене визначення часу на заміну канату у запропонованій муфті з використанням нормативів показало, що для виконання цієї операції необхідно витратити близько 150 хв часу, що значно менше 530 хв, потрібних для заміни пружних мембран базової муфти Vulkan. **Наукова новизна.** Виконано оцінку основних конструктивних, силових та міцнісних параметрів муфти з торцевою установкою каната підвищеної ремонтпридатності. **Практична значимість.** В роботі запропоновано конструкцію муфти підвищеної ремонтпридатності, оснащеної канатними пружними елементами. Застосування такої муфти в енергетичних установках може скоротити витрати часу та ресурсів на технічне обслуговування й знизити вартість перевезень.

*Ключові слова:* пружна муфта; канат; ремонтпридатність; міцність; пропульсивна установка

### Вступ

В структурі витрат на перевезення вантажів усіма видами транспорту, зокрема залізничним, річковим та морським, значне місце належить витратам на технічне обслуговування та ремонт основного і найбільш напруженого елемента засобів транспорту – енергетичних установок. В той же час, одним із найбільш навантажених елементів енергетичних установок є муфти, їх конструкція та ремонтпридатність зазвичай визначає і зміст технологічного процесу технічного обслуговування приводу нею оснащеного.

### Мета

Одними з найбільш поширених конструкцій муфт енергетичних установок локомотивів [8, 9] та суден, оснащених середньообертовими

дизелями [2, 10-13], є муфти з гумовотканинними мембранами та гумовими дисками. Вони мають низьку перевагу, що і визначило їх широке розповсюдження для сполучення двигунів з генераторами та передачами, а на судах – і для сполучення передач з валопроводом пропульсивної установки.

Однак оснащення приводів такими муфтами має недолік, пов'язаний із великою трудомісткістю заміни їхніх пружних елементів. Як приклад наведемо двомашинну двовальну пропульсивну установку балкера проекту 2-95A/R. Кожен гребний гвинт у цій установці отримує енергію від головного двигуна Skoda 6L27,5HPN, максимальною потужністю 515 кВт, через реверс-редуктор VSR10. Вихідний вал реверс-редуктора 1, що робить до

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

300 об/хв, сполучений з проміжним валом 2 муфтою Vulkan, оснащеною двома гумовими мембранами 3, рис. 1.

Незважаючи на центровку муфт, через деформацію корпусу судна, муфти працюють в умовах значних неспіввідношень, що можуть

сягати кількох міліметрів, тому гумові мембрани нагріваються за рахунок деформацій від наявної неспіввідношеності. Такі умови роботи та низький коефіцієнт теплопровідності ( $0,25 \dots 0,30 \text{ Вт/(м}\times\text{К)}$ ) матеріалу мембран призводить до їх нагрівання та подальшого руйнування (рис. 2).

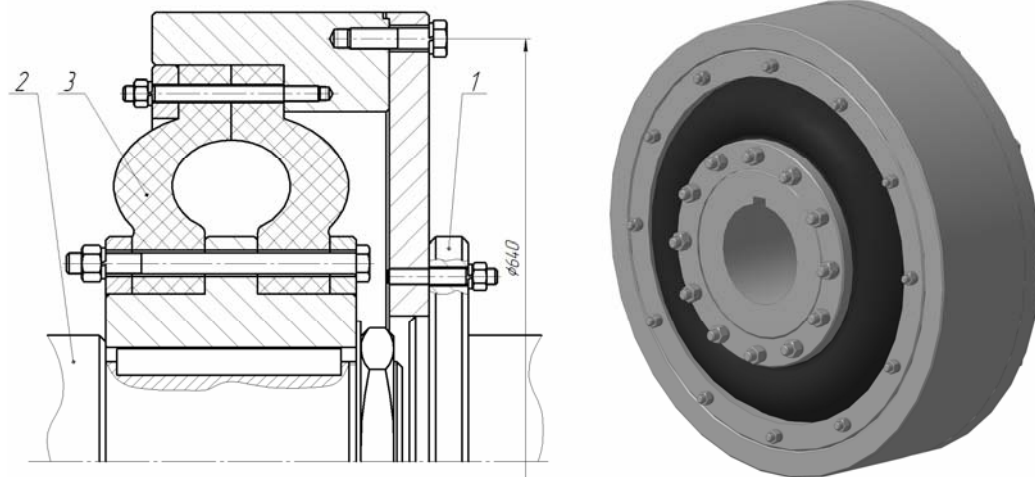


Рис. 1. Загальний вигляд базової муфти Vulkan

Fig. 1. General view of basic Vulkan coupling



Рис. 2. Зруйнований пружний елемент базової муфти

Fig. 2. Destroyed elastic element of base coupling

Заміна пружних елементів муфти вимагає не тільки її демонтажу, а й підняття кришки реверс-редуктора та упорного підшипника, а також демонтажу проміжного вала (рис. 3). При цьому середня трудомісткість відновлення муфти, визначена методом хронометражу, складає приблизно 500...530 хв, що підтверджує низьку ремонтпридатність, джерелом якої є конструктивна недосконалість самої муфти Vulkan. З огляду на це, створення муфт, що мають про-

сту ремонтпридатну конструкцію та здатні ефективно відводити тепло від пружних елементів, є актуальним завданням для транспортного машинобудування, технології та організації експлуатації засобів транспорту.

### Методика

Під час розробки конструкції муфти із підвищеною ремонтпридатністю було використано критерій мінімальної середньої трудомістко-

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

сті її відновлення. Конструктивно-силові параметри муфти визначено із використанням класичних методів і теорем статки та математичного аналізу. Моделювання роботи муфт вико-

нано чисельними методами для муфт конкретних виконань з використанням сучасних програмних комплексів.

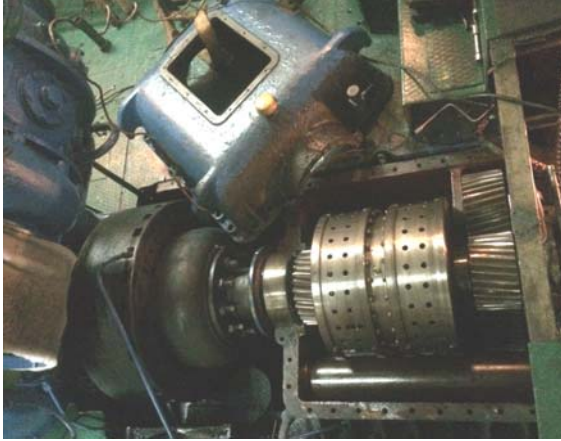


Рис. 3. Етапи заміни пружного елемента базової муфти (знімання кришки реверс-редуктора та демонтаж проміжного вала)

Fig. 3. Replace stages of elastic element of base coupling (cover removal of the reverse gear and intermediate shaft disassembly)

### Результати

Серед пружних елементів, які мають значне демпфування та здатність до відведення тепла, що виділилося в результаті поглинання коливань, можна назвати сталеві канати. Ці вироби здатні до розсіювання енергії [4] за рахунок тертя дротин та мають коефіцієнт теплопровідності, властивий для сталі на рівні  $30 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ , тобто відводять тепло в багато разів краще, ніж гумові мембрани. Разом з тим, канати широко розповсюджені та масово виготовляються промисловістю. Авторами розроблена достатньо велика кількість конструкцій муфт, оснащених сталевими канатами, причому для установки в приводах великої потужності найбільш досконалими визнані муфти, в яких несівні канати встановлені в торцевій площині напівмуфт [7], оскільки вони не створюють осьового навантаження на сполучені вали. Але такі муфти також мають резерв для підвищення ремонтоздатності та є нереверсивними.

З огляду на це, авторами розроблено муфту з канатними пружними елементами, що здатна замінити базову муфту Vulkan. Устрій нової муфти зрозумілий з рис. 4. Вона може бути виготовлена з використанням елементів базової напівмуфти. Особливістю цієї муфти є застосування як пружний елемент одного відрізка ка-

ната, що закріплений у пальцях, які встановлені в отворах ведучої та веденої напівмуфт у шаховому порядку. При цьому утворюється кількість несівних ділянок каната вдвічі більша, ніж кількість пальців у кожній напівмуфті. Половина цих ділянок працює при прямому обертанні муфти і відповідно половина – при реверсному. Канат закріплений у пальцях гвинтами, що встановлені в їх осеві різьбові отвори. Підвищення ремонтпридатності в такій конструкції муфти передбачається забезпечити за рахунок застосування пальців із відкритими пазами, в які послідовно може закладатися канат. Така конструкція муфти не потребує демонтажу напівмуфт при заміні каната.

Технологія заміни каната в такій муфті достатньо проста і потребує початкового закріплення каната у двох суміжних пальцях ведучої і веденої напівмуфт, після чого муфту можна провертати валоповоротним пристроєм, закріплюючи канат в інших пальцях.

Дослідженнями [6] доведено, що пальці в напівмуфтах доцільно закріплювати шарнірно з метою зменшення навантаження на вали від неспіввісності. В такому випадку (рис. 5) канати можна наближено підбирати за зусиллям розриву, попередньо обчислюючи їх натяг  $F_n(1)$ .

Вектор сили натягу каната  $F_n$  та колової си-

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

ли на пальці  $F_t$  утворюють кут  $\beta$ . Цей кут визначимо з подібності трикутника  $OO_2O_3$  та силового трикутника  $O_3CB$ , оскільки центральний кут  $2\beta$  зі сторонами  $OO_1$  та  $OO_3$  ( $O_1$  і  $O_3$  – центри двох суміжних пальців ведучої і веденої напівмуфти) дорівнює:

$$2\beta = \frac{2\pi}{2z} = \frac{\pi}{z}, \quad (1)$$

де  $z$  – кількість пальців у кожній напівмуфті.

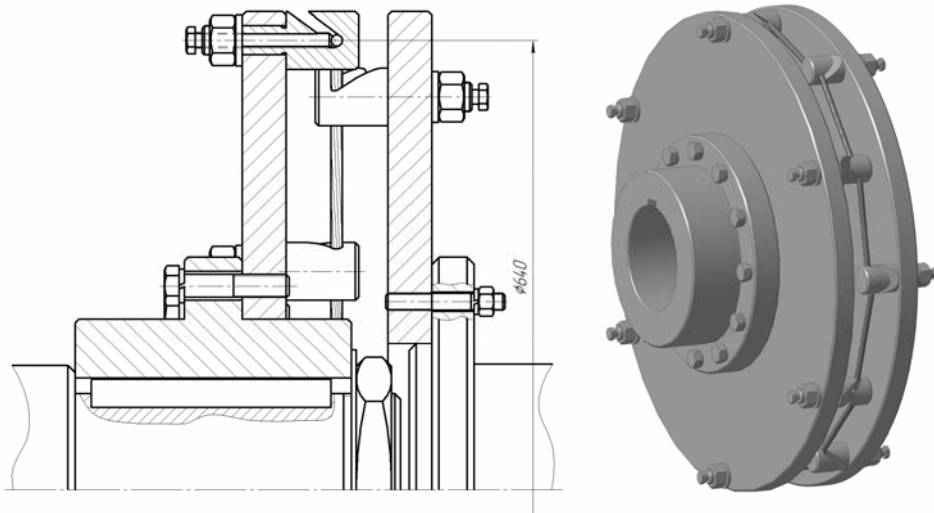


Рис. 4. Загальний вигляд муфти з канатними пружними елементами

Fig. 4. General view of the coupling with rope elastic elements

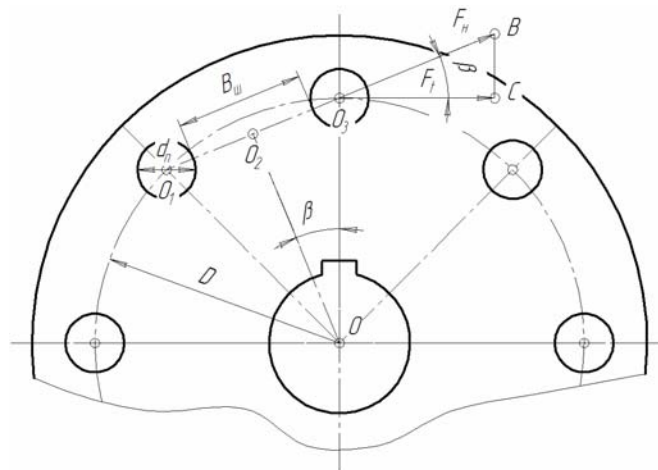


Рис. 5. Розрахункова схема муфти

Fig. 5. Design circuit of coupling

Тоді, з трикутника  $O_3CB$ , отримаємо:

$$\cos \beta = \frac{F_t}{F_H}, \quad (2)$$

Оскільки колова сила на кожному із  $z$  пальців напівмуфти становить:

$$F_t = \frac{2T}{zD}, \quad (3)$$

де  $D$  – діаметр розташування пальців у напівмуфтах, то вираз для обчислення зусилля натягу канатів матиме вигляд:

$$F_H = \frac{F_t}{\cos \beta} = \frac{2T}{zD \cos(\pi / 2z)}. \quad (4)$$

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

За обчисленим значенням сили натягу канатів можна виконувати їх підбір та перевіряти міцність пальців. При цьому необхідно розглядати найгірший випадок сприйняття навантаження хвостовиком пальця. Такий випадок може мати місце при наявності під час роботи муфти аксіальної неспіввідповідності і відповідно аксіальної сили, яка може призвести до витягування пальців і появи зазору  $z_1$  між торцем пальця та торцем фланця напівмуфти (рис. 6). При цьому напруження згину у хвостовику становитиме:

$$\sigma_{зг} = \frac{32F_H l_p d_x}{\pi(d_x^4 - d^4)}, \quad (5)$$

де  $l_p$  – робоча довжина пальця;  $d_x$  – діаметр хвостовика пальця;  $d$  – зовнішній діаметр різьби.

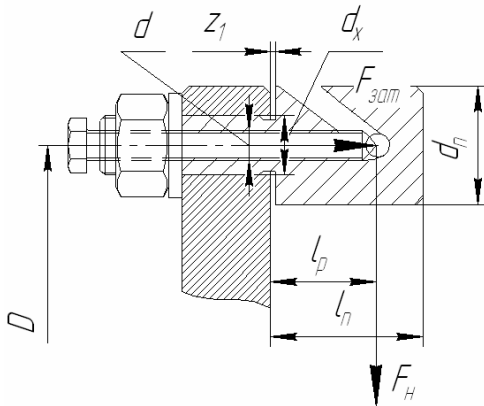


Рис. 6. Розрахункова схема пальця (сила натягу канатів умовно зображена в площині розрізу)

Fig. 6. Design circuit of pin (tension force of ropes is conventionally shown in the section plane)

Зрозуміло, що в такому з'єднанні затискний гвинт нестиме частину навантаження пальця, проте розподіл навантаження між ним і пальцем наразі не вивчений, тому формула (5) дає запас міцності. Діаметри хвостовика та нарізи визначається конструктивно в кожному випадку. Діаметр пальця доцільно приймати вчетверо більшим за діаметр каната.

Для обґрунтування визначення сили затягування каната авторами виконуються експериментальні дослідження затискних елементів різного типу, що затискають канат в отворі пальця, діючи на його зовнішню поверхню. Досліджуються затискні елементи із наконечни-

ками плоского (безінтендорного) типу, а також інтендорних кулькового та конічного. Так, для затискного елементу з безінтендорним наконечником встановлено, що сила виривання каната із затискного елементу дорівнює силі затиску каната  $F_{зат}$ , що необхідно враховувати при розрахунку силових гвинтів затискних елементів.

Складання муфти потребує використання шаблону (рис. 5) при затиску каната у перших двох пальцях. Цим шаблоном визначається відстань між суміжними пальцями напівмуфт. Шаблон можна виготовити дерев'яним товщиною меншою або рівною вильоту пальців, а його ширину обчислювати за формулою (6).

$$B_{ш} = D \cos \frac{\pi}{2z} - d_n, \quad (6)$$

Інші розміри муфти визначаються конструктивно за відомими співвідношеннями [1, 3]. Авторами розраховано та сконструйовано муфту з канатними пружними елементами (рис. 4) для заміни муфти Vulkan (рис. 3). Розрахунок показав, що її достатньо оснастити канатом 6×19 діаметром 6,2 мм ГОСТ 2688 із розривним зусиллям 19 250 Н (маркувальна група 1 570 МПа), що закріплюватиметься у шести пальцях ( $z = 6$ ) кожної напівмуфти. Укрупнене визначення часу на заміну каната у пропонуваній муфті із використанням нормативів [5] показало, що для виконання цієї операції необхідно витрати приблизно 150 хв часу. Базова муфта Vulkan потребує для заміни двох мембран приблизно 530 хв, що наочно демонструє підвищення ремонтпридатності муфти з канатними пружними елементами і перевагу її порівняно із базовою конструкцією муфти пропульсивної установки балкера проекту 2-95А/Р. Авторами за наведеною методикою також розраховано та виготовлено муфту запропонованої конструкції меншого розміру ( $T = 200$  Нм) та випробувано її в стендовому режимі, де вона продемонструвала працездатність.

### Наукова новизна та практична значимість

Виконано оцінку основних конструктивних, силових та міцнісних параметрів муфти з торцевою установкою каната підвищеної ремонтпридатності.

В роботі запропоновано конструкцію муфти підвищеної ремонтпридатності, оснащеної



## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

канатними пружними елементами. Застосування такої муфти в енергетичних установках може скоротити витрати часу та ресурсів на технічне обслуговування і знизити вартість перевезень.

**Висновки**

1. Запропоновано конструкцію муфти, оснащеної одним відрізком каната, що за рахунок конструктивного виконання має високу ремонтпридатність.

2. Описано процес заміни пружного елемента нової муфти та показано, що нова муфта має низьку тривалість виконання заміни пружного елемента порівняно з муфтою Vulkan пропульсивної установки балкера проекту 2-95A/R.

3. За рахунок виконання теоретичних досліджень отримані вирази для розрахунку нової муфти та наведені рекомендації щодо її проектування.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Детали машин / под общ. ред. В. Н. Ражикова. – Санкт-Петербург : Политехника, 2015. – 695 с.
2. Кита, В. Ф. Редукторы и соединительные муфты в судовых силовых установках / В. Ф. Кита. – Москва : Транспорт, 1965. – 208 с.
3. Малащенко, В. О. Деталі машин. Курсове проектування / В. О. Малащенко, В. В. Янків. – Львів : Новий Світ-2000, 2013. – 264 с.
4. Малиновский, В. А. Стальные канаты : аналит. справ. / В. А. Малиновский. – Одесса : Астропринт, 2016. – 252 с.
5. Общемашиностроительные нормативы времени на слесарную обработку деталей и слесарно-сборочные работы по сборке машин. Мелкосерийное и единичное производство. – 2-е изд. – Москва : Машиностроение, 1974. – 220 с.
6. Проценко, В. О. Деформації канатів у муфтах від неспіввисності з урахуванням їх закріплення / В. О. Проценко, О. Ю. Клементьєва // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвідом. наук.-техн. зб. / Центральноукр. нац. техн. ун-т. – Кропивницький, 2016. – Вип. 46. – С. 91–99.
7. Проценко, В. О. Силовая взаємодія елементів муфти з торцевою установкою канатів тангенціального розташування / В. О. Проценко, О. Ю. Клементьєва // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2016. – № 1. – С. 110–114.
8. Соколов, Ю. Н. Повышение надежности узлов тягового привода пассажирских электровозов ЭП1М и ЭП10 / Ю. Н. Соколов, А. С. Пономарев, В. Е. Дегтярев // Локомотив-информ. – 2010. – № 6. – С. 4–11.
9. Суровцев, П. М. Динамическая нагруженность приводов вспомогательных агрегатов локомотивов / П. М. Суровцев, Ю. Н. Соколов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2004. – Вип. 5. – С. 194–205.
10. Accurate characterization of torsional stiffness of flexible disk couplings / A. Francis, I. Avdeev, J. Hamann, S. Ananthasivan // J. of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2015. – Vol. 137. – Iss. 8. – P. 082504. doi:10.1115/1.4029392.
11. Han, H. S. Parametric study to identify the cause of high torsional vibration of the propulsion shaft in the ship / H. S. Han, K. H. Lee, S. H. Park // Engineering Failure Analysis. – 2016. – Vol. 59. – P. 334–336. doi: 10.1016/j.engfailanal.2015.10.018.
12. Heribert, M. Testing flexible coupling / M. Heribert // The Motor Ship. – 1983. – Vol. 64. – P. 63–65.
13. Murawski, L. Simplified method of torsional vibration calculation of marine power transmission system / L. Murawski, A. Charchalis // Marine Structures. – 2014. – Vol. 39. – P. 335–349. doi: 10.1016/j.marstruc.2014.10.004.

В. А. ПРОЦЕНКО<sup>1\*</sup>, О. Ю. КЛЕМЕНТЬЕВА<sup>2\*</sup><sup>1\*</sup>Каф. «Транспортные технологии», Херсонская государственная морская академия, просп. Ушакова, 20, Херсон, Украина, 73000, тел. +38 (052) 22 35 69, эл. почта eseu@ukr.net, ORCID 0000-0002-3468-4952<sup>2\*</sup>Каф. «Транспортные технологии», Херсонская государственная морская академия, просп. Ушакова, 20, Херсон, Украина, 73000, тел. +38 (052) 22 35 69, эл. почта vesnyk\_ksma@ukr.net, ORCID 0000-0002-9592-6214

## ПОВЫШЕНИЕ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ МУФТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА ПРИМЕНЕНИЕМ КАНАТНЫХ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ

**Цель.** В работе необходимо рассмотреть снижение трудоемкости технического обслуживания приводов энергетических установок средств транспорта за счет разработки конструкции муфты, имеющей низкую длительность замены упругого элемента, и обосновать ее основные силовые и прочностные параметры.

**Методика.** При разработке конструкции муфты с повышенной ремонтопригодностью был использован критерий минимальной средней трудоемкости ее восстановления. Конструктивно-силовые параметры муфты определяли с использованием классических методов и теорем статики и математического анализа. Моделирование работы муфт выполнено численными методами для муфт конкретных исполнений с использованием современных программных комплексов. **Результаты.** Авторами разработана муфта с канатными упругими элементами, имеющая низкую трудоемкость замены упругого элемента за счет универсальной конструкции зажимных элементов и пальцев с открытыми пазами, в которые последовательно может закладываться канат. Получены зависимости, позволяющие определять силовые нагрузки элементов муфты, а также выполнять подбор канатов и расчет прочности зажимных элементов. С применением полученных зависимостей рассчитана и сконструирована муфта с канатными упругими элементами для замены муфты Vulkan пропульсивной установки балкера проекта 2-95A/R. Углубленное определение времени на замену каната в предложенной муфте с применением нормативов показало, что для выполнения этой операции необходимо затратить около 150 мин времени, что значительно меньше 530 мин, необходимых для замены упругих мембран базовой муфты Vulkan. **Научная новизна.** Выполнена оценка основных конструктивных, силовых и прочностных параметров муфты с торцевой установкой каната повышенной ремонтопригодности. **Практическая значимость.** В работе предложена конструкция муфты повышенной ремонтопригодности, оснащенной канатными упругими элементами. Применение такой муфты в энергетических установках может сократить затраты времени, ресурсов на техническое обслуживание и снизить стоимость перевозок.

*Ключевые слова:* упругая муфта; канат; ремонтопригодность; прочность; пропульсивная установка

V. O. PROTSENKO<sup>1\*</sup>, O. YU. KLEMENTYEVA<sup>2\*</sup><sup>1\*</sup>Dep. «Transport Technologies», Kherson State Maritime Academy, Ushakov Av., 20, 73000, Kherson, Ukraine, tel. +38 (052) 22 35 69, e-mail eseu@ukr.net, ORCID 0000-0002-3468-4952<sup>2\*</sup>Dep. «Transport Technologies», Kherson State Maritime Academy, Ushakov Av., 20, 73000, Kherson, Ukraine, tel. +38 (052) 22 35 69, e-mail vesnyk\_ksma@ukr.net, ORCID 0000-0002-9592-6214

## COUPLING MAINTAINABILITY INCREASE OF TRANSPORT VEHICLES POWER PLANTS BY APPLICATION OF ROPE ELASTIC ELEMENTS

**Purpose.** The paper should consider lowering the labour input of maintenance of drive gears operation of vehicles power plants at the expense of working out the coupling construction having low duration of substitution of elastic element and a justification of its force, power and strength parameters. **Methodology.** During development of coupling construction with increased maintainability the criterion of minimum average labour input of its reconstruction has been used. Constructive-power parameters of coupling were defined with the use of classical methods and statics and calculus theorems. Simulation of couplings operation is executed by numerical methods for couplings of concrete executions with the use of modern program complexes. **Findings.** Authors developed the cou-

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

pling with rope elastic elements having low labour input of elastic element substitution due to multiple-purpose construction of tightening elements and pins with open slots in which the rope sequentially can be included is developed. The dependences are received, allowing to define power loads of elements of a coupling, and also to execute selection of ropes and calculation of strength of tightening elements. With obtained dependence the coupling with rope elastic elements for substitution of coupling Vulkan propulsion plant of the bulk ship of the project 2-95A/R is calculated and designed. The integrated definition of time for rope substitution in the offered coupling with application of specifications has displayed that for execution of this process it is necessary to expend about 150 minutes of time that is much less than 530 mines necessary for substitution of elastic membranes of base coupling Vulkan. **Originality.** The estimation of the basic constructive, power and strenght parametres of coupling with face installation of a rope with increased maintainability is executed. **Practical value.** Construction of a coupling with increased maintainability equipped with rope elastic elements is offered in the paper. Application of such coupling in power installations can reduce expenditures of time and resources to maintenance operation and to lower cost of transportations.

*Keywords:* elastic coupling; rope; maintainability; strength; propulsion plant

## REFERENCES

1. Razhikov, V. N. (Ed). (2015). *Detali mashin*. Saint-Petersburg: Politekhnik.
2. Kita, V. F. (1965). *Reduktory i soyedinitelnye mufty v sudovykh silovykh ustanovkakh*. Moscow: Transport.
3. Malashchenko, V. O., & Yankiv, V. V. (2013). *Detali mashyn. Kursove proektuvannia*. Lviv: Novyi Svit-2000.
4. Malinovskiy, V. A. (2016). *Stalnyye kanaty: analiticheskiy spravochnik*. Odessa: Astroprint.
5. *Obshchemashinostroitelnyye normativy vremeni na slesarnuyu obrabotku detaley i slesarno-sborochnyye raboty po sborke mashin. Melkoseriynoye i yedinichnoye proizvodstvo*. (1974). Moscow: Mashinostroeniye.
6. Protsenko, V. O., & Klementyeva, O. Y. (2016). Deformatsii kanativ u muftakh vid nespivvisnosti z urakhu-vanniam yikh zakriplennia. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn*, 46, 91-99.
7. Protsenko, V. O., & Klementyeva, O. Y. (2016). Force interaction of coupling elements with the end position setting tangential rope installation. *Innovative Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering*, 1, 110-114.
8. Sokolov, Y. N., Ponomarev, A. S., & Degtyarev, V. Y. (2010). Povysheniye nadezhnosti uzlov tyagovogo privoda passazhirskikh elektrovozov EP1M i EP10. *Lokomotiv-Inform*, 6, 4-11.
9. Surovtsev, P. M., & Sokolov, Y. N. (2004). Dynamic loading drives auxiliary units of locomotives. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 5, 194-205.
10. Francis, A., Avdeev, I., Hamann, J., & Ananthasivan, S. (2015). Accurate characterization of torsional stiffness of flexible disk couplings. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 137(8). doi: 10.1115/1.4029392
11. Han, H. S., Lee, K. H., & Park, S. H. (2016). Parametric study to identify the cause of high torsional vibration of the propulsion shaft in the ship. *Engineering Failure Analysis*, 59, 334-336. doi: 10.1016/j.engfailanal.2015.10.018
12. Heribert, M. (1983). Testing flexible coupling. *The Motor Ship*, 64, 63-65.
13. Murawski, L., & Charchalis, A. (2014). Simplified method of torsional vibration calculation of marine power transmission system. *Marine Structures*, 39, 335-349. doi: 10.1016/j.marstruc.2014.10.004

*Стаття рекомендована до друку д.т.н., проф. К. М. Клевцовим (Україна); д.т.н., проф. С. В. Ракишою (Україна)*

Надійшла до редколегії: 21.12.2016

Прийнята до друку: 15.03.2017



## UDC 004.942

S. S. TYSHCHENKO<sup>1</sup>, A. V. KRASNIUK<sup>2</sup>, T. V. ULCHENKO<sup>3</sup>, A. S. SHCHERBAK<sup>4\*</sup><sup>1</sup>Dep. «Higher Mathematics», Dnipropetrovsk State Agrarian-Economic University, Voroshilov St., 25, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (056) 713 51 86, e-mail mozganet@mail.ua, ORCID 0000-0003-4860-4818<sup>2</sup>Dep. «Graphics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 38, e-mail krasnyuk@mail.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-1400-9992<sup>3</sup>Dep. «Graphics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 724 47 22, e-mail ulchenkov@ya.ru, ORCID 0000-0003-2354-7765<sup>4</sup>Dep. «Graphics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 59, e-mail pro-f@ukr.net, ORCID 0000-0003-1340-0284

## DESIGNING OF DEVELOPED SURFACES OF COMPLEX PARTS

**Purpose.** The paper focuses on ensuring the rational choice of parameters of the mating surfaces of parts when designing process equipment based on the methods of artificial intelligence. **Methodology.** The paper considers the geometric model of a ruled developed surface, the conditions of existence of such a surface and provides a generalized algorithm for surface plotting regardless of the type of the working element or the machine-building product. One of the most common technical surfaces are the ruled ones, among which a special position is occupied by developed surfaces (thanks to their differential-parametric properties): surface tangent plane is in contact along the rectilinear generator and does not change its position in space when changing the point of contact; surfaces can be produced by bending sheet metal. These provisions enable a product manufacturer to save significant material and energy means, therefore, the development of geometric models of such surfaces is an important task. **Findings.** We analyzed the geometrical model of the developed surface which is incident to two guides. Experimental studies have shown the application prospectivity of semi-digger moldboards on moldboard plows, particularly on the double-deck ones. Taking into account the operating speed of the plow 2.8 m/s, the plant residues plowing percentage for plow with semi-digger moldboards is 98.9%, and with the digger ones – 96.1%. **Originality.** According to results: 1) the approaches to solving the problem of recognition of wear conditions of the tested interface, depicted by its conceptual model, were elaborated; 2) the corresponding algorithms of the computational procedures were built; 3) the mathematical model that determines the effect of the parameters of the contacting surfaces on their performance properties – linear wear rate during the normal wear and tear was developed; 4) for this model the theoretical prerequisite of use for the random mating study were designated. **Practical value.** Currently, these areas produced significant results which are in line with modern requirements of construction engineering. The process of parametric model optimization generates a plurality of desired values of the surface parameters. There are formed the algorithms for automatic recognition of design features and operation of interfaces by their images, which are set by a structured set of formal signs. The recognition result is the interface designation to a particular group, each of which corresponds to an individual computational model of quality parameters normalization.

**Keywords:** geometry; surfaces; developed surfaces; model; working elements

## Introduction

For a multiple production the most important among the technological equipment is mechanical processing equipment characterized by the need of frequent change, optimal service life is 5-7 years. Analysis of design methods of technological and mechanical processing equipment showed that at the early design stages it is very difficult to assess and take into account the variety of factors affecting the quality of its work. There is a problem of automated selection of design and process parameters the mating surfaces to ensure operating pur-

pose of the product. At the same time, there is no scientific methodological framework that allows taking into account the design and technological features of the designed equipment.

One of the main directions of descriptive geometry is designing surfaces, linear and two-dimensional contours, which correspond to different positional, metric, differential conditions. Currently, these areas received significant results that meet the modern requirements of design planning.

The works [10, 11] present the geometric model of ruled surfaces with multiparameter sets of lines and special lines of surfaces, but a large

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

number of parameters and difficult determination of special lines, such as curvature, make the use of these models difficult in practice. The works [12–15] are devoted to the development of geometric models of tillage working element surfaces. The disadvantage of these models is that they are specified for the working element, which reduces the possibility of their use in the design of other tools. A common shortcoming of these models is that they are presented in general or for a specific working element. This leads to the fact that in each case it is necessary to develop the own algorithm for surface building.

### Purpose

The main directions of the descriptive geometry of surfaces formulated by I. I. Kotov [7, 8] and including development of methods for designing linear and two-dimensional contours, continuous frames in compliance with the set differential-isometric conditions, generation of contours and surfaces equations, are still up to date. Furthermore, increasing requirements for accuracy characteristics, increase in speed and the need to improve the dynamic characteristics of surface interactions with the environment made the surface geometry conditions more complicated. For example, the transition curves of railways need continuous fourth derivative at the junctions [4, 18]; bi-dimensional contours must have degree of smoothness at the joint not lower than the second one [3, 9] for the surfaces, operating in conditions of high density environment (working elements of tillage tools, machines and mechanisms in the car-locomotive facilities of railways, ship contours, etc.) or of high speeds.

The above generates an urgent need to develop new methods for continuous mathematical surface models (MSM), which correspond to a large number of differential geometric terms with a given degree of accuracy and solution of various applied problems on the received MSM.

An important sector of technology, which is connected with engineering progress, are those units that are engaged in designing and manufacturing of products, whose main functional element is the surface, working in conditions of high speeds or a large density, particularly the tillage elements and machines. Energy costs thus depend on the geometric properties of surfaces.

One of the most common technical surfaces are the ruled ones, among which a special position is occupied by developed surfaces thanks to their differential-parametric properties:

- surface tangent plane is in contact along the rectilinear generator and does not change its position in space when changing the point of contact;
- the surfaces can be made by bending sheet metal.

These provisions enable a product manufacturer to save significant material and energy means, therefore, the development of geometric models of such surfaces is an important task.

The work purpose is to ensure the rational choice of parameters of the mating surfaces of parts when designing process equipment based on the methods of artificial intelligence.

The study object is a combination of machining and mechanical processing equipment, tools and other machine parts, working in conditions of friction under boundary lubrication and made of general purpose structural materials.

The paper considers the geometric model of a ruled developed surface, the conditions of existence of such a surface and provides a generalized algorithm for surface plotting regardless of the type of the working element or the machine-building product [6].

### Methodology

We know that a developable surface is given by two curves which have the property: if through any point of the first curve to draw the area tangent to both curves, this tangent property is kept in many geometric transformations.

Assume that we have two set curves:

$m$ :

$$x = x_1(u), \quad y = y_1(u), \quad z = z_1(u), \quad (1)$$

$n$ :

$$x = x_2(v), \quad y = y_2(v), \quad z = z_2(v), \quad (2)$$

which separate a congruence from a set of lines:

$$y = ax + b, \quad z = cx + d. \quad (3)$$

Herewith the parameters  $a, b, c, d$  depend on  $u$  and  $v$  and are determined by the equations (1) and (2), (3), so that,

$$a = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2}; \quad b = y_1 - ax_1; \quad (4)$$

$$c = \frac{z_1 - z_2}{x_1 - x_2}; \quad d = z_1 - cx_1. \quad (5)$$

To separate a developable surface, we introduce additional condition as compatibility of equations defining the framing of both curves with the standards of future surface [1, 2]:

$$\begin{cases} z'_1 = p \cdot x'_1 + q \cdot y'_1 \\ z'_2 = p \cdot x'_2 + q \cdot y'_2 \end{cases}, \quad (6)$$

where primes indicate the rates of the functions that define curves by their parameters, and differential equation of ruled surface:

$$p + aq - c = 0, \quad (7)$$

which is equivalent to the equation:

$$\begin{vmatrix} x'_1 & y'_1 & z'_1 \\ x'_2 & y'_2 & z'_2 \\ x_1 - x_2 & y_1 - y_2 & z_1 - z_2 \end{vmatrix} = 0. \quad (8)$$

The equation (6) expresses the fact that the surface standards at the relevant points of the set curves (which belong to the same straight line generator) are parallel that is equivalent to existence of general tangent area to the surface in these points. Indeed, given (4) and (5), the equation (8) takes the form:

$$\begin{vmatrix} x'_1 & y'_1 & z'_1 \\ x'_2 & y'_2 & z'_2 \\ x - x_2 & y - y_2 & z - z_2 \end{vmatrix} = 0, \quad (9)$$

i.e. vectors tangent to the curve and generators are coplanar.

Equation (9) allows determining the relationship between the parameters  $u$  and  $v$  provided the surface developability:

$$\varphi(u, v) = 0, \quad (10)$$

that together with (3), (4), (5) gives the desired surface equation.

If one of the parameters (for example  $u$ ) can be from (10) expressed clearly through the other parameter,

$$u = \varphi_1(v), \quad (11)$$

then with (4), (5) and (11) surface equation will look like:

$$y = a(v) \cdot x + b(v), \quad z = c(v) \cdot x + d(v). \quad (12)$$

To find the edge of regression 1, we differentiate (12) by  $v$ :

$$x = \frac{b'(v)}{a'(v)} = -\frac{d'(v)}{c'(v)}. \quad (13)$$

One of the equations (13) together with (12) will define 1.

Obviously, not every two lines with their shape and position in space will enable to plot a developable surface. In solving the determinant (9) there may be the following cases (except the discussed above, which leads to (10)):

– determinant identically equals to zero (curves are in the same area, which is the sought surface regardless of function  $\varphi$ );

– as a result of the solution (9) becomes the equation of one parameter (there is no developable surface, there are separate generators, whose number equals to the number of roots of equations, where there is a common tangent area by given curves);

– determinant (9) is not equal to zero (developable surface does not exist).

Thus, the desired result gives only the case that leads to (10).

We consider the equation (6) and (9). Minor determinants  $2 \times 2$  of the first two rows of the determinant (9) are the coordinates of the surface standard  $\vec{n} \{ \Delta x, \Delta y, \Delta z \}$ , so that

$$p = \frac{-\Delta x}{\Delta z}, \quad q = \frac{-\Delta y}{\Delta z}, \quad (14)$$

where

$$\Delta x = -\begin{vmatrix} y'_1 & z'_1 \\ y'_2 & z'_2 \end{vmatrix}; \quad \Delta y = \begin{vmatrix} x'_1 & z'_1 \\ x'_2 & z'_2 \end{vmatrix}; \quad \Delta z = \begin{vmatrix} x'_1 & y'_1 \\ x'_2 & y'_2 \end{vmatrix} \quad (15)$$

Plotting of the surface is greatly simplified when the guide curves are contour lines. For example, if  $m$  and  $n$  are horizontals, then the condition of a developable surface is  $\Delta z = 0$ , and for the frontals:  $\Delta y = 0$  and so on.

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Algorithm for plotting the surface.

There are given  $m$  and  $n$  curves (equation (1) and (2)).

1. We find the generators  $x'1, y'1, z'1, x'2, y'2, z'2$ .

2. We add the determinant (9) as a result of which find a solution (10). If the dependence (10) does not arise from the determinant (9), then the solution does not exist.

3. We determine the coefficients  $a, b, c, d$  according to (4) and (5).

4. We find  $a, b, c, d$  taking into account (10).

5. We write the surface equation (3).

The given model is used for building the semi-digger moldboard of the upper deck of a double-deck plow PNY-4-40 (Fig. 1), while the lower deck had digger moldboards. As the guide curves we selected boundary movement trajectories of soil beds [5, 16, 17].

### Findings

The assessment of the operation quality of the double-deck plow with digger and semi-digger moldboards of the upper deck was conducted by the following indicators:

- depth of plowing of plant residues;
- percentage of plowing of plant residues

Experimental studies have shown the application prospectivity of semi-digger moldboards on moldboard plows, particularly on the double-deck ones. Taking into account the operating speed of the plow 2.8 m/s, the plant residues plowing percentage for plow with semi-digger moldboards is 98.9%, and with the digger ones – 96.1%, which is 4.3% higher, that is why semi-digger moldboards mounted on the upper deck of the double-deck plow outweigh the digger moldboards by agro-technical parameters [19].

### Originality and practical value

1. The approaches to solving the problem of recognition of wear conditions of the tested interface, depicted by its conceptual model, were elaborated; the corresponding algorithms of the computational procedures were built.

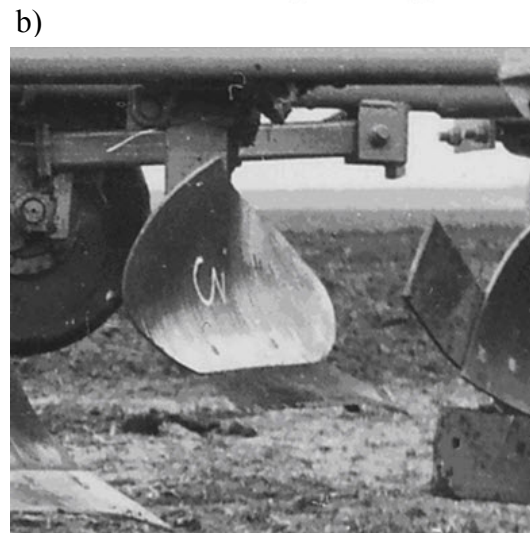
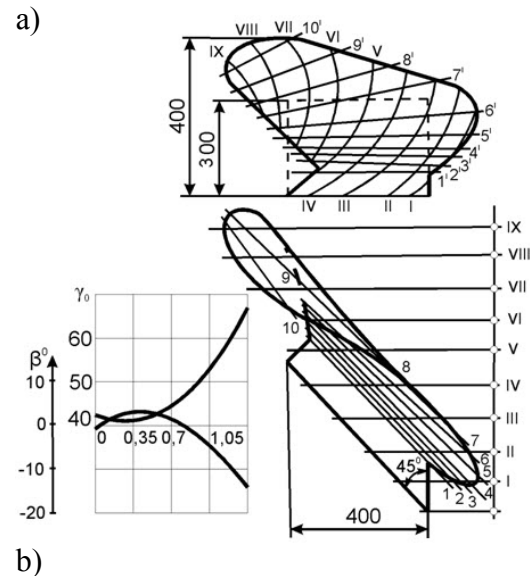


Fig. 1. Semi-digger moldboard of double-deck plow:

- a – moldboard drawing;  
b – general view of semi-digger moldboard

2. The mathematical model that determines the effect of the parameters of the contacting surfaces on their performance properties – linear wear rate during the normal wear and tear was developed; for this model the theoretical prerequisite of use for the random mating study were designated. The process of parametric model optimization generates a plurality of desired values of the surface parameters.

3. There are formed the algorithms for automatic recognition of design features and operation of interfaces by their images, which are set by a structured set of formal signs. The recognition result is the interface designation to a particular

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

group, each of which corresponds to an individual computational model of surface quality parameters normalization.

### Conclusions

1. The analysed method of putting together the analytic formulas of specific transformations allows us to study the converted lines and surfaces using the methods of analytic geometry.

2. The designed model of developed surface is expedient to be used for designing various working elements, including tillage tools.

3. Using the system, we elaborated the algorithms and compiled the programs for analytical calculation of line, non-line and equidistant to them surfaces by given differential geometric terms, which have shown high efficiency of the system application in solving the above problems.

4. We proposed a new equation of patch-wise surface centre without transitional functions that saves the computing resources and simplifies the solutions of various geometric and engineering problems.

### LIST OF REFERENCE LINKS

1. Айзикович, С. М. Внедрение параболического индентора в неоднородную полосу, лежащую на упругом основании / С. М. Айзикович, Ю. Ч. Ванг, С. С. Волков // Соврем. проблемы механики сплошной среды : сб. тр. XVII Междунар. конф. (14.10–17.10.2014). – Ростов-на-Дону : ЮФУ, 2014. – С. 16–19.
2. Годес, А. Ю. Напряженно-деформированное состояние упругой плоскости с дуговой трещиной между круговым включением и матрицей / А. Ю. Годес, В. В. Лобода // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Серія: «Механіка». – Дніпропетровськ, 2013. – Вип. 17, т. 1. – С. 3–10.
3. Голованов, Н. Н. Геометрическое моделирование / Н. Н. Голованов. – Москва : Изд-во физ.-мат. лит., 2002. – 472 с.
4. Ельфимов, Г. В. Теория переходных кривых / Г. В. Ельфимов. – Москва : Трансжелдориздат, 1948. – 311 с.
5. Зелёный, П. В. Компьютерное моделирование геометрии движения пахотного агрегата / П. В. Зелёный, О. К. Щербакова // Инновац. технологии в инженер. графике: проблемы и перспективы : сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф., 27 марта 2015 г. – Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2015. – С. 24–26.
6. Квазилинейные графические модели пространства / А. Д. Малый, Ю. Я. Попудняк, Т. В. Ульченко, Т. В. Старосольская // Мости та тунелі : теорія, дослідження, практика. – 2014. – Вип. 5. – С. 51–56.
7. Котов, И. И. Методическое пособие по начертательной геометрии «Алгоритмы конструирования каркасных поверхностей». – Москва : Изд-во Моск. авиац. ин-та, 1975. – 63 с.
8. Котов, И. И. Начертательная геометрия. Курс лекций для слушателей ФПК. – Москва : Изд. Моск. авиац. ин-та, 1973. – 198 с.
9. Лагута, В. В. Удосконалення проектування кривих залізничної колії в плані : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.06 / Лагута Василь Васильович ; Дніпропетр. держ. техн. ун-т залізн. трансп. – Дніпропетровськ, 2002. – 18 с.
10. Найдыш, В. М. Конструирование поверхностей из многопараметрических множеств линий и поверхностей / В. М. Найдыш // Науч. тр. Укр. с.-х. акад. – Киев, 1980. – Вип. 234. – С. 141–144.
11. Найдыш, В. М. Конструирование поверхностей, проходящих через их специальные линии / В. М. Найдыш // Изв. высш. учеб. завед. Серия: Авиационная техника. – 1981. – № 2. – С. 88–90.
12. Тищенко, С. С. Геометрическая адаптация поверхностей почвообрабатывающих рабочих органов к выполняемому процессу / С. С. Тищенко // Вісн. Харк. нац. техн. ун-ту сіл. госп-ва ім. П. Василенка. – Харків, 2007. – Вип. 59, т. 1. – С. 110–114.
13. Тищенко, С. С. Геометрическая модель адаптивной поверхности почвообрабатывающего рабочего органа инцидентной двум кривым / С. С. Тищенко // Сб. науч. раб. Крым. гос. ун-та. – Симферополь, 2005. – Вип. 84. – С. 242–247.
14. Тищенко, С. С. Конструирование поверхности окучника для пропашных культур по абсолютным траекториям движения почвы / С. С. Тищенко, В. В. Карась // Вісн. Дніпропетр. держ. агроуніверситету. – 2006. – № 1. – С. 27–30.
15. Трухина, В. Д. Применение вычислительной техники при проектировании лемешно-отвальных поверхностей : учеб. пособие / В. Д. Трухина ; М-во высш. и сред. спец. образования РСФСР, Алт. политехн. ин-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул, 1989. – 82 с.

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

16. Brown, L. D. A semiparametric multivariate partially linear model: A difference approach / L. D. Brown, M. Levine, L. Wang // J. of Statistical Planning and Inference. – 2016. – Vol. 178. – P. 99–111. doi:10.1016/j.jspi.2016.06.005.
17. One-to-one nonlinear transformation the space with identity plane / A. D. Malyi, T. V. Ulchenko, A. S. Shcherbak [et al.] // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 3 (63). – С. 181–190. doi: 10.15802/stp2016/74768.
18. Watson, D. F. Computing the n-dimensional Delaunay tessellation with application to Voronoi polytopes / D. F. Watson // The Computer Journal. – 1981. – No. 2. – P. 167–172.
19. Xu, X. A spatial autoregressive model with a nonlinear transformation of the dependent variable / X. Xu, L. Lee // Journal of Econometrics. – 2015. – Vol. 186. – Iss. 1. – P. 1–18. doi: 10.1016/j.jeconom.2014.12.005.

С. С. ТИЩЕНКО<sup>1</sup>, А. В. КРАСНЮК<sup>2</sup>, Т. В. УЛЬЧЕНКО<sup>3</sup>, А. С. ЩЕРБАК<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Вища математика», Дніпропетровський державний аграрно-економічний університет,  
вул. Ворошилова, 25, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 713 51 86, ел. пошта mozganet@mail.ua,  
ORCID 0000-0003-4860-4818

<sup>2</sup>Каф. «Графіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,  
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 38, ел. пошта krasnyuk@mail.diit.edu.ua,  
ORCID 0000-0002-1400-9992

<sup>3</sup>Каф. «Графіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,  
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 724 47 22, ел. пошта ulchenkotv@ya.ru,  
ORCID 0000-0003-2354-7765

<sup>4\*</sup>Каф. «Графіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,  
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 59, ел. пошта pro-f@ukr.net, ORCID 0000-0003-1340-0284

## ПРОЕКТУВАННЯ РОЗГОРТНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ СКЛАДНОЇ ФОРМИ

**Мета.** У статті необхідно розглянути забезпечення раціонального вибору параметрів поверхонь, що сполучаються, та оброблюваних деталей при проектуванні технологічного обладнання на основі методів штучного інтелекту. **Методика.** В роботі розглядається геометрична модель лінійчатої розгортної поверхні, умови існування такої поверхні та приводиться узагальнений алгоритм побудови поверхні, незалежно від типу робочого органу або машинобудівного виробу. Одними з найбільш поширених у техніці поверхнями є лінійчаті, серед яких особливе положення займають розгортні (завдяки своїм диференціально-параметричним властивостям): дотична площина контактує з поверхнею вздовж всієї прямолінійної твірної та не змінює свого положення у просторі при зміні точки дотику; поверхні можуть виготовлятися методом згину металевих листів. Ці положення дозволяють при виготовленні виробів заощаджувати значні матеріальні та енергетичні кошти, тому розробка геометричних моделей таких поверхонь є важливою задачею.

**Результати.** Авторами розглянуто геометричну модель розгортної поверхні, яка інцидентна двом напрямним. Експериментальні дослідження показали перспективність застосування напівгвинтових полиць на поливних плугах, зокрема, на двоярусних. Приймаючи до уваги робочу швидкість руху плугу 2,8 м/с, відсоток заорювання рослинних решток для плугу з напівгвинтовими полицями складає 98,9 %, а з культурними – 96,1 %. **Наукова новизна.** За результатами експерименту: 1) вироблені підходи до вирішення задачі розпізнавання умов зношування досліджуваного сполучення, зображеного його концептуальною моделлю; 2) побудовані відповідні алгоритми обчислювальних процедур; 3) розроблено математичну модель, яка визначає вплив параметрів контактуючих поверхонь на їх експлуатаційну властивість – лінійну інтенсивність зношування в період нормального зносу; 4) для даної моделі позначені теоретичні передумови застосування в дослідженні довільного сполучення.

**Практична значимість.** На даний час у цих напрямках отримані серйозні результати, які стоять на рівні сучасних вимог конструкторського проектування. В процесі параметричної оптимізації моделі формуються безліч шуканих значень параметрів поверхонь. Сформовані алгоритми автоматичного розпізнавання особливостей конструкції та експлуатації сполучень за їх зображеннями, що задається структурованими сукупностями формалізованих ознак. Результатом розпізнавання є віднесення сполучення до певної групи, кожній з множин яких відповідає індивідуальна розрахункова модель нормування параметрів якості.

**Ключові слова:** геометрія; поверхні; розгортні поверхні; модель; робочі органи

С. С. ТИЩЕНКО<sup>1</sup>, А. В. КРАСНЮК<sup>2</sup>, Т. В. УЛЬЧЕНКО<sup>3</sup>, А. С. ЩЕРБАК<sup>4\*</sup><sup>1</sup>Каф. «Высшая математика», Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет,  
ул. Ворошилова, 25, Днепро, Украина, 49600, тел. +38 (056) 713 51 86, эл. почта mozganet@mail.ua,  
ORCID 0000-0003-4860-4818<sup>2</sup>Каф. «Графика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика  
В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 38, эл. почта krasnyuk@mail.diit.edu.ua,  
ORCID 0000-0002-1400-9992<sup>3</sup>Каф. «Графика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика  
В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (067) 724 47 22, эл. почта ulchenkotv@ya.ru,  
ORCID 0000-0003-2354-7765<sup>4</sup>Каф. «Графика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика  
В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 59, эл. почта pro-f@ukr.net,  
ORCID 0000-0003-1340-0284

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАЗВЕРНУТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

**Цель.** В статье необходимо рассмотреть обеспечение рационального выбора параметров сопрягаемых поверхностей обрабатываемых деталей при проектировании технологического оборудования на основе методов искусственного интеллекта. **Методика.** В работе рассматривается геометрическая модель линейчатой развернутой поверхности, условия существования такой поверхности и приводится обобщенный алгоритм построения поверхности, независимо от типа рабочего органа или машиностроительного изделия. Одними из наиболее распространенных в технике поверхностей являются линейчатые, среди которых особое положение занимают развернутые (благодаря своим дифференциально-параметрическим свойствам): касательная плоскость соприкасается с поверхностью вдоль всей прямолинейной образующей и не меняет своего положения в пространстве при изменении точки соприкосновения; поверхности могут изготавливаться методом сгиба металлического листа. Эти положения позволяют при изготовлении изделий экономить значительные материальные и энергетические средства, поэтому разработка геометрических моделей таких поверхностей является важной задачей. **Результаты.** Авторами рассмотрена геометрическая модель развернутой поверхности, которая инцидентна двум направляющим. Экспериментальные исследования показали перспективность применения полувинтовых полок на полочных плугах, в частности, на двухъярусных. Принимая во внимание рабочую скорость движения плуга 2.8 м/с, процент запахивания растительных остатков для плуга с полувинтовыми полками составляет 98,9 %, а с культурными – 96,1%. **Научная новизна.** По результатам эксперимента: 1) выработаны подходы к решению задачи распознавания условий изнашивания исследуемого сопряжения, изображаемого его концептуальной моделью; 2) построены соответствующие алгоритмы вычислительных процедур; 3) разработана математическая модель, определяющая влияние параметров контактирующих поверхностей на их эксплуатационное свойство – линейную интенсивность изнашивания в период нормального износа; 4) для данной модели обозначены теоретические предпосылки применения к исследованию произвольного сопряжения. **Практическая значимость.** В настоящее время по этим направлениям получены серьезные результаты, которые находятся на уровне современных требований конструкторского проектирования. В процессе параметрической оптимизации модели формируется множество искомых значений параметров поверхностей. Сформированы алгоритмы автоматического распознавания особенностей конструкции и эксплуатации сочетаний по их изображениям, которые задаются структурированными совокупностями формализованных признаков. Результатом распознавания является отношение сопряжения к определенной группе, каждой из множества которых соответствует индивидуальная расчетная модель нормирования параметров качества.

*Ключевые слова:* геометрия; поверхности; развернутые поверхности; модель; рабочие органы

### REFERENCES

1. Ayzikovich, S. M., Vang, Y. C., & Volkov, S. S. (2014). Vnedreniye parabolicheskogo indentora v neodnorodnyu polosu, lezhashchuyu na uprugom osnovanii. *Proceedings of the XVII International Conference on Sov-*

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

- remennyye problemy mekhaniki sploshnoy sredy, October 14-17, 2014, Rostov-on-Don. 16-19. Rostov-on-Don: Southern Federal University.*
2. Godes, A. Y., & Loboda, V. V. (2013). Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye uprugoy ploskosti s dugovoy treshchinoy mezhdru krugovym vklyucheniem i matritsey. *Bulletin of Dnipropetrovsk University, Series Mechanics*, 17 (1), 3-10.
  3. Golovanov, N. N. (2002). *Geometricheskoye modelirovaniye*. Moscow: FIZMATLIT.
  4. Yelfimov, G. V. (1948). *Teoriya perekhodnykh krivyykh*. Moscow: Transzheldorizdat.
  5. Zelenyy, P. V., & Shcherbakova, O. K. (2015). Kompyuternoye modelirovaniye geometrii dvizheniya pakhotnogo agregata. *Proceedings of the International Conference on Innovatsionnyye tekhnologii v inzhenernoy grafike: problemy i perspektivy, March 27, 2015, Novosibirsk. 24-26. Novosibirsk: NGASU (Sibstrin).*
  6. Malyi, A. D., Popudniak, Y. Y., Ulchenko, T. V., & Starosol'ska T. V. (2014). Quasilinear graphic models of space. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 5, 51–56.
  7. Kotov, I. I. (1975). *Algoritmy konstruirovaniya karkasnykh poverkhnostey: Metodicheskoye posobiye po nachertatelnoy geometrii*. Moscow: MAI.
  8. Kotov, I. I. (1973). *Nachertatel'naya geometriya: Kurs lektsiy dlya slushateley FPK*. Moscow: MAI.
  9. Laguta, V. V. (2002). *Improvement of designing of the railway curves in a plan*. (PhD thesis). Available from Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipropetrovsk.
  10. Naydysh, V. M. (1980). Konstruirovaniye poverkhnostey iz mnogoparametricheskikh mnozhestv liniy i poverkhnostey. *Nauchnyye trudy Ukrainskoy selskokhozyaystvennoy akademii*, 234, 141-144.
  11. Naydysh, V. M. (1981). Konstruirovaniye poverkhnostey, prokhodyashchikh cherez ikh spetsialnyye linii. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii: Aviatsionnaya Tekhnika*, 2, 88-90.
  12. Tishchenko, S. S. (2007). Geometricheskaya adaptatsiya poverkhnostey pochvoobrabatyvayushchikh rabochikh organov k vypolnyaemomu protsessu. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva im. P. Vasylenka*, 59(1), 110-114.
  13. Tishchenko, S. S. (2005). Geometricheskaya model adaptivnoy poverkhnosti pochvoobrabatyvayushchego rabocheho organa intsidentnoy dvum krivym. *Sbornik nauchnykh rabot Krymskogo gosudarstvennogo universiteta*, 84, 242-247.
  14. Tishchenko, S. S., & Karas, V. V. (2006). Konstruirovaniye poverkhnosti okuchnika dlya propashnykh kultur po absolyutnym traektoriyam dvizheniya pochvy. *News of Dnipropetrovsk State Agrarian and Economic University*, 1, 27-30.
  15. Trukhina, V. D. (1989). *Primeneniye vychislitelnoy tekhniki pri proyektirovanii lemeshnootvalnykh poverkhnostey*. Barnaul: API.
  16. Brown, L. D., Levine, M., & Wang, L. (2016). A semiparametric multivariate partially linear model: A difference approach. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 178, 99-111. doi:10.1016/j.jspi.2016.06.005
  17. Malyi, A. D., Ulchenko, T. V., Shcherbak, A. S., Popudniak, Y. Y., & Starosolskaya, T. V. (2016). One-to-one nonlinear transformation the space with identity plane. *Science and Transport Progress*, 3(63), 181-190. doi: 10.15802/stp2016/74768
  18. Watson, D. F. (1981). Computing the n-dimensional Delaunay tessellation with application to Voronoi polytopes. *The Computer Journal*, 24(2), 167-172. doi: 10.1093/comjnl/24.2.167
  19. Xu, X., & Lee, L. (2015). A spatial autoregressive model with a nonlinear transformation of the dependent variable. *Journal of Econometrics*, 186(1), 1-18. doi: 10.1016/j.jeconom.2014.12.005

*Prof. M. V. Shchpyrko, D. Sc. (Tech.), (Ukraine); Prof. V. D. Petrenko, D. Sc. (Tech.) recommended this article to be published)*

Accessed: Dec. 14, 2016

Received: March 23, 2017



# РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.46.02

О. В. ФОМІН<sup>1</sup>, А. А. СТЕЦЬКО<sup>2\*</sup>, В. Є. ОСЬМАК<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Вагони та вагонне господарство», Державний економіко-технологічний університет транспорту,  
вул. І. Огієнка, 19, Київ, Україна, 03049, тел. +38 (067) 813 97 88, ел. пошта fomin1985@list.ru,  
ORCID 0000-0003-2387-9946

<sup>2\*</sup>Каф. «Вагони та вагонне господарство», Державний економіко-технологічний університет транспорту,  
вул. І. Огієнка, 19, Київ, Україна, 03049, тел. +38 (063) 243 97 47, ел. пошта stetsko.anton@mail.ru,  
ORCID 0000-0002-9232-2968

<sup>3</sup>Каф. «Вагони та вагонне господарство», Державний економіко-технологічний університет транспорту,  
вул. І. Огієнка, 19, Київ, Україна, 03049, тел. +38 (067) 220 27 56, ел. пошта vic5@ukr.net,  
ORCID 0000-0003-2459-554X

## РОЗПОДІЛЕНЕ ЗОВНІШНЄ ПОВЕРХНЕВЕ ЗМІЦНЕННЯ ВАГОННИХ КОНСТРУКЦІЙ МЕТОДОМ НАВИВАННЯ

**Мета.** Робота передбачає висвітлення особливостей та результатів проведеного авторами дослідження з визначення можливості та доцільності створення попередньо напружено-деформованого стану вантажних вагонів методом навивання з метою поліпшення їх міцнісних характеристик. Також необхідним є представлення теоретичного обґрунтування ефективності застосування даного методу для вагонних конструкцій та відповідного прикладу для вагона-цистерни. **Методика.** Проведене дослідження базується на результатах аналізу відомих робіт із теми, математичному обґрунтуванні та комп'ютерному моделюванні. При розрахунках складових рухомого складу використані сучасні загальноприйняті методики. **Результати.** Авторами з'ясовано, що метод навивання для створення попередньо напружено-деформованого стану є ефективним та доцільним для застосування в конструкціях рухомого складу залізниць та, зокрема, у вантажних вагонах. Конструкції вантажних вагонів із попередньо напружено-деформованим станом характеризуються рядом міцнісних переваг, серед яких можна виділити покращення роботи зі сприйняття експлуатаційних навантажень та збереження ресурсу. **Наукова новизна.** Вперше запропоновано удосконалення несучої здатності конструкцій вантажних вагонів шляхом створення її складових у спрямованому напружено-деформованому стані. Також вперше запропоновано застосування розподіленого зовнішнього поверхневого зміцнення методом навивання для створення попередньо напружено-деформованого стану конструктивних елементів вантажних вагонів. Розглянуто способи навивання для конструкцій вантажних вагонів та їх впровадження. **Практична значимість.** В результаті проведених досліджень розроблено ряд технічних рішень із удосконалення конструкцій вантажних вагонів та контейнера-цистерни, що було запатентовано. В статті частково наведено відповідні рішення для вагона-цистерни. Практичне впровадження таких рішень дозволить суттєво поліпшити техніко-економічні та експлуатаційні показники вагонних конструкцій.

**Ключові слова:** залізничний транспорт; вантажний вагон; спрямований напружено-деформований стан; несучі системи; навивання; контейнер-цистерна

### Вступ

Вітчизняний залізничний транспорт відіграє виключну роль у національній економіці, є основою виробничих зв'язків між окремими регіонами та країнами. Це визначає особливі вимоги [10–12] до сучасного рухомого складу, най-

більш чисельна та вагома частка якого належить вантажним вагонам.

Головним несучим елементом вантажних вагонів є рама [5, 7, 9, 13], як основні складові елементи якої можна виділити: хребтову, проміжні та поздовжні, шворневі, лобові (кінцеві) балки. Результати аналізу перспективних для

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

вагонобудування профілів [5, 11] та досвіду інших галузей машинобудування [5, 10] вказали на доцільність розгляду питання впровадження труб круглого перерізу як несучих складових вагонів.

У роботі [12] наведені результати та особливості виконаних досліджень з впровадження труб круглого перерізу як складових елементів кузовів вантажних вагонів, які підтвердили правильність та перспективність такого напрямку.

Проблемами поліпшення несучих конструкцій вагонів займалося багато наукових шкіл та вчених (Лазарян В. А., Бубнов В. М., Манашкін Л. А., Блохін Є. П., Данович В. Д., Савчук О. М., Богомаз Г. І., Науменко Н. Ю., Філіпов В. М., Горобець В. Л., Пшінько О. М., Барбас Й. Г. та інші).

Водночас одним з ефективних методів вдосконалення конструкції вантажних вагонів вважається створення попередніх напружень, що досягаються навиванням високоміцного дроту, скловолокна або стрічки на їх несучі елементи, що виконані з порожнистих замкнутих профілів [2]. При цьому в стінках (несучих елементах) створюються зусилля, зворотні за знаком до робочих. У цьому випадку спостерігається перерозподіл напружень, що можна корисно використати при проектуванні зниження товщини стінки і створенні більш міцної та з збільшеним ресурсом конструкції за рахунок вирівнювання кільцевих і поздовжніх напружень [3].

Спосіб створення попередніх напружень широко застосовується в апаратах високого тиску [1, 3, 4, 6]. Однак аналіз літератури свідчить, що науково-технічна проблема застосування попереднього напруження в несучі системи вантажних вагонів не обґрунтована та не досліджена.

### Мета

Мета роботи полягає в дослідженні можливості та доцільності створення спрямованого попередньо напружено-деформованого стану елементів вантажних вагонів методом навивання з метою поліпшення їх міцнісних характеристик.

### Методика

Навивання дроту посилює конструкцію, тим самим підвищуючи ефективність її використання за рахунок зниження собівартості виготовлення та експлуатації шляхом: зниження її

матеріалоємності, підвищення вантажопідйомності, ремонтпридатності та корозійної стійкості при виконанні умов міцності та експлуатаційної надійності.

Навивання обмотки на циліндричні оболонки найбільш ефективна у випадках, коли оболонка сприймає внутрішній надлишковий тиск. До того ж, при заданому робочому тиску за допомогою відповідного армування можна істотно знизити витрати металу. Як обмотка можуть застосовуватися високоміцний сталевий дріт або стрічка, а також склоники, що навиваються в один або кілька шарів. Внутрішню оболонку можна виготовляти з листів сталі, алюмінієвих або титанових сплавів.

Основна ідея такої конструкції – за допомогою високоміцної попередньо розтягнутої обмотки перерозподілити зусилля в конструкції таким чином, щоб розвантажити внутрішній шар (зробити його більш тонким) із менш міцного матеріалу і в разі використання алюмінієвих або титанових сплавів – більш дорогого матеріалу.

Навивати дріт або стрічку можна або в кільцевому напрямку, або по спіралі під кутом до повздовжньої осі оболонки. При навиванні напруженої арматури по спіралі зменшуються не тільки кільцеві, й повздовжні навантаження у внутрішній оболонці від розрахункових навантажень. Цей спосіб доречний для котлів вагонів-цистерн та контейнерів-цистерн, в яких одночасно можуть бути перенапружені і сферичні днища [2, 8], а також перспективних несучих систем вантажних конструкцій із порожнистих замкнутих профілів. Внутрішня оболонка може слугувати основою для навивання і мати мінімальну товщину, що визначається умовою забезпечення стійкості її при навиванні першого шару і корозійною стійкістю матеріалу в разі агресивності робочого середовища. Товщина обмотки при цьому вийде достатньо великою.

Технологічно найбільш простий спосіб кільцевого навивання, коли витки вкладаються щільно один до одного або розташовуються з деяким кроком. Але тоді зменшуються тільки кільцеві навантаження по внутрішній оболонці. Оскільки в циліндричному резервуарі при внутрішньому тиску кільцеві напруження в 2 рази більші, ніж повздовжні, то за допомогою кільцевої обмотки можна отримати рівномірну

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

в обох напрямках конструкцію. В цьому випадку мінімальна товщина оболонки визначається її міцністю в повздовжньому напрямку, оскільки обмотка в цьому напрямку не працює. Необхідна товщина обмотки виходить значно менше, ніж товщина оболонки. Із зазначеного можна зробити висновок, що кільцевим навиванням можна зменшити вагу внутрішньої оболонки в 2 рази (не враховуючи ваги обмотки). Більшого ефекту можна досягти, якщо оболонка буде виконана з матеріалу з меншим модулем пружності, ніж обмотка.

Роботу циліндричної оболонки з навиванням, як і роботу будь-якої попередньо-напруженої конструкції, можна розділити на два етапи. Перший визначається початковими напруженнями, що з'являються в оболонці після навивання на неї обмотки з попереднім напруженням. Другий етап характеризується роботою попередньо-напруженого резервуара на внутрішній тиск.

Розрахунок такої конструкції полягає у відповідному підборі фізико-механічних характеристик матеріалів обох шарів і їх товщини, а також вибору величини попереднього напруження (і, у разі потреби, кута намотування), щоб при досягненні робочого тиску у всіх елементах конструкції був забезпечений заданий запас міцності при мінімальній вартості конструкції [2].

Розглянемо напружений стан циліндричної оболонки з обмоткою, що піддається дії внутрішнього тиску  $p$  на бічну поверхню і повздовжньої сили  $N_x$  (рис. 1) (для замкнутого резервуара вона визначається тиском на днище). Товщина оболонки постійна по довжині. Обмотка рівномірно розподілена вздовж твірної. Розрахункова товщина її визначається площею поперечного перерізу витків, що приходяться на одиницю довжини оболонки (або кількості матеріалу на  $1 \text{ см}^2$  поверхні оболонки при косій навивці). Передбачається, що товщина оболонки і обмотки малі порівняно з радіусом, тому конструкцію можна вважати тонкостінною [2, 8].

Вводимо такі позначення:  $r$  – радіус оболонки;  $\delta_1$  – товщина оболонки;  $\delta_2$  – товщина обмотки, рівна  $\delta_2 = f/t$ , де  $f$  – площа поперечного перерізу витка;  $t$  – крок витків;  $E_1$ ,  $\mu$  – модуль пружності і коефіцієнт Пуассона матеріалу оболонки;  $E_2$  – модуль пружності матеріалу обмотки.

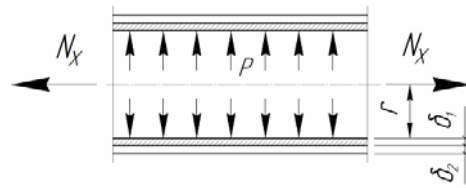


Рис. 1. Розрахункова схема циліндричної оболонки з обмоткою

Fig. 1. Diagram of cylindrical shell with winding

Якщо на оболонку навивати дріт з заданим (контрольованим) напруженням  $\sigma_k$ , то після навивання напруження в ній виявиться меншим внаслідок пружної деформації оболонки. Напруження в конструкції внутрішньо урівноважені – це зусилля, що приходить на одиницю довжини оболонки, рівні і протилежні за знаком відповідному зусиллю в обмотці. Передбачається, що під дією обмотки в оболонці виникають тільки пружні деформації.

Виріжемо двома кільцевими і двома повздовжніми перерізами одиничний елемент оболонки і позначимо зусилля, що діють в ньому в загальному випадку після навивання так, як показано на рис. 2.

При кільцевому навиванні можна записати

$$N_{01} - N_{02} = 0$$

або

$$\sigma_{01}\delta_1 - \sigma_{02}\delta_2 = 0,$$

де  $N_{01}$  і  $N_{02}$  – кільцеві зусилля в оболонці і обмотці;  $\sigma_{01}$  – кільцеве напруження в оболонці;  $\sigma_{02}$  – напруження в обмотці.

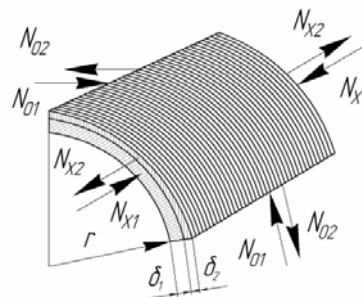


Рис. 2. Одиничний елемент, вирізаний із циліндричної оболонки з обмоткою

Fig. 2. A single element cut from cylindrical shell with winding

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

В загальному випадку спірального навивання обмотки в оболонці з'являються початкові зусилля в кільцевому і повздовжньому напрямках:

$$\left. \begin{aligned} N_{01} - N_{02} &= 0 \\ N_{x1} - N_{x2} &= 0 \end{aligned} \right\}.$$

При одношаровому навиванні напруження в оболонці досягають заданого значення попереднього навантаження  $\sigma_{01}$ , якщо напруження в шарі обмотки відповідно до (1) буде дорівнювати:

$$\sigma_{02_1} = \sigma_{01} \frac{\delta_1}{\delta_{21}}, \quad (1)$$

де  $\sigma_{01}$  – напруження в оболонці при навиванні першого шару обмотки;  $\sigma_{02_1}$  і  $\delta_{21}$  – напруження і товщина навитого шару обмотки.

Розглянемо процес навивання одного шару ( $i = 1$ ). Складемо рівняння, в якому потенціальна енергія деформації попередньо розтягнутої обмотки до її навивання прирівнюється до потенціальної енергії металевої оболонки першого шару після навивання:

$$\frac{[\sigma_{02_1}]^2}{2E_2} \delta_2 = \frac{\sigma_{02_1}^2}{2E_2} \delta_2 + \frac{\sigma_{01}^2}{2E_1} \delta_1.$$

Виражаючи величину  $\sigma_{01}$  через  $\sigma_{02_1}$  за рівнянням рівноваги (1), отримаємо формулу для визначення напружень в навитому шарі дроту залежно від створюваного (контрольованого) напруження  $[\sigma_{02_1}]$ :

$$\sigma_{02_1} = \frac{[\sigma_{02_1}]}{\sqrt{1 + \frac{E_2 \delta_2}{E_1 \delta_1}}} = \frac{[\sigma_{02_1}]}{\sqrt{1 + \lambda}},$$

де  $1/\sqrt{1 + \lambda}$  – коефіцієнт ослаблення напружень в дроті, що показує величину втрат попереднього напруження від пружного обтиску оболонки. Він залежить від співвідношення жорсткості оболонки і обмотки.

При дії внутрішнього тиску оболонка і обмотка в кільцевому напрямку працюють разом. В оболонці попереднє напруження (стиск) поступово зменшується до нуля, а потім з'являється

розтяг. В обмотці напруження від внутрішнього тиску додаються до початкових розтягуючих. Повздовжні зусилля при кільцевому навиванні сприймаються тільки оболонкою.

Вважаючи, що оболонка попередньо-напружена кільцевою обмоткою навантажена рівномірним внутрішнім тиском  $p$  на бічний поверхні і повздовжньою розтягуючою силою  $N_x$  (рис. 1), то отримаємо рівняння рівноваги системи в кільцевому і повздовжньому напрямках:

$$\sigma_1 \delta_1 + \sigma_2 \delta_2 = pr; \quad (2)$$

$$\sigma_x \delta_1 = \frac{N_x}{2\pi r}, \quad (3)$$

де  $\sigma_1$  і  $\sigma_x$  – кільцеве і повздовжнє напруження в оболонці;  $\sigma_2$  – кільцеве напруження в обмотці.

Характер зміни кільцевих напружень в оболонці і обмотці зі збільшенням тиску  $p$  наведений на рис. 3 [2].

Через те, що при дії внутрішнього тиску оболонка і обмотка деформуються разом і деформації їх пружні, маємо умову рівності кільцевих деформації обох шарів:

$$\left[ (\sigma_1 - \mu \sigma_x) - \sigma_{01} \right] \frac{1}{E_1} = (\sigma_2 - \sigma_{02}) \frac{1}{E_2}, \quad (4)$$

(величини напружень беруться зі своїми знаками).

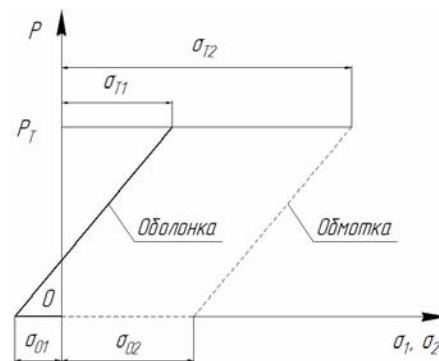


Рис. 3. Діаграма роботи попередньо-навантаженої оболонки під внутрішнім тиском в пружній стадії

Fig. 3. Diagram of the pre-loaded shell under internal pressure in the elastic stage

До цих рівнянь потрібно додати рівняння рівноваги оболонки в кільцевому напрямку в стадії попереднього напруження

$$\sigma_{01} \delta_1 + \sigma_{02} \delta_2 = 0. \quad (5)$$

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

В результаті сумісного розв'язання рівнянь (2)–(5) можна визначити невідомі значення кільцевих напружень в оболонці і обмотці:

$$\sigma_1 = \frac{pr + \mu \frac{N_x}{2\pi r} m \frac{\delta_2}{\delta_1}}{\delta_1 + m\delta_2} - \sigma_{02} \frac{\delta_2}{\delta_1}, \quad (6)$$

$$\sigma_2 = \frac{mpr - \mu \frac{N_x}{2\pi r} m}{\delta_1 + m\delta_2} + \sigma_{02}, \quad (7)$$

де  $m = E_2/E_1$ .

Для замкнутого резервуара  $N_x = p\pi r^2$  формули (6) і (7) матимуть вигляд:

$$\sigma_1 = \frac{pr \left(1 + \frac{\mu}{2} m \frac{\delta_2}{\delta_1}\right)}{\delta_1 + m\delta_2} - \sigma_{02} \frac{\delta_2}{\delta_1}; \quad (8)$$

$$\sigma_2 = \frac{mpr \left(1 - \frac{\mu}{2}\right)}{\delta_1 + m\delta_2} + \sigma_{02}. \quad (9)$$

Як видно з наведених формул, розподілення навантажень в шарах резервуара і його міцність залежать від багатьох факторів: співвідношення товщин оболонки і обмотки, модулів пружності матеріалів  $m$ , які використовуються, попереднього навантаження (а також кута нахилу витків до осі резервуара при спіральній обмотці). Виходячи з цього, можна спроектувати резервуар таким чином, що при заданих навантаженнях кільцеві і повздовжні напруження в оболонці будуть однакові. Це досягається створенням необхідного попереднього напруження. Значення його може бути отримане з формули (8) враховуючи (6) і (8) за умови  $\sigma_1 = \sigma_x$ :

$$\frac{\sigma_{01}}{\sigma_1} = \frac{\delta_1 - m\delta_2(1 - \mu)}{\delta_1 + m\delta_2}. \quad (9)$$

Якщо попереднє напруження перевищує величину (9), то при заданому внутрішньому тиску оболонка виявиться більш напруженою в повздовжньому напрямку, ніж в кільцевому.

Таким чином, тільки за допомогою попереднього напруження можна зробити циліндричний резервуар рівномірним і подолати важли-

вий недолік всіх циліндричних оболонок, у яких при внутрішньому тиску кільцеві напруження в 2 рази більше, ніж у повздовжніх.

Робота конструкції вважається пружною до моменту появи пластичних деформації в оболонці. При цьому обмотка продовжує працювати пружно, оскільки вона, як правило, виконується з більш міцного матеріалу. Якщо в формулі (8) прийняти кільцеві напруження в оболонці рівними межі текучості матеріалу  $\sigma_T$ , то можна отримати значення внутрішнього тиску, що відповідає кінцю пружної роботи оболонки:

$$p_T = \frac{\sigma_{T1} + \sigma_{01}}{r} \frac{\delta_1 + m\delta_2}{1 + \frac{\mu}{2} m \frac{\delta_2}{\delta_1}}.$$

В розрахунках попередньо-напружених конструкцій методом граничних станів напружень в усіх елементах при розрахункових навантаженнях не повинні перевищувати розрахункових опорів матеріалів, що використовуються (у разі потреби з врахуванням коефіцієнтів умов роботи). Розрахункові опори листового прокату, з якого виготовляють оболонки, наведені у відповідних ГОСТах. За розрахунковий опір розтягненню високоміцного сталюго дроту відповідно до СНиП II-B.3-72 приймають значення тимчасового опору розриву дроту, що встановлене ГОСТами, розділене на коефіцієнт безпеки по матеріалу 1,6. Позначаємо їх відповідно  $R_1$  і  $R_2$ .

На основі вищенаведеного з виразів (2)–(5) можна отримати формули для визначення потрібних товщин оболонки і обмотки при заданому внутрішньому тиску:

$$\delta_1 = \frac{pr}{R_1} \frac{k - m \left( \frac{\sigma_{01}}{R_1} + 1 \right) + \mu m \frac{\sigma_x}{R_1}}{(k - m) \left( \frac{\sigma_{01}}{R_1} + 1 \right) + \mu m \frac{\sigma_x}{R_1}}; \quad (10)$$

$$\delta_2 = \frac{pr}{R_1} \frac{\frac{\sigma_{01}}{R_1}}{(k - m) \left( \frac{\sigma_{01}}{R_1} + 1 \right) + \mu m \frac{\sigma_x}{R_1}}, \quad (11)$$

де  $k = R_2 / R_1$ .

Ці формули дають залежність товщин від

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

попереднього напруження. Величину його назначають виходячи з конкретних умов з врахуванням потреб забезпечення стійкості оболонки під час навивання. Якщо необхідно отримати однакову міцність в кільцевому і повздовжньому напрямках резервуара, тобто найбільш економічну, то попереднє напруження із (10) і (11) в припущенні  $\sigma_x = R_1$  дорівнює:

$$\frac{\sigma_{01}}{R_1} = \frac{k - m(1 - \mu)}{k + m},$$

і залежить від співвідношення фізико-механічних властивостей матеріалів оболонки і обмотки.

## Результати

Ефективність впровадження зазначеного вище математичного апарату було використано та попередньо перевірено для наведених на рис. 4 конструктивних складових рухомого складу. При цьому застосовувались сучасні загальноприйняті методи та інженерне програмне забезпечення. Попередньо з'ясовано, що застосування запропонованого методу попередньо напружено-деформованого стану дозволить покращити динамічні та статичні міцнісні якості конструкцій в середньому на 15 %.

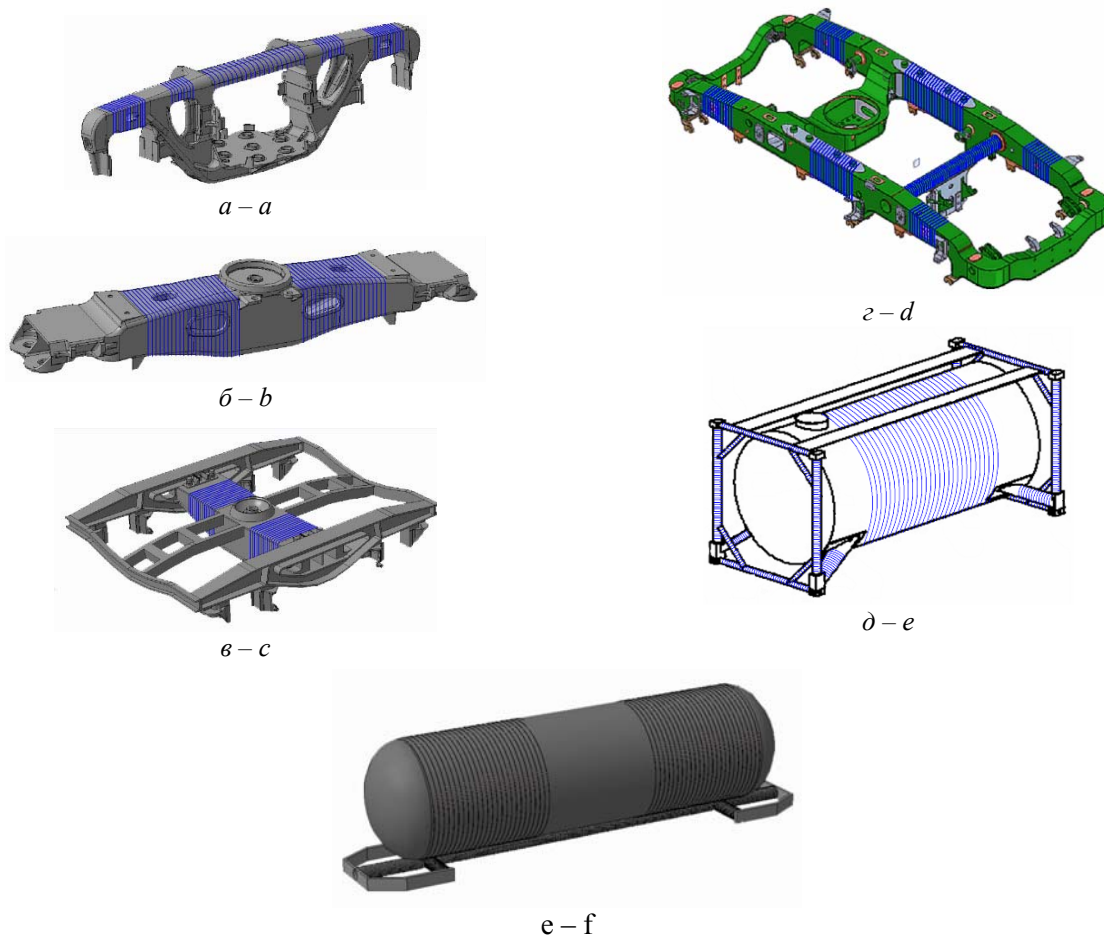


Рис. 4. Схематичне відображення потенційних місць застосування на модулях ходових частин та кузова розподіленого зовнішнього поверхневого зміцнення методом навивання:

*a, б* – бокова та надресорна балки візка моделі 18-100;

*в* – рама європейського візка моделі Y25; *г* – рама тепловоза 2ТЭ70; *д* – контейнер-цистерна; *е* – вагон-цистерна

Fig. 4. Schematic representation of potential locations for application of distributed external surface hardening by winding on modules of undercarriage and body:

*a, b* – lateral and bolster beams of a bogie, model 18-100; *c* – frame of a European bogie, model Y25;

*d* – frame of a locomotive 2TE70; *e* – tank-container; *f* – tank-car



## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

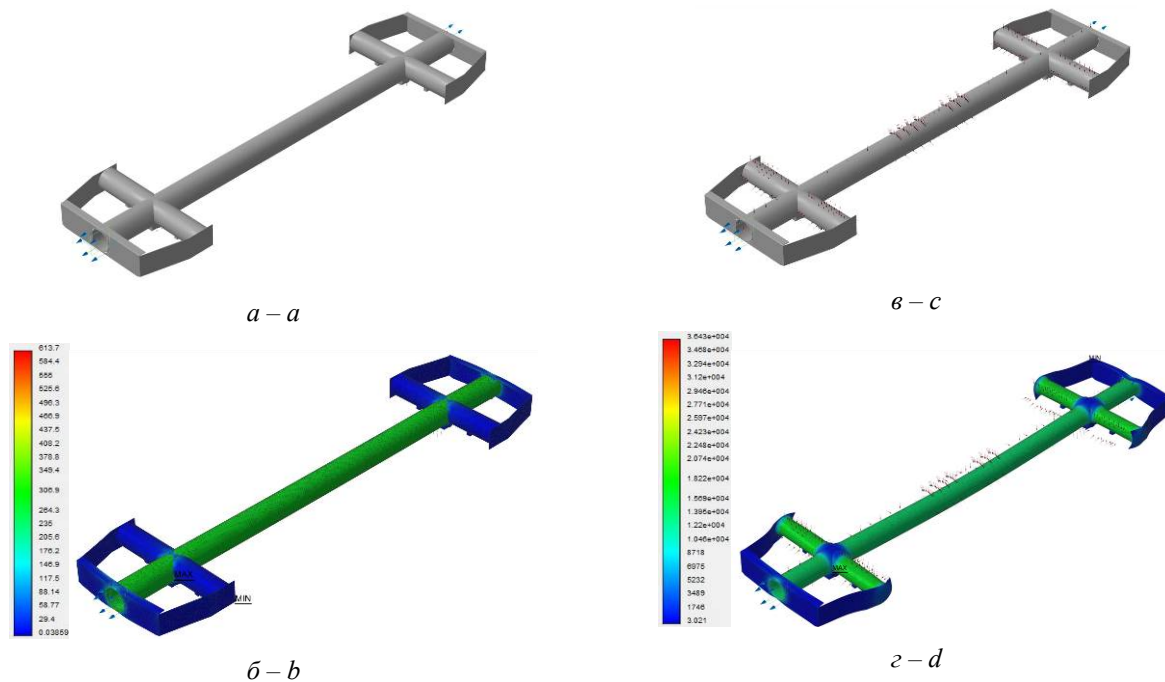


Рис. 5. Дослідження напружено-деформованого стану рами вагона-цистерни:

*a* – прикладення зусиль до рами без навивання; *b* – напружений стан рами без навивання; *c* – прикладення зусиль до рами з навиванням; *d* – напружений стан рами з навиванням

Fig. 5. Study of stress-strain state of a tank-car frame:

*a* – application of efforts to a frame without winding; *b* – stress state of a frame without winding; *c* – application of efforts to the frame with winding; *d* – stress state of a frame with winding

Більш поглиблено авторами було виконано аналіз ефективності впровадження попередньо напружено-деформованого стану зокрема до рами вагона-цистерни. Були виконані комплексні дослідження напружено-деформованого стану рами вагона-цистерни в сучасному програмному комплексі (рис. 5). При цьому моделювались різні експлуатаційні випадки роботи рами, і відповідно, схеми прикладення навантажень.

Попередній розрахунок вказав на можливість отримати такі позитивні результати: тару вагона знизити на 20 %; вантажопідйомність підвищити на 20 %; тріщиностійкість покращити на 30 %; вартість виготовлення та експлуатації знизити на 5 %.

Отримані результати оцінювання впровадження спрямованого напружено-деформованого стану для вагонних конструкцій не суперечать раніше відомим (в тому числі [8]) для металоконструкцій.

На сьогодні виконуються авторами роботи з експериментального підтвердження отриманих теоретичних результатів.

### Наукова новизна та практична значимість

Досліджено можливість удосконалення несучої здатності конструкцій рухомого складу шляхом створення її складових в спрямованому напружено-деформованому стані. Запропоновано застосування методу навивання для попередньо напружено-деформованого стану вантажних вагонів. Систематизовано особливості навивання для конструкцій рухомого складу і їх впровадження.

Розроблено низку технічних рішень з удосконалення конструкцій вантажних вагонів, зокрема контейнера-цистерни, що було запатентовано. Практичне впровадження таких рішень дозволить суттєво поліпшити її техніко-економічні та експлуатаційні показники.

### Висновки

В результаті виконаного дослідження підтверджено запропоновану авторами гіпотезу з ефективності створення спрямованого напружено-деформованого стану вагонних кон-

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

струкцій методом навивання. Так застосування такого підходу дозволить покращити динамічні та статичні міцнісні якості вагонних складових в середньому на 15 %.

При впровадженні спрямованого напружено-деформованого стану до складових вантажних вагонів доцільно використовувати наведені в роботі математичні описання. Запропонований метод також доцільно використовувати як дієвий засіб подовження ресурсу вагонних конструкцій та інших відповідальних складових рухомого складу. Зазначене забезпечується суттєвою позитивною боротьбою з втомою їх складових.

В подальшому плануються більш детальні розрахунки з врахуванням технології виготовлення та розрахунок ресурсу. В цій роботі наведені по-

передні результати економічної ефективності, які в подальшому плануються більш детально та ґрунтовно визначити в тому числі з визначенням показників ресурсу.

Також в подальшому необхідно отримати результати теоретичного дослідження та комп'ютерного математичного моделювання підтвердити експериментальними натурними випробуваннями.

Наведений метод покращення техніко-економічних та експлуатаційних показників вагонних конструкцій за рахунок поліпшення їх динамічної та статичної міцності також доцільно використовувати при вирішенні аналогічних завдань для інших засобів транспортного машинобудування.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Айнабеков, А. И. Работа надземных предварительно напряженных трубопроводов при эксплуатационных нагрузках / А. И. Айнабеков, Б. Р. Арапов, У. С. Сулейменов // Наука и образование Южного Казахстана. – 2003. – № 35. – С. 12–14.
2. Беленя, Е. И. Предварительно-напряженные металлические листовые конструкции / Е. И. Беленя, С. М. Астряб, Э. Б. Рамазанов. – Москва : Стройиздат, 1979. – 192 с.
3. Беленя, Е. И. Предварительно-напряженные несущие металлические конструкции / Е. И. Беленя. – Москва : Стройиздат, 1975. – 416 с.
4. Воеводин, А. А. Предварительно напряженные системы элементов конструкций / А. А. Воеводин. – Москва : Стройиздат, 1989. – 298 с.
5. Дослідження міцності контейнера-цистерни удосконаленої конструкції в умовах експлуатації / А. О. Ловська, О. В. Фомін, А. М. Огороков, О. М. Мельничук // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 2 (56). – С. 180–188. doi: 10.15802/stp2015/42177.
6. Перспективы применения предварительного напряжения в металлических конструкциях нефтеперерабатывающей промышленности / У. С. Сулейменов, А. Б. Молдагалиев, Н. Ж. Жанабай, М. К. Укибаев // Наука и образование Южного Казахстана. – 2005. – № 3. – С. 51–53.
7. Тартаковский, Е. Д. Удосконалення процесу керування локомотивом шляхом використання систем підтримки прийняття рішень / Е. Д. Тартаковский, О. М. Горобченко, А. О. Антонович // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. – 2016. – Т. 5, № 3 (83). – С. 4–11. doi: 10.15587/1729-4061.2016.80198.
8. Экспериментальный анализ колебаний предварительно напряженных магистральных трубопроводов / А. И. Айнабеков, У. С. Сулейменов, К. В. Аврамов [и др.] // Проблемы машиностроения. – 2016. – Т. 19, № 1. – С. 21–27.
9. Analysis of syngas formation and ecological efficiency for the system of treating biomass waste and other solid fuels with CO2 recuperation based on integrated gasification combined cycle with diesel engine / A. Y. Pilatau, H. A. Viarshyna, A. V. Gorbunov [et al.] // J. of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2014. – Vol. 36. – Iss. 4. – P. 673–679. doi: 10.1007/s40430-014-0166-7.
10. Determination of the dynamic characteristics of freight wagons with various bogie / S. Myamlin, L. P. Lingaitis, S. Dailydka [et al.] // Transport. – 2015. – Vol. 30. – Iss. 1. – P. 88–92. doi: 10.3846/16484142.2015.1020565.
11. Fomin, O. V. Increase of the freight wagons ideality degree and prognostication of their evolution stages / O. V. Fomin // Науковий вісник НГУ. – 2015. – № 3. – Р. 68–76.
12. Fomin, O. V. Modern requirements to carrying systems of railway general-purpose gondola cars / O. V. Fomin // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – No. 5. – P. 31–43.
13. Formation of an automated traffic capacity calculation system of rail networks for freight flows of mining and smelting enterprises / S. V. Panchenko, T. V. Butko, A. V. Prokhorchenko, L. O. Parkhomenko // Науковий вісник НГУ. – 2016. – № 2. – Р. 93–99.



РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

А. В. ФОМИН<sup>1</sup>, А. А. СТЕЦКО<sup>2\*</sup>, В. Е. ОСЬМАК<sup>3</sup><sup>1</sup>Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Государственный экономико-технологический университет транспорта,  
ул. И. Огиенко, 19, Киев, Украина, 03049, тел. +38 (067) 813 97 88, эл. почта fomin1985@list.ru,  
ORCID 0000-0003-2387-9946<sup>2\*</sup>Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Государственный экономико-технологический университет транспорта,  
ул. И. Огиенко, 19, Киев, Украина, 03049, тел. +38 (063) 243 97 47, эл. почта stetsko.anton@mail.ru,  
ORCID 0000-0002-9232-2968<sup>3</sup>Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Государственный экономико-технологический университет транспорта,  
ул. И. Огиенко, 19, Киев, Украина, 03049, тел. +38 (067) 220 27 56, эл. почта vic5@ukr.net, ORCID 0000-0003-2459-554X

## РАСПРЕДЕЛЕННОЕ ВНЕШНЕЕ ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ВАГОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ НАВИВКИ

**Цель.** Работа предполагает освещение особенностей и результатов проведенного авторами исследования по определению возможности и целесообразности создания предварительно напряженно-деформированного состояния грузовых вагонов методом навивки с целью улучшения их прочностных характеристик. Также необходимо представление теоретического обоснования эффективности применения данного метода для вагонных конструкций и соответствующего примера для вагона-цистерны. **Методика.** Проведенное исследование базируется на результатах анализа известных работ по теме, математическом обосновании и компьютерном моделировании. При расчетах составляющих подвижного состава использованы современные общепринятые методики. **Результаты.** Авторами установлено, что метод навивки для создания предварительно напряженно-деформированного состояния является эффективным и целесообразным для применения в конструкциях подвижного состава железных дорог и, в частности, грузовых вагонов. Конструкции грузовых вагонов с предварительным напряженно-деформированным состоянием характеризуются рядом прочностных преимуществ, среди которых можно выделить улучшение работы по восприятию эксплуатационных нагрузок и сохранение ресурса. **Научная новизна.** Впервые предложено усовершенствование несущей способности конструкций грузовых вагонов путем создания ее составляющих в направленном напряженно-деформированном состоянии. Также впервые предложено применение распределенного внешнего поверхностного упрочнения методом навивки для создания предварительно напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов грузовых вагонов. Рассмотрены способы навивки для конструкций грузовых вагонов и их внедрения. **Практическая значимость.** В результате проведенных исследований разработан ряд технических решений по совершенствованию конструкций грузовых вагонов и контейнера-цистерны, что было запатентовано. В статье частично приведены соответствующие решения для вагона-цистерны. Практическое внедрение таких решений позволит существенно улучшить технико-экономические и эксплуатационные показатели вагонных конструкций.

**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт; грузовой вагон; направленное напряженно-деформированное состояние; несущие системы; навивка; контейнер-цистерна

O. V. FOMIN<sup>1</sup>, A. A. STETSKO<sup>2\*</sup>, V. Y. OSMACK<sup>3</sup><sup>1</sup>Dep. «Cars and Carriages Economy», State Economic and Technological University of Transport, Ohiienko I. St., 19, Kyiv, Ukraine, 03049, tel. +38 (067) 813 97 88, e-mail fomin1985@list.ru, ORCID 0000-0003-2387-9946<sup>2\*</sup>Dep. «Cars and Carriages Economy», State Economic and Technological University of Transport, Ohiienko I. St., 19, Kyiv, Ukraine, 03049, tel. +38 (063) 243 97 47, e-mail stetsko.anton@mail.ru, ORCID 0000-0002-9232-2968<sup>3</sup>Dep. «Cars and Carriages Economy», State Economic and Technological University of Transport, Ohiienko I. St., 19, Kyiv, Ukraine, 03049, tel. +38 (067) 220 27 56, e-mail vic5@ukr.net, ORCID 0000-0003-2459-554X

## DISTRIBUTED EXTERNAL SURFACE HARDENING OF CAR DESIGN BY WINDING

**Purpose.** The paper involves coverage of features and results of the research conducted by the authors to determine the feasibility and establishment of pre-stressed-strained state of freight cars by winding in order to improve their strength characteristics. It is also necessary to present the theoretical justification for the effectiveness of the application of this method for car designs and an appropriate example for the tank-car. **Methodology.** The conducted study is based on an

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

analysis of known works on the subject, mathematical justification and computer modeling. At the calculations of rolling stock components contemporary conventional techniques were used. **Findings.** Authors found that the winding method for pre-stressed-strained state is effective and appropriate for use in the construction of railway rolling stock and, in particular freight cars. Freight car designs with the pre-stressed-strained state are characterized by a number of strength advantages, among which there is an improvement of the work on the perception of operational loads and resource conservation. **Originality.** For the first time it is proposed the improvement of bearing capacity of freight car constructions through the creation of its component in the directed stress-strained state. It is also for the first time proposed the use of distributed external surface hardening by the method of winding to create a pre-stress-strained state of structural components of freight cars. The methods for winding designs of freight cars and their implementation were considered. **Practical value.** The studies developed a number of technical solutions for improving the design of freight cars and tank-container, which has been patented. Corresponding solutions for the tank-car are partially presented. Practical implementation of such solutions will significantly improve the technical, economic and operational performances of car designs.

**Keywords:** railway transport; freight car; directed stress-strained state; bearing system; winding; tank-container

## REFERENCES

1. Aynabekov, A. I., Arapov, B. R., & Suleymenov, U. S. (2003). Rabota nadzemnykh predvaritelno napryazhennykh truboprovodov pri ekspluatatsionnykh nagruzkakh. *Science and Education of South Kazakhstan*, 35, 12-14.
2. Belenya, Y. I., Astrayab, S. M., & Ramazanov, E. B. (1979). *Predvaritelno-napryazhennyye metallicheskiye listovyye konstruksii*. Moscow: Stroyizdat.
3. Belenya, Y. I. (1975). *Predvaritelno-napryazhennyye nesushchiye metallicheskiye konstruksii*. Moscow: Stroyizdat.
4. Voevodin, A. A. (1989). *Predvaritelno napryazhennyye sistemy elementov konstruksiy*. Moscow: Stroyizdat.
5. Lovska, A. O., Fomin, O. V., Okorokov, A. M., & Melnychuk, O. M. (2015). Research of a tank-container strength of improved construction using the computer simulation of operating conditions. *Science and Transport Progress*, 2(56), 180-188. doi: 10.15802/stp2015/42177
6. Suleymenov, U. S., Moldagaliev, A. B., Zhanabay, N. Z., & Ukibaev, M. K. (2005). Perspektivy primeneniya predvaritelnogo napryazheniya v metallicheskiykh konstruksiyakh neftepererabatyvayushchey promyshlennosti. *Science and Education of South Kazakhstan*, 3, 51-53.
7. Tartakovskyi, E., Gorobchenko, O., & Antonovych, A. (2016). Improving the process of driving a locomotive through the use of decision support systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5, 3(83), 4-11. doi: 10.15587/1729-4061.2016.80198
8. Aynabekov, A. I., Suleymenov, U. S., Avramov, K. V., Moldagaliev, A. B., Kambarov, M. A., Serikbaev, T. T., & Abshenov, K. A. (2016). Experimental analysis of prestressed pipelines vibrations. *Problems of Mechanical Engineering*, 19(1), 21-27.
9. Pilatau, A. Y., Viarshyna, H. A., Gorbunov, A. V., Nozhenko, O. S., Maciel, H. S., Baranov, V. Y., & Matus, A. (2014). Analysis of syngas formation and ecological efficiency for the system of treating biomass waste and other solid fuels with CO<sub>2</sub> recuperation based on integrated gasification combined cycle with diesel engine. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 36(4), 673-679. doi: 10.1007/s40430-014-0166-7
10. Myamlin, S., Lingaitis, L. P., Dailydka, S., Vaičiūnas, G., Bogdevičius, M., & Bureika, G. (2015). Determination of the dynamic characteristics of freight wagons with various bogie. *Transport*, 30(1), 88-92. doi: 10.3846/16484142.2015.1020565
11. Fomin, O. V. (2015). Increase of the freight wagons ideality degree and prognostication of their evolution stages. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 3, 68-76.
12. Fomin, O. V. (2014). Modern requirements to carrying systems of railway general-purpose gondola cars. *Metallurgical and Mining Industry*, 5, 31-43.
13. Panchenko, S. V., Butko, T. V., Prokhorchenko, A. V., & Parkhomenko, L. O. (2016). Formation of an automated traffic capacity calculation system of rail networks for freight flows of mining and smelting enterprises. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 93-99.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. П. Ткаченко (Україна); д.т.н., проф. С. В. Мямліним (Україна)

Надійшла до редколегії: 12.12.2016

Прийнята до друку: 23.03.2017

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 624.131.7:628.477

Л. В. ТРИКОЗ<sup>1\*</sup>, В. Ю. САВЧУК<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Будівельні матеріали, конструкції та споруди», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 68, ел. пошта lvtrikoz@ukr.net, ORCID 0000-0002-8531-7546

<sup>2</sup>Каф. «Будівельні матеріали, конструкції та споруди», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 68, ел. пошта kalmukova2@mail.ru, ORCID 0000-0001-5971-5041

### ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВОГО МАТЕРІАЛУ З ВИКОРИСТАННЯМ ВІДХОДІВ

**Мета.** Для підвищення екологічної чистоти все частіше кондиційні будівельні матеріали замінюють відходами виробництва. Це стосується як металургійних шлаків, так і активного мулу станцій біологічного очищення міських стічних вод. Для з'ясування можливості їх використання необхідно дослідити деформаційні властивості композиційних ґрунтових матеріалів із додаванням вказаних відходів. **Методика.** При вивченні напружено-деформованого стану ґрунту в складних умовах, в яких і знаходиться ґрунт основ реальних будівель та споруд, як деформаційну характеристику застосовують модуль загальної деформації  $E_0$ . Цю характеристику визначали за результатами випробувань зразків ґрунту в компресійних приладах (одометрах), які виключають можливість бічного розширення зразка ґрунту при його навантажуванні вертикальним навантаженням. **Результати.** У результаті вимірювань було побудовано компресійні криві залежності коефіцієнта пористості від тиску. За цими даними визначено коефіцієнт стисливості та модуль деформації. Встановлено, що додавання активного мулу зменшує коефіцієнт стисливості зразків у 4 рази порівняно з глиною. У порівнянні зі зразками, які містять 50 % активного мулу, зразки з додаванням 50 % шлаку, зменшують стисливість у 12 разів. Додавання в глину активного мулу дозволяє збільшити модуль деформації з 7,8 до 20,3 МПа, шлак підвищує цю величину до 52,7 МПа. **Наукова новизна.** При виготовленні композиційного матеріалу на основі глинистих ґрунтів функціональні групи активного мулу взаємодіють із гідроксильними групами, розташованими на поверхні глинистих частинок, із утворенням просторової структури. Крім того, введення активного мулу сприяє пептизації – руйнуванню агрегатів ґрунту і утворенню контактів між окремими частинками, що й призводить до зменшення стисливості зразків за рахунок зменшення загальної пористості. Додавання шлаку сприяє утворенню оптимальної структури зразків із розміщенням менших за розмірами частинок у прошарках між більшими частинками. **Практична значимість.** Застосування активного мулу та шлаку забезпечує підвищену несучу здатність ґрунту, розширення сировинної бази для його отримання з одночасним покращенням екологічної ситуації у містах, забезпечення можливості вторинного використання укріпленого ґрунту.

**Ключові слова:** укріплений ґрунт; шлак; активний мул; модуль деформації; коефіцієнт пористості; коефіцієнт стисливості

#### Вступ

При будь-якому виді будівництва (улаштуванні земляного полотна залізничних та автомобільних доріг, будівництві пасажирських платформ чи прокладанні підземного газопроводу) сучасні умови потребують розробки ін-

дивідуальних проектів та вибору ефективних будівельних матеріалів, обґрунтованих відповідними розрахунками. Значною мірою це стосується умов проектування й будівництва на ділянках залягання «слабких» ґрунтів, схильних до консолідаційного осідання. У випадку неоднакових умов ущільнення виникає нерівномір-

## ТРАНСПОРТЕ БУДІВНИЦТВО

не осідання ґрунту, що призводить до деформації будівлі чи інженерної споруди та великих капітальних вкладень на ремонт або відновлення. Вибір найбільш раціональних матеріалів для майбутнього будівництва залежить від величини осідання ущільнення та її розвитку в часі під дією постійних та тимчасових навантажень.

Основною метою під час вибору будівельних матеріалів є визначення здатності сприймати тривалий час навантаження, що не перешкоджають нормальній експлуатації будівлі чи інженерної споруди. Для встановлення основних показників деформованості ґрунтів виконують їх випробування на ущільнення під навантаженням, коли деформації ґрунту можуть розвиватися тільки в одному напрямку під дією тільки зовнішнього навантаження [3]. Характер деформації ґрунту та її величина залежить від напрямку і інтенсивності внутрішніх зусиль, на які впливає низка чинників: хіміко-мінеральний склад, структурно-текстурні особливості, ступінь водонасичення, вологість та ін. [15]. Незворотні деформації є наслідком проявлення пластичних властивостей тіл. Основними чинниками незворотності деформацій є руйнування окремих структурних зв'язків при деформації, зміщення частинок (кристалів, зерен, уламків та ін.), витиснення рідини та газів із пор, поступове накопичення мікрodefektів у структурі ґрунту. Незворотні або пластичні деформації більшою мірою характерні для дисперсних пластичних ґрунтів із слабкими коагуляційними структурними зв'язками.

У цей час у світовій практиці накопичено певний досвід поліпшення властивостей ґрунтів для їх подальшого використання шляхом введення неорганічних або органічних закріплюючих компонентів. Виходячи з економічних та екологічних міркувань найбільше застосування в будівельній практиці матимуть композиційні матеріали на основі ґрунтів, в яких дефіцитні й енергозатратні в'язучі та добавки до них використовуються в мінімальних обсягах, а основну частину становлять ті чи інші відходи й побічні продукти промислових підприємств [9]. Одним з таких відходів є активний мул станцій біологічного очищення, проблема утилізації якого є досить актуальною для великих міст.

Набули широкого використання ґрунтові композиційні матеріали з різноманітними домішками, які дозволяють збільшити модуль дефо-

рмації й підвищити несучу здатність ґрунту [7, 12]. Однією з таких домішок є шлак – каменеподібна або склоподібна речовина, яка є сплавом оксидів змінного складу з головним компонентом – оксидом  $\text{SiO}_2$ . Шлак – це вторинна речовина для отримання різноманітних будівельних матеріалів, наприклад, шлакопортландцементу, безклінкерних в'язучих, шлаколуужних бетонів, мінеральної вати, шлакоситалів, заповнювачів цементних і асфальтових бетонів [1, 4], щебеню для дорожнього будівництва [2].

Загальноприйнято, що шлаки тверднуть тільки за наявності активізатора – лужного компонента. Однак, у літературі описано випадки застосування шлаків і без активізації [11, 13, 14]. Так, згідно з [6] композиція для улаштування основ дорожнього одягу містить суглинний ґрунт, шлак, воду з таким співвідношенням компонентів, мас. %: шлак 10–90, ґрунт 90–10, вода (понад). При цьому досягається певна міцність отриманого матеріалу, яка дорівнює 3,44 МПа у віці 28 діб. Це достатня міцність для улаштування основ автомобільних та залізничних доріг відповідних категорій. При додаванні у такі композиції для укріплення зв'язних ґрунтів вапна, наприклад [5], досягається міцність 4,2 МПа на 90 добу твердіння. На наш погляд, сповільнене набирання міцності має свої переваги при повторному застосуванні викинутого із котловану або траншеї ґрунту замість кондиційного, який привозиться. При цьому може бути здійснено попереднє змішування ґрунту зі шлаком, а потім зворотна засипка у котлован або траншею, де відбудеться твердіння композиції без руйнування конденсаційно-кристалізаційних зв'язків, які встигли б виникнути за наявності лужного активатора.

### Мета

Встановлення залежності між показниками деформаційних властивостей глинистих ґрунтів, отриманих при статичному навантаженні, та додаванням у композиційний ґрунтовий матеріал вторинної сировини промислових підприємств.

### Методика

При вивченні напружено-деформованого стану ґрунту в складних умовах (в яких і знаходиться ґрунт основ реальних будівель і споруд) як деформаційну характеристику застосовують

## ТРАНСПОРТЕ БУДІВНИЦТВО

модуль загальної деформації  $E_0$ . Ґрунт не є пружним середовищем, і залишкові деформації значно перевищують пружні. Параметр  $E_0$  враховує пружні деформації і залишкові за умови, що ґрунт сприймає лише одноразову навантаженість стискаючим навантаженням. Ці характеристики визначають за результатами випробувань зразків ґрунту в компресійних приладах (одометрах), які виключають можливість бічного розширення зразка ґрунту при його навантаженні вертикальним навантаженням.

У лабораторних умовах було досліджено залежність зміни коефіцієнта пористості глинистого ґрунту від вмісту в ньому активного мулу, який змінювався від 15 до 50 %.

Із суміші глини, води й активного мулу були виготовлені зразки, які після витримання в нормальних умовах протягом 7 діб були розміщені в одометрі. Індикатором годинникового типу для кожного ступеня навантаження вимірювали деформації зразків та обчислювали абсолютну вертикальну стабілізовану деформацію зразка ґрунту  $\Delta h$ , мм, як середнєарифметичне показань вимірювального приладу після віднімання поправки на деформацію компресійного приладу. Відносну вертикальну деформацію зразка ґрунту розраховували за формулою згідно з [3]

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta h}{h}, \quad (1)$$

де  $h$  – початкова висота зразка, мм.

Обчислювали коефіцієнти пористості  $e_i$  ґрунту при різних тисках за формулою згідно з [3]

$$e_i = e_0 - \varepsilon_i \cdot (1 + e_0), \quad (2)$$

де  $e_0$  – початковий коефіцієнт пористості.

Зразки для подальших досліджень готували шляхом перемішування глинистого ґрунту з активним мулом у пропорційному відношенні за масою 1:1. Оптимальність такого співвідношення було встановлено попередніми дослідженнями [8, 10]. У підготовлену таким чином суміш додавали різну кількість шлаку і випробовували в одометрах з подальшим визначенням коефіцієнта пористості. У лабораторних умовах було досліджено залежність зміни коефіцієнта пористості глинистого ґрунту від вмісту в ньому шлаку, який змінювався від 15 до 50 %. Досліджен-

ня виконувалися за стандартною методикою [3] при тиску від 0,05 МПа до 0,3 МПа.

Коефіцієнт стисливості  $m_o$ , МПа<sup>-1</sup> в заданому інтервалі тисків  $p_i$  і  $p_{i+1}$  обчислювали з точністю 0,001 МПа<sup>-1</sup> за формулою

$$m_o = \frac{e_i - e_{i+1}}{p_{i+1} - p_i}, \quad (3)$$

де  $e_i$  і  $e_{i+1}$  – коефіцієнти пористості, які відповідають тискам  $p_i$  і  $p_{i+1}$ .

Модуль деформації  $E$ , МПа в інтервалі тисків  $p_i$  і  $p_{i+1}$  обчислювали з точністю 0,1 МПа за формулою

$$E = \frac{1 + e_o}{m_o} \beta, \quad (4)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт, який враховує відсутність поперечного розширення ґрунту в компресійному приладі (дорівнює 0,37).

### Результати

За результатами вимірювань та обчислень за формулами (1)–(2) побудовано графіки залежності коефіцієнта пористості від тиску для зразків, які містять різну кількість активного мулу (рис. 1) та шлаку (рис. 2). Як свідчать наведені дані, додавання активного мулу у кількості 50 % зменшує коефіцієнт стисливості зразків (3) у 4 рази порівняно з глиною. Порівняно із зразками, які містять 50 % активного мулу, зразки із додаванням 50 % шлаку зменшують стисливість у 12 разів. Додавання в глину активного мулу дозволяє збільшити модуль деформації з 7,8 до 20,3 МПа, шлак підвищує цю величину до 52,7 МПа.

#### Модуль деформації зразків композиційного матеріалу, розрахований за формулою (4), становить; МПа:

Глина 100% .....	7,8
Глина 50 % + активний мул 50 % .....	20,3
Глина 65 % + активний мул 35 % .....	15,5
Глина 85 % + активний мул 15 % .....	10,7
Глина 50 % + активний мул 50 % + шлак 50 % .....	21,0
Глина 50 % + активний мул 50 % + шлак 15 % .....	31,3
Глина 50 % + активний мул 50 % + шлак 35 % .....	43,2
Глина 50 % + активний мул 50 % + шлак 50 % .....	52,7

## ТРАНСПОРТЕ БУДІВНИЦТВО

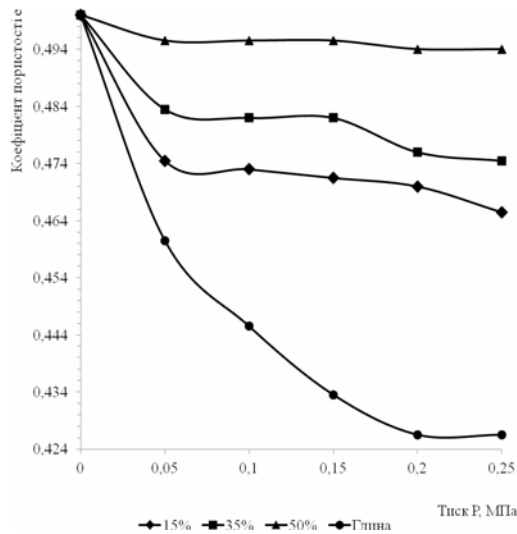


Рис. 1. Зміна коефіцієнтів пористості глинистих зразків з різною кількістю активного мулу

Fig. 1. Change of the porosity coefficients of clay samples with different amount of activated sludge

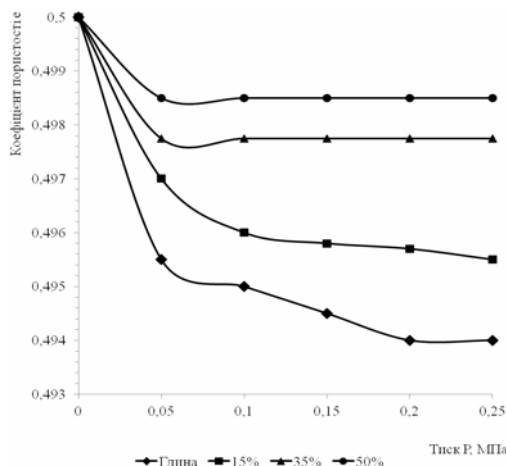


Рис. 2. Зміна коефіцієнтів пористості глинистих зразків з різною кількістю шлаку

Fig. 2. Change of the porosity coefficients of clay samples with different amount of activated slag

### Наукова новизна та практична значимість

Активний мул є продуктом біологічної очистки промислових стічних вод у вигляді колоїдно-дисперсної системи, яка складається з комплексу мікроорганізмів з адсорбованими на них органічними і неорганічними речовинами. До хімічного складу активного мулу входить від 30 до 50% білку, що дозволяє застосовувати його як зв'язуюче ґрунтових матеріалів з метою

підвищення їх стійкості та міцності. Білки містять такі функціональні групи:  $-\text{COOH}$ ,  $-\text{NH}_2$ ,  $-\text{OH}$  та ін., тобто є типовими поверхнево-активними речовинами. При виготовленні композиційного матеріалу на основі глинистих ґрунтів зазначені функціональні групи взаємодіють з гідроксильними групами, розташованими на поверхні глинистих частинок, з утворенням просторової структури. Крім того, введення активного мулу сприяє пептизації – руйнуванню агрегатів ґрунту і утворенню контактів між окремими частинками, що й призводить до зменшення стисливості зразків за рахунок зменшення загальної пористості. Додавання шлаку сприяє утворенню оптимальної структури зразків з розміщенням менших за розмірами частинок у прошарках між більшими частинками (рис. 3).

Отримані в лабораторії результати дають підґрунтя припустити добру здатність ґрунтового композиційного матеріалу з додаванням шлаку зменшувати свою стисливість. Це зумовлено збільшенням кількості коагуляційних контактів в одиниці об'єму ґрунту і збільшенням його щільності за рахунок більшого зближення високодисперсних частинок. Застосування активного мулу та шлаку забезпечує підвищену несучу здатність ґрунту, розширення сировинної бази для його отримання з одночасним покращенням екологічної ситуації в містах, забезпечення можливості вторинного використання укріпленого ґрунту.

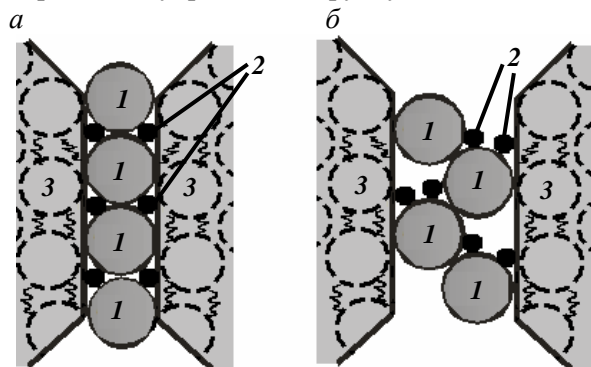


Рис. 3. Схема розміщення частинок шлаку (1) та активного мулу (2) у прошарках між агрегатами ґрунту (3) у випадку оптимальної (а) та неоптимальної (б) структури

Fig. 3. Allocation scheme of slag particles (1) and activated sludge (2) in between the layers of soil aggregates (3) in case of optimal (a) and non-optimal (b) structure

## ТРАНСПОРТЕ БУДІВНИЦТВО

**Висновки**

У результаті проведених досліджень встановлено, що деформаційні властивості глинистих ґрунтів, отриманих при статичному навантаженні, покращуються при додаванні шлаку та активного мулу, що проявляється у зменшенні стисливості та збільшенні модуля деформації ґрунту. Це дозволяє отримати технічний ре-

зультат, виражений у збільшенні міцності композиційного матеріалу на стиск без використання кондиційних високовитратних в'язучих (цементу, вапна), зниженні витрат кондиційного ґрунту та відповідно знижені вартості закріплення, розширенні сировинної бази для отримання матеріалу, можливості вторинного використання укріпленого ґрунту без його вивезення та утилізації.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Большаков, В. И. Контактная прочность механоактивированных мелкозернистых бетонов из доменных гранулированных шлаков / В. И. Большаков, М. А. Елисеева, С. А. Щербак // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 5 (53). – С. 138–149. doi: 10.15802/stp2014/29975.
2. Дворкин, Л. И. Строительные материалы из отходов промышленности : учеб.-справ. пособие / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2007. – 368 с.
3. ДСТУ Б В.2.1-4-96. Ґрунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності і деформованості. – Введ. 1996–11–01. – Київ : Укрархбудінформ, 1996. – 101 с.
4. 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.
5. Пат. 58654 Україна, МПК Е 01 С 3/00, Е 02 D 3/00, Е 01 С 21/00, Е 01 С 23/00. Композиція для укріплення зв'язних ґрунтів / Кожушко В. П., Грано Н. М.; заявник та патентовласник Сум. нац. аграр. ун-т. – № u201009294; опубл. 26.04.2011, Бюл. № 8. – 4 с.
6. Пат. 102551 Україна, МПК Е 01 С 21/00, Е 01 С 7/00. Композиція для улаштування основ дорожніх одягів на основі укріплених суглинних ґрунтів / Черноголь Віталій Богданович; заявник та патентовласник Черноголь В. Б. – № u201502893; опубл. 10.11.2015, Бюл. № 21. – 2 с.
7. Платонов, А. П. Композиционные материалы на основе ґрунтов / А. П. Платонов, М. Н. Першин. – Москва : Химия, 1987. – 144 с.
8. Трикоз, Л. В. Застосування активного мулу станцій біологічного очищення для стабілізації ґрунтів / Л. В. Трикоз, В. Ю. Савчук // Зб. наук. пр. Укр. держ. акад. залізн. трансп. – Харків, 2014. – Вип. 148, ч. 2. – С. 58–62.
9. Яковишина, Т. Ф. Екологічна оцінка включення важких металів до продуктів техногенезу / Т. Ф. Яковишина // Вестн. Харьк. нац. автомоб.-дор. ун-та : сб. науч. тр. – Харьков, 2015. – Вып. 70. – С. 50–54.
10. Investigation into Electrical Conductivity of the Multicomponent System of Trackbed / L. V. Trykoz, I. V. Bagiyanc, V. Yu. Savchuk [et al.] // Intern. J. of Engineering Research in Africa. – 2016. – Vol. 25. – P. 52–57. doi: 10.4028/www.scientific.net/JERA.25.52.
11. Kaneko, T. Effect of sand content on stabilization of dredged soil-steel slag mixture / T. Kaneko, Y. Watabe // Japanese Geotechnical Society Special Publication. – 2016. – Vol. 2. – Iss. 6. – P. 302–305. doi: 10.3208/jgssp.jp-120.
12. Kavak, A. Reuse of Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) in Lime Stabilized Embankment Materials / A. Kavak, G. Bilgen // Intern. J. of Engineering and Technology. – 2016. – Vol. 8. – Iss. 1. – P. 11–14. doi: 10.7763/ijet.2016.v6.850.
13. Oh, M. Evaluation on the compressive strength of dredged soil-steel slag / M. Oh, G. L. Yoon, Y. W. Yoon // Japanese Geotechnical Society Special Publication. – 2016. – Vol. 2. – Iss. 6. – P. 298–301. doi: 10.3208/jgssp.kor-12.
14. Perná, I. The setting time of a clay-slag geopolymer matrix: the influence of blast-furnace-slag addition and the mixing method / I. Perná, T. Hanzlíček // J. of Cleaner Production. – 2016. – Vol. 112. – P. 1150–1155. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.05.069.
15. Vekli, M. Effects of iron and chrome slag on the index compaction and strength parameters of clayey soils / M. Vekli, C. C. Çadır, F. Şahinkaya // Environmental Earth Sciences. – 2016. – Vol. 75. – Iss. 5. doi: 10.1007/s12665-016-5312-3.

Л. В. ТРИКОЗ<sup>1\*</sup>, В. Ю. САВЧУК<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Строительные материалы, конструкции и сооружения», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 10 68, эл. почта lvtrikoz@ukr.net, ORCID 0000-0002-8531-7546

<sup>2</sup>Каф. «Строительные материалы, конструкции и сооружения», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 10 68, эл. почта kalmukova2@mail.ru, ORCID 0000-0001-5971-5041

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТХОДОВ

**Цель.** Для повышения экологической чистоты все чаще кондиционные строительные материалы заменяют отходами производств. Это касается как металлургических шлаков, так и активного ила станций биологической очистки городских сточных вод. Для выяснения возможности их использования необходимо исследовать деформационные свойства композиционных грунтовых материалов с добавлением указанных отходов. **Методика.** При изучении напряженно-деформированного состояния грунта в сложных условиях, в которых и находится грунт оснований реальных зданий и сооружений, в качестве деформационной характеристики используют модуль общей деформации  $E_0$ . Эту характеристику определяли по результатам испытаний образцов грунта в компрессионных приборах (одометрах), которые исключают возможность бокового расширения образца грунта при его нагружении вертикальной нагрузкой. **Результаты.** В результате измерений были построены компрессионные кривые зависимости коэффициента пористости от давления. По этим данным определен коэффициент сжимаемости и модуль деформации. Установлено, что добавление активного ила уменьшает коэффициент сжимаемости образцов в 4 раза по сравнению с глиной. По сравнению с образцами, которые содержат 50 % активного ила, образцы с добавлением 50 % шлака уменьшают сжимаемость в 12 раз. Добавление в глину активного ила позволяет увеличить модуль деформации с 7,8 до 20,3 МПа, шлак повышает эту величину до 52,7 МПа. **Научная новизна.** При изготовлении композиционного материала на основе глинистых грунтов функциональные группы активного ила взаимодействуют с гидроксильными группами, расположенными на поверхности глинистых частиц, с образованием пространственной структуры. Кроме того, введение активного ила способствует пептизации и разрушению грунтовых агрегатов, образованию контактов между отдельными частицами, что приводит к уменьшению сжимаемости образцов за счет уменьшения общей пористости. Добавление шлака способствует образованию оптимальной структуры образцов с размещением меньших по размерам частиц в слоях между большими частицами. **Практическая значимость.** Применение активного ила и шлака обеспечивает повышенную несущую способность грунта, расширение сырьевой базы для его получения с одновременным улучшением экологической ситуации в городах, обеспечивает возможности вторичного использования укрепленного грунта.

**Ключевые слова:** укрепленный грунт; шлак; активный ил; модуль деформации; коэффициент пористости; коэффициент сжимаемости

L. V. TRYKOZ<sup>1\*</sup>, V. U. SAVCHUK<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Building Materials, Constructions and Structures», Ukrainian State University of Railway Transport, Feierbakh Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 68, e-mail lvtrikoz@ukr.net, ORCID 0000-0002-8531-7546

<sup>2</sup>Dep. «Building Materials, Constructions and Structures», Ukrainian State University of Railway Transport, Feierbakh Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 68, e-mail kalmukova2@mail.ru, ORCID 0000-0001-5971-5041

## THE STUDY OF DEFORMATION CHARACTERISTICS OF SOIL MATERIALS WITH THE USAGE OF WASTES

**Purpose.** More often the qualified building materials are replaced by the industrial wastes for environmental improvement. This refers to both metallurgical slags and biological solids of water treatment plants. In order to understand the possibilities of their usage it needs studying deformation properties of composite soil materials with industrial wastes addition. **Methodology.** The soil of real buildings and structures foundation is in the complicated conditions and the stress-strained state. While studying this state the total deformation modulus  $E_0$  is used as the deformation characteristic. This one is determined according to the results of sample soil testing in the compression



## ТРАНСПОРТЕ БУДІВНИЦТВО

instrument (odometer). This instrument prevents the possibility of lateral expansion of sample soil under the vertical load. **Findings.** As a result of the testing the compression curves are plotted as the dependence of the porosity coefficient on pressure. These data allow determining the compressibility coefficient and the strain modulus. It is found that a biological solids addition increases the compressibility coefficient four times compared to the clay. The two types of samples are compared. The first type contains 50% of biological solids. The second type contains 50% of biological solids and 50% of slag. The comparison shows that the second type is compressed twelve times less. An addition into the clay of biological solids increases the strain modulus from 7.8 to 20.3 MPa. The slag increases the strain modulus to 52.7 MPa. **Originality.** While making the composition based clay materials the functional groups of biological solids interact with hydroxyl groups which are placed on the surface of clay particles and form a spatial structure. Besides an addition of biological solids contributes to peptization, soil aggregates destroy themselves, and form contacts between separate particles. It causes the decrease of soil compressibility due to the total porosity decrease. An addition of slag results in formation of optimal structure where particles of less sizes are placed in layers between bigger particles. **Practical value.** An application of biological solids and slag provides the increased load-carrying capacity of soil, extending of raw material sources while improving the environmental situation in the cities. Also it provides the recycling of reinforced soil.

**Keywords:** reinforced soil; slag; biological solids; strain modulus; porosity coefficient; compressibility coefficient

## REFERENCES

1. Bolshakov, V. I., Yeliseieva, M. O., & Shcherbak, S. A. (2014). Contact strength of mechanoactivated fine concretes from granulated blast-furnace slags. *Science and Transport Progress*, 5(53), 138-149. doi: 10.15802/stp2014/29975
2. Dvorkin, L. I., & Dvorkin, O. L. (2007). *Stroitelnye materialy iz otkhodov promyshlennosti*. Rostov-on-Don: Feniks.
3. Hrunty. Metody laboratornoho vyznachennia kharakterystyk mitsnosti i deformovanosti, DSTU B V.2.1-4-96 (1996).
4. Ivanova, H. P., & Trufanova, O. I. (2014). Analysis and application prospects of effective resources-saving technologies in concrete manufacture. *Science and Transport Progress*, 5(53), 150-156. doi: 10.15802/stp2014/30453
5. Kozhushko, V. P., & Hrano, N. M. (2011). *UA Patent No. 58654*. Ukrainian Intellectual Property Institute.
6. Chernogil, V. B. (2015). *UA Patent No. 102551*. Ukrainian Intellectual Property Institute (UKRPATENT). Retrieved from <http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=217496>
7. Platonov, A. P., & Pershin, M. N. (1987). *Kompozitsionnyye materialy na osnove gruntov*. Moscow: Khimiya.
8. Trykoz, L. V., & Savchuk, V. U. (2014). Using of activated sludge of biological treatment plant for soil stabilization. *Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 148(2), 58-62.
9. Yakovishina, T. (2015). Environmental assessment of including heavy metals into the products of technogenesis. *Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University*, 70, 50-54.
10. Trykoz, L. V., Bagiyanc, I. V., Savchuk, V. Y., Pustovoitova, O. M., Kamchatnaya, S. M., & Saiapin, O. S. (2016). Investigation into Electrical Conductivity of the Multicomponent System of Trackbed. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 25, 52-57. doi: 10.4028/www.scientific.net/JERA.25.52
11. Kaneko, T., & Watabe, Y. (2016). Effect of sand content on stabilization of dredged soil-steel slag mixture. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2(6), 302-305. doi: 10.3208/jgssp.jp-120
12. Kavak, A., & Bilgen, G. (2016). Reuse of Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) in Lime Stabilized Embankment Materials. *International Journal of Engineering and Technology*, 8(1), 11-14. doi: 10.7763/ijet.2016.v6.850
13. Oh, M., Yoon, G. L., & Yoon, Y. W. (2016). Evaluation on the compressive strength of dredged soil-steel slag. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2(6), 298-301. doi: 10.3208/jgssp.kor-12
14. Perná, I., & Hanzlíček, T. (2016). The setting time of a clay-slag geopolymers matrix: the influence of blast-furnace-slag addition and the mixing method. *Journal of Cleaner Production*, 112, 1150-1155. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.05.069
15. Vekli, M., Çadır, C. C., Şahinkaya F. (2016). Effects of iron and chrome slag on the index compaction and strength parameters of clayey soils. *Environmental Earth Sciences*, 75(5). doi: 10.1007/s12665-016-5312-3

Стаття рекомендована до друку д.т.н., проф. В. Д. Петренком (Україна); д.т.н., проф. А. А. Пługнім (Україна)

Прийнята до друку: 08.12.2016

Надійшла до редколегії: 09.03.2017

## ЗМІСТ

### **ВИДАТНІ ПОДІЇ**

ТРАНСПОРТНІЙ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ – 25 РОКІВ ..... 7

### **ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ**

**М. М. БІЛЯЄВ, А. О. КАРПО, З. М. ЯКУБОВСЬКА**  
ЗНИЖЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ВИНЕСЕННЯ  
ВУГІЛЬНОГО ПИЛУ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ  
СПЕЦІАЛЬНОГО РОЗЧИНУ ..... 8

**С. З. ПОЛІЩУК, В. Ю. КАСПІЙЦЕВА**  
ПІДСИСТЕМА МОДЕЛЕЙ ЕКОЛОГІЧНОГО  
МОНІТОРИНГУ ДЛЯ ОЦІНКИ СТАНУ  
АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ..... 16

### **ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ**

**Б. ФАРКАС**  
ПРЕДСТАВЛЕННЯ НАЙБІЛЬШ ПОТУЖНОЇ  
ЗАЛІЗНИЦІ ЄС ТА ПІДТРИМКА ЇЇ РОБОТИ ЗА  
ДОПОМОГОЮ ЕКОНОМІЧНОГО АНАЛІЗУ ..... 25

### **ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ**

**І. В. ЖУКОВИЦЬКИЙ, І. А. КЛЮШНИК**  
ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ  
ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ВАЛА  
ГІДРАВЛІЧНОЇ ПЕРЕДАЧІ ТЕПЛОВОЗА  
З ВИКОРИСТАННЯМ МІКРОКОНТРОЛЕРА ..... 36

**Г. І. КИРИЧЕНКО**  
МЕТОДИКА СТВОРЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ  
ДОСТАВКОЮ ВАНТАЖІВ НА ЗАЛІЗНИЦІ ..... 46

**Д. М. КОЗАЧЕНКО, Р. В. ВЕРНИГОРА,  
Р. Ш. РУСТАМОВ**  
СТВОРЕННЯ ЕКСПОРТНО-ОРІЄНТОВАНОЇ  
МЕРЕЖІ ЕЛЕВАТОРІВ В УКРАЇНІ ..... 56

**Р. Г. КОРОБІЙОВА**  
ПРОБЛЕМИ ОРГАНІЗАЦІЇ ПАСАЖИРСЬКИХ  
ПЕРЕВЕЗЕНЬ НА ЗАЛІЗНИЦЯХ США ..... 71

### **ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ**

**О. Ю. БАЛІЙЧУК, Л. В. ДУБИНЕЦЬ,  
О. Л. МАРЕНИЧ, Д. В. УСТИМЕНКО**  
ВПЛИВ НАТИСНЕННЯ КОНТАКТІВ КОНТАКТОРІВ  
У СИЛОВИХ КОЛАХ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО  
СКЛАДУ НА ЇХ ПЛАСТИЧНУ ДЕФОРМАЦІЮ  
ТА ПЛАВЛЕННЯ ..... 81

### **ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ**

**В. Д. БОРИСЕНКО, С. А. УСТЕНКО**  
МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНОЇ КРИВОЇ  
НА ОБМЕЖЕНІЙ ДІЛЯНЦІ МІСЦЕВОСТІ ..... 92

**В. Г. ШЕРСТЮК, М. В. ЖАРІКОВА**  
СИСТЕМА ПІДТРИМКИ АКАДЕМІЧНОЇ  
ЧЕСНОСТІ ДЛЯ УКРАЇНСЬКИХ УНІВЕРСИТЕТІВ ... 101

**В. Г. ШЕРСТЮК, І. В. СОКОЛ, К. М. ТАРАСЕНКО**  
СЦЕНАРНО-ПРЕЦЕДЕНТНИЙ ПІДХІД ДО  
УПРАВЛІННЯ ГЕТЕРОГЕННИМ АНСАМБЛЕМ  
ДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ..... 110

### **МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО**

**О. Г. БЄЛІК, Б. В. ЄФРЕМЕНКО,  
С. Л. МАКУРОВ**  
ОСОБЛИВОСТІ МІКРОСТРУКТУРИ ХРОМО-  
НІКЕЛЕВОГО ПОКРИТТЯ, НАПЛАВЛЕНОГО  
ПОРОШКОВОЮ СТРІЧКОЮ  
ПІЛ АН-111 ІЗ 50 % ПЕРЕКРИТТЯМ ..... 120

### **НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ**

**В. І. ДИРДА, Ю. М. ОВЧАРЕНКО, С. В. РАКША,  
О. А. ЧЕРНІЙ**  
ДИНАМІКА ВІБРОЖИВИЛЬНИКІВ  
ІЗ НЕЛІНІЙНОЮ ПРУЖНОЮ  
ХАРАКТЕРИСТИКОЮ ..... 131

**В. О. ПРОЦЕНКО, О. Ю. КЛЕМЕНТЬЄВА**  
ПІДВИЩЕННЯ РЕМОНТОПРИДАТНОСТІ  
МУФТ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ЗАСОБІВ  
ТРАНСПОРТУ ЗАСТОСУВАННЯМ КАНАТНИХ  
ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ..... 140

**С. С. ТИЩЕНКО, А. В. КРАСНЮК,  
Т. В. УЛЬЧЕНКО, А. С. ЩЕРБАК**  
ПРОЕКТУВАННЯ РОЗГОРТНИХ ПОВЕРХОНЬ  
ДЕТАЛЕЙ СКЛАДНОЇ ФОРМИ ..... 148

### **РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ**

**О. В. ФОМІН, А. А. СТЕЦЬКО, В. Є. ОСЬМАК**  
РОЗПОДІЛЕНЕ ЗОВНІШНЄ ПОВЕРХНЕВЕ  
ЗМІЦНЕННЯ ВАГОННИХ КОНСТРУКЦІЙ  
МЕТОДОМ НАВИВАННЯ ..... 156

### **ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО**

**Л. В. ТРИКОЗ, В. Ю. САВЧУК**  
ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙНИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ҐРУНТОВОГО МАТЕРІАЛУ  
З ВИКОРИСТАННЯМ ВІДХОДІВ ..... 166

## СОДЕРЖАНИЕ

### **ЗНАМЕНАТЕЛЬНЫЕ СОБЫТИЯ**

ТРАНСПОРТНОЙ АКАДЕМИИ УКРАИНЫ – 25 ЛЕТ .... 7

### **ЭКОЛОГИЯ НА ТРАНСПОРТЕ**

**Н. Н. БЕЛЯЕВ, А. А. КАРПО, З. Н. ЯКУБОВСКАЯ**  
СНИЖЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ УНОСА  
УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
СПЕЦИАЛЬНОГО РАСТВОРА ..... 8

**С. З. ПОЛИЩУК, В. Ю. КАСПИЙЦЕВА**  
ПОДСИСТЕМА МОДЕЛЕЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО  
МОНИТОРИНГА ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ  
АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ..... 16

### **ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

**Б. ФАРКАС**  
ПРЕДСТАВЛЕНИЕ САМОЙ МОЩНОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ  
ДОРОГИ ЕС И ПОДДЕРЖКА ЕЕ РАБОТЫ С  
ПОМОЩЬЮ ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ..... 25

### **ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА**

**И. В. ЖУКОВИЦКИЙ, И. А. КЛЮШНИК**  
ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕРЕНИЯ  
ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ  
ПЕРЕДАЧИ ТЕПЛОВОЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ..... 36

**А. И. КИРИЧЕНКО**  
МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ  
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ ДОСТАВКОЙ ГРУЗОВ  
НА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ ..... 46

**Д. Н. КОЗАЧЕНКО, Р. В. ВЕРНИГОРА,  
Р. Ш. РУСТАМОВ**  
СОЗДАНИЕ ЭКСПОРТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ  
СЕТИ ЭЛЕВАТОРОВ В УКРАИНЕ ..... 56

**Р. Г. КОРОБЬЕВА**  
ПРОБЛЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПАССАЖИРСКИХ  
ПЕРЕВОЗОК НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ США ..... 71

### **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ**

**А. Ю. БАЛИЙЧУК, Л. В. ДУБИНЕЦ,  
О. Л. МАРЕНИЧ, Д. В. УСТИМЕНКО**  
ВЛИЯНИЕ НАЖАТИЯ КОНТАКТОВ  
КОНТАКТОРОВ В СИЛОВЫХ ЦЕПЯХ  
ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА  
НА ИХ ПЛАСТИЧЕСКУЮ ДЕФОРМАЦИЮ  
И ПЛАВЛЕНИЕ ..... 81

### **ИНФОРМАЦИОННО- КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

**В. Д. БОРИСЕНКО, С. А. УСТЕНКО**  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОЙ КРИВОЙ  
НА ОГРАНИЧЕННОМ УЧАСТКЕ МЕСТНОСТИ ..... 92

**В. Г. ШЕРСТЮК, М. В. ЖАРИКОВА**  
СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ АКАДЕМИЧЕСКОЙ  
ЧЕСТНОСТИ ДЛЯ УКРАИНСКИХ  
УНИВЕРСИТЕТОВ ..... 101

**В. Г. ШЕРСТЮК, И. В. СОКОЛ,  
Е. Н. ТАРАСЕНКО**  
СЦЕНАРНО-ПРЕЦЕДЕНТНЫЙ ПОДХОД К  
УПРАВЛЕНИЮ ГЕТЕРОГЕННЫМ АНСАМБЛЕМ  
ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ..... 110

### **МАТЕРИАЛОЗНАВСТВО**

**А. Г. БЕЛИК, Б. В. ЕФРЕМЕНКО, С. Л. МАКУРОВ**  
ОСОБЕННОСТИ МИКРОСТРУКТУРЫ ХРОМО-  
НИКЕЛЕВОГО ПОКРЫТИЯ, НАПЛАВЛЕННОГО  
ПОРОШКОВОЙ ЛЕНТОЙ ПЛ АН-111  
С 50 % ПЕРЕКРЫТИЕМ ..... 120

### **НЕТРАДИЦИОННЫЕ ВИДЫ ТРАНСПОРТА. МАШИНЫ И МЕХАНИЗМЫ**

**В. И. ДЫРДА, Ю. Н. ОВЧАРЕНКО, С. В. РАКША,  
А. А. ЧЕРНИЙ**  
ДИНАМИКА ВИБРОПИТАТЕЛЕЙ С  
НЕЛИНЕЙНОЙ УПРУГОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ ..... 131

**В. А. ПРОЦЕНКО, О. Ю. КЛЕМЕНТЬЕВА**  
ПОВЫШЕНИЕ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ МУФТ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК СРЕДСТВ  
ТРАНСПОРТА ПРИМЕНЕНИЕМ КАНАТНЫХ  
УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ ..... 140

**С. С. ТИЩЕНКО, А. В. КРАСНЮК,  
Т. В. УЛЬЧЕНКО, А. С. ЩЕРБАК**  
ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАЗВЕРНУТЫХ  
ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ ..... 148

### **ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ И ТЯГА ПОЕЗДОВ**

**О. В. ФОМИН, А. А. СТЕЦКО, В. Е. ОСЬМАК**  
РАСПРЕДЕЛЕННОЕ ВНЕШНЕЕ  
ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ВАГОННЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ НАВИВКИ ..... 156

### **ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО**

**Л. В. ТРИКОЗ, В. Ю. САВЧУК**  
ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТХОДОВ ..... 166

# CONTENTS

## **EVENTS**

TRANSPORT ACADEMY OF UKRAINE – 25 YEARS..... 7

## **TRANSPORT ECOLOGY**

**M. M. BILIAIEV, A. A. KARPO,  
Z. M. YAKUBOVSKA**  
REDUCING THE INTENSITY OF TAKEAWAY  
PULVERIZED COAL BY USING SPECIAL SOLUTION .. 8

**S. Z. POLISCHUK, V. YU. KASPIJCTEVA**  
SUBSYSTEM OF MODELS OF ECOLOGICAL  
MONITORING FOR ESTIMATION OF THE STATE  
OF ATMOSPHERIC AIR..... 16

## **ECONOMICS AND MANAGEMENT**

**B. FARKAS**  
THE INTRODUCTION OF THE MOST POWERFUL  
RAILWAY OF THE EU, AND ITS SUPPORT WITH  
ECONOMIC ANALYSES ..... 25

## **OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS**

**I. V. ZHUKOVITSKIY, I. A. KLYUSHNIK**  
CHOICE OF THE OPTIMAL PARAMETERS OF  
MEASURING THE SHAFT ROTATION FREQUENCY  
OF THE HYDRAULIC TRANSMISSION OF THE  
LOCOMOTIVE USING MICROCONTROLLER ..... 36

**H. I. KYRYCHENKO**  
CREATION PRINCIPLES OF INTELLIGENT  
AUTOMATED DELIVERY MANAGEMENT SYSTEMS  
AT THE RAILWAY ..... 46

**D. M. KOZACHENKO, R. V. VERNIGORA,  
R. S. RUSTAMOV**  
CREATION OF EXPORT-ORIENTED NETWORK OF  
GRAIN ELEVATORS IN UKRAINE ..... 56

**R. H. KOROBIOVA**  
ISSUES OF ORGANIZING THE PASSENGER  
TRANSPORTATION ON US RAILWAYS..... 71

## **ELECTRIC TRANSPORT**

**O. YU. BALICHUK, L. V. DUBYNETS,  
O. L. MARENYCH, D. V. USTYMENKO**  
INFLUENCE OF CONTACTOR CONTACT PRESSURE  
IN POWER CIRCUITS OF ELECTRIC STOCK ON  
THEIR PLASTIC DEFORMATION AND FUSING ..... 81

## **INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL MODELING**

**V. D. BORISENKO, S. A. USTENKO**  
MODELING THE TRANSITION CURVE ON  
A LIMITED TERRAIN ..... 92

**V. G. SHERSTJUK, M. V. ZHARIKOVA**  
ACADEMIC INTEGRITY SUPPORT SYSTEM FOR  
UKRAINIAN UNIVERSITIES..... 101

**V. G. SHERSTJUK, I. V. SOKOL,  
E. N. TARASENKO**  
SCENARIO-CASE APPROACH TO THE CONTROL  
OF HETEROGENEOUS ENSEMBLES OF DYNEMIC  
OBJECTS ..... 110

## **MATERIAL SCIENCE**

**A. G. BELIK, B. V. EFREMENKO,  
S. L. MAKUROV**  
MICROSTRUCTURE FEATURES OF CHROME-  
NIKEL COATING WELDED WITH FILLER WIRE  
PL AN-111 WITH A 50% OVERLAP..... 120

## **NON-TRADITIONAL TRANSPORT MODES. MACHINES AND MECHANISMS**

**V. I. DYRDA, YU. N. OVCHARENKO,  
S. V. RAKSHA, A. A. CHERNII**  
DYNAMICS OF VIBRATION FEEDERS WITH  
A NONLINEAR ELASTIC CHARACTERISTIC ..... 131

**V. O. PROTSENKO, O. YU. KLEMENTYEVA**  
COUPLING MAINTAINABILITY INCREASE OF  
TRANSPORT VEHICLES POWER PLANTS BY  
APPLICATION OF ROPE ELASTIC ELEMENTS..... 140

**S. S. TYSHCHENKO, A. V. KRASNIUK,  
T. V. ULCHENKO, A. S. SHCHERBAK**  
DESIGNING OF DEVELOPED SURFACES  
OF COMPLEX PARTS..... 148

## **ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION**

**O. V. FOMIN, A. A. STETSKO, V. YE. OSMAK**  
DISTRIBUTED ETERNAL SURFACE HARDENING  
OF CAR DESIGN BY WINDING ..... 156

## **TRANSPORT CONSTRUCTION**

**L. V. TRYKOZ, V. U SAVCHUK**  
THE STUDY OF DEFORMATION  
CHARACTERISTICS OF SOIL MATERIALS  
WITH THE USAGE OF WASTES..... 166

## ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

До публікації в журналі приймаються статті українською, російською або англійською мовами проблемного, узагальнюючого, методичного характеру, оригінальні наукові, практичні дослідження, які раніше ніде не видавалися.

Матеріали необхідно надавати в друкованому та електронному вигляді у програмі Microsoft Word. Для набору формул використовується MathType.

Наукова стаття повинна відповідати вимогам п. 3 Постанови ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 року.

Матеріали рецензуються членами редакційної колегії журналу та сторонніми незалежними експертами, виходячи з принципу об'єктивності та з позицій вищих міжнародних академічних стандартів якості, та редагуються. Редакція залишає за собою право на стилістичну правку рукопису.

### **Вимоги щодо обсягу наукових статей, повідомлень, відгуків та рецензій:**

- оглядові та проблемні статті – до 45 000 знаків з пробілами (7–10 с.);
- загальні статті за рубриками видання – до 30 000 знаків з пробілами (5–7 с.);
- наукове повідомлення – до 8 000 знаків з пробілами (до 2,5 с.);
- відгук або рецензія – до 6 000 знаків з пробілами (до 2 с.).

Матеріал надається у форматі A4, враховуючи таблиці, ілюстрації, список використаних джерел. Статті, більші за обсягом, можуть бути прийняті до розгляду на підставі рішення редколегії.

### **Для здачі статті до друку авторам необхідно надати наступні документи:**

- 1) файл зі статтею та друкований примірник рукопису з підписами всіх співавторів на останньому аркуші роботи;
- 2) оригінал Ліцензійного договору з підписами всіх співавторів;
- 3) рецензія на статтю з місця роботи авторів;
- 4) файл з відомостями про кожного з авторів – прізвище, ім'я, по-батькові повністю, посада, місце роботи, наукове звання, науковий ступінь, контактна інформація (телефон, адреса електронної пошти), код ORCID. Відомості про авторів подаються трьома мовами – українською, російською та англійською;
- 5) Оригінал експертного висновку.

**Увага! Згідно з міжнародними стандартами якості наукових публікацій необхідним є:** наявність авторських розширених (250–300 слів) і структурованих резюме (рефератів – abstracts), у т.ч. англійською мовою, рецензій, пристатейних списків літератури в романському алфавіті тощо.

### **Виклад основного матеріалу статті повинен мати такі елементи:**

- **вступ:** постановка проблеми, аналіз останніх досліджень;
- **мету;**
- **методику:** виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Докладно описують загальну методику дослідження, щоб його результати могли бути відтворені: описується послідовність виконання дослідження, обґрунтовується вибір використовуваних і викладається суть запропонованих методів і моделей, змістовно визначається, що саме досліджувалося кожним методом;
- **результати:** містять експериментальні чи теоретичні дані, отримані в роботі, для демонстрації того, що отримано нове рішення проблеми, і що робота є значним кроком вперед у порівнянні з попередніми дослідженнями. Дані подаються у формі таблиць, графіків, діаграм, рівнянь, фотографій, рисунків, статистичними оцінками. Результати повинні бути викладені коротко і чітко, при цьому містити досить інформації для оцінки зроблених висновків, також має бути очевидно, чому для аналізу обрані саме ці дані;
- **наукову новизну та практичну значимість.** Наукова новизна отриманих результатів викладається аргументовано, коротко і чітко. До наукової новизни не можна відносити прикладні результати (способи, пристрої, методики, схеми, алгоритми). Практичне значення отриманих результатів становлять відомості про використання результатів досліджень або рекомендації з їх використання;
- **висновки:** необхідно навести досягнуті кількісні та якісні показники дослідження, викласти рекомендації з їх використання.

### **З усіх питань звертайтеся до редакції журналу за адресою:**

Науково-технічна бібліотека (ауд. 166),

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,  
вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна,

49010

e-mail: visnik@diit.edu.ua

Сайт журналу: <http://stp.diit.edu.ua/>

## ОГОЛОШЕННЯ

**АСПІРАНТУРА**

Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна ЗАПРОШУЄ для навчання

на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальностями:

- ❖ 033 Філософія
- ❖ 051 Економіка
- ❖ 073 Менеджмент
- ❖ 101 Екологія
- ❖ 122 Комп'ютерні науки та інформаційні технології
- ❖ 144 Теплоенергетика
- ❖ 192 Будівництво та цивільна інженерія
- ❖ 273 Залізничний транспорт
- ❖ 275 Транспортні технології (за видами)

Підготовка аспірантів здійснюється за денною та заочною формою навчання за рахунок Держбюджету України та коштів фізичних, юридичних осіб. Термін навчання 4 роки.

Етапи вступної кампанії у 2017 році:

- прийом заяв та документів – з **21 серпня по 03 вересня 2017 року;**
- терміни проведення вступних іспитів – з **04 вересня по 10 вересня 2017 року;**
- початок навчання в аспірантурі – **2 жовтня 2017 року.**

Звертатися за адресою: 49010, Україна, м. Дніпро, вул. В. Лазаряна, 2,  
☎ +38(056) 373-15-63, e-mail: aspirantura\_diit@ndch.diit.edu.ua



Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician  
V. Lazaryan invites for postgraduate studies in the field of:

- ❖ 033 Philosophy
- ❖ 051 Economy
- ❖ 073 Management
- ❖ 101 Ecology
- ❖ 122 Computer Science and Information Technology
- ❖ 144 Power System
- ❖ 192 Construction and Civil Engineering
- ❖ 273 Railway Transport
- ❖ 275 Transport Technologies (by types)

Training of postgraduate students in the University is carried out in full-time and correspondence forms. The standard period of study is 4 years.

Stages of admission to postgraduate school in 2017:

- acceptance of applications and documents – **from 21/08/2017 to 03/09/2017;**
- timing of entry exams – **from 04/09/2017 to 10/09/2017;**
- beginning of postgraduate studies – **2/10/2017**

49010, Ukraine, Dnipro, V. Lazaryana St., 2, tel.: +38 (056) 373 15 63,  
e-mail: aspirantura\_diit@ndch.diit.edu.ua

Наукове видання

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

№ 2 (68) 2017

(українською, російською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – А. І. Миргородська  
Комп'ютерне верстання – А. О. Каїра, О. В. Помінова  
Літературна обробка – О. М. Врублевська

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ум. друк. арк. 20,69. Тираж 300 пр. Зам. № 016/17

**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

*Друк:*

Видавництво «Герда», 49000, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 60  
Свідцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 397 від 03.04.2001 р.



Научное издание

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

**(НАУКА И ПРОГРЕСС ТРАНСПОРТА. ВЕСТНИК ДНЕПРОПЕТРОВСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО  
УНИВЕРСИТЕТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ИМЕНИ АКАДЕМИКА В. ЛАЗАРЯНА)**

№ 2 (68) 2017

(на украинском, русском и английском языках)

Ответственный за выпуск – А. И. Миргородская  
Компьютерная верстка – А. О. Каира, О. В. Помінова  
Литературная обработка – О. М. Врублевская

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ус. печат. лист. 20,69. Тираж 300 экз. Зак. № 016/17

**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

*Печать:*

Издательство «Герда», 49000, г. Днепр, пр. Д. Яворницкого, 60  
Свидетельство субъекта издательского дела серия ДК № 397 от 03.04.2001 г.



Scientific Edition

**NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU. VİSNIK DNİPROPETROVS'KOGO NACİONAL'NOGO  
UNİVERSİTETU ZALİZNIČNOGO TRANSPORTU**

**(SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS. BULLETIN OF DNIPROPETROVSK NATIONAL  
UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT NAMED AFTER ACADEMICIAN V. LAZARYAN)**

No. 2 (68) 2017

(in Ukrainian, Russian and English languages)

Responsible for issue – А. І. Myrhorodska  
Desktop publishing – А. О. Kaira, О. V. Pominova  
Redaction – О. М. Vrublevska

Format 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Conventional printed sheet 20,69. Circulation 300. Order no 016/17

**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

*Printing*

Publishing house «Gerda», 49000, Dnipro, Yavornitsky av., 60



