



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



# НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ  
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

№ 5(53)

•• 2014 ••

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

№ 5 (53) 2014

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*  
*Матеріалознавство*  
*Моделювання задач транспорту та економіки*  
*Нетрадиційні види транспорту*  
*Промисловий транспорт*  
*Рухомий склад залізниць і тяга поїздів*  
*Транспортне будівництво*  
*Розвиток вищої школи*

Дніпропетровськ

2014

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

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

Пшінько 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):*

Аксьонов І. М., 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., Верхоглядова Н. І., Власова Т. І., Габринєць В. О., Гаврилук В. І., Гетьман Г. К., Главацький К. Ц., Головова Л. С., Гончаров К. В., Горобєць В. Л., Дорогань Т. Є., Доценко О. М., Жуковицький І. В., Заблудовський В. О., Каламбет С. В., Капіца М. І., Ковтун В. В., Копитко В. І., Костін М. О., Кравець В. В., Краснюк А. В., Кривчик Г. Г., Кузнецов В. Г., Курган М. Б., Муха А. М., Мухіна Н. А., Настєчик М. П., Нетєса М. І., Оковитий С. І., Очкасов О. Б., Петренко В. Д., Пічугов С. О., Пічурін В. В., Покотілов А. А., Полішко Т. В., Радкевич А. В., Радченко М. О., Ракша С. В., Скалозуб В. В., Сніжко Л. О., Урсуляк Л. В., Штапенко Е. П., Яришкіна Л. О.

*ІНОЗЕМНІ ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:*

Анісімов П. С. (Московський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація); Бялонь А. (Науково-технічний центр залізничного транспорту, Республіка Польща); Вайчунас Г. (Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса, Литва); Васяк І. (Інститут електроенергетики, Республіка Польща); Гусєв Б. В. (Московський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація); Долежел І. (Академія наук, Чеська Республіка); Зіммер К. (Електротехнічний інститут, Республіка Польща); Казакевич М. І. (Федеративна Республіка Німеччина); Куанишев Б. М. (Казахська академія транспорту і комунікацій, Республіка Казахстан); Лінгайтис В. Л. (Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса, Литва); Манашкін Л. А. (Технологічний університет Нью-Джерсі, США); Микульські Є. (Сілезький технологічний університет, Республіка Польща); Сладковські А. (Сілезький технологічний університет, Республіка Польща); Стржелецькі Р. (Гданський морський університет, Республіка Польща); Худзікевич А. (Варшавський політехнічний університет, Республіка Польща).

Журнал зареєстровано Державною реєстраційною службою Міністерства юстиції України. Свідоцтво про реєстрацію КВ № 19609-9409ПР від 29.12.2012 р. Видання внесено до Переліку наукових фахових видань України постановами президії ВАК України № 1-05/6 від 16.12.2009 р. (технічні науки) та № 1-05/2 від 10.03.2010 р. (економічні науки). Журнал зареєстровано в міжнародних каталогах періодичних видань Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat, наукометричних системах Google Scholar, Polish Scholarly Bibliography, eLibrary.ru, DOAJ, Index Copernicus, DRJI. Друкується за рішенням вченої ради університету від 03.11.2014 р., протокол № 4

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

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

Видання публікується з 1936 р.:

- 1936–1993 рр. – «Труди Дніпропетровського інституту інженерів залізничного транспорту»;
- 1993–2002 рр. – «Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту» (за серіями);
- 2003–2012 рр. – «Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»;
- з 2013 р. – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта  
имени академика В. Лазаряна

## **НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ**

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

## **(НАУКА И ПРОГРЕСС ТРАНСПОРТА**

**ВЕСТНИК ДНЕПРОПЕТРОВСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ИМЕНИ АКАДЕМИКА В. ЛАЗАРЯНА)**

**Научный журнал**

**№ 5 (53) 2014**

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*  
*Материаловедение*  
*Моделирование задач транспорта и экономики*  
*Нетрадиционные виды транспорта*  
*Промышленный транспорт*  
*Подвижной состав железных дорог и тяга поездов*  
*Транспортное строительство*  
*Развитие высшей школы*

Днепропетровск

2014

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):*

Аксенов И. М., Афанасов А. М., Банников Д. О., Бараш Ю. С., Беляев Н. Н., Бобыр Д. В., Бобровский В. И., Боднар Б. Е., Босов А. А., Вакуленко И. А., Верхоглядова Н. И., Власова Т. И., Габринец В. А., Гаврилюк В. И., Гетьман Г. К., Главацкий К. Ц., Головкова Л. С., Гончаров К. В., Горобец В. Л., Дорогань Т. Е., Доценко Е. Н., Жуковицкий И. В., Заблудовский В. А., Каламбет С. В., Капица М. И., Ковтун В. В., Копитко В. И., Костин Н. А., Кравец В. В., Краснюк А. В., Кривчик Г. Г., Кузнецов В. Г., Курган Н. Б., Муха А. М., Мухина Н. А., Настечик М. П., Нетеса Н. И., Оковитый С. И., Очкасов А. Б., Петренко В. Д., Пичугов С. А., Пичурин В. В., Покотилев А. А., Полишко Т. В., Радкевич А. В., Радченко Н. А., Ракша С. В., Скалозуб В. В., Снежко Л. А., Урсуляк Л. В., Штапенко Е. П., Яришкина Л. А.

*ИНОСТРАННЫЕ ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:*

Анисимов П. С. (Московский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация); Бялонь А. (Научно-технический центр железнодорожного транспорта, Республика Польша); Вайчунас Г. (Вильнюсский технический университет им. Гедиминаса, Литва); Васяк И. (Институт электроэнергетики, Республика Польша); Гусев Б. В. (Московский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация); Долежел И. (Академия наук, Чешская Республика); Зиммер К. (Электротехнический институт, Республика Польша); Казакевич М. И. (Федеративная Республика Германия); Куанышев Б. М. (Казахская академия транспорта и коммуникаций, Республика Казахстан); Лингайтис В. Л. (Вильнюсский технический университет им. Гедиминаса, Литва); Манашкин Л. А. (Технологический университет Нью-Джерси, США); Микульски Е. (Силезский технологический университет, Республика Польша); Сладковски А. (Силезский технологический университет, Республика Польша); Стржелецки Р. (Гданьский морской университет, Республика Польша); Худзикевич А. (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 постановлениями президиума ВАК Украины № 1-05/6 от 16.12.2009 г. (технические науки) и № 1-05/2 от 10.03.2010 г. (экономические науки).

Журнал зарегистрирован в международных каталогах периодических изданий Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat, наукометрических системах Google Scholar, Polish Scholarly Bibliography, eLibrary.ru, DOAJ, Index Copernicus, DRJI.

Печатается по решению ученого совета университета от 03.11.2014 г., протокол № 4

Издатель

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

Адрес  
учредителя

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

Издание публикуется с 1936 г.:

- 1936–1993 гг. – «Труды Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта»;
- 1993–2002 гг. – «Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту» (за серіями);
- 2003–2012 гг. – «Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»;
- 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 NACIONAL'NOGO UNÌVERSITETU  
ZALÌZNIČNOGO TRANSPORTU**

**(SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS**

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

**Scientific journal**

**No. 5 (53) 2014**

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*  
*Material Science*  
*Transport and Economic Tasks Modeling*  
*Non-Traditional Transport Modes*  
*Industrial Transport*  
*Rolling Stock and Train Traction*  
*Transport Construction*  
*High School Development*

Dnipropetrovsk

2014

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., Aksenov I. 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., Dorohan T. E., Dotsenko O. M., Gabrync V. A., Gavrilyuk V. I., Getman G. K., Glavatskiy K. Ts., Golovkova L. S., Goncharov K. V., Gorobets V. L., Kalambet S. V., Kapitsa M. I., Kopytko V. I., Kostin M. O., Kovtun V. V., Krasnyuk A. V., Kravets V. V., Kurgan M. B., Kuznetsov V. G., Mukha A. M., Mukhina N. A., Nastechik N. P., Netesa N. I., Ochkasov O. B., Okovytyy S. I., Petrenko V. D., Pichugov S. O., Pichurin V. V., Pokotilov A. A., Polishko T. V., Radchenko N. A., Radkevych A. V., Raksha S. V., Shtapenko E. P., Skalozub V. V., Snizhko L. O., Ursulyak L. V., Vakulenko I. O., Verkhoglyadova N. I., Vlasova T. I., Yarishkina L. O., Zabludovskiy V. O., Zhukovytsky I. V.

*FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:*

Anisimov P. (Moscow State University of Railway Engineering, Russian Federation); Byalon A. (Science and Technology Center of Railway Transport, Republic of Poland); Chudzikiewicz A. (Transport Warsaw University of Technology, Republic of Poland); Dolezel I. (Academy of Sciences, Czech Republic); Gusev B. (Moscow State University of Railway Engineering, Russian Federation); Kazakevich M. (Federal Republic of Germany); Kuanyshev B. M. (Kazakh Academy of Transport and Communications, Republic of Kazakhstan); Lingaitis V. L. (Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania); Manashkin L. (New Jersey Institute of Technology, USA); Mikulski J. (Silesian University of Technology, Republic of Poland); Sladkowski A. (Silesian University of Technology, Republic of Poland); Strzelecki R. (Gdynia Maritime University, Republic of Poland); Vaiciunas G. (Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania); Wasiak I. (Institute of Electrical Power Engineering, Republic of Poland); Zimmer 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 Resolution of Presidium of HAC (Higher Attestation Commission) of Ukraine no. 1-05/6 from 16.12.2009 (technical sciences) and no. 1-05/2 from 10.03.2010 (economic sciences). Journal is registered in the International Catalogue of periodicals Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat, research and metric systems Google Scholar, Polish Scholarly Bibliography, eLibrary.ru, DOAJ, Index Copernicus, DRJI. Published according to the Academic Council decision of the University from 03.11.2014, Protocol no. 4
Publisher	Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (Dnipropetrovsk) Certificate of Publisher ДК no. 1315 from 31.03.2003
Address of Founder	St. Lazaryana, 2, room 267, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: +38 (056) 371-51-05; e-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua; journal site: http://stp.diit.edu.ua/

Edition is being published since 1936:

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

## НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

УДК 536.24:621.791.55

С. С. БЕЛИМЕНКО<sup>1\*</sup>, В. А. ИЩЕНКО<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>ООО «Теплотехника», ул. К. Маркса, 93, к. 227, Днепропетровск, Украина, 49000, тел./факс +38 (056) 33 33 06, эл. почта director@teplotehnika.dp.ua, ORCID 0000-0002-9935-4778

<sup>2\*</sup>Каф. «Теплотехника», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 76, эл. почта vladichsh@gmail.com, ORCID 0000-0002-5948-9483

### РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАРЯДА И РАЗРЯДА ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ТЕПЛООВОГО АККУМУЛЯТОРА

**Цель.** В работе необходимо разработать критерии подобия для различных режимов работы твердотельного теплового аккумулятора (ТА), работающего за счет накопления тепловой энергии в объеме теплоаккумулирующего материала без фазового перехода, а также создать комплексный критерий эффективности теплового аккумулятора для определения весогабаритных показателей и режимов его работы на этапе проектирования. **Методика.** Для достижения целей исследования использованы теория подобия и анализ размерностей, а также методики планирования проведения физического эксперимента. **Результаты.** На основе теории подобия и анализа размерностей получены критерии подобия работы твердотельных тепловых аккумуляторов при заданных базисных параметрах. Это критерии эффективности заряда, разряда и полный критерий. Используются три теоремы теории подобия в приложении к решению теплотехнической задачи. Критерий эффективности заряда теплового аккумулятора характеризует эффективность достижения заданного значения удельного количества тепла в материале теплового аккумулятора при заряде, при принятых материалах, геометрических соотношениях и теплового потока подводимого тепла. Критерий эффективности разряда характеризует эффективность разряда теплового аккумулятора при принятых материалах, массе аккумулирующего тела и общего аккумулированного количества тепла при установленном значении теплового потока и времени разряда. Полный коэффициент эффективности работы ТА характеризует эффективность работы теплового аккумулятора за полный цикл. **Научная новизна.** Анализ показал, что возможна реализация любой системы твердотельного теплового аккумулятора на основе структурной схемы данного типа устройств. Получены критерии подобия эффективности заряда, эффективности разряда и полный критерий эффективности работы твердотельного теплового аккумулятора на основе твердого аккумулирующего материала без фазового перехода. **Практическая значимость.** Критерии, приведенные в данной работе, носят сравнительный характер. В соответствии с полученными критериями можно сравнивать близкие по конструкциям проектируемые и существующие тепловые аккумуляторы. Технико-экономический анализ показывает, что предложенная методология оценки эффективности работы твердотельных тепловых аккумуляторов на разных режимах работы является эффективной, технически реализуемой и позволяет определить весогабаритные показатели и режимы работы твердотельного теплового аккумулятора на этапе проектирования.

**Ключевые слова:** твердотельный тепловой аккумулятор; твердый аккумулирующий материал; эффективность заряда; эффективность разряда; теория подобия; анализ размерностей; критерий подобия

#### Введение

В настоящее время, одним из приоритетных направлений энергосбережения, является эконо-

номия затрат на теплоснабжение промышленных зданий и вокзалов, обогрев вагонов пассажирских поездов при перевозке пассажиров, те-

## НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

пловозов, находящихся в горячем резерве депо [6], за счет запасенной тепловой энергией в ночное время и отдаче ее в дневные часы. В результате этого экономия достигается за счет разницы тарифов на стоимость электрической энергии в дневное и ночное время, а также ведет к значительному снижению выбросов  $\text{CO}_2$  в атмосферу, что является требованием Евросоюза и способствует активной разработке и внедрению тепловых аккумуляторов [17]. Переход на «ночной» тариф позволяет платить за электрическую энергию в среднем в три раза дешевле, в сравнении с обычным режимом работы. Одним из наиболее распространенных типов устройств, которые позволяют аккумулировать и отдавать полученное разными способами тепло, являются тепловые аккумуляторы (ТА). Теплоаккумулирующие устройства могут также использоваться для прогрева тепловозных дизелей [9], автономным методом, что позволяет значительно экономить топливо и увеличивать моторесурс дизеля, кроме того предлагается использовать тепловые аккумуляторы для регулирования пиковой нагрузки при использовании когенерационных и ветровых электростанций [16]. Наибольшее распространение теплоаккумулирующие устройства нашли в энергетике, машиностроении. По температурному интервалу ТА можно разделить на четыре группы: для производства холода –  $T < 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ; низкотемпературные –  $20 \text{ }^\circ\text{C} < T < 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ; среднетемпературные –  $200 \text{ }^\circ\text{C} < T < 500 \text{ }^\circ\text{C}$ ; высокотемпературные –  $T > 500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Наибольшее применение нашли низкотемпературные и высокотемпературные ТА. Использование ТА, в первую очередь, связано с системами жизнеобеспечения человека, а также экологически чистыми способами производства энергии с учетом оптимизации потребления энергии, а также с оптимизацией их весогабаритных показателей. Тепловые аккумуляторы с твердым теплоаккумулирующим материалом (ТАМ) в настоящее время занимают преобладающее положение, что связано, в первую очередь, с использованием относительно дешевых материалов в сочетании с простыми и проверенными конструктивными и технологическими решениями. ТА обладает практически неограниченным ресурсом работы. Следует отметить, что важнейшим моментом при проектировании ТА является определение весогабаритных показателей, а также оптимизация рабочих

режимов их работы. Следовательно, изучение и разработка методологии определения весогабаритных показателей и определения рабочих режимов работы ТА является важной задачей энергосбережения, актуальной в современных условиях дефицита энергоносителей.

До настоящего времени опубликовано большое количество работ по ТА и ТАМ, например работы [10, 13]. Функционирование ТА в процессе аккумулирования тепла может осуществляться за счет двух основных механизмов: первый происходит вследствие изменения физических параметров ТАМ; второй – за счет использования энергии связи атомов и молекул веществ.

Базируясь на первом законе термодинамики для незамкнутой системы с постоянным химическим составом, характеристики тепловых аккумуляторов связаны определенными функциональными зависимостями с градиентами различных физических величин, а именно: энтальпии и внутренней энергии материала, давления, массы, объема. При этом следует учитывать взаимосвязь между этими физическими величинами, а также влияние на них температурного поля.

Наиболее распространенными и простыми в применении являются аккумуляторы емкостного типа, в которых используется теплоемкость вещества, нагреваемого без изменения его агрегатного состояния. Теплоаккумуляционная способность или мощность, которую можно накопить в аккумуляторе теплоты емкостного типа, находится из формулы:

$$Q = m C_p (T_2 - T_1), \quad (1)$$

где  $m$  – масса теплоаккумулирующего вещества;  $C_p$  – удельная изобарная теплоемкость вещества (для воды  $C_p = 1,16 \text{ Вт} / (\text{кг}\cdot\text{К})$ );  $T_1$  и  $T_2$  – средние значения начальной и конечной температуры ТАМ.

Для расчетов весогабаритных характеристик ограничиваются определением массы, согласно формулы 1. При расчетах режима работы ТА рассматривают процессы теплопередачи, применяя классические подходы анализа тепловых полей [11], а также методики, основанные на подобии процессов теплопередачи в устройствах теплотехнического назначения [14]. Математические модели хранения и разряда ТА направлены на описание теплового поля ТАМ [7, 8] и не могут быть напрямую применены для

## НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

расчета весогабаритных характеристик ТА. Ввиду сложности классического описания процессов накопления и расхода тепла в ТА, а также имея достаточный опыт в проектировании и изготовлении ТА, воспользуемся теорией подобия и анализа размерностей.

Для определения конструктивной схемы рассмотрим типичные конструкции ТА, которые встречаются в научно-технической и патентной литературе. Например, в качестве ТАМ во многих случаях в ТА используются смеси различных компонентов и разнообразные композиционные материалы. Для аккумуляции тепловой энергии в ТА используется как теплоемкость ТАМ, так и скрытая теплота фазовых переходов. Пример такой системы ТА представлен в [12].

Широкое распространение композиционных материалов привело к их использованию и в этой области техники. Например, предложен ТА с каналами из композиционного материала [8].

Приведенные конструкции ТА полностью отражают структуру и конструкцию типичного ТА на основе твердого ТАМ. Таким образом, ТА всегда содержит теплоизолированное теплоаккумулирующее тело, нагреватель, системы охлаждения, безопасности, регулирования подвода и отвода тепла.

### Цель

Цель работы – определение весогабаритных характеристик твердотельного высокотемпературного ТА и режимов его работы. Для решения этой задачи следует разработать критерии

подобия для различных режимов работы ТА, работающих за счет накопления тепловой энергии в объеме ТАМ без фазового перехода, а также создать комплексный критерий эффективности ТА для определения весогабаритных показателей ТА и режимов его работы на этапе проектирования.

### Методика

В настоящей работе рассмотрены следующие разновидности ТТА

- ТА с воздушным охлаждением – АЭТ;
- ТА с водяным охлаждением – АЭТ В;
- ТА с комбинированным охлаждением – АЭТ ВВ.

Основные конструктивные особенности ТТА приведены в [2, 3].

Структурную схему ТА можно представить, как показано на рис. 1.

ТТА представляет собой совокупность нескольких систем, конструктивно объединенных в единую конструкцию. Так обязательным элементом ТА является система нагрева, в нашем случае – это трубчатые электрические нагреватели (ТЭН). Вырабатываемое ТЭН тепло накапливается в твердом аккумулялирующем теле (ТАТ) ТА – осуществляется заряд ТА. Для использования накопленного тепла ТА имеет систему охлаждения, в нашем случае это воздушные и водяные каналы. При активной циркуляции теплоносителя – воздуха и/или воды, тепло отбирается от ТАТ и подается потребителю. Система распределения тепла в состав ТА не входит.

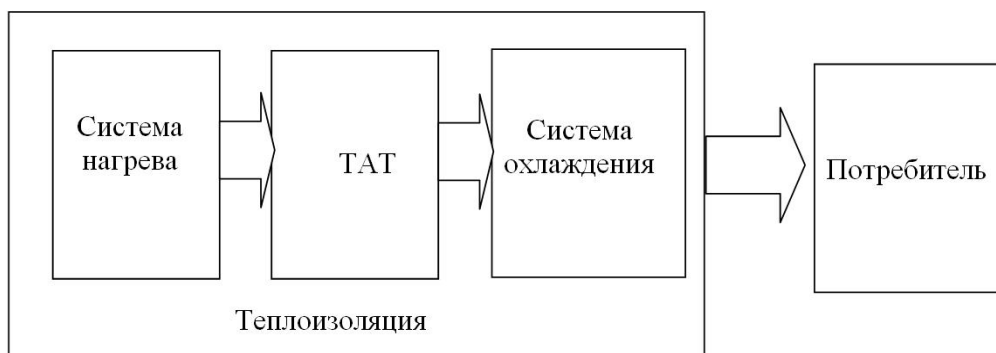


Рис. 1. Структурная схема ТА

Fig. 1. Structural diagram of TA

## НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

При различных сочетаниях конструкций отдельных элементов ТА можно получить различные конструкции ТА.

Исходя из того, что исследуемые объекты подобны, воспользуемся теорией подобия и анализа размерностей для получения критериев подобия для рассматриваемых выше систем [5]. Так согласно первой теореме подобия получим критерии подобия для каждого значимого параметра ТА. Перечень значимых параметров, которые влияют на процесс аккумуляции и расхода тепла представлены в табл. 1. Размерность в системе СИ – [MLTΘ], где M – масса, L – длина, T – время, Θ – температура. Преобразование производных размерностей в системе [MLTΘ], в простые соответствующие системе СИ приведены ниже.

Удельная теплоемкость:

$$\begin{aligned} [\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})] &= [\text{Н} \cdot \text{м}/(\text{кг} \cdot \text{К})] = \\ &= [(\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2)/(\text{кг} \cdot \text{К})] = [(\text{м}^2/(\text{с}^2 \cdot \text{К}))] = \\ &= [\text{L}^2 \text{T}^{-2} \Theta^{-1}]. \end{aligned}$$

Эффективная теплопроводность:

$$\begin{aligned} [\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})] &= [\text{Дж}/(\text{см} \cdot \text{К})] = [\text{Н} \cdot \text{м}/(\text{см} \cdot \text{К})] = \\ &= [(\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}^3 \cdot \text{К})] = [\text{MLT}^{-3} \Theta^{-1}]. \end{aligned}$$

Удельное количество тепла в массе:

$$\begin{aligned} [\text{Дж}/\text{кг}] &= [\text{Н} \cdot \text{м}/\text{кг}] = [(\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2) \cdot \text{кг}] = \\ &= [\text{м}^2/\text{с}^2] = [\text{L}^2 \text{T}^{-2}]. \end{aligned}$$

Тепловой поток:

$$[\text{Вт}/\text{м}^2] = [(\text{Дж}/\text{с})/\text{м}^2] = [\text{Н}/\text{см}] = [\text{кг}/\text{с}^3] = [\text{MT}^{-3}].$$

Таблица 1

## Перечень значимых параметров для ТА

Table 1

## The list of significant parameters for TA

№ п/п	Название параметра	Обозначение параметра	Размерность параметра	Размерность в системе СИ [MLTΘ]
Характеристики ТАМ				
1	Удельная теплоемкость	$C_p$	Дж/(кг · К)	$[\text{L}^2 \text{T}^{-2} \Theta^{-1}]$
2	Эффективная теплопроводность	$\lambda$	Вт/(м · К)	$[\text{MLT}^{-3} \Theta^{-1}]$
3	Плотность	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	$[\text{M L}^{-3}]$
Характеристики ТАТ				
4	Масса ТАТ	$m$	кг	[M]
5	Площадь теплообмена ТАТ	$S$	м <sup>2</sup>	$[\text{L}^2]$
6	Объем ТАТ	$V$	м <sup>3</sup>	$[\text{L}^3]$
7	Коэффициент геометрической формы ТАТ	$K_r$	м <sup>-1</sup>	$[\text{L}^{-1}]$
Характеристики режима работы				
8	Разность температур ТАТ при нагреве и охлаждении	$T$	К	[Θ]
9	Время режима	$\tau$	с	[T]
10	Удельное количество тепла в массе ТАТ	$Q_m$	Дж/кг	$[\text{L}^2 \text{T}^{-2}]$
11	Тепловой поток	$q$	Вт/м <sup>2</sup>	$[\text{MT}^{-3}]$
12	Удельное количество тепла в объеме ТАТ	$Q_v$	Дж/м <sup>3</sup>	$[\text{MT}^{-2} \text{L}^{-1}]$

Таблица 2

## Базисные параметры

Table 2

## Basic parameters

№ п/п	Название параметра	Обозначение	Размерность	[MLTΘ]
1	Масса ТАТ	$m$	кг	[M]
2	Коэффициент геометрической формы	$K_r$	$m^{-1}$	[L <sup>-1</sup> ]
3	Время режима	$\tau$	с	[T]
4	Разность температур	$T$	К	[Θ]

Удельное количество тепла в объеме:

$$[\text{Дж}/\text{м}^3] = [(\text{Н}/\text{м}^2)] = [\text{кг}/(\text{с}^2 \cdot \text{м})] = [\text{MT}^{-2}\text{L}^{-1}].$$

Коэффициент геометрической формы  $K_r$  – это отношение поверхности теплообмена ТА к его теплопоглощающему объему. Принято в [15] как характеристика формы объекта в тепловых задачах.

Согласно второй теореме подобия – теореме Бэкингема, получим критерии подобия для указанных величин, при следующих базисных параметрах, которые приведены в табл. 2, согласно рекомендаций [4].

## Результаты

Далее получены критерии подобия для каждой из значимых величин, воспользовавшись рекомендациями, изложенными в [12]. Критерии подобия значимых величин приведены

в табл. 3. Полученные критерии безразмерны и характеризуют отдельные процессы и численно равны для различных структурных схем и конструкций ТА, согласно структуры приведенной на рис. 3. Далее воспользуемся третьей теоремой подобия и объединим критерии для различных режимов работы ТА. Были проверены различные сочетания критериев и отобраны наиболее адаптивные. Критерий считается адаптивным, если при изменении значений значимых параметров имеет наибольшее численное изменение своего значения.

Критерий эффективности заряда ТА равен:

$$\Pi_{\text{эфз}} = \Pi_{\lambda} \Pi_{Q_v} / (\Pi_{C_p} \Pi_{\rho} \Pi_q) = \alpha Q_v K_r / q, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности, равен  $\alpha = \lambda / (C_p \rho)$ .

Таблица 3

## Критерии подобия значимых величин

Table 3

## Similarity criteria of significant quantities

№ п/п	Название параметра	Обозначение критерия	Выражение критерия
1	Критерий теплоемкости	$\Pi_{C_p}$	$C_p K_r^2 T \tau^2$
2	Критерий теплопроводности	$\Pi_{\lambda}$	$\lambda \tau^3 T K_r / m$
3	Критерий плотности	$\Pi_{\rho}$	$\rho / (m K_r^3)$
4	Критерий удельного количества тепла в массе	$\Pi_{Q_m}$	$Q_m K_r^2 \tau^2$
5	Критерий теплового потока	$\Pi_q$	$q \tau^3 / m$
6	Критерий удельного количество тепла в объеме	$\Pi_{Q_v}$	$Q_v \tau^2 / (m K_r)$

## Значения критериев подобия для разных ТА

Table 4

## The values of the similarity criteria for different HA

№ п/п	Название ТА	Критерий эффективности заряда, $\Pi_{\text{Эфз}}$	Критерий эффективности разряда, $\Pi_{\text{Эфр}}$	Критерий эффективности полный, $\Pi_{\Sigma}$
1	АЭТ 3,2 кВт	2 177	0,0006	1,33
2	АЭТ 4 кВт	2 415	0,0007	1,66
3	АЭТ В	1 859	0,0010	1,88
4	АЭТ ВВ	1 489	0,0075	11,13

Критерий эффективности заряда ТА характеризует эффективность достижения заданного значения удельного количества тепла в материале ТА при заряде, при принятых материалах, геометрических соотношениях ТА и теплового потока подводимого тепла.

Критерий эффективности разряда ТА равен:

$$\Pi_{\text{Эфр}} = \Pi_{C_p} \Pi_{\rho} \Pi_{Q_m} / (\Pi_{\lambda} \Pi_q) = m Q_m / (\alpha q \tau^2) = Q / (\alpha q \tau^2) \quad (3)$$

где  $Q$  – общее аккумулированное количество тепла в ТА.

Критерий эффективности разряда ТА характеризует эффективность разряда ТА при принятых материалах, массе ТАТ и общего аккумулированного количества тепла при установленном значении теплового потока от ТА и времени разряда.

Полный критерий эффективности равен:

$$\Pi_{\Sigma} = \Pi_{\text{Эфз}} \Pi_{\text{Эфр}} = Q_v K_r Q / (q^2 \tau^2) \quad (4)$$

Условно принимаем равенство плотностей теплового потока при заряде и разряде, также время заряда и разряда ТА. Указанные допущения позволят получить упрощенное решение для полного критерия эффективности. Упростим выражение (5), подставляя  $Q_v = Q/V$ , а также  $V = S/K_r$  получим:

$$\Pi_{\Sigma} = K_r^2 Q^2 / (S q^2 \tau^2) \quad (5)$$

Полный коэффициент эффективности работы ТА характеризует эффективность работы ТА при заряде и разряде, т.е. за полный цикл. Далее упростим выражение (9) – возьмем из

указанного выражения квадратный корень, получим:

$$\Pi_{\Sigma} = \frac{K_r Q}{\sqrt{S} q \tau} = \frac{Q \sqrt{S}}{V q \tau} \quad (6)$$

Таким образом, полный коэффициент эффективности работы ТА зависит от полной емкости заряженного аккумулятора, геометрических соотношений ТАТ, теплового потока при выбранном режиме и времени выбранного режима. Свойства ТАМ, которые характеризуются коэффициентом температуропроводности, равным  $\alpha = \lambda / (C_p \rho)$ , обеспечивают аккумулирование необходимого количества тепла при заданных габаритах ТА. При рассмотрении полного цикла работы ТА свойства ТАМ на эффективность полного цикла не оказывают прямого влияния.

Значения критериев для исследуемых ТА приведены в табл. 4.

#### Научная новизна и практическая значимость

Критерии, приведенные в табл. 4 носят сравнительный характер. Можно считать, что заряд осуществится эффективнее для АЭТ 4 кВт, чем для всех остальных ТА, а разряд будет более эффективным для АЭТ В. Поскольку режимы ТА неотделимы друг от друга, то анализ полного критерия эффективности показывает, что АЭТ ВВ является наиболее эффективным устройством по сравнению с другими исследуемыми ТА с точки зрения цикла «Заряд – Разряд». Сравнение ТА, приведенное в табл. 4, показывает, что согласно полученных критериев

## НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

возможно сравнивать близкие по принципам работы и сходным системам теплообмена ТА. Так, можно утверждать, что АЭТ 4 кВт, эффективнее по критерию заряда, а АЭТ ВВ эффективнее приведенных ТА по полному критерию эффективности (рассчитан по формуле 5).

Поскольку критерии подобия, по определению, отражают подобные тепловые процессы, происходящие в ТА– заряд и разряд, возможно, используя накопленный опыт, по проектированию ТА и численные значения критериев, приведенные в табл. 4, задавая, например, материалы и режимы работы ТА, определить его весогабаритные характеристики. Так для реализации режима заряда подобного АЭТ 4 кВт, например для проектируемого АЭТ с подключенной мощностью 10 кВт, задаем значение критерия заряда из табл. 4, выбираем материал, значения режимных параметров и определяем весогабаритные показатели проектируемого ТА, через коэффициент геометрической формы. Или наоборот, задавая весогабаритные характеристики проектируемого ТА, определяем критерий заряда, разряда или полный критерий эффективности.

## Выводы

Анализ показывает, что предложенная методология оценки эффективности работы твердотельных тепловых аккумуляторов для разных режимов работы является эффективной, технически реализуемой и позволяет определить весогабаритные показатели и режимы работы твердотельного теплового аккумулятора на этапе проектирования. Предложенная методология применима при проектировании и сравнении тепловых аккумуляторов с подобными системами подвода и отвода тепла.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. А. С. 1746151 СССР, МПК<sup>4</sup> F 24 Н 7/00. Тепловой аккумулятор / Л. Л. Васильев, И. М. Болдак, Л. С. Домород, Е. И. Широков (СССР). – № 04800461/06 ; заявл. 14.12.89 ; опубл. 07.07.92, Бюл. № 25. – 1 с.
2. Беліменко, С. С. Електротеплоаккумуляційні нагрівачі: шлях до енергонезалежності України / С. С. Беліменко // Праці ін-ту електродинаміки НАН. – К., 2006. – Спец. випуск. – С. 80–83.
3. Беліменко, С. С. Системи опалювання тепло акумуляційними нагрівачами / С. С. Беліменко // Екоінформ. – 2011. – № 6. – С. 18–19.
4. Браун, Э. Д. Моделирование трения и изнашивания в машинах / Э. Д. Браун, Ю. А. Евдокимов, А. В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 1982. – 191 с.
5. Веников, В. А. Теория подобия и моделирование применительно к задачам электроэнергетики / В. А. Веников. – М., 1966. – 182 с.
6. Габриниць, В. О. Шляхи підвищення ефективності енергетичних підрозділів залізничного транспорту / В. О. Габриниць, Є. В. Христьян, І. В. Титаренко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 41. – С. 187–190.
7. Дружинин, П. В. Математическая модель процесса разрядки теплового аккумулятора фазового перехода / П. В. Дружинин, А. А. Коричев, И. А. Косенков // Техн.-технол. пробл. сервиса. – 2009. – № 4. – С. 17–22.
8. Дружинин, П. В. Математическая модель процесса хранения теплоты в тепловом аккумуляторе / П. В. Дружинин, А. А. Коричев, И. А. Косенков // Техн.-технол. пробл. сервиса. – 2009. – № 2. – С. 63–65.
9. Каграманян, А. О. Оцінка економічної ефективності застосування прогріву тепловозів від альтернативних джерел енергії / А. О. Каграманян, А. В. Онищенко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – Вип. 32. – С. 259–263.
10. Левенберг, В. Д. Аккумулирование тепла / В. Д. Левенберг, М. Р. Ткач, В. А. Гольстрем. – К. : Техника, 1991. – 315 с.
11. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М. : Высш. шк., 1967. – 600 с.
12. Пат. 2088857 Российская Федерация, МПК<sup>4</sup> F 24 Н 7/00. Тепловой аккумулятор фазового перехода / Бульчев В. В., Емельянов Е. С., Загряжкин В. Н. и др. ; заявитель и патентообладатель Бульчев В. В., Емельянов Е. С., Загряжкин В. Н. и др. – № 93036725/06 ; заявл. 16.07.93 ; опубл. 27.08.1997. – 1 с.
13. Резницкий, Л. А. Тепловые аккумуляторы / Л. А. Резницкий. – М. : Энергоатомиздат, 1996. – 91 с.
14. Филиппов, Л. П. Теория термодинамического подобия / Л. П. Филиппов. – М. : Изд-во МГУ, 1985. – 225 с.
15. Чичинадзе, А. В. Расчет и исследование внешнего трения при торможении / А. В. Чичинадзе. – М. : Наука, 1967. – 331 с.
16. Analysis on peak-load regulation ability of cogeneration unit with heat accumulator / Q. Lyu,

T. Chen, H. Wang et al. // Automation of electric Power System. – 2014. – Vol. 38. – Iss. 11, 10. – P. 34–41.

17. Taler, D. Water-air ceramic heat accumulator heating system for building / D. Taler, P. Cisec, J. Tokarzik // Runek Energy. – 2014. – Vol. 107. – Iss. 6. – P. 71–76.

С. С. БЕЛІМЕНКО<sup>1\*</sup>, В. О. ІЩЕНКО<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>ТОВ «Теплотехніка», вул. К. Маркса, 93, к. 227, Дніпропетровськ, Україна, 49000, тел./факс +38 (056) 33 33 06, ел. пошта director@teplotehnika.dp.ua, ORCID 0000-0002-9935-4778

<sup>2\*</sup>Каф. «Теплотехніка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 76, ел. пошта vladichsh@gmail.com, ORCID 0000-0002-5948-9483

## РОЗРОБКА КРИТЕРІЇВ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАРЯДУ Й РОЗРЯДУ ТВЕРДОТІЛЬНОГО ТЕПЛООВОГО АКУМУЛЯТОРА

**Мета.** В роботі необхідно здійснити розробку критеріїв подібності для різних режимів роботи твердотілого теплового акумулятора (ТА), що працює за рахунок накопичення теплової енергії в обсязі теплоакуюючого матеріалу без фазового переходу, а також створити комплексний критерій ефективності теплового акумулятора для визначення вагогабаритних показників і режимів його роботи на етапі проектування. **Методика.** Для досягнення цілей дослідження використані теорія подібності і аналіз розмірностей, а також методики планування проведення фізичного дослідження. **Результати.** На основі теорії подібності та аналізу розмірностей отримані критерії подібності роботи твердотілих теплових акумуляторів при заданих базисних параметрах. Це критерії ефективності заряду, розряду та повний критерій. Використані три теореми теорії подібності в питанні до вирішення теплотехнічної задачі. Критерій ефективності заряду теплового акумулятора характеризує ефективність досягнення заданого значення питомої кількості тепла в матеріалі теплового акумулятора при заряді, при прийнятих матеріалах, геометричних співвідношеннях і теплового потоку підведеного тепла. Критерій ефективності розряду характеризує ефективність розряду теплового акумулятора при прийнятих матеріалах, масі тіла, що акумулює, і загальної кількості акумульованого тепла при встановленому значенні теплового потоку і часу розряду. Повний коефіцієнт ефективності роботи теплового акумулятора характеризує ефективність роботи теплового акумулятора за повний цикл. **Наукова новизна.** Аналіз показав, що можлива реалізація будь-якої системи твердотілого теплового акумулятора на основі структурної схеми цього типу пристроїв. Отримані критерії подібності ефективності заряду, ефективності розряду та повний критерій ефективності роботи твердотілого теплового акумулятора на основі твердого матеріалу, що акумулює, без фазового переходу. **Практична значимість.** Критерії, наведені в даній роботі, носять порівняльний характер. Відповідно до отриманих критеріїв можна порівнювати близькі за конструкціями проєктовані й існуючі теплові акумулятори. Техніко-економічний аналіз показує, що запропонована методологія оцінки ефективності роботи твердотілих теплових акумуляторів в різних режимах роботи є ефективною, технічно реалізується і дозволяє визначити вагогабаритні показники та режими роботи твердотілого теплового акумулятора на етапі проектування.

**Ключові слова:** твердотілий тепловий акумулятор; твердий акумулюючий матеріал; ефективність заряду; ефективність розряду; теорія подоби; аналіз розмірностей й; критерій подоби

S. S. BELYMENKO<sup>1\*</sup>, V. O. ISHCENKO<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>LTD «Heating Engineering», K. Marks Av., 93, r. 227, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49000, tel./fax +38 (056) 33 33 06, e-mail director@teplotehnika.dp.ua, ORCID 0000-0002-9935-4778

<sup>2\*</sup>Dep. «Heating Engineering», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel./fax +38 (056) 373 15 76, e-mail vladichsh@gmail.com, ORCID 0000-0002-5948-9483

## DEVELOPMENT OF CRITERIA OF CHARGE AND DISCHARGE EFFICIENCY OF SOLID STATE OF HEAT ACCUMULATOR

**Purpose.** Development of similarity criteria for different modes of operation of the solid-state heat accumulator working due to accumulation of heat in the volume of the heat storage material without phase transition, and the crea-

## НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

tion of systematic criteria of heat accumulator efficiency for determination the weight / size parameters and operating modes at the design stage. **Methodology.** To achieve the objectives of the study the theory of similarity and dimensional analysis were used as well as planning and carrying out techniques of physical experiments. **Findings.** Based on the theory of similarity and dimensional analysis similarity criteria operation of solid-state heat accumulators, under given basic parameters were obtained. These are performance criteria for charge, discharge and full criterion. Three theorems of similarity theory in application to the solution of engineering problems were used. The criterion of efficiency of the heat accumulator charge characterizes the effectiveness of achieving the specified value of the specific amount of heat in the material of heat accumulator under charge, under received materials, geometrical ratios, and heat flow of the heat input. The efficiency criterion characterizes the discharge efficiency of the heat accumulator, at the accepted materials; mass of heat-retainer and the total accumulated amount of heat when the value of the heat flow and the time of discharge. Full coefficient of the heat accumulator performance characterizes the efficiency of the heat accumulators for a full cycle. **Originality.** Accordingly to the analysis the implementation of any system of solid-state heat accumulator is possible on the basis of structural schemes of this type of device. The similarity criteria of the efficiency of the charge, the efficiency of discharge and the full criterion of solid-state heat accumulators' efficiency based on the solid storage material without phase transition were obtained. **Practical value.** Criteria presented in this work are of a comparative nature. In accordance with the obtained criteria we can compare designed and existing heat accumulators that are similar to structures. Feasibility analysis indicates that the proposed assessment methodology of solid-state heat accumulators' efficiency in different modes of operation is effective, technically feasible and allows determining the weight / size parameters and modes of operation of the solid-state heat accumulator at the design stage.

*Keywords:* solid-state heat accumulator; solid storage material; charge efficiency; discharge efficiency; similarity theory; dimensional analysis; similarity criterion

## REFERENCE

1. Vasilyev L.L., Boldak I.M., Domorod L.S., Shirokov Ye.I. *Teplovoy akkumulyator* [Heat accumulator]. A.s.1746151 SSSR, no. 4800461/06, 1992.
2. Bielimenko S.S. Elektroteploakumulatsiini nahrivachi: shliakh do enerhonezalezhnosti Ukrainy [Electro-thermal and accumulative heaters is a way to nonvolatility of Ukraine]. *Pratsi instytutu elektrodynamiky NAN* [Proc. of The Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences in Ukraine], 2006, a special issue, pp.80-83.
3. Bielimenko S.S. Systemy opaliuvannia teplo akumulatsiinyh nahrivachamy [Heating systems with thermal energy storage heaters]. *Ekoinform – Ecoinform*, 2011, no. 6, pp.18-19.
4. Braun E.D., Yevdokymov Yu.A., Chichinadze A.V. *Modelirovaniye treniya i iznashivaniya v mashinakh* [Simulation of friction and wear in machines]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1982. 191 p.
5. Venikov V.A. *Teoriya podobiya i modelirovaniye primenitelno k zadacham elektroenergetiki* [Similarity theory and simulation as applied to problems of electricity]. Moscow, 1966. 182 p.
6. Habrynets V.O., Khrystian Ye.V., Tytarenko I.V. Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti enerhetychnykh pidrozdiliv zaliznychnoho transportu [Ways to improve the efficiency of energy units of railway transport]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 41, pp. 187-190.
7. Druzhinin P.V., Korichev A.A., Kosenkov I.A. Matematycheskaya model protsessa razryadky teplovogo akkumulyatora fazovogo perekhoda [A mathematical model of the heat accumulator discharge process of phase transition]. *Tekhniko-tehnologicheskkiye problemy servisa – Technical and technological problems of service*, 2009, no. 4. pp. 17-22.
8. Druzhinin P.V., Korichev A.A., Kosenkov I.A. Matematicheskaya model protsessa khraneniya teploty v teplovom akkumulyatore [A mathematical model of the heat storage process in the heat accumulator]. *Tekhniko-tehnologicheskkiye problemy servisa – Technical and technological problems of service*, 2009, no. 2. pp. 63-65.
9. Kahramanian A.O., Onyshchenko A.V. Otsinka ekonomichnoi efektyvnosti zastosuvannia prohrivu teplovoziv vid alternatyvnykh dzherel enerhii [Assessment of the economic efficiency of locomotives warm-up from alternative energy sources]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 32, pp. 259-263.
10. Levenberh V.D., Tkach M.R., Holstrem V.A. *Akkumulirovaniye tepla* [Heat accumulation]. Kyiv, Tekhnika Publ., 1991. 315 p.

## НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

11. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [The theory of heat conduction]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1967. 600 p.
12. Bulychov V.V., Yemelyanov Ye.S., Zagryazkin V.N. *Teplovoyye akkumulyator fazovogo perekhoda* [Heat storage of phase transition]. Patent RU, no. 93036725/06, 1997.
13. Reznitskiy L.A. *Teplovyye akkumulyatory* [Heat accumulators]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1996. 91 p.
14. Filippov L.P. *Teoriya termodinamicheskogo podobiya* [The theory of thermodynamic similarity]. Moscow, Izdatelstvo MGU Publ., 1985. 225 p.
15. Chichinadze A.V. *Raschet i issledovaniye vneshnego treniya pri tormozhenii* [Calculation and investigation of external friction during braking]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 331p.
16. Lyu Q., Chen T., Wang H., Yu T., Li Q., Tang W. Analysis on peak-load regulation ability of cogeneration unit with heat accumulator. *Automation of electric Power System*, June 2014, vol. 38, issue 11, 10, pp. 34-41.
17. Taler D., Cisec P., Tokarzik J. Water-air ceramic heat accumulator heating system for building. *Runeek Energy*, 2014, vol. 107, issue 6, pp. 71-76.

*Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Л. И. Кныш (Украина); д.т.н., проф. В. А. Габринцом (Украина)*

Надійшла до редколегії: 20.06.2014

Прийнята до друку: 20.09.2014

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

UDC 656.259.2: 621.315

O. O. HOLOLOBOVA<sup>1\*</sup>, V. I. HAVRYLIUK<sup>2</sup>, M. O. KOVRYHIN<sup>3</sup>, S. YU. BURIK<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Automation, Telemechanics and Communications», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St. 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail gololobova\_oksana@i.ua, ORCID 0000-0003-1857-8196

<sup>2</sup>Dep. «Automation, Telemechanics and Communications», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St. 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail gvi\_dp@mail.ru, ORCID 0000-0001-9954-4478

<sup>3</sup>Dep. «Automation, Telemechanics and Communications», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St. 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04

<sup>4</sup>Dep. «Automation, Telemechanics and Communications», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St. 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.+38 (056) 373 15 04, e-mail bsyur@mail.ru, ORCID 0000-0002-8251-785x

### STUDY OF TRANSMISSION LINES EFFECT ON THE SYSTEM OPERATION OF CONTINUOUS AUTOMATIC CAB SIGNALLING

**Purpose.** To conduct an effect research of the electromagnetic field of high-voltage transmission lines (HVTL) (750 kV, 50 Hz) on the track circuits and continuous automatic cab signalling (CACS) with a signal current of 50 Hz in the areas of convergence and intersection with the transmission lines and to propose possible methods to improve noise immunity of CACS. **Methodology.** The measurements were performed both by means of car-laboratory and directly on rail lines. During the study the electric field strength in the range of industrial frequency directly under the transmission lines and at the distance from it to the railway lines was measured, as well as the time dependence of CACS codes with signal current frequency of 50 Hz directly under the transmission lines and at a distance from it in the absence of the train and its passing. **Findings.** The root causes analysis of CACS faults and failures was carried out. The effect of the electromagnetic field of high-voltage transmission lines (750 kV, 50 Hz) on the track circuit and CACS with signal current of 50 Hz in the areas of convergence and intersection with the transmission line was investigated. Possible methods to improve noise immunity of CACS were considered. **Originality.** The effect research of transmission lines (750 kV) on the operation of the automatic cab signalling on spans Prishib-Burchatsk and Privolnoye-Yelizarovo, Pridneprovsk railway in places of oblique railroads crossing and transmission lines (750 kV, 50 Hz) was conducted. Electric field strength in the range of industrial frequency directly under the transmission lines and at a distance from it to the railway line, as well as the time dependences of ALSN codes with signal current frequency of 50 Hz directly under the transmission lines and at a distance from it in the absence of the train and as its passing were measured. It was found that CACS codes in track circuits under transmission lines are strongly distorted, as strength measurements of electric field are shown, it can be explained by the electromagnetic field effect of transmission lines on track circuits. **Practical value.** Possible methods of CACS safety enhancement by improving the reliability of signaling from a track on the locomotive were considered.

*Keywords:* automatic cab signalling system; fault; failure; high-voltage transmission line

#### Introduction

Recently, in Ukraine there is an increase of train speeds, implementation of accelerated mo-

tion, and in the future implementation of high-speed train one, while ensuring the necessary safety level of trains.

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

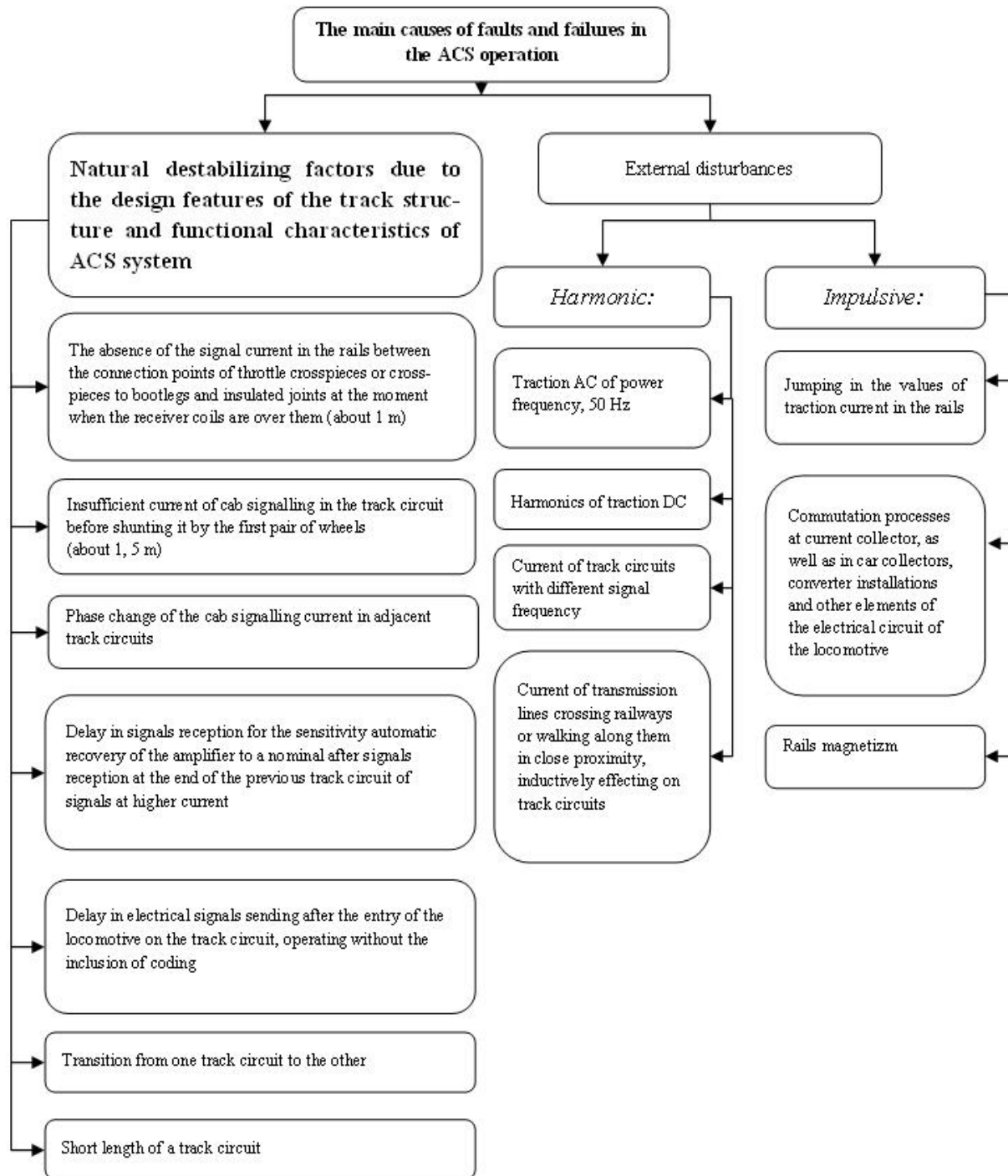


Fig. 1. Main reasons classification of faults and failures in ACS operation

Short-term faults and failures of continuous automatic cab signalling (CACS) are connected with a large number of reasons (Fig. 1) [7].

Natural destabilizing factors due to the design features of the track structure and functional characteristics of the system itself, can lead to the in-

terval in signalling and brief glimpses of locomotive traffic lights. But the work of the ACS is constructed that the devices recognize the new electric signal is not earlier than 5–6 seconds (time delay for releasing the Compliance relay (CR)), which in most cases let protect the system against faults.

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

Furthermore, there are some protective measures:

– accelerated and preliminary signalling to the track circuits, decoding by a decoder the yellow light signal with red one after the second arrival, matching the washer starting in the transmitter;

– fixation by a decoder the green light signals with an extra impulse during a time delay of control relay in code combinations entry (CCE), the use of code transmitters with a shorter duration of code combinations - 1.6 sec. on the stations, the location of insulated joints in the transition curves of switches, and not on the main track [5].

External interferences in turn differ in the nature of impact. Impulsive noise consist of short current pulses, induced in the receiver coils of a locomotive. They have an arbitrary shape and their occurrence moment, amplitude and duration are absolutely sporadic. It is impossible to determine how often the pulses will follow in turn, there is no regularity in their intensity, shape and duration. Impulse noise effect on the electrical signals of cab signalling can lead to quantitative errors (including the received impulses) and quality impulse distortions. Nature of these noise depends on their sources (switch processes in the current collector, in the collectors of cars, converter installations and other elements of the electrical circuit of the locomotive may be as impulse noise), so the choice of the most effective fighting method is based on the analysis of their characteristics, which are determined during research in those specific conditions in which signal transmission takes place.

In the harmonic noise occurrence a certain regularity is defined, so protection against them is often constructed on the frequency selection using electric filters. They prevent effect of oscillations with a frequency different from the frequency of the signal current of cab signalling on the receiving devices.

The percentage of faults caused by the transmission line effect, in relation to the total number of repeated faults due to the blame of signal telephone and telegraph service (Sh) on the Prydneprovsk railway for the last 4 years is shown in Figure 2.

### Purpose

Research conducting of the electromagnetic field effect of high-voltage transmission lines (750 kV, 50 Hz) on the track circuit and CACS with signal current of 50 Hz on the sections of approach and crossing with the transmission line and to propose possible methods to improve CACS noise immunity.

### Analysis of faults in the CACS operation

An important task of traffic safety is to ensure trouble-free operation of automatic cab signalling.

A special place is the problem of protection against the effects of transmission lines (TL) on the sections with DC electric traction and diesel traction when the cab signalling devices operate at a frequency of 50 Hz, and so the methods of frequency-division signalling and harmonic noise are not applicable [1].

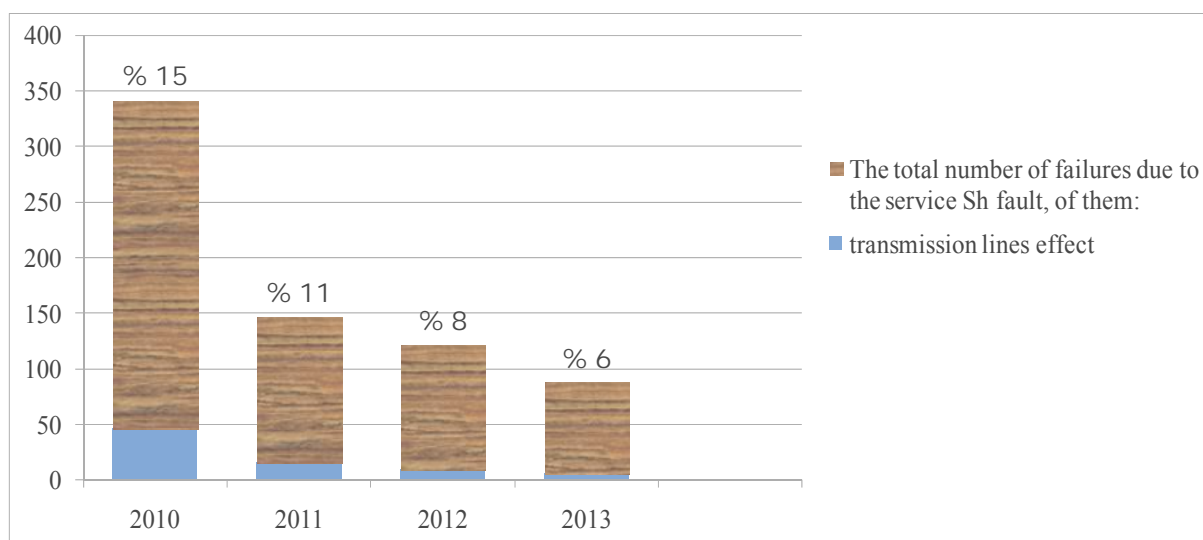


Fig. 2. The percentage of faults caused by the transmission lines effect, in relation to the total number of repeated faults due to the blame of signal telephone and telegraph service (Sh) on the Prydneprovsk railway

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

There are two ways of solving this problem. The first method is external in relation to the system and represents the maximum exclusion of the transmission line effect by shielding the current-carrying elements, or electric circuits use with antiphase protection currents which flows in the various circuits in order to reduce effects of electromagnetic noise of the transmission lines on the receiver coils.

The second method of protection is intersystem method. It is a necessity to develop such a mechanism or algorithm of the system operation that transmits traffic lights readings on the locomotive, so that even small changes in the shape, amplitude, duration of pauses and intervals are excluded and do not result in the faults of codes.

One should determine what the most effective method is. To do this we will carry out the analysis of the work and functioning of the automatic cab signalling system under the transmission lines effect. In accordance with the analysis of noise immunity under the effect of high electromagnetic fields one can judge about advantages and disadvantages of a particular protection method.



Fig. 3. Transmission lines crossing the railway track

Transmission lines noise have sinusoidal nature and occur in places of transmission lines approach with the railway as crossings or in the form of mutual parallel arrangement [14]. Zone of interference factor is small (approximately 30-40 m on each side from an axis of the transmission lines). However, on a number of roads faults in the vicinity of the intersection with the transmission lines are significant. Lines that are parallel to the railways, are usually low-power, that is why they do not require a special protection methods. But the lines crossing the track

at different angle, have a fundamental importance on the ACS receiving system.

The transmission lines effect on ACS receiving devices depends on many factors. The most important is: angle of crossing of transmission lines of the railway line, suspension type of wires on the support, the phase currents and their asymmetry, asymmetry of locomotive receiver coils relatively to the wires of the influencing line and others [10].

Effective protection measures are necessary to reduce the level of noise from transmission lines. To some extent, this protection is ensured with efficiency of automatic gain control (AGC). AGC is required to avoid distortion of the receiving code signals [4]. Current level in the rails under the receiver coils while the locomotive moves may increase more than 20 times, depending on the length of the rail line. The signal amplitude at the output of the filter increases during the impulse and exponential decrease during the pause. If the sensitivity of the locomotive receiver remained unchanged, then with an increase of the input signal would occur pulse stretching and shortening of pause, as at invariable time constant of the transition process in this case the wavefront would decrease and the recession would increase the amplitude of the signal from the steady-state value to the threshold of sensitivity.

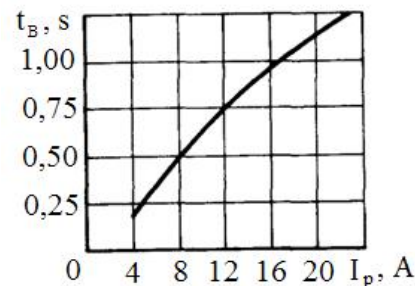


Fig. 4. Time dependence of the amplifier sensitivity recovery

With the help of AGC sensitivity of a locomotive receiver is reduced, it promotes undistorted reception of code signals.

The effectiveness of the AGC is characterized by the generalizing parameter  $t_B$ . It is defined as the time during which the sensitivity of the amplifier after the termination of the current  $I_p$  remains below the nominal one. Time  $t_B$  at switching of the current corresponding to 10-fold overload is 1 sec (see Fig. 4) [10]. The effectiveness and anti-interference features of the AGC are in the Figure 5.

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

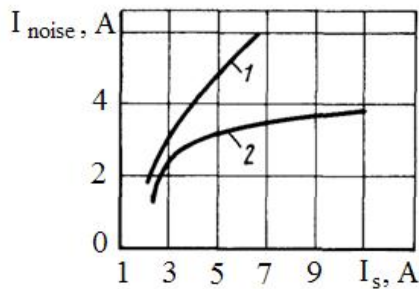


Fig. 5. Efficiency graphics and anti-interference features of the AGC:

1 – maximum value of interference current for provision of normal ACS operation during the noise in phase with the desired signal; 2 – maximum value of interference current for provision of normal ACS operation during the noise influence in antiphase

Another way to improve the reliability of the ACS operation is the development of protective devices (Fig. 6) [9]. The proposed device allows preventing the effects of the noise influence from transmission lines on the ACS work regardless of the train speed. This greatly improves the operation reliability of the ACS devices.

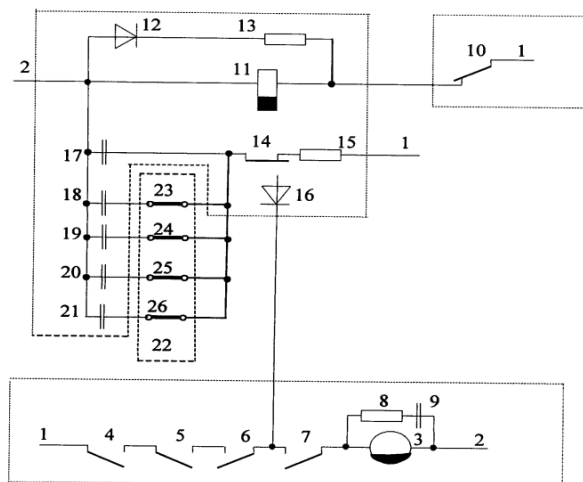


Fig. 6. Protection equipment of operation devices of automatic cab signalling from transmission lines noise: 1 – plus and 2 – minus poles of energy source; 3 – equivalent relay; 4 – frontline contacts of code presence relay; 5 – third counter; 6 – green light relay; 7 – red and yellow light relay; 8 – resistor; 9 – condenser; 10 – contact of impulse relay; 11 – reversal repeater of impulse relay; 12 – spark quenching diode; 13 – spark quenching resistor; 14 – contact of reversal repeater; 15 – additional resistor; 16 – additional diode; 17 – the first additional capacitor; 18 – the second additional capacitor; 19 – the third additional capacitor; 20 – the fourth additional capacitor; 21 – the fifth additional capacitor; 22 – speed gauge; 23 – the first, 24 – the second, 25 – the third and 26 – the fourth contacts of speed gauge

In addition, there are other ways to reduce the transmission lines effect: increasing the height of the suspension and reducing the distance between the wires of transmission lines at the point of intersection, arranging of special, closed and suspended or laid on the ground stubs, which are served with the current, frequency of 50 Hz, the phase-shifted with respect to the current of induced noise, compensation of current interference by specially laid on the locomotive circuit and increase the signal current at the intersection.

Since the effect of transmission lines can be conditionally subdivided into direct and indirect, it is necessary to take into account that most of the protection methods grade the direct influence of the transmission lines magnetic field on ACS coils. But studies show [13] that the noise level is determined mainly by an indirect effect, i.e. it is a consequence of the guidance in the electromagnetic mass (frame, bogies, body and so on.) the locomotive of eddy current, their magnetic field directly affects on the receiver coils. Therefore, the task of protective measures development remains vital.

### Methodology

Among the all varieties the transmission lines with a voltage of 110 kW, 220 kW, 330 kW and 750 kW are most commonly used. Transmission lines with voltage 500 kW and above, with currents exceeding 600 A, and typical unbalances because of the large distances between the phase wires and the increasing load currents have the greatest interfering effect. Maximum EMF (electromotive force) of noise induced by transmission lines in the receiver coils can reach 800 mW (accordingly to measurements). This is equivalent to a disturbing current approximately of 5.5 A in rails. Transmission line of 220 kW (current up to 500 A) with vertical wires are more symmetrical and less disturb significantly in the receiver coils. The induced EMF in the receiver coils in the first case is 400-500 mW and in the vertical placement is 135-165 mW. Other transmission lines usually do not have perceptible effect. To determine the protective measures it is convenient for EMF, induced by transmission lines in the receiver coils, to represent as an equivalent current in rails (1 A directs in coils 165 mW) at 220 kW (transmission lines) - 1.5-2.5 A at 330 kW - 2-3 A at 500 kW - 3.5-5 A, 750 kW - A 4-6 [9].

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

Electric Codes of Ukraine regulate norms of railway tracks crossing (item 2.5.207-2.5.211) [6, 11]:

– crossing angle of HVL with electrified railways or subject to railway electrification, as well as the crossing angle of 750 kW with the railways of general use should be approximately 90°, but not less than 40°;

– for the non-electrified railways distance from the wire to the rail head in the normal mode of the HVL vertically should be at least 7.5 m - 20 m at a voltage of 110 kW to 750 kW properly;

– span of railroad crossing limited with spun poles (Fig. 7).

Let us take for the research two spans on Prydniprovsk railway stations on the crossing sections with the transmission line 750 kW: Prishib-Burchatsk, Zaporizhzhia region (Figure 8) and distilled Privolnoye–Yelizarovo (Figure 9).

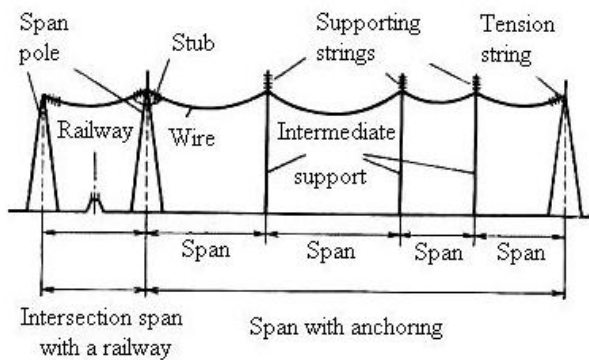


Fig. 7. Scheme of the span crossing with the railway

Span Prishib-Burchatsk is electrified with direct current, measurements were carried out with system "Control" on the basis of a car-laboratory of Prydniprovsk signal telephone and telegraph service.



Fig. 8. Span Prishib-Byrchak



Fig. 9. Span Privolnoye–Yelizarovo

On the span Privolnoye Yelizarovo the continuous welded railway track with self-contained traction. The length of the track circuit between signal points 1 and 18, where there is a crossing section with the transmission lines, 839 m.

The electromagnetic emission meter levels P3-41, ampervoltmeter TS-43-80 («C-4380») with an internal resistance of 0.06 ohms, Rogowski coil were used for the research.

The following methods for measuring the ACL signal current in rails are presented [12]:

1) Continuous current measurement sent to the RC during the check-up instead the impulse. Do this requires to shunt transmitter relay contact with a jumper for temporary sending the continuous current;

2) Measurement of pulse current. During this process one shunt a track circuit at the input end by an ampervoltmeters with a special driver provided with an outer head or by ammeters with the internal resistance not more than 0.06-0.08 ohms TS-56 («C-56»), TS-760 («C-760»), TS-4380 («C-4380»), at a scale 6A );

3) Current measurement in the additional winding of an impedance-bond. The ammeter is connected parallel to this winding without disconnecting the load. In this case, the ammeter shunts the track circuit. Current strength in rails one can determine by multiplying the readings on the volt ratio. The disadvantage of this method is due to an important role of the ammeter resistance. It is rec-

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

ommended to use an ammeter TS-4380 («C-4380»), with a scale of 0-1.5 A with a resistance of 0.32 ohms;

4) Current measurement with track circuit shunting with a test shunt. This method finds application in the absence of an ammeter with low input impedance. Voltage on a shunt is measured and divided on its resistance (0.06 ohms), the resulting value is current of locomotive signaling.

In the research of the span Privolnoye-Eylizarovo a second method using an ammeter TS-4380 («C-4380»), with an internal resistance of 0.06 ohms was applied. Using probes the track circuit was shunted for a short time. On one of the probes a Rogowski coil was put on, which was connected to the analog-to-digital converter. Wiring diagram is presented in Figure 10. In addition, since the interfering effect area of transmission lines is approximately 30-40 m, measurements of a level of electromagnetic field emission were conducted by means of unit RR-41 («PP-41») at a given distance, a height of about 20 cm above the railhead elevation (taking into account the height of the receiver coils) and at a height of about 2.5 m.

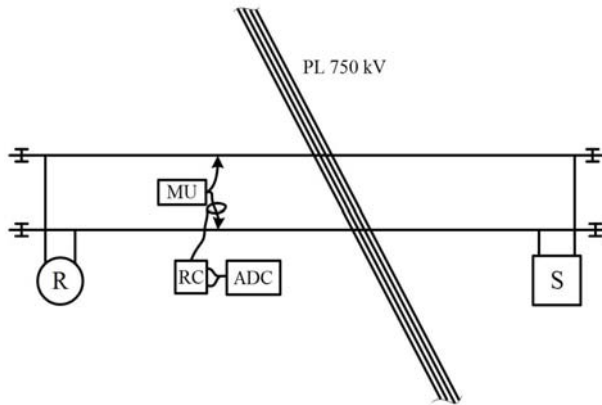


Fig. 10. Wiring diagram for the organization of measurements:

MU – measurement unit TS-4380 («C-4380»);  
RC – Rogowski coil; ADC – analog-to-digital converter;  
R – relay end of track circuit; S – supply end of track circuit

### Findings

Measurements results of signal current of the green light code (Z) with a car-laboratory of signal telephone and telegraph department on Prydniprovs'k railway are presented in Figure 11.

As in the Figure, noise in the coils, induced by transmission lines of 750 kV, are so strong that code availability [3] is hardly discerned. Noise fill

short pause, long interval between codes and superimposed on impulses of code. The magnitude of the greatest noise reaches more than 1 W, which is about equivalent to a disturbing current in the rails, value 6 A.

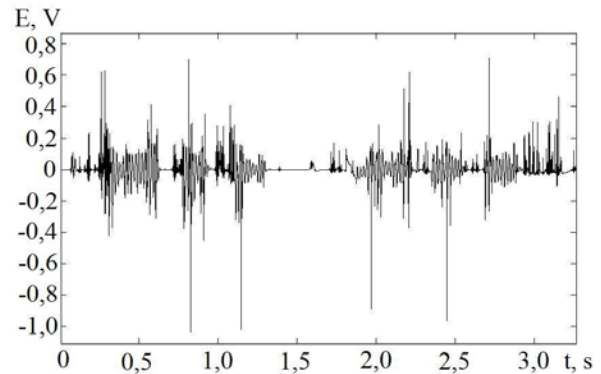


Fig. 11. Signal current code Z

The measurements results of the signal current of yellow light code (W) with a car-laboratory are presented in Figure 12.

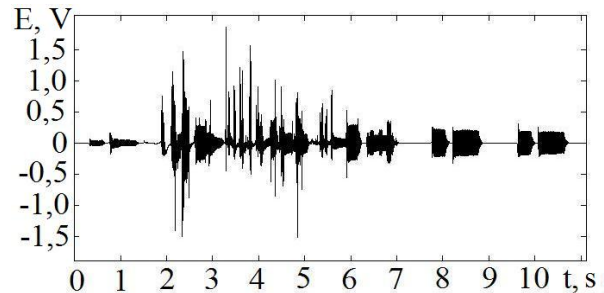


Fig. 12. Signal current code W

As in Figure noise in locomotive coils distort three consecutive cycles W. The magnitude of the greatest interference reaches about 1 W that is also approximately equivalent to a disturbing current in rails 6 A as in the previous measurement. In these both cases, the signal through the ADC was taken directly from the locomotive coils, so we observe both direct and indirect effects of transmission lines.

The measurements results of the signal current, code W (a tested section of a track is located in front of preinput signal point) are presented in Fig. 13.

Also as in Figure 11 one can observe that noise from transmission line of 750 kW fill a signal code lengthwise. But unlike the previous figure, the magnitude of the disturbing current in the rails is no more than 1 A. In actual operating conditions on the given sector there is a problem of major faults in the ACS reception code. In the measure-

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

ments, the average position of the instrument indicator TS-4380 («C-4380») at steady-state oscillations under the influence of the measured current has shown the current rate in rails of 8 A. On the given section the current signal level is too high due to the need for protection against noise, induced with HTL (see Fig. 12). In this case, we can talk about research of direct transmission lines impact, as readings were taken directly from the track circuit without the presence of the rolling stock. Consequently significant disruptions in the ACS codes on this section are caused by the indirect effect of the HVL.

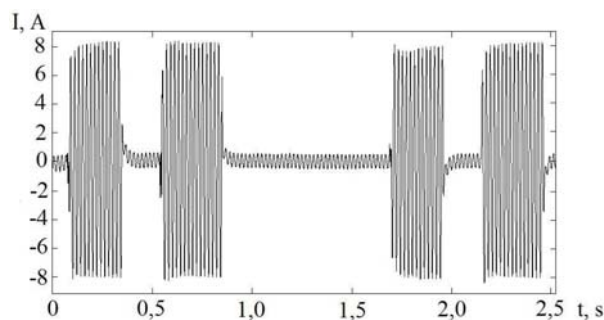


Fig. 13. Signal current code W

The results of measurements with the RR-41 («PP-41») are presented in Table 1.

Table 1

**The electromagnetic field strength in the zone of interference effect of transmission line**

The distance from the zero point-projection on the railway track m	Height 20 cm above the head level of a rail, V/m	Height 2.5 m above the head level of a rail, V/m
-30	4,4	7,4
-27	5,3	8,0
-24	5,7	8,3
-21	6,1	8,5
-18	6,7	8,8
-15	8,5	9,6
-12	8,8	12,4
-9	9,9	17,9
-6	11,5	24,8
-3	12,3	27,0
0	12,6	35,0
+3	12,0	26,0

End of Table 1

The distance from the zero point-projection on the railway track m	Height 20 cm above the head level of a rail, V/m	Height 2.5 m above the head level of a rail, V/m
+6	11,7	24,9
+9	9,3	18,2
+12	8,3	13,4
+15	7,2	10,0
+18	6,5	9,1
+21	6,2	8,6
+24	5,4	8,0
+27	4,9	7,8
+30	4,2	7,6
The average electromagnetic field strength	7,98	14,35

The results of measurement with an instrument RR-41 («PP-41») are presented in the Table 1. The electromagnetic field strength at a height of 2.5 m is 2-3 times greater than at a height of 20 cm from the railhead elevation - height of receiver coil suspension.

**Originality and practical value**

The research of transmission line 750 kW effect on the operation of automatic cab signalling on spans Prishib-Burchatsk and Privolnoye-Yelizarovo Prydniprovsk railway in the places of oblique railroad crossing and transmission line of 750 kW, 50 Hz were conducted. Measurements were made both by means of the car-laboratory and directly on rail lines. In the research course the electric field intensity in the range of industrial frequency directly under the transmission line and with distance from it along the railway, as well as the time dependences of CACS codes with signal current frequency of 50 Hz is directly under the transmission lines and with distance from it in the absence of the train and its passing were measured. It was found that CACS codes in rail circuits under the transmission lines are strongly distorted, which as shown by measurements of the electric field intensity can be explained by the influence of the electromagnetic field of the transmission line on the track circuits.

The possible methods of CACS safety increasing by improving reliability of signaling from their way on a locomotive were considered.

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

**Conclusions**

Root causes analysis of the faults and failures in CACS was conducted. The effect of the electromagnetic field of high-voltage transmission lines (750 kV, 50 Hz) on the track circuits and CACS with signal current of 50 Hz in the areas of convergence and intersection with the transmission line was studied.

The possible methods of increasing interference protection of CACS were considered.

## LIST OF REFERENCE LINKS

1. Безнаритний, А. М. Аналіз стану пристроїв автоблокування, методів його обслуговування та контролю / А.М. Безнаритний, В. І. Гаврилюк, О. О. Гололобова // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2014. – № 1 (49). – С. 22–32.
2. Гаврилюк, В. І. Ймовірна модель впливу тягового струму на рейкові кола / В. І. Гаврилюк, О. В. Завгородний // Інформац.-керуючі системи на залізничн. трансп. – 2010. – № 4. – С. 73–76.
3. Гололобова, О. О. Математичне моделювання вхідних пристроїв системи автоматичної локомотивної сигналізації / О. О. Гололобова // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2014. – № 2 (50). – С. 21–30.
4. Інструкція з технічного обслуговування локомотивних пристроїв автоматичної локомотивної сигналізації безперервного типу (АЛС) і пристроїв контролю пильності машиніста на залізницях України : ЦТ-ЦШ-0072. – К. : Укрзалізниця, 2004. – 92 с.
5. Казаков, А. А. Автоблокировка, локомотивная сигнализация и автостопа : учеб. для техникумов ж.-д. трансп. / А. А. Казаков, Е. А. Казаков. – 7-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1980. – 360 с.
6. Конструктивные параметры воздушных линий электропередачи [Electronic resource] / Школа для электрика. – 2010–2014. – Available at: <http://electricalschool.info/main/vl/829-konstruktivnye-parametry-vozdushnykh.html>. – Title from the screen. – Accessed : 08.06.2014.
7. Кошевий, С. В. Електромагнітні завади в межах рейкової лінії і їх вплив на роботу автоматичної локомотивної сигналізації / С. В. Кошевий, М. С. Кошевий, М. М. Бабаєв // Інформац.-керуючі системи на залізн. трансп. – 2008. – № 4. – С. 13.
8. Леонов, А. А. Техническое обслуживание автоматической локомотивной сигнализации / А. А. Леонов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1982. – 255 с.
9. Пат. 2475395 Россия, В61L25/02. Устройство защиты работы устройств автоматической локомотивной сигнализации от помех линий электропередач [Electronic resource] / Косолапов А. М., Полевой Ю. И. (Россия) ; заявитель и патентовладелец Гос. образоват. учреждение высшего профессионального образования «Самарский гос. ун-т путей сообщения». – Available at: <http://www.findpatent.ru/patent/247/2475395.html>. – Title from the screen. – Accessed: 08.06.2014.
10. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики : учеб. для вузов / Ю. А. Кравцов, В. Л. Нестеров, Г. Ф. Лекута и др. – М. : Транспорт, 1996. – 400 с.
11. Правила устройства электроустановок Украины 2009 (по разделам) [Electronic resource] / Охрана труда. – 2010-2012. – Available at: <http://www.ohranatruda.in.ua/pages/5004/>. – Title from the screen. – Accessed : 08.06.2014.
12. Электромагнитная совместимость устройств автоматической локомотивной сигнализации с тяговой сетью [Electronic resource] / Централ. науч. б-ка. – 2013. – Available at: [http://www.0ck.ru/transport/elektromagnitnaya\\_sovmestimost\\_ustrojstv.html](http://www.0ck.ru/transport/elektromagnitnaya_sovmestimost_ustrojstv.html). – Title from the screen. – Accessed : 08.06.2014.
13. Railroad-Highway Grade Crossing Handbook - Revised Second Edition August [Electronic resource] / U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration. – 2007. – Available at: [http://safety.fhwa.dot.gov/xings/com\\_roaduser/07010/sec04b.htm](http://safety.fhwa.dot.gov/xings/com_roaduser/07010/sec04b.htm). – Title from the screen. – Accessed : 08.06.2014.
14. Theeg, G. Railway Signalling and Interlocking. Intern. Compendium / G. Theeg, S. Vlasenko. – Hamburg : Eurailpress, 2009. – 448 p.

О. О. ГОЛОЛОВА<sup>1\*</sup>, В. І. ГАВРИЛЮК<sup>2</sup>, М. О. КОВРИГІН<sup>3</sup>, С. Ю. БУРЯК<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Автоматика, телемеханіка та зв'язок», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.+38 (056) 373 15 04, ел. пошта gololova\_oksana@i.ua, ORCID 0000-0003-1857-8196

<sup>2</sup>Каф. «Автоматика, телемеханіка та зв'язок», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.+38 (056) 373 15 04, ел. пошта gvi\_dp@mail.ru, ORCID 0000-0001-9954-4478

<sup>3</sup>Каф. «Автоматика, телемеханіка та зв'язок», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.+38 (056) 373 15 04

<sup>4</sup>Каф. «Автоматика, телемеханіка та зв'язок», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.+38 (056) 373 15 04, ел. пошта bsyur@mail.ru, ORCID 0000-0002-8251-785x

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ НА РОБОТУ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОЇ ЛОКОМОТИВНОЇ СИГНАЛІЗАЦІЇ НЕПЕРЕРВНОЇ ДІЇ

**Мета.** Робота має за мету проведення дослідження впливу електромагнітного поля високовольтної лінії електропередачі (ЛЕП) (750 кВ, 50 Гц) на рейкові кола і автоматичну локомотивну сигналізацію неперервної дії (АЛСН) з сигнальним струмом 50 Гц на ділянках зближення і перетину з ЛЕП та запропонувати можливі методи підвищення перешкодозахищеності АЛСН. **Методика.** Виміри проведені як засобами вагон-лабораторії, так і безпосередньо на рейкових лініях. В процесі досліджень вимірювали напруженість електричного поля в діапазоні промислової частоти безпосередньо під ЛЕП і в міру віддалення від неї по залізничній колії, а також тимчасові залежності кодів АЛСН з частотою сигнального струму 50 Гц безпосередньо під ЛЕП і на відстані від неї у відсутності поїзда та при його проходженні. **Результати.** Проведений аналіз основних причин виникнення збоїв і відмов у роботі АЛСН. Досліджено вплив електромагнітного поля високовольтної ЛЕП (750 кВ, 50 Гц) на рейкові кола і АЛСН із сигнальним струмом 50 Гц на ділянках зближення і перетину з ЛЕП. Розглянуто можливі методи підвищення перешкодозахищеності АЛСН. **Наукова новизна.** Проведено дослідження впливу ЛЕП 750 кВ на роботу автоматичної локомотивної сигналізації на перегонах Пришиб-Бурчацьк і Привільне-Слізарове Придніпровської залізниці в місцях косоного перетину залізничних колій і ЛЕП 750 кВ, 50 Гц. Виміряні напруженість електричного поля в діапазоні промислової частоти безпосередньо під ЛЕП і в міру віддалення від неї по залізничній колії, а також тимчасові залежності кодів АЛСН з частотою сигнального струму 50 Гц безпосередньо під ЛЕП і на відстані від неї у відсутності поїзда та при його проходженні. Виявлено, що коди АЛСН в рейкових ланцюгах під ЛЕП сильно спотворені, це, як показують виміри напруженості електричного поля, може бути пояснено впливом електромагнітного поля лінії електропередачі на рейкові кола. **Практична значимість.** Розглянуто можливі методи підвищення безпеки АЛСН шляхом підвищення достовірності передачі сигналів зі шляху на локомотив.

*Ключові слова:* система автоматичної локомотивної сигналізації; збій; відмова; високовольтна лінія електропередачі

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

О. А. ГОЛОЛОВОВА<sup>1\*</sup>, В. И. ГАВРИЛЮК<sup>2</sup>, М. А. КОВРИГИН<sup>3</sup>, С. Ю. БУРЯК<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Автоматика, телемеханика и связь», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, эл. почта gololobova\_oksana@i.ua, ORCID 0000-0003-1857-8196

<sup>2</sup>Каф. «Автоматика, телемеханика и связь», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, эл. почта gvi\_dp@mail.ru, ORCID 0000-0001-9954-4478

<sup>3</sup>Каф. «Автоматика, телемеханика и связь», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04

<sup>4</sup>Каф. «Автоматика, телемеханика и связь», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, эл. почта bsyur@mail.ru, ORCID 0000-0002-8251-785x

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА РАБОТУ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКОМОТИВНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

**Цель.** В работе необходимо провести исследования влияния электромагнитного поля высоковольтной линии электропередачи (ЛЭП) (750 кВ, 50 Гц) на рельсовые цепи и автоматическую локомотивную сигнализацию непрерывного действия (АЛСН) с сигнальным током 50 Гц на участках сближения и пересечения с ЛЭП, а также предложить возможные методы повышения помехозащищенности АЛСН. **Методика.** Измерения проведены как средствами вагон-лаборатории, так и непосредственно на рельсовых линиях. В процессе исследований измеряли напряженность электрического поля в диапазоне промышленной частоты непосредственно под ЛЭП и по мере удаления от нее по железнодорожному пути, а также временные зависимости кодов АЛСН с частотой сигнального тока 50 Гц непосредственно под ЛЭП и на удалении от нее в отсутствии поезда и при его прохождении. **Результаты.** Проведен анализ основных причин возникновения сбоя и отказов в работе АЛСН. Исследовано влияние электромагнитного поля высоковольтной ЛЭП (750 кВ, 50 Гц) на рельсовые цепи и АЛСН с сигнальным током 50 Гц на участках сближения и пересечения с ЛЭП. Рассмотрены возможные методы повышения помехозащищенности АЛСН. **Научная новизна.** Проведены исследования влияния ЛЭП 750 кВ на работу автоматической локомотивной сигнализации на перегонах Пришиб-Бурчацк и Привольное-Елизарово Приднепровской железной дороги в местах косоугольного пересечения железнодорожных путей и ЛЭП 750 кВ, 50 Гц. Измерены напряженность электрического поля в диапазоне промышленной частоты непосредственно под ЛЭП и по мере удаления от нее по железнодорожному пути, а также временные зависимости кодов АЛСН с частотой сигнального тока 50 Гц непосредственно под ЛЭП и на удалении от нее в отсутствии поезда и при его прохождении. Обнаружено, что коды АЛСН в рельсовых цепях под ЛЭП сильно искажены, что, как показывают измерения напряженности электрического поля, может быть объяснено влиянием электромагнитного поля линии электропередачи на рельсовые цепи. **Практическая значимость.** Рассмотрены возможные методы повышения безопасности АЛСН путем повышения достоверности передачи сигналов с пути на локомотив.

**Ключевые слова:** система автоматической локомотивной сигнализации; сбой; отказ; высоковольтная линия электропередачи

## REFERENCES

1. Beznarytnyi A.M., Havryliuk V.I., Hololobova O.O. Analiz stanu prystroiv avtoblokuvannia, metodiv yoho obsluhovuvannia ta kontroliu [Analysis of interlocking devices, methods of its maintenance and control]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2014, no. 1 (49), pp. 22-32.
2. Havryliuk V.I., Zavorodnyi O.V. Ymovirnisna model vplyvu tiahovoho strumu na reikovi kola [Probabilistic model of the influence of traction current on the track circuits]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti – Information and control systems on the railway transport*, 2010, issue 4, pp. 73-76.
3. Hololobova O.O. Matematychni modeliuvannia vkhidnykh prystroiv systemy avtomatichnoi lokomotyvnoi syhnalizatsii [Mathematical modeling of input devices of the system of automatic cab signalling]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Sci-*

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

- ence and Transport Progress. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2014, no. 2 (50), pp. 21-30.
4. Instruktsiia z tekhnichnoho obsluhovuvannya lokomotyvnykh prystroiv avtomatychnoi lokomotyvnoi syhnalizatsii bezperervnogo typu (ALS) i prystroiv kontroliu pylnosti mashynista na zaliznytsiakh Ukrainy [Maintenance instruction manual of locomotive devices of continuous automatic cab signalling (CACS) and control devices of driver's vigilance on the railways of Ukraine]. Kyiv, Ukrzaliznytsia Publ., 2004. 92 p.
  5. Kazakov A.A., Kazakov Ye.A. *Avtoblokirovka, lokomotivnaya signalizatsiya i avtostopy* [Automatic lock, locomotive signalling and train-stops]. Moscow, Transport Publ., 1980. 360 p.
  6. Konstruktivnyye parametry vozduzhnykh liniy elektroperedachi (The design parameters of aerial transmission lines). *Shkola dlya elektrika* (School for the electrician). 2010-2014. Available at: <http://electricalschool.info/main/vl/829-konstruktivnye-parametry-vozduzhnykh.html> (Accessed 08 June 2014).
  7. Koshevyi S.V., Koshevyi M.S., Babaiev M.M. Elektromahnitni zavady v mezhakh reikovoi linii i yikh vplyv na robotu avtomatychnoi lokomotyvnoi syhnalizatsii [Electromagnetic interference within the rail lines and their effect on automatic cab signalling]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti – Information and control systems on the railway transport*, 2008, issue 4, p. 13.
  8. Leonov A.A. *Tekhnicheskoye obsluzhivaniye avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii*. [Maintenance manual of automatic cab signalling]. Moscow, Transport Publ., 1982. 255 p.
  9. Kosolapov A.M., Polevoy Yu.I. *Ustroystvo zashchity raboty ustroystv avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii ot pomekh liniy elektroperedach* [Protection equipment for devices operation of automatic cab signalling from transmission lines noise]. Patent RU, no. 2475395 Available at: <http://www.findpatent.ru/patent/247/2475395.html> (Accessed 08 June 2014).
  10. Kravtsov Yu.A., Nesterov V.L., Lekuta G.F. *Sistemy zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki* [Railway automation systems and telemechanics]. Moscow, Transport Publ., 1996. 400 p.
  11. Pravila ustroystva elektroustanovok Ukrainy 2009 (po razdelam) (Rules for arranging of electric installations of Ukraine in 2009 (by categories)). *Ohrana truda – Health and Safety*, 2010-2012. Available at: <http://www.ohranatruda.in.ua/pages/5004/> (Accessed 08 June 2014).
  12. *Elektromagnitnaya sovместimost ustroystv avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii s tyagovoy setyu* (EMC of automatic cab signaling devices with electric traction network). 2013. Available at: [http://www.0ck.ru/transport/elektromagnitnaya\\_sovместimost\\_ustroystv.html](http://www.0ck.ru/transport/elektromagnitnaya_sovместimost_ustroystv.html) (Accessed 08 June 2014).
  13. Railroad-Highway Grade Crossing Handbook - Revised Second Edition August. Department of Transportation. Federal Highway Administration. 2007. Available at: [http://safety.fhwa.dot.gov/xings/com\\_roaduser/07010/sec04b.htm](http://safety.fhwa.dot.gov/xings/com_roaduser/07010/sec04b.htm) (Accessed 08 June 2014).
  14. Theeg G., Vlasenko S. *Railway Signalling and Interlocking*. International Compendium. Hamburg, Eurailpress Publ., 2009. 448 p.

*Prof. V. Y. Havryliuk, D. Sc. (Phys&Math); Prof. O. V. Kovalenko, D. Sc. (Phys&Math) recommended this article to be published*

Received: June 09, 2014

Accepted: Aug. 21, 2014

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

УДК 622.012: 502.3

Н. Н. БЕЛЯЕВ<sup>1\*</sup>, А. В. БЕРЛОВ<sup>2\*</sup>, А. В. ШЕВЧЕНКО<sup>3\*</sup>

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

<sup>2\*</sup>Каф. «Аэрогидромеханика и энергомассоперенос», Днепропетровский национальный университет имени О. Гончара, ул. Казакова, 18, корп. № 14, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 760 92 07, эл. почта berlov@bigmir.net, ORCID 0000-0002-7442-0548

<sup>3\*</sup>Главное управление МЧС Украины в Днепропетровской области, ул. Короленко, 4, Днепропетровск, Украина, 49600, тел. +38 (056) 744 25 87, эл. почта dnipro@fireman.dp.ua, ORCID 0000-0001-9907-3610

### МОДЕЛИРОВАНИЕ АВАРИЙНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ В ХРАНИЛИЩЕ ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА

**Цель.** Разработка прикладной численной модели для расчета динамики загрязнения атмосферы над городом при чрезвычайной ситуации в хранилище твердого ракетного топлива, сопровождающейся выбросом в атмосферу продуктов горения. **Методика.** Для численного моделирования процесса переноса опасного вещества (продукта горения твердого ракетного топлива) в атмосфере применяется уравнение конвективно-диффузионного переноса примеси. Данное уравнение учитывает рассеивание в атмосфере опасного вещества за счет ветра и атмосферной диффузии. Для расчета процесса загрязнения воздушной среды внутри помещений при затекании в них загрязненного атмосферного воздуха используется балансовая модель. Эта модель учитывает величину воздухообмена в помещении, объем помещения и концентрацию опасного вещества во входящем в помещение потоке. Величина фильтрующегося воздуха в помещении рассчитывается с помощью эмпирической модели. Для численного интегрирования уравнения переноса примеси в атмосфере применяется неявная разностная схема расщепления. На основе построенной численной модели создан код на алгоритмическом языке Фортран. Проведен вычислительный эксперимент по оценке уровня загрязнения атмосферы над г. Павлоградом и воздушной среды внутри помещений. **Результаты.** Предложенная модель позволяет оперативно рассчитать загрязнение атмосферы при выбросе химически опасного вещества. Модель позволяет определить размеры зоны токсичного поражения людей. С помощью разработанной численной модели выполнена оценка риска поражения людей в селитебной зоне г. Павлоград. **Научная новизна.** Создана численная модель, позволившая оперативно оценить риск токсичного поражения людей в г. Павлоград в случае чрезвычайной ситуации в хранилище твердого ракетного топлива. **Практическая значимость.** Разработанная численная модель может быть использована для оценки риска поражения людей на открытом воздухе или внутри помещений при эмиссии химически опасных веществ в атмосферу. С помощью разработанной численной модели решена задача по оценке последствий для населения при возгорании твердого ракетного топлива в хранилище.

**Ключевые слова:** загрязнение атмосферы; ракетное топливо; инфильтрация опасных веществ в помещение; численное моделирование

#### Введение

На территории Павлоградского химического завода (рис. 1) находятся хранилища (рис. 2)

с твердым ракетным топливом ракеты РС-22 (рис. 3). В случае чрезвычайной ситуации и возгорания топлива в атмосферу начнут посту-

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

пять химически опасные вещества – продукты горения. Исходя из того, что внутри хранилищ находится достаточно большая масса топлива и сами хранилища располагаются вблизи города (см. рис. 1) возникает актуальная задача – прогноз динамики загрязнения атмосферы при чрезвычайной ситуации и оценка риска токсичного поражения людей в городе [1–4, 6, 7].



Рис. 1. Положение хранилища твердого ракетного топлива (зона А) возле г. Павлоград

Fig. 1. Storage of solid rocket propellant (zone A) near city Pavlograd



Рис. 2. Здания – хранилища с твердым ракетным топливом на территории Павлоградского химического завода

Fig. 2. Buildings with a solid rocket propellant on the territory of Pavlograd chemical plant

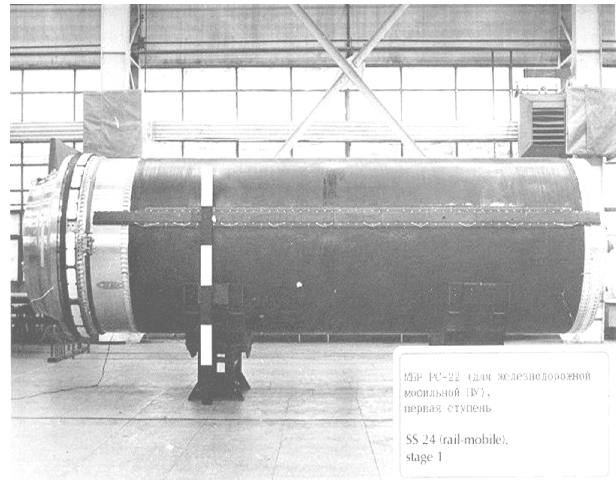


Рис. 3. Твердое ракетное топливо первой ступени ракеты РС-22

Fig. 3. Solid rocket propellant of the first stage of rocket RS-22

### Цель

Цель работы – разработка прикладной численной модели для расчета процесса загрязнения атмосферы при горении твердого ракетного топлива и прогнозирование уровня загрязнения атмосферного воздуха в жилой зоне в случае чрезвычайной ситуации в хранилище.

*Анализ публикаций.* В Украине в настоящее время для прогноза последствий аварий на химически опасных объектах широко используется нормативная методика, которая основана на ряде эмпирических зависимостей. Недостатком этой методики является отсутствие прямого учета скорости ветра, атмосферной диффузии, времени эмиссии химически опасного вещества на процесс формирования зоны загрязнения. Кроме этой модели в Украине применяются аналитические модели и в частности модель Гаусса. Модели данного класса позволяют оперативно рассчитать зону загрязнения, но для модельных ситуаций типа точечный постоянно действующий источник или точечный мгновенный выброс [8]. Для практики важно иметь более гибкие математические модели, которые позволяли бы прогнозировать зону химического загрязнения с максимальным учетом физических факторов, влияющих на процесс переноса и позволяющих оценивать риск токсичного поражения людей как на открытом пространстве, так и внутри помещений.

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

*Постановка задачі.* Рассматривается рассеивание в атмосфере токсичного вещества (хлористый водород), попавшего в нее при чрезвычайной ситуации в хранилище твердого ракетного топлива (рис. 2). Известна интенсивность выброса загрязняющего вещества и продолжительность эмиссии опасного вещества по времени (время горения). Необходимо исследовать динамику загрязнения атмосферы при заданных параметрах метеоситуации и оценить риск токсичного поражения людей как на открытом пространстве, так и внутри помещений.

**Методика**

Процесс рассеивания токсичных продуктов горения твердого ракетного топлива в атмосфере основывается на применении осредненного по высоте переноса  $H$  уравнения Г. И. Марчука [2–5; 8–10; 12, 14]

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + Q(t) \delta(x - x_0) \delta(y - y_0), \quad (1)$$

где  $C$  – концентрация примеси (опасное вещество);  $u, v$  – компоненты вектора скорости движения ветрового потока;  $\mu = (\mu_x, \mu_y)$  – коэффициенты атмосферной диффузии;  $t$  – время;  $Q$  – интенсивность эмиссии;  $x_0, y_0$  – координаты источника эмиссии;  $\delta(x - x_0), \delta(y - y_0)$  – дельта функция Дирака.

Постановка краевых условий для данного уравнения рассмотрена в работах [2, 5, 8].

*Модель инфильтрации загрязненного наружного воздуха в здание.* В данной работе процесс загрязнения воздушной среды в помещении описывается следующим уравнением (нульмерная модель) [13, 15]

$$V \frac{dC}{dt} = QC_{np} - QC, \quad (2)$$

где  $C_{np}$  – концентрация загрязнителя в приточном воздухе;  $C$  – концентрация опасного вещества в выходящем из помещения воздухе;  $V$  – объем комнаты;  $Q$  – интенсивность воздухообмена;  $t$  – время. При применении модели

(2) полагается, что концентрация загрязнителя в помещении равна  $C$ .

Интенсивность воздухообмена рассчитывается с помощью следующего уравнения [15]

$$Q = ELA \sqrt{f_s^2 |\Delta T| + f_w^2 U^2}, \quad (3)$$

где  $f_s$  – параметр, учитывающий процесс инфильтрации через потолок и пол;  $f_w$  – параметр, учитывающий наличие возле здания иных объектов;  $ELA$  – площадь инфильтрации;  $\Delta T$  – перепад температур между температурой внутри помещения и снаружи;  $U$  – скорость ветра. При расчетах полагалось, что параметры  $f_s, f_w$  равны 0,15.

*Численное интегрирование моделирующих уравнений.* Для численного интегрирования уравнения (1) используется попеременно – треугольная разностная схема расщепления [2, 12]. Для численного интегрирования уравнения (2) используется метод Эйлера [11].

*Практическая реализация численной модели.* Построенная численная модель была использована для экспресс-прогноза уровня загрязнения атмосферного воздуха над г. Павлоград при чрезвычайной ситуации в хранилище твердого ракетного топлива, расположенного на территории Павлоградского химического завода. Численное моделирование выполнялось при следующих исходных данных: размеры расчетной области 12 000 м × 6 300 м; интенсивность эмиссии – 100 ед (безразмерная); выброс осуществляется в течение 900 с; загрязняющее вещество – хлористый водород; высота усреднения – 600 м; скорость ветра – 6 м/с; направление ветра – северо-восточное (это направление можно считать одним из наиболее опасных, с той точки зрения, что при данном направлении в зону действия источника попадают жилые районы города), значение коэффициентов атмосферной диффузии по обоим направлениям – 5 м<sup>2</sup>/с; объем комнаты – 51 м<sup>3</sup>; площадь щелей в комнате, через которые происходит инфильтрация загрязненного наружного воздуха – 0,0055 м<sup>2</sup>; разница в температуре наружного атмосферного воздуха и воздуха внутри помещения – 5 °С. Координаты источника эмиссии (хранилища)  $x = 1\,200$  м,  $y = 3\,150$  м; координаты первого рецептора – здания в начале селитебной зоны

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

г. Павлограда (рис. 2)  $x = 6\,480$  м,  $y = 2\,850$  м; координати второго рецептора – здания в конце селитебной зоны г. Павлограда (рис. 1)  $x = 11\,280$  м,  $y = 2\,850$  м. На рис. 4 положение рецепторов схематично показано белым «кружком» с цифрой 1 и 2.

## Результаты

Рассмотрим результаты моделирования, полученные на базе разработанной численной модели. На приведенных ниже рисунках представлена динамика формирования зоны загрязнения в атмосфере для различных моментов времени после начала горения топлива.

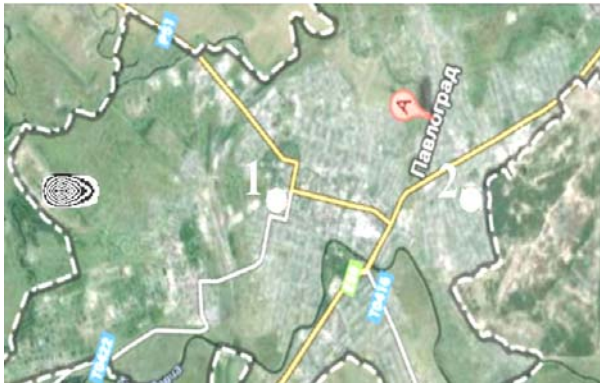


Рис. 4. Зона загрязнения через 3 минуты после начала горения топлива:

1 – положение первого рецептора в жилой зоне,  
2 – положение второго рецептора

Fig. 4. Contamination area for time  $t = 3$  min after the beginning of the accident:

1 – position of the first receptor in a urban district,  
2 – position of the second receptor



Рис. 5. Зона загрязнения через 7 минут после начала горения топлива

Fig. 5. Contamination area for time  $t = 7$  min after the beginning of the accident



Рис. 6. Зона загрязнения через 15 минут после начала горения топлива

Fig. 6. Contamination area for time  $t = 15$  min after the beginning of the accident



Рис. 7. Зона загрязнения через 19 минут после начала горения топлива

Fig. 7. Contamination area for time  $t = 19$  min after the beginning of the accident



Рис. 8. Зона загрязнения через 21 минуту после начала горения топлива (процесс горения прекратился)

Fig. 8. Contamination area for time  $t = 21$  min after the beginning of the accident (the process of burning has completed)

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Как видно из рис. 4–6, в течение промежутка времени, когда процесс горения продолжается, зона загрязнения интенсивно вытягивается по направлению ветра, а максимум концентрации и зона загрязнения с наибольшим градиентом концентрации находится непосредственно вблизи хранилища. После прекращения горения максимум концентрации находится в центре облака, которое мигрирует через город (рис. 7, 8).

*Оценка риска токсичного поражения людей в селитебной зоне.* Поскольку крайне важным вопросом является прогноз токсичного поражения людей в городе, то в разработанной программе осуществляется расчет и вывод на печать концентрации опасного вещества в любой ячейке, находящейся на территории селитебной зоны. Ниже в таблицах представлены прогнозные данные относительно величины концентрации опасного вещества на открытой местности и внутри помещения для двух рецепторов, которые условно обозначены цифрой 1, 2 на рис. 4. Это начало селитебной зоны города и конец селитебной зоны.

Таблица 1

**Среднее значение концентрации опасного вещества в атмосферном воздухе в начале селитебной зоны г. Павлоград**

Table 1

**The median concentration of hazardous substances in the air at the beginning of the Pavlograd residential areas**

Время после аварии в хранилище, мин	Концентрация опасного вещества в атмосферном воздухе, С [мг/м <sup>3</sup> ]	Превышение ПДК (С/ПДК)
20	15,6	78
30	18,02	90
40	1,49	7,4
50	0,02	0,1

Как видно из данных таблиц, в случае аварийного выброса на территории Павлоградского химического завода, создается риск токсичного поражения людей в г. Павлоград с летальным исходом.

Следует отметить, что для задач рассматриваемого класса особую важность представляют оценка риска смертельного поражения людей

при эмиссии химически опасных веществ в атмосферу. Под риском здесь будем понимать количество людей попавших в зону, где концентрация химического вещества превышает величину поражающей концентрации, которая для хлористого водорода составляет порядка 4,5 мг/м<sup>3</sup>. В состав разработанного кода входит подпрограмма «ZONA», которая рассчитывает, где в области концентрация загрязнителя равна или превышает это пороговое значение. На основе этих данных формируется массив, который определяет те разностные ячейки, которые соответствуют зоне поражения. На основе этой информации на карте строится данная зона поражения, которая позволяет быстро оценить размеры зоны, опасной для жизни.

Таблица 2

**Значение концентрации опасного вещества внутри помещения (здание находится в начале селитебной зоны г. Павлоград)**

Table 2

**Concentration value of the dangerous substance inside the premises (the building is located at the beginning of the Pavlograd residential areas)**

Время после аварии в хранилище, мин	Концентрация опасного вещества внутри помещения, С [мг/м <sup>3</sup> ]	Превышение ПДК (С/ПДК)
20	1,28	6,43
30	4,86	24
40	5,20	26
50	4,35	21

Таблица 3

**Среднее значение концентрации опасного вещества в атмосферном воздухе в конце селитебной зоны г. Павлоград**

Table 3

**The median concentration of hazardous substances in the air at the end of the Pavlograd residential areas**

Время после аварии в хранилище, мин	Концентрация опасного вещества в атмосферном воздухе, С [мг/м <sup>3</sup> ]	Превышение ПДК (С/ПДК)
35	17,8	89
50	6,1	30
60	0,48	2,4

Таблица 4

**Значение концентрации опасного вещества внутри помещения (здание находится в конце селитебной зоны г. Павлоград)**

Table 4

**Concentration value of the dangerous substance inside the premises (the building is at the end of the Pavlograd residential areas)**

Время после аварии в хранилище, мин	Концентрация опасного вещества внутри помещения, С [мг/м <sup>3</sup> ]	Превышение ПДК (С/ПДК)
35	2,06	10,3
50	5,14	25
60	4,60	23

Кроме этого указанная подпрограмма сразу рассчитывает площадь зоны поражения и зная среднюю плотность населения для данного города (1 855 человек/км<sup>2</sup>) определяет количество погибших людей:

$$D = S'_D P, \quad (4)$$

где  $D$  – количество погибших людей;  $S'_D$  – площадь зоны поражения;  $P$  – плотность населения.



Рис. 9. Зона смертельного поражения на открытой местности для момента времени  $t = 25$  минут после аварии (в данной зоне концентрация опасного вещества была равна или превысила 4,5 мг/м<sup>3</sup>), скорость ветра 6 м/с

Fig. 9. Zone of hitting for time  $t = 25$  min after the accident (in this zone the concentration of hazardous substance was equal to or exceeded 4.5 mg/m<sup>3</sup>), speed of wind is 6 m/sec

Если рассматривается ситуация, когда люди находятся на открытом пространстве, то в зону

смертельного поражения попадает порядка 5 400 человек. Зона смертельного поражения для указанной метеоситуации показана на рис. 9.

Изменения скорости ветра оказывает естественное влияние на темп формирования зоны поражения. Так на рис. 10 показана эта зона для скорости ветра 4 м/с. Сравнивая этот рисунок с предыдущим, видим, что длина зоны поражения к моменту времени  $t = 25$  минут меньше, чем для предыдущего сценария.



Рис. 10. Зона смертельного поражения на открытой местности для момента времени  $t = 25$  минут после аварии (в данной зоне концентрация опасного вещества была равна или превысила 4,5 мг/м<sup>3</sup>), скорость ветра 4 м/с

Fig. 10. Zone of hitting for time  $t = 25$  min after the accident (in this zone the concentration of hazardous substance was equal to or exceeded 4.5 mg/m<sup>3</sup>), speed of wind is 4 m/sec

Таким образом, в случае чрезвычайной ситуации в хранилище с твердым ракетным топливом возможно массовое поражение людей в селитебной зоне.

В заключение отметим, что расчет задачи на базе разработанной модели составляет порядка 2 с компьютерного времени.

#### Научная новизна и практическая значимость

Создана численная модель, позволяющая оперативно рассчитать динамику загрязнения атмосферного воздуха и риска токсичного поражения людей при чрезвычайной ситуации в хранилище с твердым ракетным топливом.

Особенностью построенной модели является использование стандартной исходной информации и быстрота в получении расчетных данных, что важно при проведении серийных расчетов по оценке размеров зон поражения.

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

**Выводы**

В работе представлена новая численная модель для расчета процесса загрязнения атмосферы при горении твердого ракетного топлива и прогнозирования уровня загрязнения атмосферного воздуха в селитебной зоне над г. Павлоград в случае чрезвычайной ситуации в хранилище.

Для расчета рассеивания опасного вещества в атмосферном воздухе используется двухмерное уравнение переноса примеси. Дальнейшее развитие данной тематики следует проводить в направлении создания 3-D модели аварийного загрязнения атмосферы при чрезвычайной ситуации в хранилище.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Авария и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий : в 5-ти кн. : учеб. пособие / ред. В. А. Котляревский, А. В. Забегаев. – М. : Изд-во АСВ, 2001.
2. 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.
3. Беляев, Н. Н. Прогнозирование загрязнения приземного слоя атмосферы при горении твердого ракетного топлива в хранилище / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов // Зб. наук. пр. НГУ. – Д., 2013. – № 42. – С.160–167.
4. Берлов, А. В. Расчет загрязнения приземного слоя атмосферы при горении твердого ракетного топлива / А. В. Берлов // Наук. вісн. буд-ва : зб. наук. пр. – Х., 2014. – № 1 (75). – С. 185–189.
5. Берлянд, М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Л. : Гидрометеоздат, 1985. – 273 с.
6. Гусев, Н. Г. Радиоактивные выбросы в биосфере / Н. Г. Гусев, В. А. Беляев. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 257 с.
7. Израэль, Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды / Ю. А. Израэль. – М. : Гидрометеоздат, 1984. – 560 с.
8. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Марчук Г. И. – М. : Наука, 1982. – 320 с.
9. 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. – Д., 2009. – Вип. 27. – С. 138–142.
10. Русакова, Т. И. Прогнозирование загрязнения воздушной среды от автотранспорта на улицах и в микрорайонах города / Т. И. Русакова // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2013. – № 6 (48). – С. 32–45.
11. Самарский, А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – М. : Наука, 1983. – 616 с.
12. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – К. : Наук. думка, 1997. – 368 с.
13. Эльтерман, В. М. Вентиляция химических производств / В. М. Эльтерман. – 3-е изд., перераб. – М. : Химия. – 1980. – 288 с.
14. Biliaiev, M. M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography / M. M. Biliaiev, M. M. Kharytonov // Air Pollution Modeling and its Application XXI, NATO SPS Series C : Environmental Security, 2012. – P. 87–91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8\_15.
15. Effectiveness of Urban Shelter-in-Place II: Residential Districts / W. R. Chan, W. W. Nazaroff, P. N. Price, A. J. Gadgil. – Atmospheric Environment. – 2007. – Iss. 41. – P. 4962–4976. doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.04.059.

М. М. БІЛЯЄВ<sup>1\*</sup>, О. В. БЕРЛОВ<sup>2\*</sup>, О. В. ШЕВЧЕНКО<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</sup>Каф. «Аерогідромеханіка та енергомасоперенос». Дніпропетровський національний університет імені О. Гончара, вул. Казакова, 18, корп. № 14, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 760 92 07, ел. пошта berlov@bigmir.net, ORCID 0000-0002-7442-0548

<sup>3\*</sup>Головне управління ДСНС України у Дніпропетровській області, вул. Короленко, 4, Дніпропетровськ, Україна, 49600, тел. +38 (056) 744 25 87, ел. пошта dnipro@fireman.dp.ua, ORCID 0000-0001-9907-3610

## МОДЕЛЮВАННЯ АВАРІЙНОГО ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ ПРИ НАДЗВИЧАЙНІЙ СИТУАЦІЇ В СХОВИЩІ ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ПАЛИВА

**Мета.** Розробка прикладної чисельної моделі для розрахунку динаміки забруднення атмосфери над містом при надзвичайній ситуації в сховищі твердого ракетного палива, що супроводжується викидом в атмосферу продуктів горіння. **Методика.** Для чисельного моделювання процесу перенесення небезпечної речовини (продукту горіння твердого ракетного палива) в атмосфері застосовується рівняння конвективно-дифузійного перенесення домішки. Це рівняння враховує розсіювання в атмосфері небезпечної речовини за рахунок вітру та атмосферної дифузії. Для розрахунку процесу забруднення повітряного середовища усередині приміщень при затіканні в них забрудненого атмосферного повітря використовується балансова модель. Ця модель враховує величину повітрообміну в приміщенні, об'єм приміщення та концентрацію небезпечної речовини в потоці, що входить в приміщення. Величина повітря, що фільтрується, в приміщенні розраховується за допомогою емпіричної моделі. Для чисельного інтегрування рівняння перенесення домішки в атмосфері застосовується неявна різницева схема. На основі побудованої чисельної моделі створений код на алгоритмічній мові Фортран. Проведено обчислювальний експеримент із оцінки рівня забруднення атмосфери над м. Павлоградом і повітряного середовища усередині приміщень. **Результати.** Запропонована модель дозволяє оперативно розрахувати забруднення атмосфери при викиді хімічно небезпечної речовини. Модель дозволяє визначити розміри зони токсичного ураження людей. За допомогою розробленої чисельної моделі виконана оцінка ризику ураження людей в селітебній зоні м. Павлоград. **Наукова новизна.** Створена чисельна модель, що дозволила оперативно оцінити ризик токсичного ураження людей м. Павлоград у разі надзвичайної ситуації в сховищі твердого ракетного палива. **Практична значимість.** Розроблена чисельна модель може бути використана для оцінки ризику ураження людей на відкритому повітрі або усередині приміщень при емісії хімічно небезпечних речовин в атмосферу. За допомогою розробленої чисельної моделі вирішено завдання з оцінки наслідків для населення при займанні твердого ракетного палива у сховищі.

*Ключові слова:* забруднення атмосфери; ракетне паливо; інфільтрація небезпечних речовин в приміщенні; чисельне моделювання

М. М. BILIAIEV<sup>1\*</sup>, A. V. BERLOV<sup>2\*</sup>, A. V. SHEVCHENKO<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, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</sup>Dep. «Aerohydrodynamics and Masstransfer», Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, Kazakova St., 18, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 760 92 07, e-mail berlov@bigmir.net, ORCID 0000-0002-7442-0548

<sup>3\*</sup>Main Administration of Ministry of Emergencies of Ukraine in the Dnepropetrovsk region, Korolenko St., 4, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49600, tel. +38 (056) 744 25 87, e-mail dnipro@fireman.dp.ua, ORCID 0000-0001-9907-3610

## SIMULATION OF THE ACCIDENTAL POLLUTION AFTER THE EMERGENCY IN TO THE STORAGE OF ROCKET SOLID PROPELLANT

**Purpose.** Development of the operational numerical model to compute contamination of the atmosphere over Pavlograd city in the case of solid rocket propellant ignition at the storage. **Methodology.** To simulate the toxic

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

chemical dispersion (product of the solid rocket propellant firing) the equation of convective-diffusion transfer is used. This equation takes into account the toxic chemical dispersion in the atmosphere by wind and the atmosphere diffusion. To calculate the process of the indoor contamination in the case of the contaminated air infiltration a balance model is used. This model takes into account the ventilation flow rate, volume of the room, concentration of toxic chemical in the inlet air. To compute the ventilation flow rate the empirical model was used. The implicit change–triangle difference scheme was used for the numerical integration of the governing equation. FORTRAN language was used to develop code on the basis of the created numerical model. On the basis of the developed numeral model numerical experiment was carried out which allowed to estimate the level of atmosphere contamination in Pavlograd city. **Findings.** The operational model allows predicting quickly the hitting zone dimensions. The developed model was used to estimate risk of people toxic hitting in the residential districts of Pavlograd city. **Originality.** A numeral model allows to estimate the risk of toxic hitting of people in Pavlograd city in the case of an accident at the of solid rocket propellant storage. **Practical value.** The developed numeral model can be used for the quick estimation of risk for people in the city after toxic chemical release at the solid propellant storage. The developed numerical model solves the problem to assess the consequences for the population at ignition of solid rocket propellant in storage.

*Keywords:* contamination of atmosphere; rocket propellant; infiltration of toxic chemical into the apartment; numeral simulation

## REFERENCES

1. Kotlyarevskiy V.A., Zabegayev A. V. *Avariya i katastrofy. Preduprezhdeniye i likvidatsiya posledstviy*. V 5-ti knigakh [Accident and disasters. Warning and liquidation of consequences. Five books]. Moscow, ACB Publ., 2001.
2. Belyayev N.N., Gunko Ye.Yu., Mashykhina P.B. *Matematicheskoye modelirovaniye v zadachah ekologicheskoi bezopasnosti i monitoringa chrezvychaynykh situatsiy* [A mathematical modeling in the tasks of ecological safety and monitoring of emergencies]. Dnipropetrovsk, Aktsent PP Publ., 2013. 159 p.
3. Belyayev N.N., Berlov A.V. *Prognozirovaniye zagryazneniya prizemnogo sloya atmosfery pri gorenii tverdogo raketnogo topliva v khranilishche* [Prediction of ground-level air pollution at burning of solid rocket propellant in storage]. *Zbirnyk naukovykh prats NGU* [Proc. of NMU], 2013, no. 42, pp. 160-167.
4. Berlov A.V. *Raschet zagryazneniya prizemnogo sloya atmosfery pri gorenii tverdogo raketnogo topliva* [Calculation of ground-level air pollution at burning of solid rocket propellant]. *Zbirnyk naukovykh prats «Naukovyi visnyk budivnytstva»* [Proc. «Scientific Bulletin of construction»], Kharkiv, 2014, issue 1 (75), pp. 185-189.
5. Berlyand M.Ye. *Prognoz i regulirovaniye zagryazneniya atmosfery* [Prognosis and controlling of atmosphere pollution]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985. 273 p.
6. Gusev N.G., Belyayev V.A. *Radioaktivnyye vybrosy v biosfere* [Radioactive emissions in biosphere]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 257 p.
7. Izrayel Yu.A. *Ekologiya i kontrol sostoyaniya prirodnoy sredy* [Ecology and control of the natural environment state]. Moscow, Gidrometeoizdat Publ., 1984. 560 p.
8. Marchuk G.I. *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy* [Mathematical modeling in the environmental problem]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 320 p.
9. Mashikhina P.B. *Modelirovaniye rasprostraneniya primesi v atmosfere s uchetom relyefa mestnosti* [Simulation of impurity spread in the atmosphere in view of the terrain]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 27, pp. 138-142.
10. Rusakova T.I. *Prognozirovaniye zagryazneniya vozdushnoy sredy ot avtotransporta na ulitsakh i v mikrorayonakh goroda* [Prediction of air pollution from motor transport in city streets and districts]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2013, no. 6 (48), pp. 32-44.
11. Samarskiy A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* [The theory of difference schemes]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 616 p.
12. Zgurovskiy M.Z., Skopetskiy V.V., Khrushch V.K., Belyayev N.N. *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede* [Numerical modeling of pollution spread in the environment]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1997. 368 p.
13. Elterman V.M. *Ventilyatsiya khimicheskikh proizvodstv* [Ventilation of chemical productions]. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 288 p.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

---

14. Biliaiev M.M., Kharytonov M.M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *Air Pollution Modeling and it's Application XXI*, NATO SPS Series C: Environmental Security Springer, 2012, pp.87-91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8\_15.
15. Chan W.R., Nazaroff W.W., Price P.N., Gadgil A.J. Effectiveness of Urban Shelter-in-Place II: Residential Districts. *Atmospheric Environment*, 2007, issue 41, pp. 4962–4976. doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.04.059.

*Статья рекомендована к публикации д.физ.-мат.н., проф. В. Д. Пичуговым (Украина); д.физ.-мат.н., проф. О. Г. Гоманом (Украина)*

Надійшла до редколегії: 20.06.2014

Прийнята до друку: 20.09.2014

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

УДК 656.025.2

Т. М. ГРУШЕВСЬКА<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Управління процесами перевезень», Державний економіко-технологічний університет транспорту, вул. М. Лукашевича, 19, Київ, Україна, 03049, тел. +38 (044) 409 24 40, ел. пошта tanya.grushevskaya@yandex.ua, ORCID 0000-0002-8480-2283

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ПАСАЖИРОПОТОКІВ У ЗАЛІЗНИЧНОМУ ПРИМІСЬКОМУ СПОЛУЧЕННІ

**Мета.** Дослідження спрямовано на визначення закономірностей змін населеності составів поїздів та підходу приміських пасажирів на посадку для визначення техніко-технологічних параметрів приміських пасажирських перевезень. **Методика.** Для досягнення поставленої мети були визначені методи дослідження населеності составів, основні періоди підходу пасажирів на платформу, що впливають на населеність вагонів у різні періоди доби. **Результати.** На основі проведених досліджень можна здійснювати комплексні, системно пов'язані розрахунки важливих техніко-технологічних параметрів приміських пасажирських перевезень. До таких параметрів можна віднести: параметри графіка руху поїздів, населеність вагонів, кількість квиткових кас, розміри пасажирських платформ, кількість та розташування на них турнікетів, забезпечення зручної та безпечної посадки пасажирів на приміські поїзди. Запропоновано використовувати відносні показники населеності составів поїздів, а також узагальнені теоретичні залежності інтенсивності підходу пасажирів на посадку в поїзди. Наведено графіки, де існує нерівномірність попиту перевезень, який оцінюється фактичною населеністю составів поїздів, що встановлювалася шляхом безпосередніх натурних спостережень у вагонах поїздів. Результати дослідження погодинного розподілу пасажиропотоку дозволили встановити, що нерівномірність за періодами доби має явно виражений характер прояву, особливо у ранковий та вечірній періоди «пік». Розміри перевезень у ці години не відповідають комфортним умовам проїзду пасажирів у приміських електропоїздах. **Наукова новизна.** Запропоновано новий підхід щодо визначення закономірностей змін населеності приміських поїздів, підходу приміських пасажирів на платформу. Представлено співставлення реальних кривих розподілу та апроксимованих теоретичних кривих інтенсивності підходу пасажирів та заповнення поїзда, а також формули, за допомогою яких описуються виявлені закономірності. Ці формули можуть бути використані для побудови відповідних математичних моделей, що описують процес підходу пасажирів на посадку у поїзди. **Практична значимість.** Використання встановлених закономірностей дозволить в подальшому прогнозувати кількість перевезених пасажирів у конкретних поїздах, оптимізуючи при цьому розклад руху приміських поїздів, інтервал між поїздами, а також необхідну кількість рухомого складу.

*Ключові слова:* населеність вагонів; міжпоїзний інтервал; приміські пасажирські перевезення; пасажиропотік; інтервали підходу пасажирів

#### Вступ

Характерною особливістю приміських пасажирських перевезень, порівняно з іншими видами залізничних пасажирських сполучень, є: коливання пасажиропотоків по годинах доби, днях, місяцях і сезонах, перевезення великої

кількості пасажирів на короткі відстані, різке падіння пасажиропотоку по мірі віддалення від головної станції. Все це значно ускладнює раціональну організацію цих перевезень. До того ж, морально застаріла матеріально-технічна база зношена вже більше, ніж на 90 %, онов-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

лення парку відбувається дуже повільними темпами. У такій ситуації залізниці вимушені скорочувати кількість приміських поїздів на багатьох напрямках. Відповідно найбільша кількість дорікань пасажирів припадає саме на приміські перевезення, що призводить до поступової втрати позиції лідера приміських перевезень пасажирів у конкурентній боротьбі з маршрутним автотранспортом, який на сьогодні має успішний розвиток.

За досвідом німецьких та інших залізниць, які найбільш успішно пройшли шлях реформування залізничного транспорту, саме у сфері залізничних регіональних і приміських перевезень може відбуватися серйозна конкуренція між перевізниками державної, приватної, змішаної форм власності і навіть іноземними перевізниками. [12, 13]. В таких умовах для забезпечення конкурентоспроможності майбутніх вітчизняних залізничних компаній приміських перевезень буде критично важливим забезпечити оптимальне використання рухомого складу як за населеністю, так і за пробігом (що є взаємопов'язаними показниками). Обидва ці показники безпосередньо впливають на ефективність використання рухомого складу та умови проїзду пасажирів, які зумовлюють привабливість транспортних послуг приміської компанії порівняно з іншими перевізниками.

Ефективне використання пасажирського рухомого складу у майбутніх умовах реформування залізничного транспорту, коли доступ до інфраструктури залізниць для операторів як вантажних, так і пасажирських перевезень [14] буде здійснюватись за плату, за прикладом європейських, американських та інших залізниць, потягне за собою також і найбільш ефективне використання наданої перевізникові частки пропускної спроможності («нитки графіка») [14].

Разом з цим підвищуються вимоги до якості обслуговування пасажирів, швидкості та зручності перевезень для повного задоволення вимог та бажань споживачів. Тому ефективна організація приміських перевезень і високоякісне обслуговування пасажирів у сучасних умовах перехідного розвитку галузі неможливі без введення нових управлінських підходів у систему організації приміських пасажирських перевезень. Такі підходи повинні базуватись на виявленні закономірностей відправлення та перевезення пасажирів приміськими поїздами

і бути основою організації руху приміських поїздів з різною частотою, пасажиромісткістю і кількістю вагонів у составі, а також розрахунку кількості поїздів для освоєння пасажиропотоку на конкретній ділянці та ін.

У розвиток досліджень щодо вдосконалення нових технологій організації приміських залізничних пасажирських перевезень значний внесок зробили такі автори: Т. В. Бутько, Т. А. Веретенкова, О. М. Гудков, Д. В. Константінов, Ф. П. Кочнев, Н. В. Левадна, Д. В. Ломотько, В. І. Мацюк, В. К. Мироненко, Ю. О. Пазойський, Р. В. Панк, А. В. Прохорченко, Л. С. Рябуха, П. В. Самарцев, В. М. Самсонкін, В. І. Терзи, В. Г. Шубко, П. О. Яновський та інші [7, 9, 11].

Однак вищеперераховані напрацювання недостатньо враховують закономірності пасажиропотоків, зокрема погодинної нерівномірності, населеності приміських поїздів.

Дослідження цих вчених присвячені напрямку вирішення проблеми підвищення доходності приміських пасажирських перевезень та підвищення якості обслуговування пасажирів. Незважаючи на різноманітність поглядів, актуальним та відкритим залишається питання дослідження закономірностей пасажиропотоків у залізничному приміському сполученні, а також удосконалення зміни населеності составів приміських поїздів з різними міжпоїзними інтервалами.

### Мета

Визначення закономірностей змін населеності составів поїздів та підходу приміських пасажирів на посадку для визначення параметрів графіка руху поїздів, кількості квиткових кас та турнікетів, забезпечення зручної та безпечної посадки пасажирів на приміські поїзди.

### Методика

Для визначення закономірностей змін населеності составів поїздів та підходу приміських пасажирів на посадку було визначено методи дослідження населеності составів, основні періоди підходу пасажирів на платформу, що впливають на населеність вагонів у різні періоди доби.

З метою більш глибокого вивчення цього процесу були здійснені прямі спостереження надходження пасажирів на зупиночні пункти у Фастівському напрямку Київського залізнич-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

ного вузла, де хронометрувався час приходу пасажирів на платформу до моменту відправлення поїзда.

Дослідження закономірностей пасажиропотоків у залізничному приміському сполученні виконуються із застосуванням методів математичної статистики.

### Результати

Зручність розкладу руху приміських поїздів на напрямках є одним із основних якісних показників, що характеризує привабливість залізничного транспорту для пасажирів [1, 8]. Для раціонального встановлення інтервалів між приміськими поїздами, визначення кількості квиткових кас і турнікетів, підвищення зручностей та доступності транспортних послуг для пасажирів необхідно дослідити режим підходу пасажирів на платформу, населеність вагонів в поїздах приміського сполучення залежно від часу доби та сезонності.

Оскільки пасажиропотік є основним фактором при виборі кількості вагонів у складі приміських поїздів, міжпоїзних інтервалів та інших параметрів, необхідно дослідити закономірності підходу пасажирів на платформу перед відправленням приміських поїздів, темпи заповнення та населеність поїздів і підібрати закон розподілу для використання цього процесу в практичних цілях. При цьому натурні спостереження таких досліджень повинні доповнюватися їх теоретичним узагальненням.

Удосконалення системи приміських пасажирських перевезень у сучасних умовах розвитку залізничного транспорту України є одним із пріоритетних питань у програмах Укрзалізниці щодо розвитку залізничних перевезень [5, 10].

Слід визнати, приміські залізничні пасажирські перевезення поступово втрачають свою привабливість, незважаючи на відносно невисокі рівні тарифів у приміському сполученні, через застарілий рухомий склад та меншу інтенсивність руху порівняно з автомобільним транспортом. Тому в умовах, що склалися, адаптувати приміський пасажирський транспорт можливо, лише використовуючи його переваги в техніко-технологічних аспектах, які визначають загальний час, що витрачає пасажир на поїздку та умови, в яких перебуває пасажир під час поїздки у рухомому складі.

Приміським пасажиропотокам властива істотна нерівномірність у часі, і можна розрізняти характерні періоди доби, протягом яких інтенсивність пасажиропотоків можна вважати постійною. Це ранішній період «пік» і значно менш інтенсивний період прибуття поїздів на головну станцію ділянки, а також вечірній період «пік» і менш інтенсивний період відправлення поїздів із головної станції. [4]. На ці періоди припадає близько 90 % всього пасажиропотоку (за напрямками). Саме в такі періоди залізниця може використовувати свою найбільшу технологічну перевагу – забезпечення великої провізної спроможності разом із надійністю сполучень.

Для більш наочної картини по пікових періодах наведемо графіки зміни попиту на перевезення в абсолютних величинах постанційно у Фастівському напрямку (рис. 1).

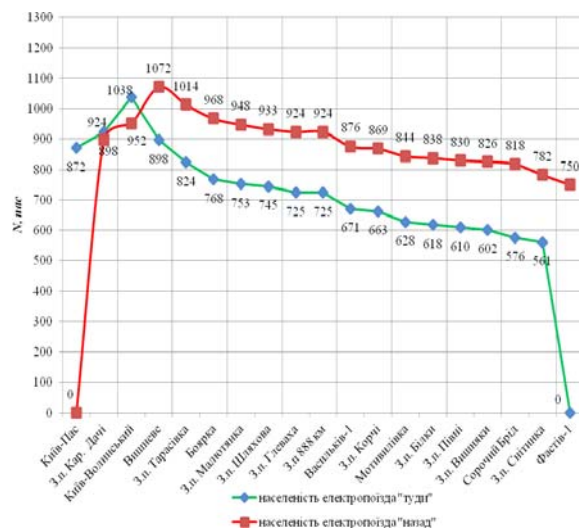


Рис. 1. Динаміка населеності електропоїздів постанційно дільниці Київ-Пасажирський–Фастів

Fig. 1. Dynamics of electric trains rate, station-by-station of Kyiv-Passenger – Fast section

Із наведених на рис. 1 графіків видно також, що існує нерівномірність обсягів перевезень (попиту) у прямому та зворотному напрямках. Нерівномірність за напрямками виявляється тоді, коли паралельно проходить декілька шляхів сполучення, в цьому випадку це залізничні та автомобільні шляхи сполучення, і пасажир здійснює поїздку «туди» одним видом транспорту, «назад» – іншим. Отже, дані щодо фактичної населеності поїздів у співставленні їх мож-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

ливостями перевезення пасажирів альтернативними маршрутами інших видів транспорту можуть використовуватися для оцінки конкуренції на транспортному ринку.

Попит на перевезення оцінюється фактичною населеністю составів поїздів, яка встановлювалася шляхом безпосередніх натурних спостережень у вагонах поїздів. Ці спостереження виконуються регулярно працівниками дирекції залізничних перевезень. Однак, на нашу думку, отримані при таких спостереженнях дані потребують подальшого опрацювання, а саме їх співставлення з номінальною кількістю сидячих місць у приміських поїздах, тобто вираження у відносних величинах.

Результати дослідження погодинного розподілу пасажиропотоку у Фастівському напрямку у відносних величинах (до номінальної кількості сидячих місць у вагонах приміських поїздів) зображено на рис. 2.

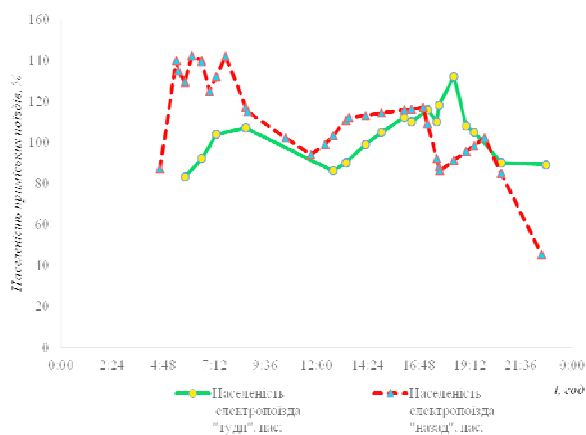


Рис. 2. Динаміка населеності приміських поїздів за періодами доби на дільниці Київ–Фастів

Fig. 2. Dynamics of habitability suburban trains by periods of day at the station Kyiv-Fastiv

Нерівномірність за періодами доби більш суттєва, має явно виражений характер прояву, особливо у ранковий та вечірній періоди «пік». Розміри перевезень у ці години не відповідають комфортним умовам проїзду пасажирів у приміських електропоїздах.

Дослідження погодинного розподілу пасажиропотоку прибуття на головну станцію напрямку, зображеного на рис. 2, дозволило встановити, що найбільший обсяг перевезень має місце з 5 до 9 год ранку. Частка пасажиропотоку, що прибуває на головну станцію в інтенсивний ранковий період, складає 45 % добового прибуття. У період з 9 год ранку до 13 год спостерігається поступове зниження прибуття пасажирів, частка пасажиропотоку складає 21 % добового прибуття. А з 13 до 20 год відбувається збільшення інтенсивності перевезення та зростання розмірів пасажиропотоку, частка якого складає 34 % добового прибуття. В період з 22 до 5 год ранку приміські поїзди відсутні.

Дослідження погодинного розподілу пасажиропотоку відправлення з головної станції Фастівського напрямку дозволили встановити, що розподіл відбувається навпаки порівняно з динамікою прибуття. Найбільший обсяг перевезень припадає з 15 до 19 год, частка пасажиропотоку, що відправляється з станції Київ-Пасажирський в інтенсивний вечірній період складає 50 % добового відправлення. З 6 до 10 год відбувається ранкове збільшення інтенсивності перевезень, максимум якого припадає на період з 7 до 9 год. Частка пасажиропотоку складає 30 % добового відправлення. У період з 9 до 13 год відбувається зниження пасажиропотоку до 85 %, а потім у період з 13 до 15 год спостерігається поступове збільшення відправлення пасажиропотоку, частка якого складає 20 % добового відправлення. Вечірній період пік припадає з 15 до 19 год. Частка пасажиропотоку цього періоду складає 50 % добового відправлення. У пікові періоди населеність поїздів на 30–40 % перевищує їх номінальну пасажиромісткість, а це означає, що перевезення пасажирів здійснюється у некомфортних умовах проїзду.

Отже, для оцінки умов проїзду пасажирів у приміських поїздах слід користуватися саме відносними величинами їх населеності.

Умови проїзду пасажирів у поїздах є, можна сказати, «наслідком» умов їх посадки в поїзди. Для дослідження закономірностей формування пасажиропотоків приміських перевезень під час посадки в поїзди були здійснені натурні спостереження надходження приміських пасажирів на платформу перед відправленням приміських поїздів.

Спостереження виконувались у вечірні години пік по станції Київ-Пасажирський у Фастівському напрямку у вересні 2013 року. Встановлено, що час приходу приміських пасажирів має коливання, оскільки більшість пасажирів користуються приміським пасажирським транспортом часто і знають розклад руху поїздів.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Тому можна стверджувати, що значна кількість пасажирів приходить на платформу безпосередньо перед відправленням поїзда, створюючи додаткові незручності під час посадки та тісняву на платформах.

Дослідження виявили, що у більшості випадків поява першого пасажирів на платформі зафіксована не раніше ніж за 35–40 хвилин до прибуття поїзда. Потім виконувався підрахунок кількості пасажирів, які надходили на платформу, за п'ятихвилинними інтервалами, до моменту відправлення поїзда. На основі вибірки виконано математичний аналіз значень часу приходу пасажирів, який дозволяє визначити параметри, які характеризують закономірність зміни досліджуваної величини [2, 3, 6]. Характерні графіки приходу пасажирів на платформу наведені на рис. 3–5, на яких, як приклад, наведено три поїзди (три спостереження з інтервалами між поїздами 40, 24 і 8 хвилин відповідно).

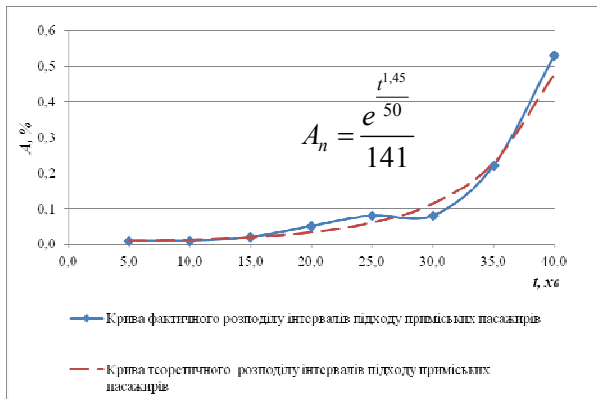


Рис. 3. Криві фактичного і теоретичного режиму підходу приміських пасажирів для міжпоїзного інтервалу 40 хв:  $t$  – час до прибуття приміського поїзда

Fig. 3. Curves of actual and theoretical approach mode of commuters for intertrain interval of 40 min

На рис. 3–5 наведено співставлення реальних кривих розподілу та апроксимованих теоретичних кривих інтенсивності підходу пасажирів та заповнення поїзда, а також формули, за допомогою яких описуються виявлені закономірності. Ці формули можуть бути використані для побудови відповідних математичних моделей, що описують процес підходу пасажирів на посадку у поїзди.

Значення числових характеристик інтервалів підходу приміських пасажирів на електропоїзди наведено в табл. 4.

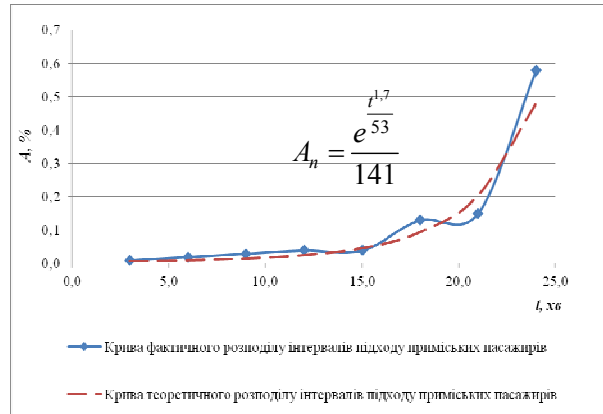


Рис. 4. Криві фактичного і теоретичного режиму підходу приміських пасажирів для міжпоїзного інтервалу 24 хв

Fig. 4. Curves of actual and theoretical approach mode of commuters for intertrain interval of 24 min

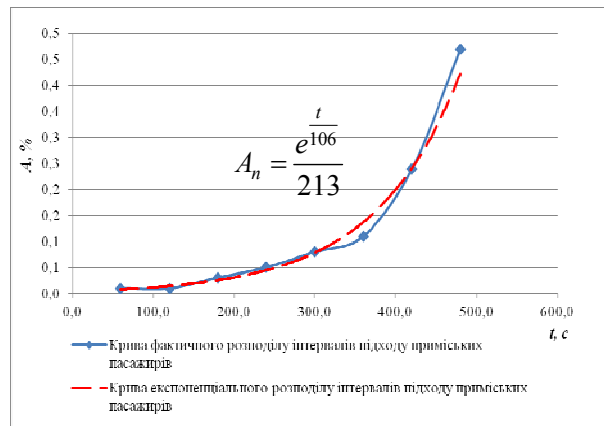


Рис. 5. Криві фактичного і теоретичного режиму підходу приміських пасажирів для міжпоїзного інтервалу 8 хв

Fig. 5. Curves of actual and theoretical approach mode of commuters for intertrain interval of 8 min

За величиною параметрів  $K$ , коефіцієнтів варіації інтервалів вхідного потоку  $C$  і за схожістю фактичного і теоретичного розподілів можна сказати, що інтервали підходу приміських пасажирів на платформу (до приміських поїздів і квиткових кас) мають експоненціальний розподіл.

Підхід пасажирів – це випадкова величина, яка коливається протягом всього періоду розкладу руху приміських поїздів і залежить від міжпоїзного інтервалу розкладу руху поїздів.

Таким чином, підхід пасажирів до квиткових кас, на приміські поїзди має неординарність, оскільки можлива поява двох і більше

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

пасажирів в один і той же момент часу, і є нестационарним у зв'язку з тим, що інтенсивність потоку пасажирів залежить від часу доби.

Таблиця 4

**Числові характеристики інтервалів підходу приміських пасажирів**

Table 4

**Numerical characteristics of intervals approach of commuters**

Станція відправлення	Інтервал між поїздами	$X_{cp}$ , хв	$K$	$C$	$\sigma$
Київ-Пасажирський	середній	34,75	20,93	0,22	7,6
Київ-Пасажирський	8 хвилин	6,82	19,32	0,23	93,1
Київ-Пасажирський	до 24 хвилин	20,91	18,91	0,23	4,8

При згущеному підході пасажирів виникають черги до квиткових кас, і якщо черга затягується, то пасажир вимушений залишити чергу і їхати без квитка або обрати автомобільний вид транспорту. Такі відмови допускати не можна, необхідно створити такі умови придбання приміських квитків, щоб обслуговування пасажирів було якісне і швидке. У зв'язку з цим необхідно достатньо гнучко реагувати на потік пасажирів, які звертаються до квиткових кас, визначаючи їх необхідну кількість по періодах доби у робочі та вихідні дні тижня, особливо в періоди інтенсивного відправлення приміських поїздів.

Параметр  $K$ , який характеризує коливання приходу пасажирів на платформу, визначається за загальновідомою формулою [2, 6]:

$$K = \frac{X_{cp}^2}{D[X]}, \quad (1)$$

де  $X_{cp}$  – середнє значення населеності приміських поїздів;  $D[X]$  – дисперсія досліджуваної величини.

Величина  $\sigma$ , де  $\sigma$  – стандартне відхилення кількості пасажирів на платформі, визначається за формулою [2, 3]:

$$\sigma = \sqrt{D[X]}. \quad (2)$$

Коефіцієнт варіації, який вказує, на скільки більше розсіювання випадкових величин порівняно із середнім значенням, визначається за формулою:

$$C = \frac{\sigma}{X_{cp}}. \quad (3)$$

За отриманим розподілом процесу підходу пасажирів на приміські поїзди, встановленою величиною параметра  $K$  і відомим (або заданим) розкладом відправлення приміських поїздів в якомусь періоді  $T$  можна визначити (побудувати графік) загальний підхід пасажирів до приміських кас протягом періоду  $T$  по часу і по кількості (рис. 2). Отримані дані загального підходу пасажирів протягом періоду  $T$  можуть бути також використані для визначення кількості білетних кас і часу їх роботи.

За величиною параметра  $K$ , коефіцієнтом варіації інтервалів вхідного потоку і за схожістю фактичного і теоретичного розподілів можна стверджувати, що інтервали приходу приміських пасажирів на платформу до приміських поїздів у Фастівському напрямку у вечірні години пік мають теоретичний (експоненціальний) розподіл.

### Наукова новизна та практична значимість

У роботі вдосконалено метод оцінки зміни населеності составів приміських поїздів, що ґрунтується на отриманні відносної оцінки пасажиропотоку до місткості приміських поїздів та отримано нові залежності режимів підходу приміських пасажирів для різних міжпоїзних інтервалів.

Використання встановлених закономірностей дозволить в подальшому прогнозувати кількість перевезених пасажирів в конкретних поїздах, оптимізуючи при цьому розклад руху приміських поїздів, інтервал між поїздами, а також необхідну кількість рухомого складу.

### Висновки

Дослідженнями встановлено, що необхідні для більш ефективної організації приміських перевезень величини, а саме населеність поїздів, попит на перевезення, інтенсивність підходу

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

пасажирів на посадку можуть бути отримані шляхом доволі нескладних натурних спостережень в поїздах, на станціях посадки-висадки та безпосередньо на платформах. Проте результати натурних спостережень потребують подальшого опрацювання відповідно до запропонованих процедур, що дозволить більш ефективно їх використовувати для організації перевізного процесу. Зокрема, запропоновано використовувати відносні показники населеності составів поїздів, а також узагальнені теоретичні залежності інтенсивності підходу пасажирів на посадку в поїзди, отримано нові залежності режимів підходу приміських пасажирів для різних міжпоїзних інтервалів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Божок, Н. О. Методичний підхід щодо визначення привабливості пасажирських перевезень залізничного транспорту / Н. О. Божок // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2014. – № 2 (50) – С. 31–40.
- Вентцель, Е. С. Задачи и упражнения по теории вероятностей : учеб. пособие для студ. вузов / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – 5-е изд., испр. – М. : Академия, 2003. – 448 с.
- Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М. : Высш. шк., 2001. – 575 с.
- Габа, В. В. Визначення розмірів руху приміських поїздів на ділянці методом цілочисельного програмування / В. В. Габа, Т. М. Грушевська // Залізн. трансп. України. – 2013. – № 3/4. – С. 30–33.
- Державна цільова програма реформування залізничного транспорту на 2010–2019 роки : Постанова Каб. Міністрів України від 16.12. 2009 р. № 1390 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1390-2009-п>. – Назва з екрана. – Перевірено : 03.06.2014.
- Калинина, В. Н. Математическая статистика / В. Н. Калинина, В. Ф. Панкин. – М. : Выс. шк., 1994. – 336 с.
- Константинов, Д. В. Формування актуальних напрямків розвитку пасажирських приміських перевезень залізниць України / Д. В. Константинов, С. М. Ватраль // Зб. наук. пр. Укр. Держ. Акад. залізн. трансп. – Х., 2013. – Вип. 140. – С. 14–22.
- Момот, А. В. Методичні підходи до визначення ефективності курсування швидкісних та високошвидкісних поїздів / А. В. Момот // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2013. – № 6 (48) – С. 45–62.
- Пазойский, Ю. О. Организация пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте (в примерах и задачах) / Ю. О. Пазойский, Л. С. Рябуха, В. Г. Шубко. – М. : Транспорт, 1991. – 240 с.
- Про схвалення Транспортної стратегії України на період до 2020 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 20.10.2010 р. № 2174-р [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2174-2010-р>. – Назва з екрана. – Перевірено : 03.06.2014.
- Совершенствование пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте / А. А. Колесов, Б. А. Таулин, И. Н. Шапкин, В. Г. Шубко. – М. : Транспорт, 1991. – 142 с.
- Barreira, A. Competitiveness of high-speed rail / A. Barreira, V. Reis, R. Macario // Transportation Research Record. – 2013. – № 2374. – P. 9–16.
- Peter. B. Railway Reform in Germany: Restructuring, Service Contracts, and Infrastructure Charges. Doctoral Thesis [Virtual Resource ] / В. Peter. – Berlin: Technische Universitat, 2008. – 236 p.
- Rail infrastructure principles and practice [Електронний ресурс]. – 2003. – Report 109. – Режим доступу: [http://bitre.gov.au/publications/2003files/report\\_109.pdf](http://bitre.gov.au/publications/2003files/report_109.pdf). – Назва з екрана. – Перевірено: 03.06.2014.

Т. Н. ГРУШЕВСКАЯ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Управление процессами перевозок», Государственный экономико-технологический университет транспорта, ул. Н. Лукашевича, 19, Киев, Украина, 03049, тел. +38 (044) 409 24 40, эл. почта tanya.grushevskaya@yandex.ua, ORCID 0000-0002-8480-2283

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПАССАЖИРОПОТОКА В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ПРИГОРОДНОМ СООБЩЕНИИ

**Цель.** Исследование направлено на определение закономерностей изменений населенности составов поездов и подхода пригородных пассажиров на посадку для определения технико-технологических параметров пригородных пассажирских перевозок. **Методика.** Для достижения поставленной цели были определе-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

ны методы исследования населенности составов, основные периоды подхода пассажиров на платформу, влияющие на населенность вагонов в разные периоды суток. **Результаты.** На основании проведенных исследований можно осуществлять комплексные, системно связанные расчеты важных технико-технологических параметров пригородных пассажирских перевозок. К таким параметрам можно отнести: параметры графика движения поездов, населенность вагонов, количество билетных касс, размеры пассажирских платформ, количество и расположение на них турникетов, обеспечение удобной и безопасной посадки пассажиров на пригородные поезда. Предложено использовать относительные показатели населенности составов, а также обобщенные теоретические зависимости интенсивности подхода пассажиров на посадку в поезда. Приведены графики, где существует неравномерность спроса перевозок, который оценивается фактической населенностью составов, что устанавливалось путем непосредственных натуральных наблюдений в вагонах поездов. Результаты исследования почасового распределения пассажиропотока дали возможность установить, что неравномерность по периодам суток имеет явно выраженный характер проявления, особенно в утренний и вечерний периоды «пик». Размеры перевозок в эти часы не соответствуют комфортным условиям проезда пассажиров в пригородных электропоездах. **Научная новизна.** Предложен новый подход к определению закономерностей изменений населенности пригородных поездов, подхода пригородных пассажиров на платформу. Представлены сопоставления реальных кривых распределения и аппроксимированных теоретических кривых интенсивности подхода пассажиров и заполнения поезда, а также формулы, с помощью которых описываются выявленные закономерности. Эти формулы могут быть использованы для построения соответствующих математических моделей, описывающих процесс подхода пассажиров на посадку в поезда. **Практическая значимость.** Использование установленных закономерностей позволит в дальнейшем прогнозировать количество перевезенных пассажиров в конкретных поездах, оптимизируя при этом расписание движения пригородных поездов, интервал между поездами, а также необходимое количество подвижного состава.

*Ключевые слова:* населенность вагонов; интервал между поездами; пригородные пассажирские перевозки; пассажиропоток; интервалы подхода пассажиров

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

<sup>1\*</sup>Dep. «Management of Transportation Processes», State Economic and Technological Transport University, N. Lukashевича St., 19, Kyiv, Ukraine, 03049, tel. +38 (044) 409 24 40, e-mail tanya.grushevskia @ yandex.ua, ORCID 0000-0002-8480-2283

## RESEARCH OF REGULARITIES OF PASSENGER FLOWS IN THE RAIL SUBURBAN TRAFFIC

**Purpose.** Determining regularities of changes of trains occupancy and the approach commuters on landing for determining the technical and technological parameters of suburban passenger services. **Methodology.** To achieve this goal were identified research methods of train occupancy, basic approach periods of passengers to platform affecting the occupancy of carriages in different periods of the day. **Findings.** On the basis of conducted researches can be carried out complex, systematically related calculations of important technical and technological parameters of suburban passenger transportations. To such parameters can be attributed parameters of trains timetable, occupancy of carriages, the number of ticket offices, passenger platforms size, number and location on them turnstiles, providing the comfortable and safe boarding of passengers on commuter trains. It is proposed to use the relative indicators of trains occupancy and generalized theoretical dependencies of approach intensity of passengers on landing in trains. There are graphs where there is unevenness of transportation demand, which is estimated by actual train occupancy that is established by direct natural supervision in train carriages. Results of the study hourly of passenger flow distribution have allowed to establish that irregularity by period of day has a pronounced character of manifestation, especially in the morning and evening during the "peak" periods. Dimensions of transportations in these hours do not meet comfortable conditions of passenger travel in suburban trains. **Originality.** It was suggested the new approach to determine regularities of changes of the suburban trains occupancy to approach commuters to platform. It is presented the comparisons of actual distribution curves and approximated theoretical curves of approach intensities of passengers and filling of trains, and the formula by which the described patterns are identified. These formulas can be used to construct appropriate mathematical models describing the process to approach of passengers on landing in trains. **Practical value.** Using of obtained regularities will allow in future predict the number of passengers in specific trains, thus optimizing the schedule of commuter trains the interval between trains, as well as the required number of rolling stock.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

*Keywords:* occupancy of carriages; interval between trains; suburban passenger transportation; passenger flow; intervals of passenger approach

## REFERENCES

1. Bozhok N.O. Metodichnyi pidkhid shchodo vyznachennia pryvablyvosti pasazhyrskykh perevezen zaliznychnoho transportu [Methodical approach to determination of passenger transportation attractiveness on railway transport]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2014, no. 2 (50), pp. 31-40.
2. Ventsel Ye.S., Ovcharov L.A. *Zadachi i uprazhneniya po teorii veroyatnostey* [Problems and exercises by a theory of probability]. Moscow, Academy Publ., 2003. 448 p.
3. Ventsel Ye.S. *Teoriya veroyatnostey* [Theory of probability]. Moscow, Vyshcha shkola Publ., 2001. 575 p.
4. Haba V.V., Hrushevska T.M. Vyznachennia rozmiriv rukhu prymiskykh poizdiv na diliansi metodom tsilochyselnoho prohrumuvannia [Determining the size of movement of suburban trains in the area by the method of integer programming]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway transport of Ukraine*, 2013, no. 3/4, pp. 30-33.
5. *Derzhavna tsilova prohruma reformuvannia zaliznychnoho transportu na 2010 – 2019 roky* (State Program of railway reform in 2010-2019 years), 2009. 43 p. Available at: <http://zakon2.rada.gov.ua> (Accessed 03 June 2014).
6. Kalinina V.N., Pankin V.F. *Matematicheskaya statistika* [The mathematical statistics]. Moscow, Vyshcha shkola Publ., 1994. 336 p.
7. Konstantinov D.V., Vatrak S.M. Formuvannia aktualnykh napriamkiv rozvytku pasazhyrskykh prymiskykh perevezen zaliznyts Ukrainy [Topical directions formation of development of passenger suburban transportation of railways in Ukraine]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoi Derzhavnoi Akademii zaliznychnoho transportu* [Proc. of Ukrainian State Academy of Railway Transport], 2013, issue 140, pp. 14-22.
8. Momot A.V. Metodichni pidkhody do vyznachennia efektyvnosti kursuvannia shvydkisnykh ta vysokoshvydkisnykh poizdiv [Methodological approaches to determining the effectiveness of high-speed trains running]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2013, no. 6 (48), pp. 45-62.
9. Pazoyskiy Yu.O., Ryabukha L.S., Shubko V.G. *Organizatsiya passazhirskikh perevozok na zheleznodorozhnom transporte (v primerakh i zadachakh)* [Organization of passenger transportation on railway transport (in examples and tasks)]. Moscow, Transport Publ., 1991. 240 p.
10. *Pro skhvalennia Transportnoi stratehii Ukrainy na period do 2020 roku: rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy* (Transport Strategy of Ukraine to 2020: Direction of Cabinet of Ministers in Ukraine). Available at: <http://zakon2.rada.gov.ua> (Accessed 03 June 2014).
11. Kolesov A.A., Taulin B.A., Shapkin I.N., Shubko V.G. *Sovershenstvovaniye passazhirskikh perevozok na zheleznodorozhnom transporte* [Improvement of passenger railway transportation]. Moscow, Transport Publ., 1991. 142 p.
12. Barreira A., Reis V., Macario R. Competitiveness of high-speed rail. *Transportation Research Record*, 2013, no. 2374, pp. 9-16.
13. Peter B. Railway Reform in Germany: Restructuring, Service Contracts, and Infrastructure Charges. Doctoral Thesis. Berlin, Technische Universitat Publ., 2008. 236 p.
14. Rail infrastructure pricing: principles and practice, 2003. Report 109. Available at: [http://bitre.gov.au/publications/2003files/report\\_109.pdf](http://bitre.gov.au/publications/2003files/report_109.pdf). (Accessed 03 June 2014).

*Стаття рекомендована до публікації д-ром техн. наук, проф. В. К. Мироненко (Україна); д-ром техн. наук, проф. Д. М. Козаченком*

Надійшла до редколегії: 27.06.2014

Прийнята до друку: 15.09.2014

## УДК 629.488.25 «401»:629.463.3

А. Р. МІЛЯНИЧ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Рухомий склад і колія», Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. І. Блажкевич, 12а, Львів, Україна, 79052, тел. +38 (067) 747 46 46, ел. пошта milyan\_74@ukr.net, ORCID 0000-0003-3583-792X

## ПОШКОДЖЕННЯ РОБОЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІНСТРУМЕНТУ, ПОВ'ЯЗАНИХ ІЗ ПЛАСТИЧНИМ ДЕФОРМУВАННЯМ ЗАТВЕРДІЛИХ ОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН

**Мета.** Найбільша частина вантажних перевезень в Україні здійснюється залізничним транспортом. Державна статистика щорічних вантажних перевезень залізницями (січень-листопад) фіксує наступні дані: 2011 р. – 468 млн. т (108,2 % до 2010 р.); 2012 р. – 421,5 млн. т (98,5 % до 2011 р.); 2013 р. – 441,8 млн. т (96,6 % до 2012 р.). Незважаючи на щорічне зменшення обсягів вантажних перевезень, вагомий внесок при транспортуванні вантажів належить перевозкам у цистернах. Тому при експлуатації цистерн надзвичайно актуальним на сьогодні є подовження терміну їх довговічності. Сучасні уявлення про накопичення втомних пошкоджень в деталях рухомого складу залізничного транспорту ґрунтуються на моделях, які оцінюють довговічність металевих систем, залежно від умов навантажень. Ці моделі дозволяють з достатнім рівнем точності виконувати оцінку знеміцнення металевих систем в умовах багатоциклової втоми та за наявності пружних деформацій. Водночас, особливості поведінки контргіл ці моделі не враховують. Метою цієї роботи є побудова математичної моделі, яка дозволяє оцінювати довговічність робочих інструментів, що використовуються при очищенні затверділих органічних вантажів залізничних цистерн. **Методика.** З використанням сучасних підходів механіки деформованого твердого тіла було виконано аналіз впливу параметрів будови органічних речовин на довговічність високонавантажених елементів конструкцій. Введення в даній роботі співвідношення взаємодії пошкоджень відноситься, головним чином, до тих елементів конструкції інструменту, які, внаслідок впливу широкосмугових гауссівських випадкових навантажень, здійснюють коливання зі своїми резонансними або навколорезонансними частотами. **Результати.** Вивчено вплив особливостей втомних навантажень на довговічність конструкції. Так, отримані результати свідчать про зростання пошкоджень, які вносяться циклами із малими амплітудами напружень, із-за нелінійного ефекту взаємодії робочого елемента інструменту з органічним матеріалом. Для наведеного прикладу була розрахована довговічність стомлюваності, яка, згідно уточненої оцінки, виявилась зниженою на 10...15 %. Зниження на 10 % відповідає максимальній амплітуді напруження  $5\sigma$ , а зниження на 15 % – максимальній амплітуді  $7\sigma$ . **Наукова новизна.** Аналітично показано, що параметри знеміцнення металевих систем пов'язані з кінетикою втомних пошкоджень, що накопичуються у металевих конструкціях під час зовнішніх навантажень. **Практична значимість.** Автором було запропоновано співвідношення, які дозволяють оцінювати залишковий ресурс деталі в умовах заданого послідовного багаторівневого циклічного навантаження.

**Ключові слова:** цикл; довговічність; пошкодження; втома; напруження; цистерни рухомого складу; залізничний транспорт

### Вступ

Найбільша частина вантажних перевезень в Україні здійснюється залізничним транспортом. Державна статистика щорічних вантажних перевезень залізницями (січень-листопад) фіксує такі дані:

– 2011 р. – перевезення вантажів складають 468 млн т (108,2 % до 2010 р.); вантажооборот дорівнює 243 556,4 млн т/км (111,7 % до 2010 р.);

– 2012 р. – перевезення вантажів складають 421,5 млн т (98,5 % до 2011 р.); вантажооборот дорівнює 218 026,2 млн т/км (98,1 % до 2011 р.);

– 2013 р. – перевезення вантажів складають 441,8 млн т (96,6 % до 2012 р.); вантажооборот дорівнює 224 017,8 млн т/км (94,2 % до 2012 р.) [2].

Незважаючи на щорічне зменшення обсягів вантажних перевезень, вагоме значення під час транспортування вантажів належить перевезенням у цистернах. Тому при експлуатації цистерн надзвичайно актуальним на сьогодні є подовження терміну їх придатності.

Питання щодо подовження терміну експлуатації в деталях рухомого складу та безпечного перевезення вантажів у цистернах постійно до-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

сліджується українськими та іноземними вченими [1, 7–14]. Так, аналіз причин пошкодження залізничних цистерн, автоцистерн і контейнерів-цистерн, а також порівняння їхнього експлуатаційного «життя» досліджено німецькими вченими [14]. Розгляду компромісних рішень між ефективністю перевезень залізничними цистернами та забезпеченням їх безпечного транспортування присвячена робота американських дослідників [13]. Темі моделювання динамічних пошкоджень залізничних цистерн з використанням фізично мотивованої внутрішньої змінної пластичності присвячено публікацію [12]. Дослідження процесів втоми матеріалів під дією випадкової вібрації та їх аналіз стали провідними у публікаціях [1, 9–11]. Можливість постійного ознайомлення та обговорення варіантів конструктивних і технічних рішень, що дозволяють підвищити показники ефективності перевезень речовин в залізничних цистернах, надається вченим на сторінках наукового журналу «Наука та прогрес транспорту» [3, 6].

У той же час недостатньо дослідженою залишається проблема пластичного деформування, яка виникає внаслідок контактів органічного матеріалу із робочими елементами інструмента.

### Мета

Сучасні уявлення про накопичення втомних пошкоджень в деталях рухомого складу залізничного транспорту ґрунтуються на моделях, які оцінюють довговічність металевих систем залежно від умов навантажень. Ці моделі дозволяють з достатнім рівнем точності виконувати оцінку знецінення металевих систем в умовах багатоциклової втоми та за наявності пружних деформацій. Водночас особливості поведінки контртілі ці моделі не враховують. Метою цієї роботи є побудова математичної моделі, яка дозволяє оцінювати довговічність робочих інструментів, що використовуються під час очищення затверділих органічних вантажів залізничних цистерн.

### Методика

До виконання досліджень і роботи над цією статтею спонукав аналіз кількості залишків у залізничних цистернах застиглих органічних вантажів (рідкий пек, рідка сірка, капролактама, паста сульфонола, суперфосфорна кислота, оле-

ум, жовтий фосфор, нафтобітум тощо), які перед повторним завантаженням необхідно видалити із порожнин котлів цистерн. Для виконання досліджень був вибраний матеріал пек, який після вивантаження рідкого пеку, залишався у цистерні у вигляді застиглого пеку, що підлягав видаленню, яке на практиці здійснювалось на промивально-пропарювальній станції (ППС) вагонного депо. Труднощі технологічного процесу видалення застиглого пеку в першу чергу полягали у складності руйнування його монолітності та порушення адгезійності із металом внутрішньої поверхні цистерни.

Відомо, що пек – тверда або в'язка маса чорного кольору, яка залишається від перегонки кам'яного вугілля, торф'яного або деревного дьогтю, сірки, смоли тощо. Він застосовується для виготовлення покривельного гідроізоляційного матеріалу, графітових електродів тощо.

На цей час для органічних матеріалів, яким властиві міцнісні та пружнісні характеристики, ще недостатньо розроблені, створені і впроваджені надійні методи, які дозволяють визначити умови руйнування таких матеріалів при складному напруженому стані. [8]. Потреби проектувальників задовольняли методи розрахунку умов пластичного руйнування при комбінованих навантаженнях. У цьому наданому дослідженні припускається, що енергія формозмінення є основою для опису пружно-пластичної поведінки застиглого органічного матеріалу у випадку, коли головні напруження за напрямом співпадають з осями матеріалу [5].

Введення у цій роботі співвідношення взаємодії пошкоджень відноситься головним чином до таких елементів конструкції інструменту, які внаслідок впливу широкосмугових гауссівських випадкових навантажень здійснюють коливання із своїми резонансними або навоколорезонансними частотами. При таких коливаннях напруження в робочих елементах є вузькосмуговим гауссівським випадковим процесом із наближеними до нуля середніми значеннями та із середньоквадратичним значенням  $\sigma$ . Густина ймовірності згинаючої кривої циклів (амплітуд) такого напруження наближено підпорядковується розподіленню Релея [4]. Такі закони зміни напружень за часом характеризуються незначною кількістю циклів напруження високої амплітуди порівняно із циклами невеликих амплітуд [9]. Цикл високої амплітуди призво-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

дить до перевантаження, тобто до підвищення деформації. Зв'язок між ефектами від таких циклів і більш частіших циклів менших амплітуд є причиною так званого явища послідовності (або чергування циклів) навантаження [11].

*Максимальний пік напружень та модифіковане правило лінійного додавання.* Величина максимального піку  $S_m$  вузькосмугових гауссівських випадкових напружень залежить від ширини спектра напруження та від тривалості навантаження. Чим ширшим є спектр напруження і тривалішим є процес навантаження, тим більшим є величина  $S_m$ . Типове значення  $S_m$  в 4...7 разів переважає  $\sigma$  [11].

Далі покажемо, як запропонована Морроу модель взаємодії [1], пов'язаної із роботою пластичного деформування, і відповідне правило додавання поширюється на ситуацію вузькосмугових гауссівських випадкових напружень. Пошкодження  $D_S$  від піку напружень  $S$  визначається:

$$D_S = \frac{n_S}{N_S} \left( \frac{S}{S_m} \right)^d, \quad (1)$$

де  $n_S$  – кількість циклів напруження з амплітудою  $S$ ;  $N_S$  – кількість циклів до руйнування при амплітуді напружень  $S$ ;  $d$  – показник роботи пластичного деформування.

Зауважимо, що  $S \leq S_m$  і що  $(n_S/N_S)$  є відношення, яке використовується у правилах лінійного додавання. Ефект накопичення пошкоджень описується інтегруванням нелінійної функції (1) по всім рівням амплітуд напруження до  $S_m$ . Умова руйнування виражатиметься:

$$\int_0^{S_m} D_S dS = 1 \quad (2)$$

Співвідношення (1) і (2) будемо називати запропонованим модифікованим правилом лінійного додавання.

*Опис методики аналізу.* Довговічність стомленістю, тобто очікувана кількість циклів до руйнування  $N_M$ , можна встановити на основі запропонованого модифікованого правила лінійного додавання шляхом підстановки в (1) і (2) параметрів вузькосмугових гауссівських випадкових напружень. Внаслідок цього отримується степенева залежність довговічності від  $\sigma$ .

Doi 10.15802/stp2014/30461

Крім того, виведена масштабована густина ймовірності руйнувань  $G(S)m$ , яка характеризує розподілення пошкоджень від кожного циклу напруження.

Висновок залежності довговічності від напруження. Позначимо:

$$l = S_m / \sigma, \quad (3)$$

$$P(S) = n_S / N_M, \quad (4)$$

де  $P(S)$  – доля циклів напружень з амплітудою  $S$ ;  $n_S$  – кількість таких циклів;  $N_M$  – середня кількість циклів до руйнування.

Підставивши прийняті вирази в (1), отримуємо:

$$D_S = \frac{P(S)}{N_S} N_M \left( \frac{S}{l\sigma} \right)^d. \quad (5)$$

Зауважимо, що при  $d = 0$  ця функція пошкодження відповідає правилу лінійного додавання.

Враховуємо вирази (2) і (5) у процесі руйнування:

$$1 = \int_0^{S_m} D_S dS = \frac{N_M}{(l\sigma)^d} \int_0^{l\sigma} S^d \frac{P(S)}{N_S} dS, \quad (6)$$

$$N_M = \frac{(l\sigma)^d}{\int_0^{l\sigma} S^d \frac{P(S)}{N_S} dS} \quad (7)$$

Якщо напруження є вузькосмуговим гауссівським випадковим процесом, то густина ймовірності огинаючих амплітуд  $P(S)$  підпорядковується розподіленню Релея [4]:

$$P(S) = \frac{S}{\sigma^2} \exp \left[ -\frac{S^2}{2\sigma^2} \right], \text{ де } S \geq 0, \quad (8)$$

причому  $P(S) = 0$  при  $S < 0$ .

Застосовуємо рівняння кривої стомленості  $S - N$  при синусоїдальному напруженні

$$N_S = \left[ \frac{S}{2^{-1/\beta} \sigma_f'} \right]^{-\beta}, \quad (9)$$

$$\beta = -1/b, \quad (10)$$

де  $\sigma_f'$ ,  $\beta$  та  $b$  – параметри стомленої міцності органічного матеріалу при циклічному навантаженні.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Після чого отримуємо:

$$N_M = \frac{(l\sigma)^d}{\frac{2}{\sigma^2 \sigma_f \beta} \int_0^{l\sigma} S^{1+\beta+d_e-S^2/2\sigma^2} dS}, \quad (11)$$

звідки:

$$N_M = H_M \sigma^{-\beta}, \quad (12)$$

$$H_M = \frac{\sigma_f \beta}{l^{-d} \left[ 2^{1+\beta/2+d/2} \right] \gamma \left[ \left( 1 + \frac{\beta}{2} + \frac{d}{2} \right) \frac{l^2}{2} \right]}, \quad (13)$$

де  $\gamma(\alpha, \tau)$  – неповна гамма – функція [5]

$$\gamma(\alpha, \tau) = \int_0^\tau x^{\alpha-1} e^{-x} dx. \quad (14)$$

Формулу (12) можна переписати таким чином:

$$\sigma = \tilde{C}_M N_M^{-1/\beta}; \quad (15)$$

$$\tilde{C}_M = H_M^{1/\beta}. \quad (16)$$

Вирази (12) і (13) разом із (15) та (16) визначають шукану залежність довговічності стомленістю від  $\sigma$ .

При застосуванні правила лінійного додавання слід приймати  $d = 0$ . Тоді вираз (13) матиме такий вигляд:

$$H_L = \sigma_f \beta \left\{ \left[ 2^{1+\beta/2} \right] \gamma \left[ \left( 1 + \frac{\beta}{2} \right) \frac{l^2}{2} \right] \right\}^{-1}, \quad (17)$$

де індексом  $L$  позначені результати, які ґрунтуються на основі правила лінійного додавання та отримані при  $d = 0$  [1].

Для очікуваної (середньої) довговічності  $N_L$  отримуємо:

$$N_L = H_L \alpha^{-\beta}, \quad (18)$$

$$\frac{N_M}{N_L} = \frac{H_M}{H_L} = \left[ \frac{1}{l^{-d/2}} \right] \left\{ \frac{\gamma \left[ \left( 1 + \beta/2 \right) \left( l^2/2 \right) \right]}{\gamma \left[ \left( 1 + \beta/2 + d/2 \right) \left( l^2/2 \right) \right]} \right\}. \quad (19)$$

Згідно з виразами (6) та (11)

$$N_M \int_0^\infty G(S)_M dS = 1, \quad (20)$$

$$G(S)_M = \left[ \frac{2^{1/\beta}}{\sigma^2 \sigma_f \beta} \right] \left( \frac{1}{l\sigma} \right)^d S^{1+\beta+d_e-S^2/2\sigma^2}. \quad (21)$$

У цих виразах  $G(S)_M$  – масштабована густина ймовірності пошкоджень  $D_S$  із нормуючим множником  $N_M$ .

Підставивши в останній вираз (21) значення  $d = 0$ , визначаємо масштабовану густину ймовірності пошкодження  $G(S)_L$  згідно з правилом лінійного додавання:

$$\frac{G(S)_M}{G(S)_L} = \left( \frac{S}{S_M} \right)^d. \quad (22)$$

### Результати

Автором досліджено вплив особливостей втомних навантажень на довговічність конструкції.

Розглянемо як приклад такі параметри. Нехай задано:

$$\sigma_f = 1\,152 \text{ МПа}; \quad \beta = 9,65; \quad d = -0,207.$$

Визначимо  $N_M/N_L$  при  $l = 3, 5$  і  $7$  та побудуємо графіки  $G(S)_M$  і  $G(S)_L$  при  $l = 5$ .

Розрахунки виконуються згідно з наведеними виразами (12)...(22), результати яких подають:

$l$	$N_M/N_L$
3	0,97
5	0,90
7	0,85

Отримані результати свідчать про зниження розрахункової оцінки довговічності на (10...15) %.

$S$	$S/S_m$	$G(S)_M/G(S)_L$
$\sigma$	0,2	1,40
$2\sigma$	0,4	1,21
$3\sigma$	0,6	1,11
$4\sigma$	0,8	1,05
$5\sigma$	1,0	1,00

Отримані результати в той же час свідчать про зростання пошкоджень, які вносяться циклами із малими амплітудами напружень, із-за нелінійного ефекту взаємодії робочого елемента інструменту з органічним матеріалом.

На рис. 1 наведені масштабовані густини ймовірностей пошкоджуваностей, визначені

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

правилами лінійного та нелінійного додавання. Зауважимо, що найбільше пошкоджень виникають циклами напружень з амплітудою від  $2\sigma$  до  $5\sigma$ . Цикли з амплітудою вище  $5\sigma$  можуть викликати дуже значні пошкодження; однак такі цикли, якщо і виникають, то дуже рідко. Цикли з амплітудою менше  $2\sigma$  виникають доволі часто, однак будь-яких значних пошкоджень не спричиняють. Максимум пошкоджень у наведеному прикладі припадає на цикли з амплітудою  $3,23\sigma$ .

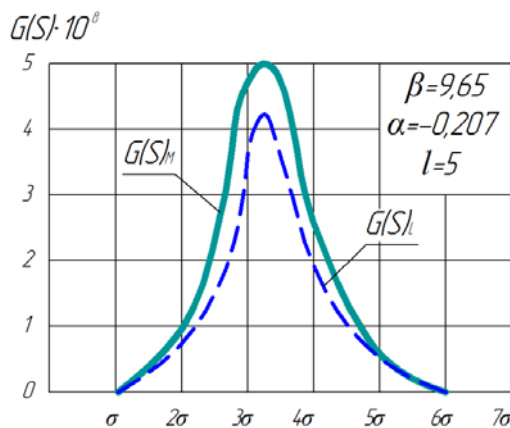


Рис. 1. Масштабована густина ймовірності пошкоджень згідно з правилом лінійного та нелінійного додавання

Fig. 1. Scalable density of damage probability according to the rules of linear and nonlinear addition

Таким чином, на прикладі цієї моделі було розраховано довговічність стомлюваністю, яка згідно з уточненою оцінкою виявилась зниженою на (10...15)%. Зниження на 10% відповідає максимальній амплітуді напруження  $5\sigma$ , а зниження на 15% – максимальній амплітуді  $7\sigma$ .

Криві напруження – довговічність експлуатації в логарифмічних координатах мають однаковий кутівий коефіцієнт.

Густина ймовірності пошкоджень ілюструє вплив нелінійної взаємодії на різних рівнях взаємодії; найбільше підвищення рівня руйнування за рахунок цього ефекту спостерігається в області малих амплітуд напруження. Основна частина пошкоджень утворюється циклами напружень з амплітудою від  $2\sigma$  до  $5\sigma$ .

Побудована математична модель дозволяє оцінювати довговічність робочих інструментів, що використовуються під час очищення затверділих органічних вантажів залізничних цистерн.

### Наукова новизна та практична значимість

У виконаному автором дослідженні було аналітично наведено, що параметри знеміцнення металевих систем пов'язані з кінетикою втомних пошкоджень, що накопичуються у металевих конструкціях під час зовнішніх навантажень. Запропоновані автором співвідношення, які дозволяють оцінювати залишковий ресурс деталі в умовах заданого послідовного багаторівневого циклічного навантаження, дозволять подовжити термін експлуатації деталей рухомого складу та забезпечити безпечне перевезення вантажів у цистернах на залізничному транспорті.

### Висновки

В результаті виконаного дослідження було встановлено, що існують способи очистки цистерн від залишків застиглих органічних вантажів, які перед повторним завантаженням необхідно видалити із порожнин котлів цистерн.

Автор запропонував методику встановлення впливу фізико-механічних характеристик органічних речовин на довговічність високонавантажених елементів інструменту руйнування та видалення залишків застиглого пеку з котлів залізничних цистерн.

Запропоновані співвідношення дозволять оцінювати залишковий ресурс робочих елементів інструменту в умовах ефективного технологічного навантаження.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андрейків, О. Є. Розрахункова модель зародження втомних тріщин біля наводненого вирізу / О. Є. Андрейків, Д. В. Рудавський // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – № 5. – С. 63–66.
2. Вантажні перевезення. Статистична інформація [Електронний ресурс] / Державна служба статистики України. – Режим доступу: <http://www.ukrstat.gov.ua/>. – Назва з екрана. – Перевірено : 15.06.2014.
3. Воропай, В. С. Разработка метода принятия решения относительно вагона-цистерны с истекшим назначенным сроком службы в условиях окончания III стадии жизненного цикла / В. С. Воропай // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 42. – С. 201–204.
4. Ибагуллин, Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев :

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

- монографія / Д. Ибатуллин. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2008. – 387 с.
5. Куліченко, А. Я. Вплив методу термомеханічної очистки котлів залізничних цистерн на ймовірність розтріскування поверхневого шару металу / А. Я. Куліченко, В. В. Ковальчук // Зб. наук. пр. Донецького ін-ту залізн. трансп. – Донецьк, 2012. – Вип. 29. – С. 228–234.
  6. Куліченко, А. Я. Теорія руйнування ортотропних матеріалів у вигляді залишків застиглого пеку в котлах залізничних цистерн / А. Я. Куліченко, А. Р. Міляннич // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 41. – С. 64–70.
  7. Питильгузов, Н. А. Особенности технологических операций подготовки цистерн при перевозке химически опасных грузов / Н. А. Питильгузов, Т. Б. Ивченко, В. В. Федорченко // Вісн. Східноукраїн. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2011. – № 6. – С. 135–139.
  8. Hess, G. Tank car travails: Regulators mull new safeguards for railcars that carry liquid hazardous materials / G. Hess // Chemical and Engineering News. – 2013. – № 91 (41). – P. 27–28.
  9. Lambert, R. G. Analysis of Fatigue Under Random Vibration / R. G. Lambert // The Shock and Vibration Bulletin. – 1976. – № 46 (3). – P. 55–72.
  10. Lambert, R. G. Computation Methods. Technical Report AD A 103211 / R. G. Lambert. – Alexandria : Defense Technical Information Center, Mar. 1980. – P 57–74.
  11. Lambert, R. G. Fracture Mechanics Applied to Step-Stress Fatigue Under Sine/Random Vibration / R. G. Lambert // The Shock and Vibration Bulletin. – 1978. – № 48 (3). – P. 93–101.
  12. Modeling the Dynamic Failure of Railroad tank cars using a physically motivated internal state variable plasticity/damage nonlocal model / F. R. Ahad, K. Enakoutsa, K. N. Solanki et al. // Modelling and Simulation in Engineering. – 2013. – Vol. 2013. – 11 p. doi: 10.1155/2013/815158.
  13. Saat, M. R. Generalized railway tank car safety design optimization for hazardous materials transport: Addressing the trade-off between transportation efficiency and safety / M. R. Saat, C. P. L. Barkan // J. of Hazardous Materials. – 2011. – № 189 (1–2). – P. 62–68. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.01.136.
  14. Weltshev, M. Comparison of the operating life of tank containers, tank vehicles and rail tank cars for the carriage of dangerous goods in practice, analysis of causes of damage / M. Weltshev, S. Schwarzer, F. Otremba // Chemical Engineering Transactions. – 2013. – № 31. – P. 559–564. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.01.13610.3303/CET1331094.

А. Р. МИЛЯНИЧ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Подвижной состав и путь», Львовский филиал Днепрпетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. И. Блажкевич, 12а, Львов, Украина, 79052, тел. +38 (067) 747 46 46, эл. почта milyan\_74@ukr.net, ORCID 0000-0003-3583-792X

## ПОВРЕЖДЕНИЯ РАБОЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ ИНСТРУМЕНТА, СВЯЗАННЫХ С ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ ЗАТВЕРДЕВШИХ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

**Цель.** Наибольшая часть грузовых перевозок в Украине совершается железнодорожным транспортом. Государственная статистика ежегодных железнодорожных грузовых перевозок (январь–ноябрь) фиксирует следующие данные: 2011 г. – 468 млн. т (108,2 % до 2010 г.); 2012 г. – 421,5 млн. т (98,5 % до 2011 г.); 2013 г. – 441,8 млн. т (96,6 % до 2012 г.). Несмотря на ежегодное уменьшение объемов грузовых перевозок, весомый вклад при транспортировке грузов принадлежит перевозкам в цистернах. Именно поэтому при эксплуатации цистерн сегодня очень актуальным является продолжение термина их долговечности. Современные представления о накоплении усталостных повреждений в деталях подвижного состава железнодорожного транспорта основываются на моделях, оценивающих долговечность металлических систем в зависимости от условий нагрузок. Эти модели позволяют с достаточным уровнем точности выполнять оценку разупрочнения металлических систем в условиях многоциклового утомления и при наличии упругих деформаций. В то же время, особенности поведения контртел эти модели не учитывают. Целью этой работы является построение математической модели, позволяющей оценивать долговечность рабочих инструментов, которые используются при очищении затвердевших органических грузов железнодорожных цистерн. **Методика.** С использованием современных подходов механики деформированного твердого тела был произведен анализ влияния параметров строения органических веществ на долговечность большегрузных элементов конструкций. Введение в данной работе соотношения взаимодействия повреждений относится, главным образом, к тем элементам

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

конструкции инструмента, которые, вследствие влияния широкополосных гауссовских случайных нагрузок, совершают колебания со своими резонансными или околорезонансными частотами. **Результаты.** Изучено влияние особенностей усталостных нагрузок на долговечность конструкции. Так, полученные результаты свидетельствуют о росте повреждений, которые вносятся циклами с малыми амплитудами напряжений, из-за нелинейного эффекта взаимодействия рабочего элемента инструмента с органическим материалом. Для приведенного примера была рассчитана долговечность утомляемостью, которая, согласно уточненной оценке, оказалась пониженной на 10...15 %. Снижение на 10 % соответствует максимальной амплитуде напряжения  $5\sigma$ , а снижение на 15 % – максимальной амплитуде  $7\sigma$ . **Научная новизна.** Аналитически показано, что параметры разупрочнения металлических систем связаны с кинетикой усталостных повреждений, которые накапливаются в металлических конструкциях при внешних нагрузках. **Практическая значимость.** Автором были предложены соотношения, которые позволяют оценивать остаточный ресурс детали в условиях заданной последовательной многоуровневой циклической нагрузки.

*Ключевые слова:* цикл; долговечность; повреждения; усталость; напряжения; цистерны подвижного состава; железнодорожный транспорт

A. R. MILIANYCH<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Rolling Stock and Track», Lviv Branch of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, I. Blazhkevych St., 12a, Lviv, Ukraine, 79052, tel. +38 (067) 747 46 46, e-mail milyan\_74@ukr.net, ORCID 0000-0003-3583-792X

## OPERATING ELEMENTS DAMAGE OF TOOLS CONNECTED WITH THE PLASTIC DEFORMATION OF HARDENED ORGANIC COMPOUNDS

**Purpose.** Most of the freight traffic in Ukraine is made by railway transport. Government statistics of annual railway freight traffic (January–November) records the following data: 2011 - 468 million tons (108.2% to 2010); 2012 – 421.5 million tons (98.5% to 2011); 2013 – 441.8 million tons (96.6% by 2012). Despite the annual decrease of freight traffic volumes, a significant contribution during the freight traffic belongs to transportation in tanks. That is why the term of their service life extension is very topical today at the operation of tanks. Modern ideas about the accumulation of fatigue damages in the details of railway vehicles are based on models that assess the service life of metallic systems, depending on the load conditions. These models with sufficient accuracy let carry out an assessment of softening of metallic systems in high-cycle fatigue conditions and at the presence of elastic deformation. At the same time, peculiarities of counterbodies' behavior these models do not take into account. The purpose of this paper is to construct a mathematical model to evaluate the durability of the operating tools, which are used in the purification of solidified organic cargo of tank cars. **Methodology.** With the use of modern approaches of deformed solid body mechanics the parameters impact of organic substances structure on the service life of heavy structural elements was analyzed. We present the interaction of damages ratio in this article. It relates mainly to those elements of the tool structure, which due to the influence of broadband Gaussian random loadings oscillate with their resonant or near-resonant frequencies. **Findings.** The influence of the fatigue loads features on the structure durability was studied. Thus, the obtained results suggest the increase of damages that are entered with low-amplitude cycles of strain, because of the nonlinear effect of the interaction between instrument operational elements with organic material. For the given example durability with fatigue which, according to an updated assessment, had been reduced by 10...15% was calculated. A decrease of 10% corresponds to the maximum amplitude of the voltage  $5\sigma$ , and a decrease of 15% - the maximum amplitude  $7\sigma$ . **Originality.** It is analytically shown that parameters of the metallic systems softening are connected with the kinetics of fatigue damages that accumulate in the metal structures under external loads. **Practical value.** Authors have proposed correlation that allows estimating the residual life of the part in conditions of a given sequence of multilevel cyclic loading.

*Keywords:* cycle; durability; damages; fatigue; voltage; tanks of rolling stock; railway transport

### REFERENCES

1. Andreikiv O.Ye., Rudavskiy D.V. Rozrakhunkova model zarodzhennia vtomnykh trishchyn bilia navodnoho vyrizu [The computational model of fatigue cracks nucleation near flood cutout]. *Fiziko-khimichna mekhanika materialiv – Physics and chemical mechanics of materials*, 2004, no. 5, pp. 63-66.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

2. *Vantazhni perevezennia. Statystychna informatsiia* [Freight traffic. Statistic information]. Available at: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (Accessed 15 June 2014).
3. Voropay V.S. Razrabotka metoda prinyatiya resheniya otnositelno vagona-tsisterny s istekshim naznachennym srokom sluzhby v usloviyakh okonchaniya III stadii zhiznenogo tsikla [Development of a method to make decision concerning the tank-car with the assigned expired lifetime in terms of final III-rd stage of the life cycle]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznichnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 42, pp. 201-204.
4. Ibatullin D. *Kinetika ustalostnoy povrezhdayemosti i razrusheniya poverkhnostnykh sloyev* [Kinetics of damage and fatigue fracture surface layers]. Samara, SSTU Publ., 2008. 387 p.
5. Kulichenko A.Ya., Kovalchuk V.V. Vplyv metodu termomekhanichnoi ochystky kotliv zaliznychnykh tsystem na ymovirnist roztriskuvannya poverkhnovoho sharu metalu [Effect of thermomechanical treatment method of railway tanks boilers on the cracking probability of the surface layer of the metal]. *Zbirnyk naukovykh prats Donetskoho instytutu zaliznychnoho transportu* [Proc. of Donetsk Institute of Railway Transport], 2012, issue 29, pp. 228–234.
6. Kulichenko A.Ya., Milianych A.R. Teoriia ruinuvannya ortotropnykh materialiv u vyhliadi zalyshkiv zastyhloho peku v kotlakh zaliznychnykh tsystem [Theory of failure of orthotropic materials in the form of a frozen pitch residues in boilers tanks]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznichnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 41, pp. 64-70.
7. Pitelguzov N.A., Ivchenko T.B., Fedorchenko V.V. Osobennosti tekhnologicheskikh operatsiy podgotovki tsistem pri perevozke khimicheskii opasnykh tovarov [Technological features of the tanks preparation during transportation of chemically dangerous goods]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni V. Dalia* [Bulletin of V. Dahl East-European National University], 2011, no. 6, pp. 135-139.
8. Hess G. Tank car travails: Regulators mull new safeguards for railcars that carry liquid hazardous materials. *Chemical and Engineering News*, 2013, no. 91 (41), pp. 27-28.
9. Lambert R.G. Analysis of Fatigue Under Random Vibration. *The Shock and Vibration Bulletin*, 1976, no. 46 (3), pp. 55-72.
10. Lambert R.G. Computation Methods. Technical Report AD A 103211. Alexandria, Defense Technical Information Center Publ., Mar. 1980, pp. 57-74.
11. Lambert R.G. Fracture Mechanics Applied to Step-Stress Fatigue Under Sine/Random Vibration. *The Shock and Vibration Bulletin*, 1978, no. 48 (3), pp. 93-101.
12. Ahad F.R., Enakoutsu K., Solanki K.N., Tjiptowidjojo Y., Bammann D.J. Modeling the Dynamic Failure of Railroad tank cars using a physically motivated internal state variable plasticity/damage nonlocal model. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2013, vol. 2013, 11 p. doi: 10.1155/2013/815158.
13. Saat M.R., Barkan C.P.L. Generalized railway tank car safety design optimization for hazardous materials transport: Addressing the trade-off between transportation efficiency and safety. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, no. 189 (1–2), pp. 62-68. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.01.136.
14. Weltshev M., Schwarzer S., Otremba F. Comparison of the operating life of tank containers, tank vehicles and rail tank cars for the carriage of dangerous goods in practice, analysis of causes of damage. *Chemical Engineering Transactions*, 2013, no. 31, pp. 559-564. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.01.13610.3303/CET1331094.

Стаття рекомендована до публікації к.т.н., доц. М. О. Кузінім (Україна); д.т.н., проф. В. В. Артемчуком (Україна)

Надійшла до редколегії: 20.06.2014

Прийнята до друку: 20.09.2014

## УДК 656.222.3

А. В. ПРОХОРЧЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Українська державна академія залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61166, тел. +38 (057) 730 19 88, ел. пошта railwayhub@yandex.ua, ORCID 0000-0003-3123-5024

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТІ МАСШТАБНОЇ ІНВАРІАНТНОСТІ СИСТЕМИ ОРГАНІЗАЦІЇ ПОЇЗДОПОТОКІВ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ПЕРКОЛЯЦІЇ

**Мета.** Робота присвячена питанню дослідження властивості масштабної інваріантності системи організації поїздопотоків на залізницях України. **Методика.** Для доказу належності реальної мережі призначень плану формування поїздів (ПФП) до типу так званих масштабно-інваріантних мереж запропоновано згенерувати різної розмірності безмасштабну мережу типу Барабаші-Альберта з параметрами, які має реальна мережа призначень ПФП. Досліджено також їх структуру на живучість за допомогою процедури перколяції вузлів. Процес перколяції запропоновано розглядати як зміну варіанту просторового переміщення вагонів на мережі при збільшенні кількості залізничних станцій, що втратили здатність виконувати основну функцію щодо пропуску вагонів за призначеннями ПФП в умовах несприятливих впливів (аварійна ситуація, перевантаження). **Результати.** Порівняльний аналіз результатів перколяції при випадковому та цілеспрямованому деструктивному впливі на вузли мережі показав співпадіння з результатами перколяції реальної мережі призначень ПФП, що доводить існування властивості самоподібності. Порівняльними показниками при перколяції були: відсоток видалених станцій в мережі, при якому виникає фрагментація мережі, середній інверсний шлях між вузлами мережі, діаметр графової структури, значення розміру другого за величиною кластера в мережі від кроків руйнування. **Наукова новизна.** Вперше підтверджена гіпотеза про існування властивості масштабної інваріантності в графі призначень ПФП на залізницях України, що дозволяє віднести граф до класу безмасштабних мереж. Існуючі знання в області теорії безмасштабних мереж можуть бути використані для опису живучості системи перевезень на залізницях України. **Практична значимість.** Спираючись на виявлені властивості системи направлення поїздопотоків, в подальшому можливим є створення математичної моделі, що дозволить спрогнозувати поведінку системи перевезень із мережевою структурою. Аналіз властивості живучості системи організації поїздопотоків дозволить оптимізувати використання капітальних інвестицій для підвищення пропускної спроможності мережі за рахунок виявлення найбільш критичних ділянок та станцій, які системно впливають на ефективність роботи мережі в цілому.

*Ключові слова:* масштабно-інваріантна мережа; план формування поїздів; перколяція; живучість; граф; залізнична мережа

### Вступ

Ця робота є продовженням досліджень фундаментальних властивостей системи організації вагонопотоків у поїзди на залізницях України [1, 3]. Існуючі підходи до аналізу системи організації поїздопотоків не дозволяють на макрорівні дослідити закономірності функціонування системи перевезень. Це вимагає впровадження нових методів досліджень, що засновані на системному підході. З цієї точки зору, перспективним є застосування сучасного напрямку досліджень на основі концепції статистичної фізики складних мереж. Цей підхід добре зарекомендував себе під час дослідження структурних властивостей соціальних мереж знайомств між людьми, технологічних мереж ліній високовольт-

них електропередач, інтернету та громадського автотранспорту [5, 8]. Проте у жодній з робіт не досліджували під час застосування цієї концепції мережу призначень плану формування поїздів (ПФП) на залізницях України. За таких умов актуальним є аналіз процесів, що відбуваються в мережі призначень ПФП. Виявлена у ході дослідження структурних властивостей мережі призначень ПФП гіпотеза про належність мережі до типу масштабно-інваріантних структур [12] потребує додаткового підтвердження. Таким структурам властива масштабна *інваріантність*, тобто явище самоподібності [6], або інваріантність під час зміни масштабу мережі. Доведення гіпотези про існування самоподібності в мережі надасть можливість спростити вивчен-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

ня загальносистемних властивостей системи організації вагонопотоків у поїзди на залізницях України за рахунок застосування заздалегідь виявлених та вивчених явищ і закономірностей в мережах подібного типу. Тому в роботі запропоновано дослідити властивість безмасштабності системи перевезень із сітьовою структурою на основі аналізу її живучості. Відповідно до відомого визначення [2] та специфіки вирішення поставленого завдання в роботі, під живучістю системи організації вагонопотоків розуміється її властивість, що забезпечує здатність виконання функції з просторового переміщення вагонів за умови дотримання строків доставки вантажів за наявності відмов на залізничних станціях, після яких відправлення вагонів за призначеннями плану формування поїздів (ПФП) неможливе. В межах дослідження живучості мережаної структури основний інтерес складає доведення існування самоподібності її перколяційного кластеру [6].

### Мета

Основною метою дослідження є підтвердження гіпотези про існування властивості масштабної інваріантності в мережі призначень плану формування поїздів України та використання нових знань для підвищення ефективності функціонування залізничного транспорту. Результати дослідження дозволять спростити розуміння процесів, які відбуваються в системі та можуть бути застосовані під час аналізу живучості системи перевезень на залізницях України.

### Методика

Для вирішення зазначеної проблеми в роботі запропоновано згенерувати різної розмірності безмасштабну мережу з параметрами, які має реальна мережа призначень ПФП та дослідити її структуру на живучість за допомогою процедури перколяції. Спираючись на висунуту гіпотезу про належність мережі призначень ПФП до типу так званих масштабно-інваріантних мереж (англ., *scale-free networks*) [9], що мають степеневий розподіл зв'язності вузлів [13], запропоновано використати для генерації мереж модель Барабаші-Альберта (англ., *Barabási-Albert model*) [8].

Ця модель є однією із найбільш поширених моделей генерації випадкових безмасштабних мереж з використанням принципу збільшення

росту та переважного приєднання (англ., *preferential attachment*) [8]. Генерація мережі починається з початкової зв'язної мережі  $m_0$ . Важливою є умова, за якої  $m_0 \geq 2$  і ступінь  $k_i$  кожного вузла  $i$  в початковій мережі повинен бути не менше 1, інакше вона завжди буде відділена від іншої частини мережі. Принцип зростання забезпечується приєднанням на кожному кроці нового вузла. Кожен новий вузол з'єднується з існуючим вузлом  $i$  з ймовірністю  $p_i$ , що пропорційна кількості зв'язків цих вузлів

$$p_i = \frac{k_i}{\sum_j k_j},$$

де  $k_i$  – ступінь вузла  $i$ ;  $k_j$  – ступінь всіх існуючих вузлів  $j$  в мережі, ( $i, j \in R$ ). В деякий момент часу  $t$  до мережі додається новий вузол із заданою кількістю нових зв'язків  $n$ ,  $n \leq m_0$ . На рис. 1 наведено приклад генерації мережі із п'яти кроків за допомогою моделі Барабаші-Альберта.

В межах завдання дослідження живучості структури мережі призначень ПФП запропоновано використати процедуру перколяції вузлів (англ., *site percolation problem*) [14]. Процес перколяції запропоновано розглядати як зміну варіанта просторового переміщення вагонів на мережі під час збільшення кількості залізничних станцій, що втратили здатність виконувати основну функцію щодо пропуску вагонів за призначеннями ПФП в умовах несприятливих впливів (аварійна ситуація, перевантаження).

Беручи до уваги відомі дослідження [6, 7], в роботі запропоновано проводити перколяцію в умовах випадкових відмов станцій в мережі (випадкова перколяція) та при так званих запланованих відмовах (корельована перколяція), коли деструктивний вплив здійснюється цілеспрямовано послідовно на станції з найбільшим вихідним ступенем зв'язності.

Для порівняння результатів протікання мережі призначень ПФП згідно з дослідженнями [4] запропоновано дослідити критичний стан двох випадково згенерованих за допомогою моделі Барабаші-Альберта мереж з параметрами степеневого розподілу зв'язності вузлів, що відповідають реальній мережі [12].

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

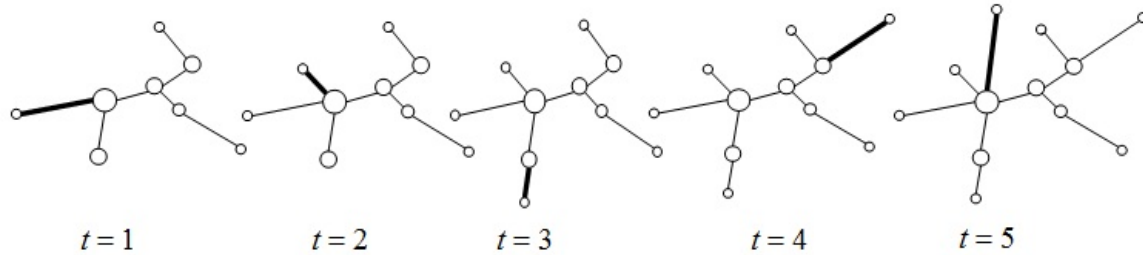


Рис. 1. Генерація мережі призначень ПФП за допомогою моделі Барабаші–Альберта при початковій мережі  $m_0 = 7$  та додаванні нового вузла на кожному кроці  $t$  із кількістю ребер  $n = 1$

Fig. 1. Generating networks of TFP destination using the model Barabash-Albert at an initial network of  $m_0 = 7$  and adding a new node at each step  $t$  of the number of edges  $n = 1$

Таблиця 1

## Результати моделювання повного руйнування мереж за двома варіантами перколяції

Table 1

## The simulation results of the complete destruction of networks in two variants of percolation

Реальна мережа 181 вершина; 372 зв'язки		Модельна мережа 181 вершина; 363 зв'язки		Модельна мережа 362 вершина; 846 зв'язки	
випадкова перколяція: повне руйнування мережі					
170 крок	94 %	179 крок	99 %	339 крок	94 %
корельована перколяція: повне руйнування мережі					
81 крок	45 %	58 крок	32 %	117 крок	32 %

Реальна мережа призначень ПФП, що була побудована відповідно до інформації з книги «Порядок направлення вагонопотоків та організації їх у вантажні поїзди на залізницях України на 2012–2013 роки», має 181 вузол та 372 зв'язки. Слід зазначити, для можливості виконання порівняльного аналізу з мережами Барабаші–Альберта, граф реальної мережі був перетворений у ненаправлений за допомогою програмного пакету RAJEK [10]. Генерація першої модельної мережі, що має 181 вузол та 363 зв'язки, здійснено на основі початкової зв'язної мережі при  $m_0 = 7$ . Тоді як друга модельна мережа була створена на основі початкової структури реальної мережі при  $m_0 = 181$  та збільшена в розмірі приблизно у два рази до 362 вершини та 846 зв'язків.

## Результати

Виконання експериментальних досліджень фазових переходів при перколяції в системі організації вагонопотоків у поїзди виявило, що при випадковій перколяції повне руйнування

мережі відбувається майже за однакових умов (рис. 2). Результати моделювання повного руйнування мереж наведено у табл. 1. Руйнування реальної мережі відбувається у разі видалення 94 % станцій від загальної їх кількості, тоді як руйнування першої і другої мереж відбувається у разі видалення 99 % та 94 % від загальної кількості станцій відповідно.

При послідовному видаленні вузлів з найбільшим середнім ступенем фрагментація в реальній мережі виникає на 81 кроці, що становить 45 % станцій від існуючих, тоді як руйнування першої і другої мереж виникає у разі видалення 32 % усіх станцій.

Для перевірки відповідності системи організації вагонопотоків її призначенню запропоновано на кожному кроці моделювання здійснювати розрахунок таких показників, як середній інверсний шлях між вузлами мережі [4] та діаметр графової структури [16] (див. рис. 3). Результати моделювання повного руйнування мереж за двома варіантами перколяції наведено у табл. 2.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

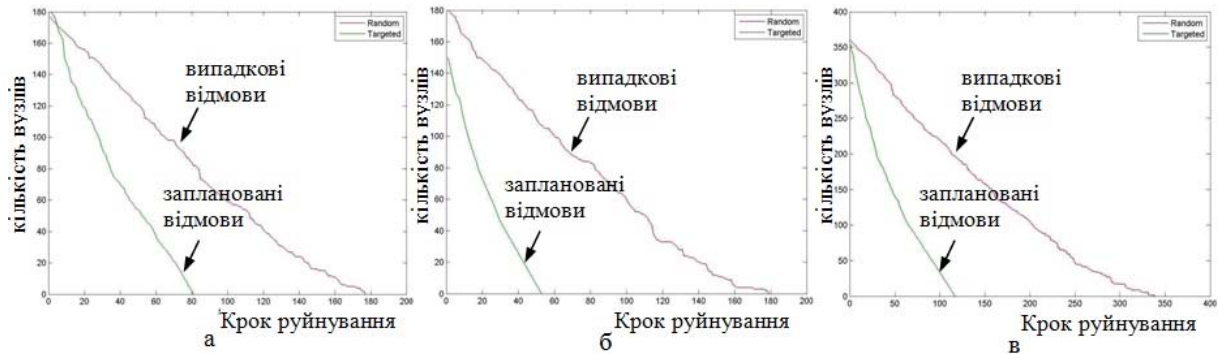


Рис. 2. Графік залежності кількості діючих вузлів в мережі призначень ПФП від кроків руйнування за двома варіантами перколяції:  
*a* – реальна мережа; *б* – перша модельна мережа; *в* – друга модельна мережа

Fig. 2. Dependence diagram of the number of active nodes in the networks of TFP destination from destruction steps by percolation of two options:  
*a* – real network; *б* – the first network model; *в* – the second network model

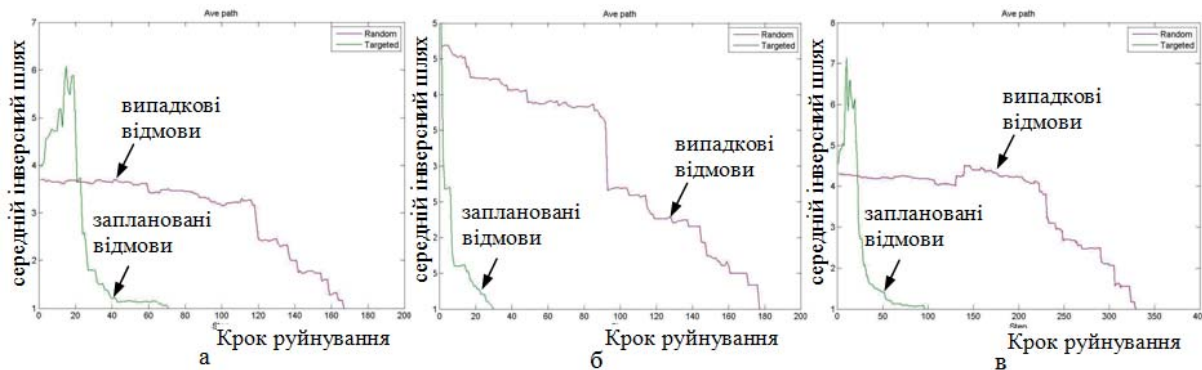


Рис. 3. Графік залежності середнього інверсного шляху в мережі призначень ПФП від кроків руйнування за двома варіантами перколяції:  
*a* – реальна мережа; *б* – перша модельна мережа; *в* – друга модельна мережа

Fig. 3. Dependence diagram of the average inverse path in the network of TFP destinations from destruction steps by percolation of two options:  
*a* – real network; *б* – the first network model; *в* – the second network model

Таблиця 2

**Результати моделювання різкої зміни показника середнього інверсного шляху та діаметра мереж за двома варіантами перколяції**

Table 2

**Simulation results of abrupt change of the average inverse path and the networks diameter in two variants of percolation**

Реальна мережа 181 вершина; 372 зв'язки		Модельна мережа 181 вершина; 363 зв'язки		Модельна мережа 362 вершина; 846 зв'язки	
випадкова перколяція:					
зміна показника середнього інверсного шляху між вузлами мережі					
130 крок	2,83	92 крок	3,611	231 крок	3,23
діаметр графової структури					
130 крок	7	92 крок	6	231 крок	9

Реальна мережа 181 вершина; 372 зв'язки		Модельна мережа 181 вершина; 363 зв'язки		Модельна мережа 362 вершина; 846 зв'язки	
корельована перколяція:					
зміна показника середнього інверсного шляху між вузлами мережі					
15 крок	6,08	1 крок	4,984	10 крок	7,148
діаметр графової структури					
15 крок	16	1 крок	10	10 крок	21

Аналіз зміни середнього інверсного шляху між вузлами мережі виявив існування фазового переходу першого роду [5, 16]. Так, за три кроки відбувається його падіння на 22,8 % у реальній мережі, тоді як перша мережа також має спад на 22,7 % з подальшою тенденцією спаду, що характеризує повне руйнування мережі.

Більш повільний спад показника спостерігається у другій модельній мережі, так за чотири кроки відбувається падіння показника на 18,6 %, тоді як за 12 кроків досягається відносно падіння на 23,9 % з подальшою тенденцією спаду. Аналіз залежності показника діаметра графа від кроків руйнування дзеркально відображає таку ж саму тенденцію.

Неоднакові результати стійкості мереж під час цілеспрямованого деструктивного впливу. Реальна мережа та друга модельна мережа продемонстрували приблизно однакові результати стійкості. Так показник середнього інверсного шляху досягає свого максимуму у реальній мережі на 15 кроці та становить 6,08 переформувань, тоді як у другій мережі максимум досягається на 10 кроці та становить 7,148 переформувань. Майже однакові результати різкого падіння показника після досягнення максимальних значень: так за 14 кроків відбувається різке падіння показника на 70,6 % у реальній мережі та 60,14 % у другій модельній мережі.

Відмінні від інших результати стійкості у першій модельній мережі. Показник середнього інверсного шляху на першому кроці має максимальне значення 4,984 переформувань, після чого на 8 кроці відбувається різке падіння показника на 67,8 % від максимального.

Можна констатувати, що перша модельна мережа при корельованій перколяції є нестійкою.

Відповідно до результатів перколяції мережі поріг протікання під час випадкового переван-

таження залізничних станцій в мережі виникає у реальній мережі при відмові 71,8 % станцій, у першій мережі – 50,8 %, у другій мережі – 63,8 %. При корельованій перколяції поріг протікання мережі ПФП виникає для реальної мережі під час руйнування 8,2 % станцій від загальної кількості; для першої модельної мережі на першому кроці – 0,6 %; для другої модельної мережі під час руйнування 5,5 % станцій.

Для підтвердження значень порогу протікання в мережі призначень ПФП на рис. 4 побудовані залежності розміру другого за величиною кластера в мережі [11, 15] від кроків руйнування за двома варіантами перколяції. Одразу можна спостерігати фазовий перехід в системі при досягненні максимального значення розміру другого за величиною кластера (рис. 4). При корельованій перколяції максимальне значення розміру другого за величиною кластера досягається у реальній мережі на 15 кроці; для першої модельної мережі на 2 кроці; для другої модельної мережі на 11 кроці. Так як і в попередніх результатах, відмінним є лише результат першої модельної мережі. При випадковій перколяції фазовий перехід в системі при досягненні максимального значення другої сильно зв'язної компоненти подібний у всіх мереж. Результати моделювання при досягненні максимального значення розміру другого за величиною кластера від кроків руйнування мереж за двома варіантами перколяції наведено у табл. 3.

### Наукова новизна та практична значимість

Відповідно до виконаних розрахунків протікання модельних мереж їх стійкість до випадкових відмов та чутливість до скоординованих збоїв дозволяє стверджувати про їх структурну схожість з реальною мережею призначень ПФП.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

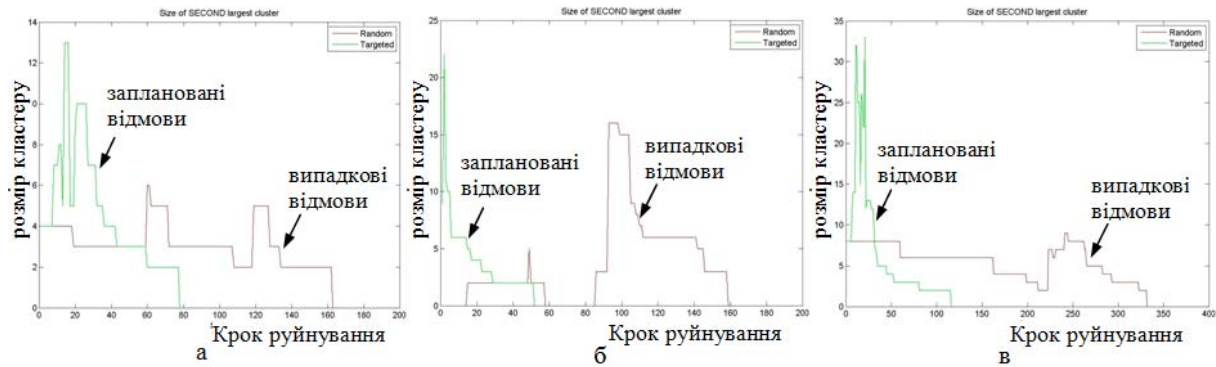


Рис. 4. Графік залежності розміру другого за величиною кластера в мережі від кроків руйнування: *a* – реальна мережа; *b* – перша модельна мережа; *c* – друга модельна мережа

Fig. 4. Dependence diagram of the size of the second largest cluster in a network from destruction steps: *a* – real network; *b* – the first network model; *c* – the second network model

Таблиця 3

**Результати моделювання залежності розміру другого за величиною кластера в мережі від кроків руйнування мереж за двома варіантами перколяції**

Table 3

**Simulation results depending on the size of the second largest cluster in a network from destruction steps in two variants of percolation**

Реальна мережа 181 вершина; 372 зв'язки		Модельна мережа 181 вершина; 363 зв'язки		Модельна мережа 362 вершина; 846 зв'язки	
випадкова перколяція: максимальне значення розміру другого за величиною кластера в мережі					
130 крок	8 станцій	93 крок	16 станцій	241 крок	9 станцій
корельована перколяція: максимальне значення розміру другого за величиною кластера в мережі					
15 крок	13 станцій	2 крок	22 станцій	11 крок	32 станцій

Отримані результати перколяції мереж різної розмірності підтверджують, що їх перколяційні кластери самоподібні або незалежні від масштабу. Відповідно до вище описаних досліджень в роботі вперше підтверджена гіпотеза про існування властивості масштабної інваріантності в мережі призначень плану формування поїздів на залізницях України. З практичної точки зору, спираючись на виявлені властивості системи направлення поїздопотоків, в подальшому можливим є створення математичної моделі, що дозволить спрогнозувати поведінку системи перевезень з сітьовою структурою на залізничному транспорті.

### Висновки

Слід зазначити, нульовий поріг протікання для першої модельної мережі при корельованій

перколяції відрізняється від результатів стійкості реальної мережі з причини складності реалізації на практиці генерування мережі, яка була б ідентична реальній. Все ж таки підхід на основі моделі Барабаші-Альберт є найпростішим, а тому для більшого наближення до реальних даних необхідним є удосконалення процедури генерування мережі призначень ПФП. Однак, навіть за таким спрощеним підходом майже всі основні результати перколяції більшості порівняльних показників співпадають з результатами реальної мережі призначень ПФП, що є підставою для ствердження про існування властивості безмасштабності в системі організації поїздопотоків та належності реальної мережі призначень ПФП до типу так званих масштабно-інваріантних мереж.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Бобровский, В. И. Совершенствование технологии формирования многогруппных составов / В. И. Бобровский, И. Я. Сковрон // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2007. – Вип. 19. – С. 88–93.
- Державний стандарт України ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. – Введено вперше ; надано чинності 1996-01-01. – К. : Держстандарт України, 1994. – 33 с.
- Марценюк, Л. В. Вдосконалення процесу вантажних перевезень та механізму управління ними / Л. В. Марценюк, А. В. Вишнякова // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2014. – № 2 (50). – С. 41–48.
- Прохорченко, А. В. Аналіз живучості системи організації поїздопотоків на основі теорії перколяції / А. В. Прохорченко // Восточно-европ. журн. передових технологій. – 2013. – Т. 6. – № 3 (66). – С. 7–10.
- Складні мережі / Ю. Головач, О. Олемской, К. фон Фербер та ін. // Журн. фіз. дослідж. – 2006. – Т. 10. – № 4. – С. 247–289.
- Тарасевич, Ю. Ю. Перколяція: теорія, приложенія, алгоритми : учеб. пособие / Ю. Ю. Тарасевич. – М. : Едиториал УРСС, 2002. – 112 с.
- Albert, R. Error and attack tolerance of complex networks / R. Albert, H. Jeong, A. Barabasi // Nature. – 2000. – Vol. 406. – P. 378–382. doi: 10.1038/35019019
- Albert, R. Statistical mechanics of complex networks / R. Albert, A. L. Barabási // Reviews of Modern Physics. – 2002. – Vol. 74. – P. 47–97.
- Barabási, A. L. Emergence of scaling in random networks / A. L. Barabási, R. Albert // Science. – 1999. – Vol. 286. – P. 509–512. doi: 10.1126/science.286.5439.509.
- Batagelj, V. Pajek: Package for Large Networks. Version 1.10 / V. Batagelj, A. Mrvar. – Ljubljana : University of Ljubljana, 2005. – 10 p.
- Broadbent, S. R. Percolation processes: I. Crystals and Mazes / S. R. Broadbent, J. M. Hammersley // Mathematical Proc. of the Cambridge Philosophical Society. – 1957. – Vol. 53. – Iss. 03. – P. 629–641.
- But'ko, T. Investigation into Train Flow System on Ukraine's Railways with Methods of Complex Network Analysis / T. But'ko, A. Prokhorchenko // American J. of Industrial Engineering. – 2013. – Vol. 1 (3). – P. 41–45.
- Clauset, A. Power-law distributions in empirical data / A. Clauset, C. R. Shalizi, M. E. J. Newman // SIAM Review. – 2009. – № 51 (4). – P. 661–703. doi: 10.1137/070710111.
- Measures of critical exponents in the four dimensional site percolation / H. G. Ballesteros, L. A. Fer-nández, V. Martin-Mayor et al. // Physics Letters. – 1997. – Vol. B 400 (3). – P. 346–351. doi: 10.1016/s0370-2693(97)00337-7.
- Newman, M. E. J. Scaling and percolation in the small-world network model / M. E. J. Newman, D. J. Watts // Phys. Rev. E. – 1999. – Vol. E. – № 60 (6). – P. 7332–7342. doi: 10.1103/physreve.60.7332.
- Wasserman, S. Social Network Analysis: Methods and Applications / S. Wasserman, K. Faust. – Cambridge : Cambridge University Press, 1994. – 827 p.

А. В. ПРОХОРЧЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Управление эксплуатационной работой», Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, площадь Фейербаха, 7, 61166, Харьков, Украина, тел. +38 (057) 730 19 88, эл. почта railwayhub@yandex.ua, ORCID 0000-0003-3123-5024

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВА МАСШТАБНОЙ ИНВАРИАНТНОСТИ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПОЕЗДОПОТОКОВ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ПЕРКОЛЯЦИИ

**Цель.** Работа посвящена вопросу исследования свойства масштабной инвариантности системы организации поездопотоків на железных дорогах Украины. **Методика.** Для доказательства принадлежности реальной сети назначений плана формирования поездов (ПФП) к типу так называемых масштабнo-инвариантных сетей предложено сгенерировать различной размерности безмасштабные сети типа Барабаши-Альберта с параметрами, которые имеет реальная сеть назначений ПФП. Исследована также структура на живучесть с помощью процедуры перколяции узлов. Процесс перколяции предложено рассматривать как изменение варианта пространственного перемещения вагонов на сети при увеличении количества железнодорожных станций, которые потеряли способность выполнять основную функцию по пропуску вагонов по назначениям ПФП в условиях неблагоприятных воздействий (аварийная ситуация, перегрузка). **Результаты.** Сравнительный анализ результатов перколяции при случайном и целенаправленном деструктивном воздействии на

Doi 10.15802/stp2014/30471

© А. В. Прохорченко, 2014

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

узлы сети показал совпадение с результатами перколяции реальной сети назначений ПФП, что доказывает существование свойства самоподобия. Сравнительными показателями при перколяции были: процент удаленных станций в сети, при котором возникает фрагментация сети, средний инверсный путь между узлами сети, диаметр графовой структуры, значение размера второго по величине кластера в сети от шагов разрушения.

**Научная новизна.** Впервые подтверждена гипотеза о существовании свойства масштабной инвариантности в графе назначений ПФП на железных дорогах Украины, что позволяет отнести граф к классу безмасштабных сетей. Существующие знания в области теории безмасштабных сетей могут быть использованы для описания живучести системы перевозок на железных дорогах Украины. **Практическая значимость.** Опираясь на выявленные свойства системы направления поездопотоков, в дальнейшем возможным является создание математической модели, что позволит спрогнозировать поведение системы перевозок с сетевой структурой. Анализ свойства живучести системы организации поездопотоков позволит оптимизировать использование капитальных инвестиций для повышения пропускной способности сети за счет выявления наиболее критических участков и станций, которые системно влияют на эффективность работы сети в целом.

*Ключевые слова:* масштабно-инвариантная сеть; план формирования поездов; перколяция; живучесть; граф; железнодорожная сеть

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

<sup>1\*</sup>Dep. «Operational Work Management», Ukrainian State Academy of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61166, tel. +38 (057) 730 19 88, e-mail railwayhub@yandex.ua, ORCID 0000-0003-3123-5024

## INVESTIGATION OF SCALE-INVARIANT PROPERTY OF ORGANIZATION SYSTEM OF TRAIN TRAFFIC VOLUME BASED ON THE PERCOLATION THEORY

**Purpose.** The work is devoted to the study the property of scaling invariance of the organization system of train traffic volume on Ukrainian railways. **Methodology.** To prove the real network origin of Trains Formation Plan (TFP) destination to the type of so-called scale-invariant networks it is proposed to generate scale-free networks with different dimensions, Barabási–Albert type with parameters that real networks of TFP destination has and to investigate their structure on survivability using the procedure of percolation nodes. Percolation process is proposed to be considered as a modified version of the spatial movement of cars on the network by increasing the number of railway stations, which have lost the ability to perform the basic function to pass cars on TFP destination in terms of adverse effects (an accident, overload). **Findings.** Comparative analysis of percolation at random and targeted destructive impact on network nodes has shown matching with the results of real network percolation of TFP destination, which proves the existence of self-similarity. Comparable figures in percolation were: percentage of remote stations in the network, in which the network fragmentation occurs, the average inverse path between network nodes, the diameter of the graph structure, the size meaning of the second largest cluster in the network from the steps of destruction. **Originality.** For the first time the hypothesis of the existence of scaling invariance properties of the graph TFP destinations on the railways of Ukraine, which can be attributed to a class of the graph scale-free networks was confirmed. Existing knowledge in the field theory of scale-free networks can be used to describe the survivability of system transportation on the railways of Ukraine. **Practical value.** Based on the identified properties of system directions of train traffic volumes, it is possible to create a mathematical model in the future that will predict the behavior of the transportation system with network structure. Properties analysis of system survivability of train traffic volumes will optimize the use of capital investments to increase network capacity by identifying the most critical lines and stations that systematically affect the efficiency of the network as a whole.

*Keywords:* scale-invariant networks; trains' formation plan; percolation; survivability; graph; railway network

### REFERENCES

1. Bobrovskiy V.I., Skovron I.Ya. Sovershenstvovaniye tekhnologii formirovaniya mnogogruppnykh sostavov [Improving the technology of multigroup compositions formation]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2007, issue 19, pp. 88-93.
2. DSTU 2860-94. *Nadiinist tekhniky. Terminy ta vyznachennia* [State Standard of Ukraine 2860-94. Reliability of technique. Terms and Definitions]. Kyiv, Derzhstandart Ukrainy Publ., 1994. 33 p.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

3. Martseniuk L.V., Vyshniakova A.V. Vdoskonalennia protsesu vantazhnykh perevezen ta mekhanizmu upravlinnia nymy [Improving of freight transportation process and mechanism of their management]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2014, no. 2 (50), pp. 41-48.
4. Prokhorchenko A.V. Analiz zhyvuchosti systemy orhanizatsii poizdopotokiv na osnovi teorii perkoliatsii [Analysis of survivability of the organisation system of train traffic volumes on the percolation theory]. *Vostochno-yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy – Eastern-European Journal of Innovative Technologies*, 2013, vol. 6, no. 3 (66), pp. 7-10.
5. Holovach Yu., Oliemskoi O., fon Ferber K., Holovach T., Mryhlod O., Olemskoi I., Palchykov V. Skladni merezhi [Complex networks]. *Zhurnal fizychnykh doslidzhen – Journal of Physical Studies*, 2006, vol. 10, no. 4, pp. 247-289.
6. Tarasevich Yu.Yu. *Perkolyatsiya: teoriya, prilozheniya, algoritmy* [Percolation: theory, applications, algorithms]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2002. 112 p.
7. Albert R., Jeong H., Barabasi A. Error and attack tolerance of complex networks. *Nature*, 2000, vol. 406, pp. 378–382. doi: 10.1038/35019019
8. Albert R., Barabási A.-L. Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of Modern Physics*, 2002, vol. 74, pp. 47-97.
9. Barabási A.-L., Albert R. Emergence of scaling in random networks. *Science*, 1999, vol. 286, pp. 509-512. doi: 10.1126/science.286.5439.509.
10. Batagelj V., Mrvar A. Pajek: Package for Large Networks, Version 1.10. Ljubljana, University of Ljubljana Publ., 2005. 10 p.
11. Broadbent S.R., Hammersley J.M. Percolation processes: I. Crystals and Mazes. *Mathematical Proc. of the Cambridge Philosophical Society*, 1957, vol. 53, pp. 629-641.
12. But'ko T., Prokhorchenko A. Investigation into Train Flow System on Ukraine's Railways with Methods of Complex Network Analysis. *American Journal of Industrial Engineering*, 2013, vol. 1 (3), pp. 41-45.
13. Clauset A., Clauset A., Shalizi C.R., Newman M.E.J. Power-law distributions in empirical data. *SIAM Review*, 2009, vol. 51 (4), pp. 661-703. doi: 10.1137/070710111.
14. Ballesteros H.G., Fernández L.A., Martin-Mayor V., Parisi G., Ruiz-Lorenzo J.J. Measures of critical exponents in the four dimensional site percolation. *Physics Letters*, 1997, vol. 400 (3) B, pp. 346-351. doi: 10.1016/s0370-2693(97)00337-7.
15. Newman M.E.J., Watts D.J. Scaling and percolation in the small-world network model. *Phys. Rev. E.*, 1999, vol. E 60 (6), pp. 7332-7342. doi: 10.1103/physreve.60.7332.
16. Wasserman, S., Faust K. *Social Network Analysis: Methods and Applications*. Cambridge, Cambridge University Press Publ., 1994. 827 p.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Т. В. Бутько (Україна); д.т.н., проф. Д. М. Козаченком (Україна)

Надійшла до редколегії: 16.07.2014

Прийнята до друку: 29.09.2014

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 621.771.23.016.01

Д. О. ЗАБАРИЛО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (063) 446 77 38, ел. пошта lazbl@yandex.ru, ORCID 0000-0002-6206-0012

### ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСТОТИ ВИСОКОЧАСТОТНОЇ ЛАНКИ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОЇ СХЕМИ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ

**Мета.** Загальна протяжність електрифікованих ділянок залізниць України розподілена приблизно навпіл між ділянками постійного та змінного струмів. Для проходження місць стикування різних родів струму без зупинки поїзда застосовується двосистемний електрорухомий склад. Тому перспективним для залізниць України є впровадження саме такого рухомого складу нової концепції, тобто, з використанням асинхронного тягового привода. Окрім ряду переваг існує вагомий недолік рухомого складу подібної концепції, який полягає в імпульсному відбиранні енергії з джерела живлення, що може вплинути на надійність роботи колійних пристроїв автоматики, а, отже, і на безпеку руху поїздів. Крім того, питома потужність тягового трансформатора значно поступається питомій потужності інших елементів тягового кола. Для усунення таких недоліків були запропоновані перспективні схеми із застосуванням проміжної ланки підвищеної частоти. Ланка складається із трансформатора та інвертора. Першочерговою задачею для впровадження перспективних схем являється визначення робочої частоти високочастотної ланки. **Методика.** Для визначення максимальної робочої частоти комутації транзисторів в роботі використовується методика розрахунку теплових параметрів для напівпровідникових приладів. Для отримання аналітичного виразу кривої залежності енергії, яка виділяється при комутації IGBT (insulated-gate bipolar transistor) від струму його навантаження, застосовується метод апроксимації кривої. **Результати.** Встановлено, що допустима частота високочастотної ланки визначається струмом навантаження проміжного трансформатора. Визначено діапазон робочих частот ланки в залежності від струмів навантаження. Для заданого діапазону струмів виконано порівняльний аналіз комутаційних характеристик IGBT 65 класу виробництва компаній Infineon та ABB. **Наукова новизна.** Отримав подальший розвиток метод визначення максимальної робочої частоти проміжної ланки в схемі з використанням проміжного трансформатора підвищеної частоти. **Практична значимість.** Визначений діапазон робочих частот високочастотної ланки дозволить розвинути подальші дослідження роботи силової схеми з застосуванням трансформатора підвищеної частоти електрорухомого складу подвійного живлення з асинхронним тяговим приводом, що зробить можливим оцінити ефективність впровадження схем подібної конфігурації.

**Ключові слова:** асинхронний тяговий двигун; електрорухомий склад подвійного живлення; трансформатор підвищеної частоти; ланка підвищеної частоти; IGBT; автономний інвертор напруги

#### Вступ

Залізниця України електрифіковані ділянками постійного і змінного струму та розділені пунктами стикування. Для проходження таких пунктів без зупинки поїздів застосовується двосистемний електрорухомий склад (ЕРС),

використання якого дозволяє знизити кількість інвентарного парку локомотивів та підвищити пропускну спроможність залізниць.

Станом на початок 2014 року інвентарний парк електрорухомого складу подвійного живлення складає 61 одиницю. З них 49 одиниць – електровози серії ВЛ82М, які практично повні-

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

стю вичерпали свій ресурс і вимагають заміни на електрорухомий склад нового покоління.

ЕРС нового покоління характеризуються використанням асинхронних тягових двигунів, які мають низку переваг відносно колекторних двигунів постійного та пульсуючого струму.

Структура високовольтної частини привода визначає його ККД, масо-габаритні показники, надійність та рівень впливу на суміжні системи. В загальному вигляді структура силової схеми ЕРС подвійного живлення нового покоління зображена на рис. 1 [11]. Працює схема таким чином. При живленні від мережі змінного струму 25 кВ, 50 Гц напруга знижується головним трансформатором ГТ, далі випрямляється, підвищується і стабілізується чотириквadrантним перетворювачем ПЧ, згладжується у ланці постійної напруги ЛПН та подається на автономний інвертор напруги АІН, який живить тяговий асинхронний двигун АТД. При живленні від мережі постійного струму 3 кВ напруга подається безпосередньо до ланки постійної напруги ЛПН.

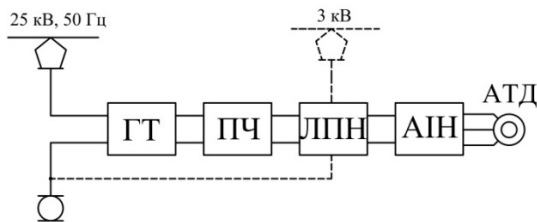


Рис. 1. Структура силової схеми ЕРС подвійного живлення з асинхронним тяговим приводом

Fig. 1. Power circuit structure of doubly-fed ERS asynchronous traction drive

Головним недоліком схем подібної конфігурації є імпульсний відбір енергії з вторинної обмотки трансформатора чотириквadrантним перетворювачем шляхом короткочасного замикання обмотки для підвищення напруги ЛПН [3]. Такі замикання створюють імпульси струму з піковими значеннями, які передаються, в остаточному підсумку, в рейкові кола і можуть викликати збій в роботі колійних пристроїв автоматики, в результаті чого знижується безпека руху поїздів. Крім того, питома вага тягового трансформатора значно поступається питомій вазі перетворювача, а традиційні методи її зниження (застосування електротехнічних сталей інших марок) не дають суттєвого виграшу, тому потрібно застосовувати альтернативні способи поліпшення масогабаритних показників трансформатора.

Doi 10.15802/stp2014/30448

Для усунення вказаних недоліків були запропоновані конфігурації схем [2, 3, 12, 13], в яких використовується проміжний трансформатор підвищеної частоти, що дозволить покращити масогабаритні показники тягового трансформатора та усунути імпульсний відбір енергії.

Загальну структуру функціональної схеми запропонованої конфігурації зображено на рис. 2. Схема працює таким чином. При живленні від мережі змінного струму 25 кВ, 50 Гц напруга випрямляється вхідним випрямлячем В1, перетворюється в змінну напругу підвищеної частоти інвертором І, перетворюється трансформатором підвищеної частоти ТПЧ до потрібного рівня, випрямляється випрямлячем В2, згладжується фільтром в ланці постійної напруги ЛПН та подається на вхід автономного інвертора напруги АІН, який живить асинхронний тяговий двигун АТД. При живленні від мережі постійного струму 3 кВ напруга подається до ланки постійної напруги ЛПН.

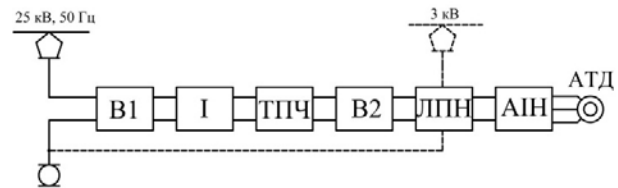


Рис. 2. Функціональна схема ЕРС подвійного живлення з використанням трансформатора підвищеної частоти

Fig. 2. Doubly-fed ERS functional diagram using a high frequency transformer

В режимі рекуперації випрямлячі В1 та В2 працюють як інвертори, а інвертор І працює випрямлячем.

З точки зору конфігурації дану структуру схеми силових кіл можна використовувати для ЕРС з будь-якою кількістю осей [1], а з точки зору потужності – як для електропоїздів, так і для електровозів.

Силова електрична схема запропонованої конфігурації для одного тягового плеча представлена на рис. 3.

## Мета

Одним з головних завдань, які потрібно вирішити для впровадження схеми з застосуванням трансформатора підвищеної частоти, є визначення робочої частоти блока інвертора.

© Д. О. Забарилло, 2014

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

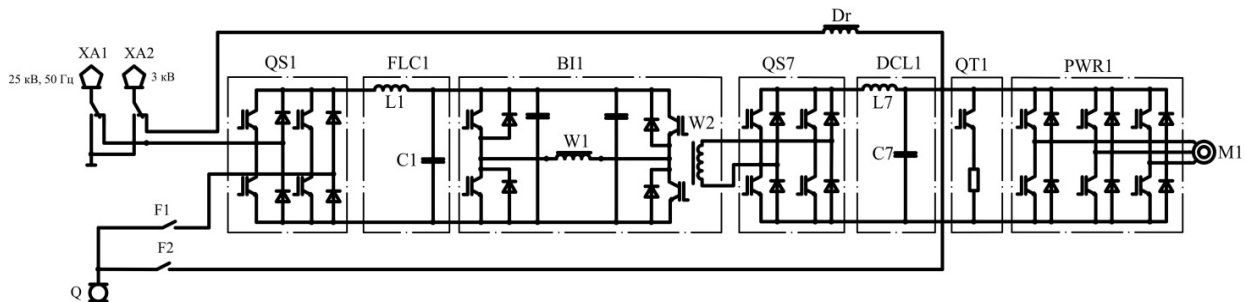


Рис. 3. Силова схема ЕРС подвійного живлення з використанням трансформатора підвищеної частоти: QS1, QS7 – випрямлячі; FLC1, DCL1 – фільтри; BI1 – блок інвертора, який складається з інвертора та трансформатора підвищеної частоти; QT1 – гальмівний чопер; PWR1 – автономний інвертор напруги; M1 – асинхронний тяговий двигун; Dr – вхідний дросель

Fig. 3. Doubly-fed ERS power circuit of using high frequency transformer

### Методика

Блок інвертора складається із трансформатора підвищеної частоти та інвертора, який його живить.

Допустима робоча частота трансформатора визначається, головним чином, магнітними та електричними властивостями матеріалу магнітопроводу. Підвищення частоти призводить до зростання нагріву сердечника, що зумовлено, з одного боку, дією вихрових струмів, а з іншого – зменшенням площі поверхні охолодження (внаслідок зменшення габаритів трансформатора). Тому для зменшення температури нагріву необхідно знижувати вихрові струми в сердечнику. Для цього потрібно застосовувати магнітм'які матеріали з питомим опором більшим, ніж у електротехнічних сталях.

Останнім часом широке розповсюдження отримали аморфні сплави – це сплави, які мають випадкову (некристалічну) структуру. До складу сплаву входять дві групи елементів: перехідні метали (Fe, Co, ...) й так звані аморфоутворюючі елементи (B, C, Si, ...). Аморфна структура сплаву виходить тільки при визначеній швидкості його охолодження – сотні й тисячі градусів за секунду.

Для силового трансформаторобудування раціональним є застосування аморфних сплавів на основі заліза. Такі сплави мають індукцію насичення 1,5–1,6 Тл.

Найбільш потужною країною-виробником аморфних сплавів є США, які в цій країні називаються Metglas. Серед великої номенклатури аморфних сплавів вигідно відрізняється сплав марки 2 605 HB1M [6], який має більш низькі пи-

томі втрати (0,083 Вт/кг при  $B = 1,3$  Тл,  $f = 50$  Гц) та більш високу індукцію насичення (1,63 Тл) порівняно з аналогами.

На ЕРС змінного струму, який експлуатується на залізницях України, використовуються тягові трансформатори, магнітопроводи яких виконано з електротехнічної сталі марок 3 414 і 3 407 товщиною листа 0,30 мм та 0,35 мм відповідно. Під час заміни магнітопроводів з електротехнічної сталі вказаних марок на аморфний сплав марки 2 605 HB1M можна знизити втрати холостого ходу в 8,5...10,6 разу [2]. Тому використання аморфного сплаву марки 2 605 HB1M дозволить знизити температуру нагріву сердечника трансформатора підвищеної частоти. Такі сердечники і, відповідно, трансформатори можуть працювати на частотах до 100 кГц [6].

Порівняння питомих втрат в електротехнічній сталі та аморфному сплаві наведено в табл. 1.

Допустима робоча частота інвертора обмежується комутаційними властивостями силових ключів. Сучасні силові керовані напівпровідникові ключі великої потужності працюють на частотах до десятків кілогерц, а їх допустима робоча частота обмежується, головним чином, тепловими параметрами.

Для надійної роботи схеми (рис. 3) необхідно в перетворювачах застосовувати прилади не нижче 65 класу [1]. На сьогодні такими приладами є IGBT. Тому при визначеному класі IGBT допустима частота високочастотної ланки залежить від струму навантаження, який визначається допустимими втратами потужності.

Загальні втрати потужності в IGBT  $P$  визначаються тепловими параметрами приладу та складаються із таких складових:

## Порівняння питомих втрат в електротехнічній сталі та аморфному сплаві

Table 1

## Comparison of specific losses in electrical steel and amorphous alloys

Марка сталі, сплаву	3 414	3 407	2 605 HB1M
Питоми втрати, Вт/кг	0,878	0,737	0,083
Відношення питомих втрат в сталі до аморфного сплаву	10,6	8,5	–

$$P = P_{cond} + P_{sw} + P_{ynp} + P_{zc}, \quad (1)$$

де  $P_{cond}$  – втрати потужності у провідному (відкритому) стані, Вт;  $P_{sw}$  – втрати потужності при комутації, Вт;  $P_{ynp}$  – втрати потужності на управління приладом, Вт;  $P_{zc}$  – втрати потужності, спричинені протіканням зворотного струму, Вт.

Втрати потужності  $P_{ynp}$  та  $P_{zc}$  мають відносно низькі значення, тому ними можна знехтувати, що не вплине на точність при розрахунках. Тоді:

$$P = P_{cond} + P_{sw}. \quad (2)$$

Втрати потужності у провідному стані  $P_{cond}$  в IGBT при синусоїдальній ШІМ для дворівневого АІН визначаються за формулою [10]:

$$P_{cond} = 0,5 \left( U_{CEO} \frac{I_m}{\pi} + r_{CE} \frac{I_m^2}{4} \right) + m \cos \varphi \left( U_{CEO} \frac{I_m}{8} + r_{CE} \frac{I_m^2}{3\pi} \right), \quad (3)$$

де  $U_{CEO}$  – порогова напруга IGBT у відкритому стані, В (рис. 4);  $r_{CE}$  – динамічний опір IGBT у відкритому стані, Ом;  $m$  – коефіцієнт модуляції;  $\cos \varphi$  – коефіцієнт потужності трансформатора підвищеної частоти;  $I_m$  – амплітудне значення струму навантаження трансформатора підвищеної частоти:

$$I_m = \sqrt{2} I_d, \quad (4)$$

де  $I_d$  – діюче значення струму навантаження трансформатора підвищеної частоти, А.

Втрати потужності при комутації визначаються за виразом [5, 10]:

$$P_{sw} = f_{sw} \left( \frac{a}{2} + \frac{bi}{\pi} + \frac{ci^2}{4} \right) \frac{U_{DC}}{U_{nom}}, \quad (5)$$

де  $f_{sw}$  – частота комутації, Гц;  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , – коефіцієнти поліному, який апроксимує залежність енергії втрат при комутації IGBT від струму колектора (рис. 5);

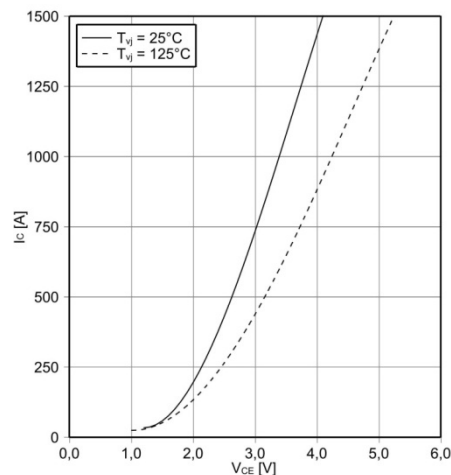


Рис. 4. Залежність падіння напруги на транзисторі від струму колектора IGBT типу FZ750R65KE3 компанії Infineon

Fig. 4. Dependence of the lost volts on the transistor from IGBT collector current, type FZ750R65KE3, Infineon company

$U_{DC}$  – напруга ланки постійного струму, В;  $U_{nom}$  – значення напруги, при якому визначаються параметри вмикання та вимикання IGBT, В.

Допустимі значення повних втрат визначаються за формулою [9].

Повні втрати потужності  $P$  визначаються за формулою:

$$P_{max} = \frac{T_j - T_a}{R_{thja}}, \quad (6)$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

де  $T_j$  – максимально допустима температура нагріву напівпровідникового кристалу;  $T_a$  – температура навколишнього середовища, °С.  $R_{thja}$  – тепловий опір кристал – середовище охолодження, Вт/°С.

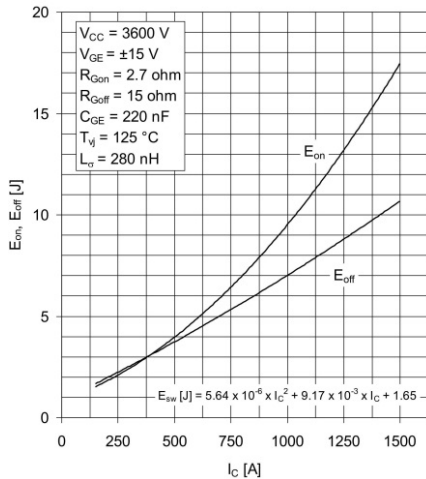


Рис. 5. Залежність енергії комутації від струму колектора за імпульс для IGBT типу 5SNA0750G650300 фірми ABB

Fig. 5. Dependence of switching energy per pulse collector current for IGBT type 5SNA0750G650300, the ABB firm

Тепловий опір  $R_{thja}$  складається з таких складових (рис. 6):

$$R_{thja} = R_{thjc} + R_{thch} + R_{thha}, \quad (7)$$

де  $R_{thjc}$  – тепловий опір кристал – корпус, Вт/°С;  $R_{thch}$  – тепловий опір корпус – охолоджувач, Вт/°С;  $R_{thha}$  – тепловий опір охолоджувач – охолоджувальне середовище, Вт/°С;

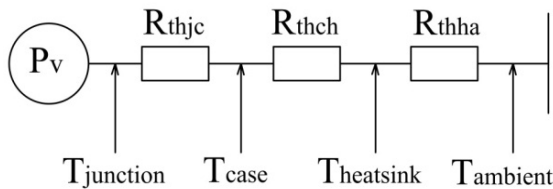


Рис. 6. Теплова схема заміщення

Fig. 6 Thermal equivalent circuit

Значення величин  $R_{thjc}$  та  $R_{thch}$  наводяться у паспортних даних на прилад, а  $R_{thha}$  – на охолоджувач.

Загальні втрати потужності  $P$  не повинні перевищувати допустимих втрат  $P_{max}$ , тому їх значення можна порівняти:

$$P_{cond} + P_{sw} = \frac{T_j - T_a}{R_{thja}}. \quad (8)$$

З урахуванням виразів (2), (3), (5)...(8) допустиму частоту комутації IGBT можна визначити за формулою (9).

Серед багатьох світових виробників напівпровідникових приладів лише окремі виробники виготовляють IGBT 65 класу, тому для подальших розрахунків обрано IGBT виробництва компаній Infineon та ABB [7, 8]. До табл. 2 зведені значення максимальної частоти залежно від струму навантаження та типу IGBT. На рис. 8, 9 наведені графіки залежності частоти від струму для IGBT компанії Infineon та ABB відповідно.

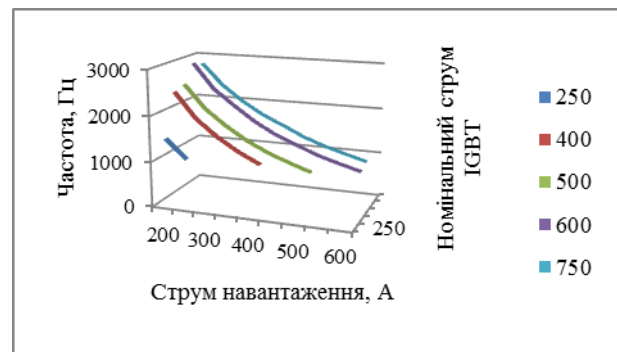


Рис. 8. Графіки залежності частоти від струму для IGBT компанії Infineon

Fig. 8. Frequency-versus-current for IGBT, company Infineon

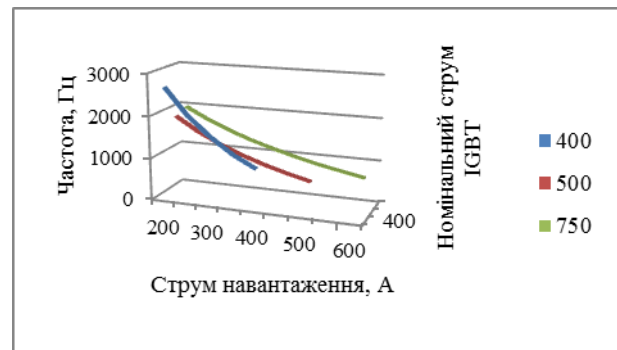


Рис. 9. Графіки залежності частоти від струму для IGBT компанії ABB

Fig. 9. Frequency-versus-current for IGBT, company ABB

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

$$f_{sw} = \frac{\left( \frac{T_j - T_a}{R_{thjc} + R_{thch} + R_{thha}} - \left( 0,5 \left( U_{CEO} \frac{I_m}{\pi} + r_{CE} \frac{I_m^2}{4} \right) + m \cos \varphi \left( U_{CEO} \frac{I_m}{8} + r_{CE} \frac{I_m^2}{3\pi} \right) \right) \right) \frac{U_{nom}}{U_{DC}}}{\left( \frac{a}{2} + \frac{bi}{\pi} + \frac{ci^2}{4} \right)} \quad (9)$$

Таблиця 2

## Значення максимальних частот від струмів для IGBT

Table 2

## The value of maximum frequency of the currents for IGBT

Струм навантаження обмотки трансформатора, А	Виробники IGBT							
	Infineon				ABB			
	Номінальний (паспортний) струм навантаження IGBT, А							
	250	400	500	600	750	400	500	750
Максимально допустима частота IGBT, Гц								
200	1 491	2 410	2 487	<b>2 882</b>	2 804	2 661	1 857	1 973
250	1 076	1 857	1 970	2 326	<b>2 330</b>	2 037	1 530	1 705
300	–	1 491	1 622	1 977	<b>1 987</b>	1 582	1 269	1 477
350	–	1 201	1 327	1 649	<b>1 704</b>	1 208	1 053	1 282
400	–	971	1 100	1 391	<b>1 494</b>	932	871	1 121
450	–	–	920	1 194	<b>1 267</b>	–	719	973
500	–	–	759	1 008	<b>1 094</b>	–	586	841
550	–	–	–	864	<b>955</b>	–	–	734
600	–	–	–	736	<b>826</b>	–	–	629

Як видно з табл. 2, IGBT компанії Infineon за частотними параметрами переважають IGBT компанії ABB для всього розглянутого діапазону струмів навантаження (200...600 А). Також з та-блиці видно, що для досягнення максимальної частоти комутації IGBT при струмі навантаження трансформатора 200 А потрібно використовувати прилад з номінальним паспортним струмом навантаження 600 А, для решти величин струму, розглянутого діапазону, – 750 А.

## Результати

Встановлено, що допустима частота високочастотної ланки в схемі з використанням проміжного трансформатора визначається струмом його навантаження. Визначено діапазон робочих частот для високочастотної ланки.

## Наукова новизна та практична значимість

Набув подальшого розвитку метод визначення максимальної робочої частоти високочастотної ланки для схеми з використанням трансформатора підвищеної частоти, що дозволить визначити діапазон робочих частот ланки залежно від потужності навантаження та типу напівпровідникового приладу.

## Висновки

1. Частота високочастотної ланки в схемі з використанням трансформатора підвищеної частоти визначається струмом навантаження трансформатора.

2. За комутаційними властивостями в діапазоні струмів навантаження 200...600 А IGBT 65 класу компанії Infineon значно випереджають IGBT такого ж класу компанії ABB.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

3. Максимально допустима частота комутації IGBT при струмі навантаження 200 А становить 2 882 Гц, при 600 А – 826 Гц.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вісін, М. Г. Аналіз силових схем з використанням високочастотного трансформатора для живлення асинхронних тягових двигунів електрорухомого складу / М. Г. Вісін, Д. О. Забарилло // Електрифікація трансп. – 2013. – № 5. – С. 25–32.
2. Вісін, М. Г. Шестивісний магістральний вантажний електровоз подвійного живлення із застосуванням трансформатора з високочастотною розв'язкою та асинхронними тяговими двигунами / М. Г. Вісін, Д. О. Забарилло // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 36. – С. 64–69.
3. Забарилло, Д. О. Перспективи застосування аморфних сплавів для тягового рухомого складу / Д. О. Забарилло // Локомотив-інформ. – 2014. – № 7 (97). – С. 44–47.
4. Муха, А. М. Розвиток наукових основ створення тягових електропередач багатосистемних електровозів : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05. 22. 09 / Муха Андрій Миколайович ; Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – 36 с.
5. Остренко, В. С. Определение максимального допустимого значения частоты коммутации модуля IGBT / В. С. Остренко // Електротехніка та електроенергетика. – 2012. – № 2. – С. 28–33.
6. Параметри аморфного сплаву марки 2605NB1M [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.metglas.com/assets/pdf/msds/msds2605sa1.pdf>. – Назва з екрана. – Перевірено : 02.06.2014.
7. Характеристики IGBT виробництва компанії ABB [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://www05.abb.com/global/scot/scot256.nsf/verifydisplay/bfeb34b019a8d50383257ca700384dff/\\$file/5sna%200750g650300\\_5sya%201600-03%2001-2014.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot256.nsf/verifydisplay/bfeb34b019a8d50383257ca700384dff/$file/5sna%200750g650300_5sya%201600-03%2001-2014.pdf). – Назва з екрана. – Перевірено : 02.06.2014.
8. Характеристики IGBT виробництва компанії Infineon [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.infineon.com/cms/en/product/power/igbt/igbt-module/igbt-module-4500v-6500v/channel.html?channel=ff80808112ab681d0112ab69f8450396>. – Назва з екрана. – Перевірено : 02.06.2014.
9. Чебовский, О. Г. Силовые полупроводниковые приборы : справочник / О. Г. Чебовский, Л. Г. Моисеев, Р. П. Недошивин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 400 с.
10. Applying IGBT [Електронний ресурс] / Bjorn Backlund, Raffael Schenell, Ulrich Schlapbach, Roland Fisher, Evgeny Tsyplakov / ABB Semiconductors. – Режим доступу: <http://www05abb.com> свободный. – Назва з екрана. – Перевірено : 02.06.2014.
11. Comparison of multi-system traction converters for high-power locomotives / M. M. Bakran, H.-G. Eckel, P. Eckert et al. // 35<sup>th</sup> Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference (20.06-25.06.2004). – Aachen, 2004. – Vol. 1. – P. 697–703. doi: 10.1109/PESC.2004.1355833.
12. Kunz, M. Entwicklung einer massearmen Energieversorgung für elektrische Triebfahrzeuge / M. Kunz, F. Hörl, Th. Klockw // ZED+DET Glass Ann. 123. – 1999. – № 11/12. – P. 423–426.
13. Victor, M. Energieumwandlung aut AC-Triebfahrzeugen mit Mittlere frequen ztransformator / M. Victor // Elektrische Bahnen 103. – 2005. – № 11. – P. 505–510.

Д. А. ЗАБАРИЛО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Электроподвижной состав железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (063) 446 77 38, эл. почта [lazbl@yandex.ru](mailto:lazbl@yandex.ru), ORCID 0000-0002-6206-0012

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЗВЕНА ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

**Цель.** Общая протяженность электрифицированных участков железных дорог Украины распределена приблизительно в равных долях между участками постоянного и переменного токов. Для прохождения мест стыкования разных родов тока без остановки поезда применяется двухсистемный электроподвижной состав. Поэтому перспективным для железных дорог Украины является внедрение именно такого подвижного состава новой концепции, то есть с применением асинхронного тягового привода. Помимо ряда преимуществ существует весомый недостаток у подвижного состава подобной концепции, который заключается в им-

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

пульсном отборе энергии от источника питания, что может повлиять на надежность работы путевых устройств автоматики, а, следовательно, и на безопасность движения поездов. Кроме того, удельная мощность тягового трансформатора значительно уступает удельной мощности других элементов тяговой цепи. Для устранения таких недостатков были предложены перспективные схемы с применением промежуточного звена повышенной частоты, которое состоит из трансформатора и инвертора. Первоочередной задачей для дальнейшего внедрения перспективной схемы является определение рабочей частоты высокочастотного звена. **Методика.** Для определения максимальной рабочей частоты коммутации транзисторов в работе используется методика расчета тепловых параметров полупроводниковых приборов. Для получения аналитических выражений кривых зависимости энергии, выделяемой при коммутации IGBT (insulated-gate bipolar transistor) от тока его нагрузки, применяется метод аппроксимации. **Результаты.** Установлено, что допустимая частота высокочастотного звена определяется током нагрузки промежуточного трансформатора. Определен диапазон рабочих частот звена в зависимости от токов нагрузки. Выполнен сравнительный анализ коммутационных характеристик IGBT 65 класса производства компаний Infineon и ABB. **Научная новизна.** Получил дальнейшее развитие метод определения максимальной рабочей частоты промежуточного звена в схеме с использованием промежуточного трансформатора повышенной частоты. **Практическая значимость.** Установленный диапазон рабочих частот высокочастотного звена позволит развить дальнейшие исследования работы силовой схемы с применением трансформатора повышенной частоты электроподвижного состава двойного питания с асинхронным тяговым приводом, что сделает возможным оценить эффективность внедрения схем подобной конфигурации.

*Ключевые слова:* асинхронный тяговый двигатель; электроподвижной состав двойного питания; трансформатор повышенной частоты; IGBT; автономный инвертор напряжения; высокочастотное звено

D. O. ZABARYLO<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail lazbl@yandex.ru, ORCID 0000-0002-6206-0012

## FREQUENCY DETERMINATION OF HIGH-FREQUENCY LINK FOR PERSPECTIVE ELECTRIC ROLLING STOCK

**Purpose.** Total mileage of Ukrainian electric railways is distributed approximately equally between the areas of direct and alternating current. A double system of electric rolling stock is used to pass jointing places of different current kinds without train's stop. Therefore introduction of such rolling stock of a new concept that is using an asynchronous traction drive is prospective for Ukrainian railways. Apart from advantages a rolling stock of similar concept has significant disadvantages, it is pulse energy consumption from the power supply, and it can affect the reliability of track automatic devices, and consequently, the train traffic safety. In addition the specific power of traction transformer is considerably inferior to the power density of other traction elements. The promising schemes using an intermediary link of increased frequency, which consist of a transformer and inverter, have been proposed for disadvantages amendments. The main task for the further introduction of prospective circuit is to determine the operating frequency for high frequency link. **Methodology.** The method of thermal parameters calculation of semiconductor devices has been used for determination switching transistors of maximum operating frequency. To obtain analytical expressions curves of energy, released during the IGBT (insulated-gate bipolar transistor) switching from its current load approximation method is used. **Findings.** The permissible frequency of low-frequency link is determined by load current of intermediate transformer. Operating frequency range of a link depending on load current has been determined. A comparative analysis of the switching characteristics of 65 class IGBT production by companies Infineon and ABB has been performed. **Originality.** The further determination method of the maximum operating frequency of intermediate link for circuit with high-frequency transformer has been developed. **Practical value.** The established operating frequency range of the high-level link will develop further research of tractive circuit with high-frequency transformer use for double feed electric rolling stock with asynchronous tractive drive. It will evaluate the introduction effectiveness of similar configuration circuits.

*Keywords:* asynchronous tractive motor; double feed electric rolling stock; high-frequency transformer; IGBT; autonomous voltage inverter; high frequency link

## REFERENCES

1. Visin M.H., Zabarylo D.O. Analiz sylovykh skhem z vykorystanniam vysokochastotnoho transformatora dlia zhyvlenia asynkhronnykh tiahovykh dvyhuniv elektrorukhomoho skladu [Analysis of power circuits using a high-frequency transformer for feed of asynchronous traction motors of electric rolling stock]. *Elektryfikatsiia transportu – Electrification of transport*, 2013, no. 5, pp. 25-32.
2. Visin M.H., Zabarylo D.O. Shestyvisnyi mahistralnyi vantazhnyi elektrovoz podviinoho zhyvlenia iz zasto-suvanniam transformatora z vysokochastotnoiu rozviazkoiu ta asynkhronnymy tiahovymy dvyhunamy [The six-axel mainline freight electric locomotive of double feed using the transformer with high-frequency junction and asynchronous tractive motors]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zal-iznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 36, pp. 132-136.
3. Zabarylo D.O. Perspektyvy zastosuvannia amorfnykh splaviv dlia tiahovoho rukhomoho skladu [Prospects of amorphous alloys application for traction rolling stock]. *Lokomotiv-inform – Locomotive-inform*, 2014, no. 7 (97), pp. 44-47.
4. Mukha A.M. *Rozvytok naukovykh osnov stvorennia tiahovykh elektropredach bahatosystemnykh elektrovoziv*. Avtoreferat Diss. [The development of scientific bases of tractive electric drive creation for multisystem electric locomotives. Author's abstract]. Dnipropetrovsk, 2011. 36 p.
5. Ostrenko V.S. Opredeleniye maksimalnogo dopustimogo znacheniya chastoty kommutatsii modulya IGBT [Determination of the maximum permissible value of the switching frequency of IGBT module]. *Elektrotehnika ta elektroenerhetyka – Electrical Engineering and Power Industry*, 2012, no. 2, pp. 28-33.
6. *Parametry amorfnoho splavu marky 2605HB1M* (Parameters of amorphous alloy of brand 2605HB1M). Available at: <http://www.metglas.com/assets/pdf/msds/msds2605sa1.pdf> (Accessed 02 June 2014).
7. *Kharakterystyky IGBT vyrobnytstva kompanii ABB* (IGBT specifications manufactured by ABB). Available at: [http://www05.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/bfeb34b019a8d50383257ca700384dff/\\$file/5sna%200750g650300\\_5sya%201600-03%2001-2014.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/bfeb34b019a8d50383257ca700384dff/$file/5sna%200750g650300_5sya%201600-03%2001-2014.pdf) (Accessed 02 June 2014).
8. *Kharakterystyky IGBT vyrobnytstva kompanii Infineon* (IGBT specifications manufactured by Infineon). Available at: <http://www.infineon.com/cms/en/product/power/igbt/igbt-module/igbt-module-4500v-6500v/channel.html?channel=ff80808112ab681d0112ab69f8450396> (Accessed 02 June 2014).
9. Chebovskiy O.G., Moiseyev L.G., Nedoshivin R.P. *Silovyye poluprovodnikovyye pribory* [Power semiconductor devices]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 400 p.
10. Backlund B., Schenell R., Schlapbach U., Fisher R., Tsyplakov E. Applying IGBT. *ABB. Semiconductors*. Available at: <http://www05.abb.com> (Accessed 02 June 2014).
11. Bakran M.M., Eckel H.-G., Eckert P., Gamach H., Wenkemann U. Comparison of multi-system traction converters for high-power locomotives. 35<sup>th</sup> Annal IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, 2004, pp. 697-703. doi: 10.1109/PESC.2004.1355833.
12. Kunz M., Hörl F., Klockw Th. Entwicklung einer massearmen Energieversorgung für elektrische Triebfahr-zeuge. *ZED+DET Glass Ann.* 123, 1999, no. 11/12, pp. 423-426.
13. Victor M. Energieumwandlung aut AC-Triebfahrzeugen mit Mittle frequen ztransformator. *Elektrische Bahnen 103*, 2005, no. 11, pp. 505-510.

*Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Г. К. Гетьманом (Україна); д.т.н., проф. Ф. П. Шкрабцем (Україна)*

Надійшла до редколегії: 20.06.2014

Прийнята до друку: 14.09.2014

## УДК 621.335.04:621.333

Т. М. МІЩЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Електропостачання залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (097) 485 68 21, ел. пошта mishchenko\_tn@ukr.net, ORCID 0000-0001-6336-7350

## ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ТА МЕТОДИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ПРИСТРОЇВ СИСТЕМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ. МЕТОД ВАГОВОЇ ФУНКЦІЇ

**Мета.** Розробка та обґрунтування нового методу структурної ідентифікації електротехнічних пристроїв систем електричної тяги як постійного, так і змінного струмів. **Методика.** Для розв'язання поставленої задачі використовуються: методи і методики лінійної електротехніки, зокрема, операторний метод за Лапласом; чисельний метод розв'язання інтегрального рівняння, що базується на представленні рівняння Вінера-Хопфа системою лінійних рівнянь, що дозволяє формувати розв'язання поставленої задачі в математичному вигляді кореляційної і вагової функцій; метод факторизації, що передбачає певне розбивання кореляційних функцій випадкових процесів. **Результати.** Розроблено метод вагової функції ідентифікації електротехнічних пристроїв, який у повній мірі може використовуватись у системах електричної тяги. В якості прикладу застосування розробленого методу розглянуто фідерну ділянку електричної тяги постійного струму з одностороннім живленням, по якій рухаються два електровози типу ДЕ 1, які й були ідентифіковані ваговими функціями. Шукані струми і напруги електровозів та тягової мережі сформульовано в імовірно-статистичному вигляді, тобто, визначені функції математичного сподівання та кореляційних функцій. При цьому враховано, що кореляційна функція суми випадкових функцій дорівнює сумі кореляційних функцій доданків, а кореляційна функція від інтегралу випадкової функції визначається як подвійний інтеграл від кореляційної функції вихідної випадкової функції. **Наукова новизна.** Полягає, по-перше, в адаптації розробленого методу структурної ідентифікації до пристроїв систем електричної тяги. По-друге, власне в розробці нового методу вагової функції. І, нарешті, в розв'язанні рівняння Вінера-Хопфа кореляційним методом факторизації. **Практична значимість.** Запропонований метод і методика, що на ньому базується, дозволяють прогнозувати електротягові навантаження тягової мережі, а також інших пристроїв систем тягового електропостачання та електрорухомого складу в різних режимах їх роботи і, зокрема, при швидкісному русі поїздів. Метод дозволяє враховувати вплив навантаження (і його режим роботи) сусідніх фідерних зон на електромагнітні процеси в досліджуваній міжпідстанційній зоні. При цьому важливо те, що шукані напруги і струми розглядаються як випадкові функції.

*Ключові слова:* ідентифікація; вагова функція; електрична тяга; кореляційна функція; електровоз; випадковий процес; напруга; струм

### Вступ

За допомогою розроблених і викладених в [6, 7] методів можливе розв'язання задач, поперше, тільки параметричної ідентифікації, тобто коли структура (оператор, наприклад пасивний RLC-двополюсник) пристрою (чи системи, далі – системи), що ідентифікується, задається, і, по-друге, в перехідному режимі, наприклад за терміном часу, що дорівнює періоду (зокрема 20 мс) діючої в пристрої прикладеної напруги. Однак, більш важливою є задача структурної ідентифікації [1, 17], тобто визначення структури (оператора) ідентифікуючої системи. Застосовуються різні оператори [12], але найчастіше для лінійної чи лінеаризованої системи

використовують вагові функції, сутність яких впливає із методу інтеграла Дюамеля, відомого в теоретичній електротехніці.

Згідно із зазначеним методом реакція  $y(t)$  пасивного двополюсника на дію  $x(t)$ , на яку вмикається цей двополюсник, визначається за формулою інтеграла Дюамеля:

$$y(t) = x(0)h(t) + \int_0^t x'_\tau(\tau)h(t-\tau)d\tau, \quad (1)$$

де  $h(t)$  – перехідна функція або перехідна характеристика двополюсника (системи).

У випадку, коли функцією-дією  $x(t)$  являється дельта-функція (функція Дірака)  $\delta(t)$ ,

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

тоді реакцією системи є імпульсна або вагова функція  $g(t)$  і реакцією системи  $y(t)$  на будь-яку дію  $x(t)$  можна записати оскільки при  $t \leq 0$  функція  $g(t) = 0$ .

$$y(t) = \int_0^t g(\tau)x(t-\tau)d\tau, \quad (2)$$

Визначною особливістю зв'язку  $x(t)$  і  $y(t)$  за формулою (2) є те, що якщо прикладена до системи дія  $x(t)$  та її реакція  $y(t)$  являються випадковими стаціонарними процесами, то для їх імовірнісних характеристик, зокрема для кореляційних функцій, існує зв'язок за рівнянням Вінера-Хопфа [10, 13]:

$$K_{yx}(t) = \int_0^T g(\tau)K_x(t-\tau)d\tau, \quad (3)$$

де  $K_{yx}(t)$  – автокореляційна функція вхідного випадкового процесу  $X(t)$ ;  $K_{yx}(t)$  – взаємна кореляційна функція випадкових процесів  $Y(t)$  і  $X(t)$ ;  $g(t)$  – вагова функція системи;  $T$  – деякий фіксований проміжок часу, що обмежує час дії системи.

Рівняння (3) дає оптимальну за критерієм мінімуму середнього значення квадрата помилки вагової функції  $g(t)$  в класі нестационарної лінійної системи.

Тоді задача ідентифікації системи, тобто визначення її вагової функції  $g(t)$ , полягає у розв'язанні інтегрального рівняння (3) при відомих функціях  $K_x(t)$ ,  $K_{yx}(t)$ , що можливо за допомогою методів, наведених далі.

**Мета**

Розробка та обґрунтування нового методу структурної ідентифікації електротехнічних пристроїв систем електричної тяги.

**Методика**

Під час викладення методів розв'язання рівняння (3), з метою коректності, будемо вважати, що вхідною випадковою дією є напруга  $u(t)$ , а вихідною – струм  $i(t)$ ; як відомо [5, 8], в системах електричної тяги вони дійсно є випадковими функціями  $U(t)$ ,  $I(t)$ . Тоді в рів-

нянні (3) будемо мати справу з кореляційними функціями  $K_U(t)$ ,  $K_{IU}(t)$ .

Одним із методів розв'язання рівняння (3) є операторний метод за допомогою перетворення Лапласа; розглянемо його.

Рівняння (3) є інтегральним рівнянням Вольтера 1-го роду, в якому  $g(t)$  є шуканою функцією.

Оскільки  $K_U(t-\tau)$ ,  $\frac{\partial K_U(t-\tau)}{\partial t}$ ,  $K_{IU}(t)$  і  $\frac{\partial K_{IU}(t)}{\partial t}$  є неперервні при  $0 \leq t \leq a$ ,  $0 \leq t \leq \tau$ , тоді візьмемо похідну від обох частин рівняння (3) по  $t$ , отримаємо:

$$K_U(t, t)g(t) + \int_0^t \frac{\partial K_U(t-\tau)}{\partial t} g(\tau)d\tau = K'_{IU}(t). \quad (4)$$

Рівняння (4) можна переписати у вигляді:

$$g(t) = \frac{K'_{IU}(t)}{K_U(t, t)} - \int_0^t \frac{\partial K_U(t-\tau)}{\partial t} g(\tau)d\tau. \quad (5)$$

Вираз (5) є рівнянням Вольтера 2-го роду (типу згорки функцій  $\frac{\partial K_U(t-\tau)}{\partial t}$ ,  $g(\tau)$ ) оскільки його ядро,  $\frac{\partial K_U(t-\tau)}{\partial t}$ , залежить від різниці  $(t-\tau)$  аргументів.

Скористаємося теоремою множення (теоремою Бореля, теоремою про згортку) [3], згідно з якою зображення згортки будь-яких функцій-оригіналів  $f(t)$  і  $\varphi(t)$  дорівнює добутку зображень цих функцій:

$$f(t) \varphi(t) = F(p) \Phi(p).$$

Тоді із (5) лапласове зображення підінтегральних функцій дорівнює

$$\int_0^t \frac{\partial K_U(t-\tau)}{\partial t} g(\tau)d\tau = L \left[ \frac{\partial K_U(t-\tau)}{\partial t} \right] L[g(t)]. \quad (6)$$

Застосовуючи до обох частин рівняння (5) перетворення Лапласа і враховуючи (6), запишемо:

$$L[g(t)] = L \left[ \frac{K'_{IU}(t)}{K_U(t, t)} \right] - L \left[ \frac{\partial K_U(t-\tau)}{\partial t} \right] L[g(t)].$$

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Звідки

$$L[g(t)] = \frac{L\left[\frac{K'_{IU}(t)}{K_U(t,t)}\right]}{1 + L\left[\frac{\partial K_U(t-\tau)}{dt}\right]}. \quad (7)$$

Функція-оригінал  $g(t)$  із (7) і буде розв'язком інтегрального рівняння (3).

Другим методом визначення імпульсної вагової функції є чисельне розв'язання інтегрального рівняння (3). Сутність цього методу полягає у можливості подання рівняння Вінера-Хопфа (3) системою лінійних рівнянь [10]. Для цього враховуємо, що при  $t \leq 0$  вагова функція  $g(t) = 0$ , а інтервал взаємної кореляції  $U(t)$  і  $I(t)$  розбиваємо на  $N$  рівних інтервалів часу  $\Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots, N\Delta t$ . Тоді рівняння (3) може бути подано у вигляді такої кінцевої суми:

$$K_{IU}(t_j) = \Delta t \sum_{i=1}^N g(t_i) K_U(t_j - t_i), \quad (8)$$

при  $j = 1, 2, 3, \dots; i = 1, 2, 3, \dots, N$ .

Таким чином, за всіма значеннями  $\Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots, N\Delta t$  отримаємо значень ординат вагової функції  $g(t)$  в точках  $\Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots, N\Delta t$ . В матричному вигляді цю систему лінійних рівнянь можна подати як

$$\|K_{IU}\| = \|g\| \|K_U\|, \quad (9)$$

де  $\|K_U\|$  – кореляційна матриця, що складена за миттєвими значеннями ординат кореляційної функції вхідної випадкової функції  $U(t)$ :

$$\|K_U\| = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1i} & \dots & K_{1N} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2i} & \dots & K_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{j1} & K_{j2} & \dots & K_{ji} & \dots & K_{jN} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{N1} & K_{N2} & \dots & K_{Ni} & \dots & K_{NN} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

$K_{ij} = K_{ji}; K_{ij} = K_U(j-i), i, j = 1, 2, 3, \dots, N$ ;  
 $\|K_{IU}\|$  – матриця-стовпець, що складається із елементів, які є миттєвими значеннями ординати взаємної кореляційної функції вихідної  $I(t)$  та вхідної  $U(t)$  випадкових функцій; ця матриця має вигляд

$$\|K_{IU}\| = \begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \\ \dots \\ K_i \\ \dots \\ K_N \end{pmatrix}, K_i = \frac{K_{IU}(i \Delta t)}{\Delta t}; \quad (11)$$

в (9)  $\|g\|$  – матриця-стовпець елементів, що є шуканими миттєвими значеннями вагової функції:

$$\|g\| = \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \dots \\ g_i \\ \dots \\ g_N \end{pmatrix}. \quad (12)$$

В результаті розв'язання рівняння (8) отримаємо дискретні чисельні значення  $g(t_i)$  шуканої вагової функції, які апроксимуються (якщо потрібно) певним аналітичним виразом.

Недолік зазначеного методу полягає, поперше, у трудомісткості формування (складання) рівнянь і, по-друге, у їх великій кількості у випадку, якщо тягові випадкові напруга  $U(t)$  і струм  $I(t)$  досліджуються за тривалий термін часу, а інтервал часу  $\Delta t$  приймається занадто малим.

Третій метод, який можливо застосовувати для визначення вагової функції, є кореляційний метод [11, 15, 16], метод факторизації, який передбачає певне розбиття заданих кореляційних функцій. Згідно з цим методом зображення за Лапласом передатної функції досліджуваної системи можна записати як

$$G(p) = \frac{K_{IU}^+(\bar{p}) - f(p)}{K_U^+(\bar{p}) - K_U^-(\bar{p})}, \quad (13)$$

де  $K_U^+(\bar{p}), K_U^-(\bar{p}), K_{IU}^+(\bar{p})$  – зображення за Лапласом таких форм кореляційних функцій

$$K_U(t) = \begin{cases} K_U^+(t) & \text{при } t \geq 0, \\ K_U^-(t) & \text{при } t < 0; \end{cases} \quad (14)$$

$$K_{IU}(t) = \begin{cases} K_{IU}^+(t) & \text{при } t \geq 0, \\ K_{IU}^-(t) & \text{при } t < 0. \end{cases} \quad (15)$$

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Для отримання зображення  $F(p)$  в (13) уводиться, згідно з [11], функція

$$f(t) = \int_0^{\infty} g(\tau) K_U^-(t - \tau) d\tau. \quad (16)$$

Можна довести [11], що шукана функція  $F(p)$  є лапласовим зображенням уведеної функції  $f(t)$ :

$$F(p) = L[f(t)].$$

Після знаходження  $G(p)$  шукана вагова функція  $g(t)$  визначається як обернене лапласове зображення від  $G(p)$ .

Якщо вагова функція  $g(t)$  досліджуваної системи знайдена і відома дія, в загальному випадку це випадкова функція  $X(t)$ , тоді реалізація  $Y(t)$  такої системи визначається за формулою [9]:

$$Y(t) = \int_0^{\infty} g(\tau) X(t, \tau) d\tau. \quad (17)$$

### Результати

Розроблено метод вагової функції ідентифікації електротехнічних пристроїв, який у повній мірі може використовуватись в системах електричної тяги [19]. Метод базується на розв'язанні інтегрального рівняння Вінера-Хопфа для авто- і взаємно кореляційних функцій випадкових процесів вхідної і вихідної величин пристрою. Для розв'язання зазначеного рівняння застосовано операторний метод за Лапласом та кореляційні методи, зокрема метод факторизації. Як приклад використання розробленого методу вагової функції розглянуто фідерну ділянку електричної тяги постійного струму з одностороннім живленням, на якій рухаються два електровоза типу ДЕ 1, які і були ідентифіковані ваговими функціями. Шукані струми і напруги електровозів в тяговій мережі сформульовано в імовірно-статистичному вигляді, тобто визначені їх математичні сподівання та дисперсії.

Схема ділянки наведена на рис. 1, на якому ТП – тягова підстанція;  $R_1$ ,  $R_2$  – активні опори ділянок контактної мережі (розглядається усталений режим, тому індуктивність контактної

мережі не враховується);  $g(t)$  – вагові функції, які ідентифікують (заміщують) електровози і вважаються відомими;  $U$  – напруга на виході ТП (відома);  $I_1$ ,  $I_2$  – фідерні струми;  $U_{e1}$ ,  $U_{e2}$ ,  $I_{e1}$ ,  $I_{e2}$  – напруги і струми електровозів.

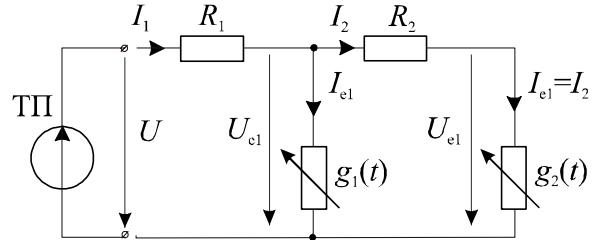


Рис. 1

Fig. 1

Не зважаючи на те, що ділянка постійного струму, однак всі напруги і струми в ній є випадковими процесами [2, 5, 8, 18], тобто змінними в часі. Виходячи з цього, система рівнянь електричного стану розглядуваної системи (рис. 1) має вигляд

$$U(t) = R_1 I_1(t) + U_{e1}(t); \quad (18)$$

$$U(t) = R_1 I_1(t) + R_2 I_2(t) + U_{e2}(t) =$$

$$= R_1 I_1(t) + R_2 \int_0^{\infty} U_{e2}(t) g_1(t) dt + U_{e2}(t); \quad (19)$$

$$I_1(t) - I_{e1}(t) - I_2(t) = I_1(t) - \int_0^{\infty} U_{e1}(t) g_1(t) dt -$$

$$- \int_0^{\infty} U_{e2}(t) g_2(t) dt = 0. \quad (20)$$

Застосовуючи операцію математичного сподівання до випадкових функцій системи рівняння (18)–(20), отримаємо систему рівнянь для математичних сподівань:

$$m_U(t) = R_1 m_{I1}(t) + m_{U_{e1}}(t); \quad (21)$$

$$m_U(t) = R_1 m_{I1}(t) +$$

$$+ R_2 \int_0^{\infty} m_{U_{e2}}(t) g_1(t) dt + m_{U_{e2}}(t); \quad (22)$$

$$m_{I1}(t) - \int_0^{\infty} m_{U_{e1}}(t) g_1(t) dt -$$

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

$$-\int_0^{\infty} m_{U_{e2}}(t)g_2(t)dt = 0. \quad (23)$$

Враховуючи, що  $U(t)$ ,  $U_{e1}(t)$ ,  $U_{e2}(t)$  – стаціонарні випадкові функції [5], тоді  $m_U(t) = \text{const}$ ,  $m_{U_{e1}}(t) = \text{const}$ ,  $m_{U_{e2}}(t) = \text{const}$  і система (21)–(23) спрощується

$$m_U = R_1 m_{I_1}(t) + m_{U_{e1}}, \quad (24)$$

$$m_U = R_1 m_{I_1}(t) + R_2 m_{U_{e2}}(t) \int_0^{\infty} g_1(t)dt + m_{U_{e2}} = 0, \quad (25)$$

$$m_{I_1}(t) - m_{U_{e1}}(t) \int_0^{\infty} g_1(t)dt - m_{U_{e2}}(t) \int_0^{\infty} g_2(t)dt = 0. \quad (26)$$

Розв'язавши цю систему рівнянь, отримаємо математичні сподівання функцій  $I_1(t)$ ,  $I_2(t)$ ,  $U_{e1}(t)$ ,  $U_{e2}(t)$ .

У подальшому отримаємо систему рівнянь для визначення функцій дисперсій  $D(t)$  випадкових функцій в системі (21)–(23). Для цього врахуємо, що дисперсія стаціонарної випадкової функції дорівнює кореляційній функції  $K(\tau)$  цієї випадкової функції при  $\tau = 0$ . У свою чергу, кореляційна функція суми випадкових функцій дорівнює сумі кореляційних функцій доданків, а кореляційна функція (а, отже, і дисперсія) від інтегралу випадкової функції  $Y(t)$  визначається як подвійний інтеграл від кореляційної функції вихідної випадкової функції  $X(t)$  [4].

$$K_y(\tau = 0) = D_y = \sigma_y^2 = \int_0^{\infty} g(\tau_1) \left[ \int_0^{\infty} g(\tau_2) K_x(\tau_1 - \tau_2) d\tau_2 \right] d\tau_1. \quad (27)$$

Обчислення  $D(t)$  за цією формулою є складним та трудомістким процесом, тому що потребує обчислення двократних інтегралів. Тим більше, що в нашій задачі перехідні складові функцій  $U_{e1}$ ,  $U_{e2}$  під інтегралом (27) невідомі, тобто задача перетворюється додатково в розв'язок інтег-

рального рівняння, що на порядок ускладнює задачу, тому поступимо таким чином.

Шляхом дискретизації з кроком  $\Delta t$  перетворимо випадкові функції  $U_{e1}(t)$ ,  $U_{e2}(t)$  в систему випадкових величин, в результаті отримаємо загальну повну (а не в перетинах) вибірку значень цих напруг. Багатьма дослідниками, зокрема в [5, 8], встановлено, що імовірнісний розподіл значень повної вибірки напруг на струмоприймачі різних видів ЕРС постійного струму (електровози, трамваї) з великою імовірністю підпорядковуються закону Гауса, який дозволяє подати випадкові величини  $U_{e1}$ ,  $U_{e2}$  у відомій формі [14]:

$$\begin{cases} U_{e1} = m_{U_{e1}} \pm 3\sigma_{U_{e1}} = m_{U_{e1}} \pm 3\sqrt{D_{U_{e1}}} \\ U_{e2} = m_{U_{e2}} \pm 3\sqrt{D_{U_{e2}}}. \end{cases} \quad (28)$$

З врахуванням згаданих властивостей кореляційної та дисперсної функцій випадкових функцій, а також (28), система рівнянь (18)–(20) для дисперсій буде мати вигляд:

$$D[U] = R_1^2 D[I_1] \pm 3\sqrt{D[U_{e1}]}; \quad (29)$$

$$D[U] = R_1^2 D[I_1] \pm R_2 D[U_{e2}] \int_0^{\infty} g_2(t)dt; \quad (30)$$

$$D[I_1] \mp D[U_{e1}] \int_0^{\infty} g_1(t)dt \mp D[U_{e2}] \int_0^{\infty} g_2(t)dt = 0. \quad (31)$$

Розв'язуючи систему (24)–(26), знаходимо математичні сподівання, а розв'язуючи систему (29)–(31) – дисперсії шуканих  $I_1(t)$ ,  $I_2(t)$ ,  $U_{e1}(t)$ ,  $U_{e2}(t)$ , що дозволяє подати їх в кінцевій імовірнісній формі (28).

### Наукова новизна та практична значимість

Полягає, по-перше, в адаптації розробленого методу структурної ідентифікації до пристроїв систем електричної тяги. По-друге, власне в розробці нового методу вагової функції. І, нарешті, в розв'язанні рівняння Вінера-Хопфа кореляційним методом факторизації. Запропонований метод і методика, що на ньому базується, дозволяють прогнозувати електротягові навантаження тягової мережі, а також інших пристроїв системи тягового електропостачання та електрорухо-

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

мого складу в різних режимах їх роботи, зокрема при швидкісному русі поїздів.

## Висновки

1. Розроблений метод вагової функції є ефективним методом структурної ідентифікації пристроїв систем електричної тяги, в якій напруги і струми є випадковими процесами.

2. Найбільш раціональним методом розв'язання інтегрального кореляційного рівняння Вінера-Хопфа при визначенні вагової функції є чисельний метод.

3. Єдиним недоліком розробленого методу є його застосування лише для стаціонарних випадкових процесів на вході і виході пристрою, що підлягає ідентифікації.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Буштрук, А. Д. Структурная идентификация нелинейных динамических объектов / А. Д. Буштрук // Автоматика и телемеханика. – 1989. – № 10. – С. 84–89.
- Костин, Н. А. Коэффициент мощности электроподвижного состава постоянного тока / Н. А. Костин, О. И. Саблин // Электротехника і електродинаміка. – 2005. – № 1. – С. 97–101.
- Краснов, М. Л. Интегральные уравнения / М. Л. Краснов, А. И. Кисенёв, Г. И. Макаренко. – М. : Наука, 1968. – 192 с.
- Лившиц, Н. А. Вероятностный анализ систем автоматического управления / Н. А. Лившиц, В. Н. Пугачёв. – М. : Сов. радио, 1963. – 483 с.
- Мищенко, Т. Н. Вероятностные характеристики случайной функции напряжения на токоприёмнике первого украинского электровоза ДЭ 1 / Т. Н. Мищенко, П. Е. Михаличенко, Н. А. Костин // Электротехника і електро-механіка. – 2003. – № 2. – С. 43–46.
- Мищенко, Т. М. Теоретичні аспекти та методи ідентифікації параметрів пристроїв системи електричної тяги. Метод миттєвих потужностей; паралельне з'єднання елементів / Т. М. Міщенко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту. заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 41. – С. 86–91.
- Мищенко, Т. М. Теоретичні аспекти та методи ідентифікації параметрів пристроїв системи електричної тяги. Метод циклічної вольтамперної характеристики / Т. М. Міщенко // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. – 2013. – № 1 (43). – С. 119–125.
- Петров, А. В. Методи спектрального аналізу випадкових технологічних коливань напруги та струму фідера тягової підстанції постійного струму / А. В. Петров // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – Вип. 34. – С. 77–80.
- Свешников, А. А. Прикладные методы теории случайных функций / А. А. Свешников. – М. : Наука, 1968. – с. 463.
- Солодовников, В. В. Статистическая динамика линейных систем автоматического управления. / В. В. Солодовников. – М. : Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1960. – 655 с.
- Эйкхофф, П. Современные методы идентификации систем / П. Эйкхофф. – М. : Мир, 1983. – 400 с.
- Aström, K. J. System Identification-A Survey / K. J. Aström, P. Eykhoff. – Automatika. – 1971. – № 7. – P. 123–162. doi: 10.1016/0005-1098(71)90059-8.
- Barraud, A. De Minimal Realization and Approximation of Linear Systems from Normal Operating Records / A. Barraud, Ph. Larminat // Proc. of the 3rd IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation. – Hague/Delft, 1973. – P. 953–956.
- Bingulac, S. P. Identification of multivariable dynamic systems / S. P. Bingulac // Proc. of the 4th IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation. – Tbilisi, Georgia, North-Holland, Hague, 1976. – P. 521–530.
- Guenod, M. Comparison of Some Methods Used for Process Identification / M. Guenod, A. P. Sage. – Automatika. – 1968. – № 4. – P. 235–269. doi: 10.1016/0005-1098(68)90016-2.
- Kostin, M. Statistics and Probability of the Pantograph of DC Electric Locomotive the Recuperation Mode / Mykolay Kostin, Anatoliy Nikitenko. – Przegląd Elektrotechniczny. – 2013. – Vol. 2012, № 2a. – P. 273–275.
- Simulation of electric vehicles combining structural and functional approaches / L. I. Silva, G. A. Magallán, P. M. De la Barrera et al. // J. of Electrical Engineering and Technology. – 2014. – Vol. 9. – Iss. 3. – P. 848–858.
- Szelag, A. A. 3 kV DC electric traction system modernisation for increased speed and trains power demand—problems of analysis and synthesis / A. A. Szelag, T. Maciołek. – 2013. – Vol. 89. – Iss. 3. A. – P. 21–28.
- Xuesong, F. Evaluating target speeds of passenger trains in China for energy saving in the effect of different formation scales and traction capacities / Xuesong Feng, Jia Feng, Keqi Wua. – Intern. J. of Electrical Power & Energy Systems. – 2012. – Vol. 42. – Iss. 1. – P. 621–626. doi: 10.1016/j.ijepes.2012.04.055.

Т. Н. МИЩЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Електроснабження залізничних доріг», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (097) 485 68 21, ел. пошта mishchenko\_tn@ukr.net, ORCID 0000-0001-6336-7350

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ. МЕТОД ВЕСОВОЙ ФУНКЦИИ

**Цель.** Разработка и обоснование нового метода структурной идентификации электротехнических устройств систем электрической тяги как постоянного, так и переменного токов. **Методика.** Для решения поставленной задачи используются: методы и методики линейной электротехники, в частности, операторный метод по Лапласу; численный метод решения интегрального уравнения, который базируется на представлении уравнения Винера-Хопфа системой линейных уравнений, что позволяет формировать решения поставленной задачи в математическом виде корреляционной и весовой функций; метод факторизации, который предусматривает определенное разбиение корреляционных функций случайных процессов. **Результаты.** Разработан метод весовой функции идентификации электротехнических устройств, который в полной мере может использоваться в системах электрической тяги. В качестве примера применения разработанного метода рассмотрен фидерный участок электрической тяги постоянного тока с односторонним питанием, по которому движется два электровоза типа ДЭ 1, которые и были идентифицированы весовыми функциями. Искомые токи и напряжения электровазов и тяговой сети сформулированы в вероятностно-статистическом виде, то есть, определены функции математического ожидания и корреляционных функций. При этом учтено, что корреляционная функция суммы случайных функций равна сумме корреляционных функций слагаемых, а корреляционная функция от интеграла случайной функции определяется как двойной интеграл от корреляционной функции выходной случайной функции. **Научная новизна.** Заключается, во-первых, в адаптации разработанного метода структурной идентификации к устройствам систем электрической тяги. Во-вторых, собственно в разработке нового метода весовой функции. И, наконец, в решении уравнения Винера-Хопфа корреляционным методом факторизации. **Практическая значимость.** Разработанный метод и методика, которая на нем базируется, позволяют прогнозировать электротяговые нагрузки тяговой сети, а также других устройств систем тягового электроснабжения и электроподвижного состава в разных режимах их работы и, в частности, при скоростном движении поездов. Метод позволяет учитывать влияние нагрузки (и её режим работы) соседних фидерных зон на электромагнитные процессы в исследуемой межподстанционной зоне. При этом важно то, что искомые напряжения и токи рассматриваются как случайные функции.

*Ключевые слова:* идентификация; весовая функция; электрическая тяга; корреляционная функция; электровоз; случайный процесс; напряжение; ток

T. N. MISHCHENKO<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Electric Power Supply of Railroads», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 485 68 21, e-mail mishchenko\_tn@ukr.net, ORCID 0000-0001-6336-7350

## THEORETICAL ASPECTS AND METHODS OF PARAMETERS IDENTIFICATION OF ELECTRIC TRACTION SYSTEM DEVICES. METHOD OF WEIGHT FUNCTION

**Purpose.** Development and substantiation of a new method of structural identification of electrical devices of electric traction systems for both DC and AC current. **Methodology.** To solve this problem the following methods are used: the methods and techniques of the linear electrical engineering, in particular, the Laplace operator method; the numerical method for solving the integral equation, which is based on the representation of the Wiener-Hopf linear equations system (this allows forming the solutions of the problem in a mathematical form of the correlation and weight functions); the factorization method, which provides certain partition of the correlation functions of the stochastic processes. **Findings.** It was developed the method of weight function of the electrical devices identifica-

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

tion, which can be fully used in the systems of electric traction. As the use example of the developed method it was considered a feeder section of DC electric traction with the single power supply. On this section move two electric locomotives of the type DE 1, they have been identified by the weighting functions. The required currents and voltages of electric locomotives are also formulated in the electric traction network in probabilistic and statistical form, that is, the functions of mathematical expectation and the correlation functions are determined. At this, it is taken into account that the correlation function of the sum of random functions is equal to the sum of the correlation functions of additives, and the correlation function of the integral of a random function is defined as the double integral of the correlation function of the output of a random function. **Originality.** Firstly, originality consists of the adaptation of the developed method of structural identification for the devices of electric traction system. Secondly, it lies in the proper development of the new method of weight function. And finally, it lies in the solution of the Wiener-Hopf equation using the correlation method of factorization. **Practical value.** The developed method and the technique that is based on it, allow predicting electric traction loadings of the traction network, as well as the other devices of the traction energy systems and the electric motive power in the different modes of operation and, in particular, during the high-speed train traffic. The method takes into account the load influence (and its mode of operation) of the adjacent feeder zones on the electromagnetic processes in the studied inter-substation area. Thus, it is important that the required voltages and currents are considered as the random functions.

*Keywords:* identification; weight function; electric traction; correlation function; electric locomotive; random process; voltage; current

## REFERENCES

1. Bushtruk A.D. Strukturnaya identifikatsiya nelineynykh dinamicheskikh obyektov [Structural identification of non-linear dynamic object]. *Avtomatika i telemekhanika – Automation and Telemechanics*, 1989, no. 10, pp. 84-89.
2. Kostin N.A., Sablin O.I. Koeffitsient moshchnosti elektropodvizhnogo sostava postoyannogo toka [The power factor of DC electric rolling stock]. *Elektrotehnika i elektrodinamika – Electric Engineering and Electrodynamics*, 2005, no. 1, pp. 97-101.
3. Krasnov M.L., Kisenev A.I., Makarenko G.I. *Integralnyye uravneniya* [Integral equations]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 192 p.
4. Livshits N.A., Pugachev V.N. *Veroyatnostnyy analiz sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Probabilistic analysis of automatic control systems]. Moscow, Sov. radio Publ., 1963. 483 p.
5. Mishchenko T.N., Mikhailichenko P.Ye., Kostin N.A. Veroyatnostnyye kharakteristiki sluchaynoy funktsii napryazheniya na tokopriyemnike pervogo ukrainskogo elektrovoza DE 1 [Probabilistic characteristics of random function of voltage on the collectors of the first Ukrainian electric locomotive DE 1]. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electric Engineering and Electromechanics*, 2003, no. 2, pp. 43-46.
6. Mishchenko T.M. Teoretychni aspekty ta metody identyfikatsii parametriv prystroiviv systemy elektrychnoi tiahuy. Metod myttievnykh potuzhnosti; paralelne ziednannia elementiv [Theoretical aspects and methods of parameters identification of devices of the electric traction system. Method of instantaneous powers; parallel connection of elements]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 41, pp. 86-91.
7. Mishchenko T.M. Teoretychni aspekty ta metody identyfikatsii parametriv prystroiviv systemy elektrychnoi tiahuy. Metod tsyklichnoi volt-ampernoï kharakterystyky [Theoretical aspects and methods of parameters identification of the electric traction systems devices. Method of cyclic current-voltage characteristics]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2013, no. 1 (43), pp. 119-125.
8. Petrov A.V. Metody spektralnogo analizu vypadkovykh tekhnolohichnykh kolyvan napruhy ta strumu fidera tiahovoi pidstantsii postiinoho strumu [Methods of spectral analysis of random technological oscillation of voltage and current of the DC traction substation feeder]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 34, pp. 77-80.
9. Sveshnikov A.A. *Prikladnyye metody teorii sluchaynykh funktsiy* [Applied methods of the random functions theory]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 463 p.
10. Solodovnikov V.V. *Statisticheskaya dinamika lineynykh sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Statistical dynamics of the linear systems of automation control]. Moscow, Gos. izd-vo fiz.-mat. lit-ry Publ., 1960. 655 p.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

11. Eykgoff P., Banegek A., Savaragi Ye. *Sovremennyye metody identifikatsii sistem* [Contemporary methods of systems identification]. Moscow, Mir Publ., 1983. 400 p.
12. Aström K.J., Eykhoff P. System Identification-A Survey. *Automatika*, 1971, no. 7, pp. 123-162. doi: 10.1016/0005-1098(71)90059-8.
13. Barraud A., Larminat Ph. De Minimal Realization and Approximation of Linear Systems from Normal Operating Records. Proc. of the 3rd IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation. Hague/Delft, 1973, pp. 953-956.
14. Bingular S.P. Identification of multivariable dynamic systems. Proc. of the 4th IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation. Tbilisi, Georgia, North-Holland, Hague, 1976, pp. 521-530.
15. Guenod M., Sage A.P. Comparison of Some Methods Used for Process Identification. *Automatika*, 1968, no. 4, pp. 235-269. doi: 10.1016/0005-1098(68)90016-2.
16. Kostin M., Nikitenko A. Statistics and Probability of the Pantograph of DC Electric Locomotive the Recuperation Mode. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2013, vol. 2012, no. 2a, pp. 273-275.
17. Silva L.I., Magallán G.A., De la Barrera P.M., De Angelo C.H., García G.O. Simulation of electric vehicles combining structural and functional approaches. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, May 2014, vol. 9, issue 3, pp. 848-858.
18. Szelag A.A., Maciołek T. 3 kV DC electric traction system modernisation for increased speed and trains power demand—problems of analysis and synthesis, 2013, vol. 89, issue 3. A, pp. 21-28.
19. Xuesong Feng, Jia Feng, Keqi Wua, Haidong Liu, Qipeng Sun. Evaluating target speeds of passenger trains in China for energy saving in the effect of different formation scales and traction capacities. *Intern. Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2012, vol. 42, issue 1, pp. 621-626. doi: 10.1016/j.ijepes.2012.04.055.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. М. О. Костіним (Україна); д.т.н., проф. С. І. Випанасенком (Україна)

Надійшла до редколегії: 30.06.2014

Прийнята до друку: 15.09.2014

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

UDC 625.12:550.837.7

V. D. PETRENKO<sup>1\*</sup>, V. V. KOVALEVYCH<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Tunnels, Bases and Foundations», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 53, e-mail petrenko1937@mail.ru, ORCID 0000-0002-5902-6155

<sup>2\*</sup>PLC «Transbudinzhyrnyh», Olena Stepanivna St., 45, building 2, of. 7, Lviv, Ukraine, 79018, tel. +38 (032) 239 51 45, e-mail skv\_lviv@mail.ru, ORCID 0000-0002-5087-1926

### THE RESULTS OF THE DEFECT PLACES INVESTIGATION OF DONETSK RAILWAY ROAD BED BY GROUND PENETRATING RADAR COMPLEX

**Purpose.** Defective places definition of road bed at ground penetrating radar is examined. **Methodology.** For achievement of this goal the experimental research on ground penetrating radar inspection of road bed defective places of the Donetsk Railway, which are caused by a complex of various reasons of geotechnical and constructive character, were conducted. **Findings.** According to these diagnostic results of road bed on the three districts of the Donetsk Railway is revealed the main causes which lead to the defects appearance, deformities and injuries in it, there is abuse of process parameters and modify its physic mechanical soil properties of natural and technology-related factors. As it is established, the use of ground penetrating radar of series “Losa” on the railways of Ukraine allows searching ballast tank in the body of road bed, defining damp places in soil road bed and foundations, to find arrangement of foreign matter in the soil road bed and work search heterogeneity and places weakening soil. In addition, the use of ground penetrating radar provides rapid detection of defects, deformation and damage of railway track, especially in areas the most dangerous for rolling stock that creates the high level security at the main and auxiliary lines of Ukrzaliznytsia. In conducting the research was justified the high level of reliability and performance with autonomous use of ground penetrating radar. **Originality.** In modern conditions of defects determination, deformations and damages by traditional methods with application of engineering-geological investigations, it is impossible in connection with their insufficient efficiency. Therefore the using of highly effective methodology of expeditious tool identification of defective places allows reducing significantly the periods of repair of a railway track which is very important for introduction of the high-speed movement on the Ukrainian Railways. **Practical value.** On the basis of the executed investigations the main actions for defects elimination, deformations and damages which consist in the device of counter dams, the draining sections, the augercast and augured piles are offered.

*Keywords:* road bed; defect places; embankment; ballast stone; ballast section; counter dam; ground penetrating radar

#### Introduction

The practice of construction and reconstruction of a railway track introduced essential amendments in the device instrument definitions of defective places of a road bed on the different railways of Ukraine in recent years. Such places can bring to dangerous processes with accidents and smash ups and to cause the organization of special windows

for repair of the damaged railway superstructure and the road bed of the railways. As a result, it is significantly complicated the operation of the track especially for high-speed train.

In this regard, the development of scientific fundamentals and practical provisions sensing arrays soil road bed, which are the most manifest of various defects, is actual scientific and technical challenge.

### Current state of the question

Due to the distribution of “sick” places in a road bed on the railways of Ukraine much attention is paid to their studying. The known scientists of Germany, France, the USA, Russia, Sweden, Canada and other states such as S. A. Lengren, I. Bergstrum, B. Erson, I. Simon, M. N. Parti, C. Coma, S. D. Bernsday, M. R. Clark, K. I. Broukhton, M. K. Ford, T. Saarenketo, A. M. Kulizhnikov, N. A. Lush Nicknames, A. A. Belozarov, G. A. Safonova, M. A. Shabashova, E. S. Ashpiz and others, were conducted many researches for the purpose of their definition and classification. Performance of inspection of the road bed by means of geophysical instruments was the main goal of the majority of works [1-9, 11-25].

The studies of the road bed defects on the running lines such as Naddvirna – Dilyatin, Khryplyn – Dilyatin, Pidvolochynsk – Ternopil and L’viv – Krasne of L’viv Railway by means of using the ground penetrating radar “Loza-V” were provided by the authors of the given work [9-10]. While probing stations of road bed were found softening of ground and waterlogged soil, resulting in subsidence of the main area of the road bed. For another thing, were found ballast bezel, subsidence of counter dam running bridge and other defective places. The ant deformation measures, which is consisting in onboard cut-out and dumping of counter dam, creation of a ditch drainage with production of water in constructions which are on sites were offered.

The ground penetrating radars of series “Loza” of Russian production for sounding “sick” places of the road bed on the railways is widespread in recent years in Ukraine. The given ground penetrating radars belong to the class of geophysical instruments for survey of subsurface structure road bed soil at depths of 10-15 meters or more depending on the model, antennas which were used and receiving facilities and environmental parameters that sounding. The principle of ground penetrating radar’s operation is based on radiated emission to broadband electromagnetic pulses and recording their reflections from the boundaries of soil layers sections or objects elements. Exploitation of ground penetrating radar of series “Losa-B” on the railways of Ukraine is effective in solving of the following tasks:

- searching in the roadbed body of the ballast tank and gun-stocks;

- definition of damp places in soil;
- search for foreign objects in the ground and the places of its relaxation.

### Purpose

To identify the defective places definition of the road bed at ground penetrating radar’s inspection.

### Methodology

For achievement of the given goal, the pilot studies at ground penetrating radar’s inspection of road bed defective places of the Donetsk railway, which are caused by the complex of various reasons of geotechnical and constructive character, were conducted.

### Findings

According to these survey of road bed on the three Donetsk railway stations is revealed, that the main causes that lead to the appearance of defects, deformities and injuries in it, there is a trouble of process parameters of its design and modify the physical and mechanical properties of the soil by natural and man-made factors. As it is established, the use of ground penetrating radar of series “Losa” on the railways of Ukraine allows searching in the body of the road bed ballast tanks, defining watery places in soil of road bed and foundations, to find the location of foreign matter in the soil road bed and search of irregularities and places of soil weakening.

### Originality and practical value

In the modern conditions of defects determination, deformations and damages by traditional methods using engineering-geological researches it is impossible in connection with their insufficient efficiency. Therefore, the using of highly effective methodology of operational instrumental detection of the defective places allows reducing significantly the periods of the track repair that is very important for implementation of high-speed movement on the railways of Ukraine.

On the basis of the executed investigations the main actions for defects elimination, deformations and damages which consist in the device of counter dams, the draining sections, the auger cast and augured piles are offered.

### Statement of the main material

The survey of the road bed and establishment of “sick” places was carried out by line service experts of the Donetsk railway on 23 km of the section Ocheretne-Gorlivka, 962 km of the section Svatove-Popasnaya and 18 km of Ocheretne-Gorlivka.

The defective place on a site 23 km Ocheretne-Gorlivka located on mounds up to 18 m, built in 1901–1903. This section concluded odd track welded on concrete sleepers with rails type R65 on crushed stone ballast and steam gauge-sectional, on wooden sleepers with rails type R65 and crushed stone ballast. On the whole area of the longitudinal profile should rise.

The defective place is divided by pipeline at 23 km (PK3 + 61) and by the bridge at 23 km (PK6 + 15). On this section of track length 254 m were anti deformation measures by means of one stage counter dam on both sides of the embankment over 150 m and 200 m from even side and 200 m – odd side. However, according to the passport PU-9 since 2002 to present time at the “sick” place observed subsidence track.

On-site inspection of the road bed status showed that on the odd side the angle of slope embankment is oversized, the outside of the track makes 2.0-2.40 m, slopes and counter dams shelves aren't created, slopes are cluttered by hard stone, on the approaches to bridges the track has a hollow, in case of cable laying integrity counter dam is broken.

From the even side such defects were marked:

- the outside of the track makes 1.5-2.0 m;
- the ballast section is oversized on 0.40-0.80 m;
- the angle of slope embankment is oversized;
- on the track the ballast is clogged with clay soils, the outside of the track isn't cut off from the polluted ballast, in the period of rains surges are carried out that also testifies to existence of ballast dimples;

– slopes blockage by work-out hard-stone.

For all measurements of ground penetrating radar soil embankment was presented by moist clay loam. At work with the ground penetrating radar was used the following modes:

- type of pass – longitudinal shooting;
- step of each frame passage 50 sm;
- measurement mode is manual;
- mode of wave forms - logarithmic;

– processing of the data – by the program “KROT”.

Considering that the “sick” place is divided by the overpass and the bridge, shooting was carried out on sections by length 56 m, 173 m and 188 m between pickets of PK2 + 75-PK7 + 60 (full length makes 485m).

In processing data of shooting by means of the program “KROT” were found ballast tanks (hollows) gun-stock, heterogeneity and instability of the embankment soil and moisture accumulation. This ballast hollows were filled with water to the depth of 1,1m from the surface within 35 m from the bridge with the largest accumulation of moisture on the approaches to it. Also was determined the presence of ballast gun-stocks at a depth of 1 m, subsidence of body of railroad over 53 m, violating the integrity of the structure of road bed within 50 m and its subsidence over a length of 80 m.

As it is set the basic reasons which lead to appearance of the road bed defects on 23 km Ocheretne-Gorlovka is the following:

- badly organized collection and lead out of a surface water;
- blockage of slopes by work-out hard stone by execution of track operations;
- width of the sub ballast is insufficient for placement of the ballast section;
- low-quality cutting of old suitable soils from the outside of the track by execution of track operations;
- increasing the thickness of ballast layer when changing the ballast for heavier types.

To eliminate the specified defects, it is necessary to execute the following:

- to provide the water drainage from the base of a road bed and the sub ballast;
- to dump slopes of the embankment;
- to lower the level of the rack head;
- in case of ballast depressions drain drainage board cuts or tenderloin cluttered ground;
- to bring slopes and counter dams shelves into the appropriate status in case of calculation of the embankment on stability.

The main recommendations about design consist in the following. Design the anti deformation actions of the road bed shall provide:

- continuity and traffic safety of trains at execution of construction works;
- the design decisions on the placement of road bed should provide the most complete of its use;

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

– high stability, durability and normal operation of the road bed after its reconstruction;

– the execution of all operations with a maximum level of mechanization.

“Sick” place on 962 km of the section of Svato-Popasnaya it is located on an embankment up to 32 m high, constructed in 1895. On this section are concluded odd and even track from link segments on wooden cross ties with rails of the P 65 type on a crushed-stone ballast. On all section the longitudinal profile had rise. For elimination of defects of a track the following anti deformation actions were executed:

– the dumping one-step counter dam from the odd side is on length of 200 m;

– the dumping of two-stage counter dams on the even side on length of 170 m;

– the device of draining sections from bored piles on the even side at the bottom of counter dams.

According to PU-9 passport embankment is located out of a slope but if to consider a difference between embankment heights from both sides, an embankment the odd side less conjugate has the embankment that testifies that the embankment is on a slope. The execution the anti deformation measures in last years on this object didn't give any result in stability of the road bed and track. Therefore on-site investigation of its status showed the following. From the odd side the gradient of the embankment is oversize, the outside of the track makes 2.0 m, slopes and the shelf of the counter dams which aren't created slopes blockage by work out hard stone, on PK4 the track has a hollow, at the bottom of an embankment the vegetation that testifies about remoistening of a road bed and bad lead out of a surface water from an embankment is marked hygrophilous, the drainage system from dredging is absent.

From the even side it was marked. that the roadside makes 1.5-2.0 m, on the way the ballast is clogged with splashes of clay soil on approaches to an embankment and on an output from dredging, testifies to existence of ballast dimples, the drainage system from dredging is absent, slopes blockage by work-out hard stone.

During the work with a georadar earlier specified modes were applied. At shooting data processing by means of the “Krot” program the same defects as well as on 23 km at section Ocheretinoe-Gorlovka were found. Furthermore, it was estab-

lished irrigation areas of the soil mass of counter dam length of 40 m on the depth of 1.0 m to the ground surface, the accumulation of moisture and unstable of road bed length is 20 m, rich moist soil subsidence over a length of 140 m and the presence of foreign objects on the station distance PK 2, 3, 6 at depths 2-7 m from the ground surface.

The main reasons which are resulted in defects of a road bed on 962 km, except specified for 23 km, the following is:

– the lack of drainage systems at the exit from dredging;

– the low-quality off take superficial riding party of a slope;

– the blocking up and insufficient depth of mountain ditches;

– the dumping of an embankment from low-quality soils developed near the located dredging.

To eliminate the specified defects, it is necessary to implement the same recommendations about technology of works as well as on 23 km of site Ocheretne-Gorlovka, and on design of their implementation. “Sick” place on 18 km of the section Ocheretne-Gorlovka it is located on an embankment height to 17,3 m, constructed in 1903 and it is reconstructed in 1966. On this site it is concluded a joint less track on ferroconcrete cross ties with rails of the P65 type and a crushed-stone ballast. On all site the longitudinal cross-section has descent. In 1991-1992 from both parties of an embankment on length of 150 m of one-stage counter dams were poured out. According to PU-9 passport since 1998 to the present time on “sick” place track sagging is watched. On-site investigation of a status of a road bed showed that on the odd side the steepness of the slope of the embankment is oversize, the roadside makes 1.2-2.40 m, slopes and shelves of the counter dams not created, on slopes of the counter dams the vegetation that testifies to availability of moisture in a body of a counter banquet is hygrophilous, water conducting pipes on an input is shielded, the rainwater catchment isn't created on a bottom. From the even side it was marked that the outside of the track makes 0.6-1.0 m, and in curve part of track a roadside of a road bed is absent, the ballast section is oversized on 0.4-0.6 m, the steepness of a slope of an embankment is also oversized, on the shelf counter dams of a crack have disclosures 0.2-0.7 cm, on an output from a pipe the course and the appropriate ditch silted between the left wall of a day off the

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

crown of tube and a body of a road bed is pockets with a source output.

By operation with a georadar the modes specified earlier were applied to determination of defects. In case of shooting data handling the “Krot” program revealed the same mains defect as well as on 23 km and 962 km.

The basic reasons leading to appearance of defects of the road bed and the recommendation about elimination of shortcomings and the main recommendations about design against deformation actions on 18 km similar which are found and offered for 23 km the section Ocheretne-Gorlovka.

Thus, georadar application in case of survey of sections of a “sick” road bed of a track allows refusing the device of labor-consuming prospecting apertures first of all.

### Conclusions

According to these survey and research road bed on three areas of Donetsk railway to the following conclusions:

– the basic reasons of defects origin and “sick” places of the road bed on the railways of Ukraine including Donetsk railway, violation of technological parameters of its construction and change of physic and mechanical properties of soil under the influence of natural and technogenic factors is;

– the application of the georadar of the “Loza” series on the railways of Ukraine allows to solve a number of tasks:

1) to carry out the search in a body of a road bed of ballast tanks and gun-stocks;

2) to define the wet places in soils of a road bed and the bases;

3) to find locations of outside objects in soil of a road bed;

4) to run for search of non-uniformity and places of weakening of the soil.

### LIST OF REFERENCE LINKS

1. Ашпиз, Е. С. Мониторинг земляного полотна при эксплуатации железных дорог / Е. С. Ашпиз. – М. : Путь-пресс, 2002. – 112 с.
2. Георадары, дороги 2000 : материалы международного науч.-практ. семинара / под ред. А. М. Кулижникова. – Архангельск : Изд-во АГТУ, 2000. – 104 с.
3. Георадары, дороги 2002 : материалы международного науч.-практ. конф. / под ред. А. М. Кулижникова. – Архангельск : Изд-во АГТУ, 2002. – 104 с.

4. Георадар–2002 : тез. докл. науч.-практ. конф. – М. : МГУ, 2002. – 50 с.
5. Исследование параметров модернизированного земляного полотна / В. Д. Петренко, А. М. М. Алхдур, А. Л. Тюткин, В. В. Ковалевич // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 41. – С. 164–169.
6. Кулижников, А. М. В разведку з георадаром. Выявление дефектов земляного полотна георадиолокационными методами / А. М. Кулижников, А. А. Белозёров // Автомобил. дороги. – 2002. – № 4. – С. 46–47.
7. Кулижников, А. М. Георадары в дорожном строительстве / А. М. Кулижников, М. А. Шабашова // Автомобил. дороги : обзор. информ. – М., 2000. – Вып. 2. – С. 52.
8. Кулижников, А. М. Опыт применения георадарных технологий в дорожном хозяйстве / А. М. Кулижников, П. А. Пушников, А. А. Белозёров // Автомобил. дороги и мосты : обзор. информ. – М., 2004. – Вып. 2. – С. 65.
9. Петренко, В. Д. Застосування георадару для визначення пошкоджень високого напіву земляного полотна / В. Д. Петренко, В. В. Ковалевич // Проблеми и перспективы развития ж.-д. трансп. : тез. 71 междунар. науч.-практ. конф. (14.04.2011-15.04.2011) / М-во инфраструктуры Украины, Днепрпетр. национ. ун-т ж.-д. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – С. 238–239.
10. Применение георадиолокационного метода при исследовании дефектов высоких насыпей железнодорожного земляного полотна / В. Д. Петренко, В. И. Харлан, В. Н. Косяк, В. В. Ковалевич // Стр-во, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / ПГАСА. – Днепрпетровск, 2011. – Вып. 61. – С. 312–316.
11. Результаты анализа параметров экспериментальных исследований армирования геотекстилем земляного полотна / В. Д. Петренко, И. Т. Гузченко, А. Л. Тюткин, А. М. М. Алхдур // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – Вип. 34. – С. 131–135.
12. Сафонова, Г. А. Всевидящий «КРОТ» / Г. А. Сафонова // Автомобил. дороги. – 2001. – № 5. – С. 58–59.
13. Сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований усиления земляного полотна малодеформируемым слоем / В. Д. Петренко, В. Т. Гузченко, А. Л. Тюткин, А. М. М. Алхдур // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 35. – С. 139–144.
14. Comparison of laboratory and Simulated data for radar image interpretation / C. Colla, C. D. Burn-

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

- side, M. R. Clark [et al.] // *NDT & Intern.* – 1998. – Vol. 3.1, № 6. – P. 439–444. doi: 10.1016/s0963-8695(98)00043-7.
15. Du, P.-F. Intelligent recognition of defects in railway subgrade / P.-F. Du, L.-J. Liao, X.-A. Yang // *J. of the China Railway Society.* – 2010. – Vol. 32. – Iss. 3. – P. 142–146
  16. Environmental geological applications of ground penetrating radar / H. Guan, X. Ye, S. Wang, Z. Deng // *14th Intern. Conf. on Ground Penetrating Radar.* – Shanghai, 2012. – P. 779–784. doi: 10.1109/icgpr.2012.6254967.
  17. Ground penetrating radar nondestructive testing method applied in railway subgrade of existing heavy haul railway / C. Wang, M. Bai, Y. Du, X. Liu [et al.] // *J. of Beijing Jiaotong University.* – 2013. – Vol. 37. – Iss. 4. – P. 35–39.
  18. Hugenschmidt, I. Zertörungsfreie Untersuchungen von Asphalt belagen mit Georadar / I. Hugenschmidt, M. N. Parti // *Bitumen.* – 1999. – № 4. – P. 125–130.
  19. Lenngren, C. A. Using Ground Penetrating Radar for Assessing Highway Pavement Thickness / C. A. Lenngren, J. Bergstrom, B. Ersson // *Proc. of SPIE.* – 2000. – Vol. 4129. – P. 474–483.
  20. Liu, J. A new method of evaluation subgrade of heavy haul railway / J. Liu, Q. Zhang // *Heavy Haul and Innovation Development : Proc. - 9th Intern. Heavy Haul Conference.* – Shanghai, 2009. – P. 3–8.
  21. Saarenketo, T. Using ground penetrating radar and dielectric probe measurements in pavement density quality control / T. Saarenketo // *Paper Submitted for Presentation and Publication at the 1997 Annual Meeting of the Transportation Research Board Washington.* – 1996. – July. – P. 1–17. doi: 10.3141/1575-05.
  22. Simon, I. M. Evaluation de systemes radar pour controller l'epaisseur des couches de chaussées / I. O. M. Simon // *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussees.* – 2002. – № 238 (maj-juin). – P. 51–59.
  23. Study on ground penetrating radar in detecting of zero-temperature boundary under the railway bed / L. Du, X. Zhang, J. Qiu, W. Liu // *Advanced Materials Research : Intern. Conf. on Civil Engineering and Building Materials (29.07.-31.07.2011).* – Kunming, 2011. – Vol. 255–260. – P. 3975–3978. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.255-260.3975.
  24. Su, L. J. Computer Methods for Geomechanics: Frontiers and New Applications / L. J. Su, B. Indraratna, C. Rujikiatkamjorn // *13th Intern. Conf. of the Intern. Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (09.05.-11.05.2011).* – Melbourne, 2011. – Vol. 1. – P. 478–482.
  25. Zhou, H.-B. Research on comprehensive geophysical exploration for hidden danger to subgrade of passenger dedicated line / H.-B. Zhou, Z.-H. Li // *J. of Railway Engineering Society.* – 2013. – Vol. 30. – Iss. 4. – P. 46–50.

В. Д. ПЕТРЕНКО<sup>1\*</sup>, В. В. КОВАЛЕВИЧ<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Тунелі, основи та фундаменти», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. В. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, ел. пошта petrenko1937@mail.ru, ORCID 0000-0002-5902-6155

<sup>2\*</sup>ТОВ «Трансбудінжиніринг», вул. Олени Степанівни, 45, буд. 2, оф. 7, Львів, Україна, 79018, тел. +38 (032) 239 51 45, ел. пошта skv\_lviv@mail.ru, ORCID 0000-0002-5087-1926

## РЕЗУЛЬТАТИ ОБСТЕЖЕННЯ ГЕОРАДАРНИМ КОМПЛЕКСОМ ДЕФЕКТНИХ МІСЦЬ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ДОНЕЦЬКОЇ ЗАЛІЗНИЦІ

**Мета.** Основною метою роботи є встановлення дефектних місць земляного полотна при геодарному обстеженні. **Методика.** Для досягнення поставленої мети були проведені експериментальні дослідження по геодарному обстеженню дефектних місць земляного полотна Донецької залізниці, які обумовлені комплексом різноманітних причин геотехнічного і конструктивного характеру. **Результати.** Згідно з наведеними результатами обстеження земляного полотна на трьох дільницях Донецької залізниці виявлено, що основними причинами, що призводять до появи дефектів, деформацій та пошкоджень у ньому, є порушення технологічних параметрів його конструкції та змінення фізико-механічних властивостей ґрунту під впливом природних та техногенних факторів. Як встановлено, застосування георадарів серії «Лоза» на залізницях України дозволяє провести пошук в тілі земляного полотна баластових корит, визначити вологі місця в ґрунтах земляного полотна та основ, знаходити місця розташування сторонніх об'єктів в ґрунті земляного полотна і робити пошук неоднорідності та місць ослаблення ґрунту. Крім того, використання георадарів забезпечує оперативне виявлення дефектів, деформацій та пошкоджень залізничної колії,

Doi 10.15802/stp2014/30817

© V. D. Petrenko, V. V. Kovalevych, 2014

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

особливо в місцях найбільш небезпечних для рухомого складу залізниць, що призводить до створення високого рівня безпеки на головних та допоміжних лініях Укрзалізниці. При проведенні досліджень був обґрунтований високий рівень надійності та ефективності роботи георадарів з автономним застосуванням.

**Наукова новизна.** В сучасних умовах визначення дефектів, деформацій та пошкоджень традиційними методами із застосуванням інженерно-геологічних досліджень неможливе в зв'язку з їх недостатньою оперативністю. Тому використання високоефективної методології оперативного інструментального виявлення дефектних місць дозволяє суттєво скорочувати періоди ремонту залізничної колії, що дуже важливо для впровадження швидкісного руху на залізницях України. **Практична значимість.** На основі виконаних досліджень запропоновані головні заходи по усуненню дефектів, деформацій та пошкоджень, які полягають у влаштуванні контрбанкетів, дренажних перерізів, буроін'єкційних або буронабивних паль.

*Ключові слова:* земляне полотно; дефектні місця; насип; баласт щебеневий; баластна призма; контрбанкети; георадар

В. Д. ПЕТРЕНКО<sup>1\*</sup>, В. В. КОВАЛЕВИЧ<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Тоннели, основания и фундаменты», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. В. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, эл. почта petrenko1937@mail.ru, ORCID 0000-0002-5902-6155

<sup>2\*</sup>ООО «Трансбудинжиниринг», ул. Елены Степановны, 45, д. 2, оф. 7, Львов, Украина, 79018, тел. +38 (032) 23951 45, эл. почта skv\_lviv@mail.ru, ORCID 0000-0002-5087-1926

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОБСЛЕДОВАНИЯ ГЕОРАДАРНЫМ КОМПЛЕКСОМ ДЕФЕКТНЫХ МЕСТ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ДОНЕЦКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

**Цель.** Основная цель работы – определение дефектных мест земляного полотна при георадарном обследовании. **Методика.** Для достижения поставленной цели были проведены экспериментальные исследования по георадарному обследованию дефектных мест земляного полотна Донецкой железной дороги, которые обусловлены комплексом разнообразных причин геотехнического и конструктивного характера. **Результаты.** Согласно с приведёнными результатами обследования земляного полотна на трёх участках Донецкой железной дороги обнаружено, что основными причинами, которые приводят к появлению дефектов, деформаций и повреждений в нём, являются нарушения технологических параметров его конструкции и изменения физико-механических свойств грунта под влиянием естественных и техногенных факторов. Как установлено, применение георадаров серии «Лоза» на железных дорогах Украины позволяет провести поиск в теле земляного полотна балластовых корыт, определить влажные места в грунтах земляного полотна и оснований, находить места размещения посторонних объектов в грунте земляного полотна и производить поиск неоднородностей и мест ослабления грунта. Кроме того, использование георадаров обеспечивает оперативное выявление дефектов, деформаций и повреждений железнодорожного пути, особенно в местах наиболее опасных для подвижного состава железных дорог, что приводит к созданию высокого уровня безопасности на главных и вспомогательных линиях Укрзалізниці. При проведении исследований был обоснован высокий уровень надёжности и эффективности работы георадаров с автономным применением. **Научная новизна.** В современных условиях определение дефектов, деформаций и повреждений традиционными методами с использованием инженерно-геологических изысканий невозможно в связи с их недостаточной оперативностью. Поэтому использование высокоэффективной методологии оперативного инструментального определения дефектных мест разрешает существенно сокращать периоды ремонта железнодорожной колеи, что является важным для внедрения скоростного движения на железных дорогах Украины. **Практическая значимость.** На основании проведенных исследований предложены главные мероприятия по устранению дефектов, деформаций и повреждений, которые состоят в устройстве контрбанкетов, дренажных сечений, буроин'єкционных или буронабивных свай.

*Ключевые слова:* земляное полотно; дефектные места; насыпь; балласт щебеночный; балластная призма; контрбанкеты; георадар

### REFERENCES

1. Ashpiz Ye.S. *Monitoring zemlyanogo polotna pri ekspluatatsii zheleznykh dorog* [Monitoring of road bed formation during railway operations]. Moscow, Put-press Publ., 2002. 112 p.

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

2. Kulizhnikov A.M. *Materialy mezhdunarodnykh nauchno-prakticheskikh seminarov «Georadary, dorogi 2000»* [Proc. of Int. Scientific and Practical Seminars «Georadar, roads 2000»]. Arkhangelsk, 2000. 104 p.
3. Kulizhnikov A.M. *Materialy mezhdunarodnykh nauchno-prakticheskikh seminarov «Georadary, dorogi 2002»* [Proc. of Int. Scientific and Practical Seminars «Georadar, roads 2002»]. Arkhangelsk, 2002. 104 p.
4. *Tezisy dokladov nauchno-prakticheskikh konferentsiy «Georadar–2002»* [Abstracts of the Scientific and Practical Conf. «Georadar–2002»]. Moscow, 2002. 50 p.
5. Petrenko V.D., Alkhdur A.M.M., Tyutkin, A.L., Kovalevich V.V. Issledovaniye parametrov modernizirovanogo zemlyanogo polotna [Investigation of the parameters of the upgraded road bed]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 41, pp. 164-169.
6. Kulizhnikov A.M., Belozarov A.A. V razvedku z georadaram. Vyyavleniye defektov zemlyanogo polotna georadiolokatsionnymi metodami [The investigation with georadar. Detection of defects of a road bed by georadar methods]. *Avtomobilnyye dorogi – Car Roads*, 2002, no. 4, pp. 46-47.
7. Kulyzhnykov A.M., Shabashova M.A. Georadary v dorozhnom stroitelstve [Georadars in road construction]. *Avtomobilnyye dorogi: obzornaya informatsiya* [Car roads: Survey information]. Moscow, 2000, issue 2, 52 p.
8. Kulizhnikov A.M., Pushnikov P.A., Belozarov A.A. Opyt primeneniya georadarnykh tekhnologiy v dorozhnom khozyaystve [Experience of application of georadar technologies in road construction. Survey information]. *Avtomobilnyye dorogi i mosty: obzornaya informatsiya* [Car roads and bridges: Survey information]. Moscow, 2004, issue 2, p. 65.
9. Petrenko V.D. Zastosuvannya heoradaru dlia vyznachennia poshkodzen vysokoho nasypu zemlianooho polotna [Application of ground penetrating radar to determine the damage of high embankment subgrade]. *Tezisy 71 Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Problemy i perspektivy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta (14.04.2011-15.04.2011)»* [Abstracts of the 71 Int. Sci. and Practical Conf. «Problems and perspectives of development of railway transport»]. Dnipropetrovsk, 2011, pp 238-239.
10. Petrenko V.D., Kharlan V.I., Kosyak V.N., Kovalevich V.V. *Primeneniye georadiolokatsionnogo metoda pri issledovanii defektov vysokikh nasypey zheleznodorozhnogo zemlyanogo polotna* [Application of a georadar method in case of research of defects of high embankments of a railroad road bed]. *Stroitelstvo, materialovedeniye, mashinostroyeniye* [Construction, materials science, mechanical engineering]. Dnipropetrovsk, 2011, issue 61, pp. 312-316.
11. Petrenko V.D., Guzchenko I.T., Tyutkin A.L., Alkhdur A.M. M. *Rezultaty analiza parametrov eksperimentalnykh issledovaniy armirovaniya geotekstilem zemlyanogo polotna* [Analysis results of parameters of the pilot studies of reinforcement by geotextiles of a road bed]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 34, pp. 131-135.
12. Safonova H.A. Vsevidyashchiy «KROT» [All-seeing «KROT»]. *Avtomobilnyye dorogi – Car Roads*, 2001, no. 5, pp. 58-59.
13. Petrenko V.D., Guzchenko V.T., Tyutkin A.L., Alkhdur A.M.M. *Sravnitelnyy analiz rezultatov eksperimentalnykh issledovaniy usileniya zemlyanogo polotna malodeformiruyemym sloyem* [Comparative analysis of results of the pilot studies of gain of a road bed with low-deformable layer]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 35, pp. 139-144.
14. Colla C., Burnside C.D., Clark M.R., K.I. Broughton, M.C. Forde. Comparison of laboratory and Simulated data for radar image interpretation. *NDT & International*, 1998, vol. 3.1, no. 6, pp. 439-444. doi: 10.1016/s0963-8695(98)00043-7.
15. Du P.-F., Liao L.-J., Yang X.-A. Intelligent recognition of defects in railway subgrade. *Journal of the China Railway Society*, 2010, vol. 32, issue 3, pp. 142-146.
16. Guan H., Ye X., Wang S., Deng Z. Environmental geological applications of ground penetrating radar. 14th International Conference on Ground Penetrating Radar. Shanghai, 2012, pp. 779-784. doi: 10.1109/icgpr.2012.6254967.
17. Wang C., Bai M., Du Y., Liu X., Qin G. Ground penetrating radar nondestructive testing method applied in railway subgrade of existing heavy haul railway. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2013, vol. 37, issue 4, pp. 35-39.
18. Hugenschmidt I., Parti M.N. Zertorungsfreie Untersuchungen von Asphalt belagenmit Georadar. *Bitumen*, 1999, no. 4, pp. 125-130.

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

19. Lenngren C.A., Bergstrom J., Ersson B. Using Ground Penetrating Radar for Assessing Highway Pavement Thickness. Proc. of SPIE, 2000, vol. 4129, pp. 474-483.
20. Liu J., Zhang Q. A new method of evaluation subgrade of heavy haul railway. Proc. of the 9th Intern. Heavy Haul Conf. «Heavy Haul and Innovation Development». Shanghai, 2009, pp. 3-8.
21. Saarenketo T. Using ground penetrating radar and dielectric probe measurements in pavement density quality control. *Paper Submitted for Presentation and Publication at the 1997 Annual Meeting of the Transportation Research Board Washington*, 1996, July, pp.1-17. doi: 10.3141/1575-05.
22. Simon I.M. Evaluation de systemes radar pour controller Pepaisseur des couches de shausses. *Bulletin des laboratoires des PontsetCgaussees*, 2002, no. 238, pp. 51-59.
23. Du L., Zhang X., Qiu J., Liu W. Study on ground penetrating radar in detecting of zero-temperature boundary under the railway bed. «Advanced Materials Research» Int. Conf. on Civil Engineering and Building Materials. Kunming, 2011, vol. 255-260, pp. 3975-3978. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.255-260.3975.
24. Su L.J., Indraratna B., Rujikiatkamjorn C. Computer Methods for Geomechanics: Frontiers and New Applications. 13th Int. Conf. of the Intern. Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics. Melbourne, 2011, vol. 1, pp. 478-482.
25. Zhou H.-B., Li Z.-H. Research on comprehensive geophysical exploration for hidden danger to subgrade of passenger dedicated line. *Journal of Railway Engineering Society*, 2013, vol. 30, issue 4, pp. 46-50.

*Prof. M. M. Biliaiev, D. Sc. (Tech.); Prof. S. P. Minieiev D., Sc. (Tech.) recommended this article to be published*

Received: June 28, 2014

Accepted: Aug. 19, 2014

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

UDC 621.791.752

I. O. VAKULENKO<sup>1\*</sup>, S. O. PLITCHENKO<sup>2</sup>, D. M. MAKAREVICH<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Materials Technology», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 56, e-mail dnuzt\_texmat@ukr.net, ORCID 0000-0002-7353-1916

<sup>2</sup>Dep. «Materials Technology», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 56, e-mail dnuzt\_texmat@ukr.net, ORCID 0000-0002-0613-2544

<sup>3</sup>Dep. «Materials Technology», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 56, e-mail dnuzt\_texmat@ukr.net, ORCID 0000-0003-4327-9809

### INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOUNDS ON THE FORMING OF WELDING ARC

**Purpose.** The purpose of work is a comparative analysis of chemical compounds influence on the process of forming arc welding and condition of its burning. **Methodology.** A wire with diameter 3 mm of low carbon steel with contain of carbon 0.15% was material for electrode. As chemical compounds, which determine the terms of arc welding forming the following compounds were used: kaolin;  $CaCO_3$  with admixtures of gypsum up to 60%;  $SiO_2$  and  $Fe - Si$  with the iron concentration up to 50%. Researches were conducted using the direct electric current and arc of reverse polarity. As a source of electric current a welding transformer of type PSO-500n was used. On the special stand initial gap between the electrode and metal plate was 1-1.5 mm. The inter electrode space was filled with the probed chemical compound and the electric arc was formed. At the moment of arc forming the values of electric current and arc voltage were determined. After the natural break of electric arc, the final gap value between electrodes was accepted as a maximal value of arc length. **Findings.** Experimentally the transfer of metal in interelectrode space corresponded to the tiny drop mechanism. According to external signs the relation between maximal arc length and the power of electric current has the form of exponential dependence. Specific power of electric arc at the moment of arc forming per unit of its length characterizes the environment in the interelectrode space. **Originality.** 1) Based on the analysis of influence of the studied chemical compounds on the formation processes of electric arc the inversely proportional relationship between the power of the electric current and the maximum arc length until the moment of its natural break is defined. 2) Ratio between the maximal arc length and the power of electric current, with the sufficiently high coefficient of correlation is submitted to the exponential dependence. Influence of the compounds under study on the process of electric arc forming is determined using the indexes of degree of the above mentioned correlation. 3) The value of specific power of electric current at the moment of electric arc forming per unit of arc length can be accepted as the parameter, which characterizes the state of interelectrode space environment. **Practical value.** In the conditions of identical adjusting force of electric current the sequence of location of the studied compounds in the order of increase of their influence on the process of arcing is determined. Minimum influence is observed from kaolin, and maximal one – from  $Fe - Si$ .

*Keywords:* electric arc; arc length; power of electric current; chemical compound

#### Introduction

For the technology of electric arc welding, the initial conditions of electric arc forming to a large

extent determine the peculiarities of further process of arcing. Taking into account the array of factors, which according to quality indicators in different

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

ways influence the conditions of electric arc ignition the state of the interelectrode space environment can be attributed to one of the most important effects [5].

On the other hand, the environment state will become no less important at the stage of stable arcing, defining the conditions of metal transfer through the electrode space. Furthermore, the nature of the molten metal transfer from the electrode to the welding pool itself will stipulate not only the technological characteristics of the electric arc and energy balance, but also the stage of development completion of metallurgical processes when forming the weld connection as a whole [3, 14]. Taking into account that the influence of interelectrode environment on the arc ignition process is determined by the ionizing power, the location of different substances between electrodes will change the initial conditions of the electric discharge forming [4, 11]. On this basis, the purposeful influence on the conditions of metal transfer at the moment of electric discharge forming is very important for the technologies of electric arc welding.

### Current condition of the problem

The process of metal transfer through the interelectrode space is to a large extent determined by the initial conditions of the electric arc ignition. The above mentioned metal transfer process can be roughly divided into separate stages. The characteristic conditions of change of the metal aggregate state and its properties are inherent to these stages [1, 6]. Thus, after formation of liquid, the growth of its volume on the cathode surface takes place until the separation of droplets from the surface and transferring them to the anode.

Taking into account the dependence of the process of droplets forming, their size and shape on the chemical reactions behavior between the substances filling interelectrode space, the combined influence on the ionizing power of environment is difficult to predict [8, 10]. On the other hand, the formation process of droplets can be confidently considered as dependent on the ratio of the gravitational forces influencing the fluid and force of surface tension of the metal.

The force value of the surface tension of molten metal or alloy is determined by the characteristics of their internal structure, which include the type of crystal lattice, the chemical composition of the alloy. The temperature of the fluid heating and its

fluidity has certain influence on the specified characteristic.

Thus, for the iron the surface tension coefficient equals to 1.22 N/m [6]. Admixtures of alloying chemical elements to the iron lead to its change. For example, the addition to the iron of 18% Cr, 8% Ni, 1% Ti (H18N9T) leads to a decrease of the surface tension ( $\sigma$ ) at the level of 8-10%.

As compared to the influence of chemical composition of the alloy, a mixture of gases of interelectrode space can also influence the level of values  $\sigma$ , although their influence in most cases is qualitatively different.

Considering the formation of metal droplets of the electrode it can be noted that the main influence is determined by the ratio between the axial force, which arises as a result of so-called pinch effect and the force of surface tension [4, 6]. The growth of heating temperature of the molten metal is accompanied by a decrease of the surface tension coefficient [6, 9].

Accounting the fact that during the first approximation the heating temperature of molten metal is proportional to the strength of welding voltage ( $I$ ), when the growth  $I$ , changing the influence of gravitational component reduces the critical size of the droplet (conditions of droplet detachment from the electrode) [6]. At the same time the influence of electromagnetic force [2] including its compressing effect on the molten metal of the weld pool is increasing [2, 12]. After the detachment of droplet from the electrode surface, the process of its movement is starting to depend on the joint action of electrostatic and electrodynamic forces, reactive action of the electric discharge [10].

On the basis of the presented joint influence, the strength increase of electric current is accompanied by breakage of molten metal droplets, which are transferred in the interelectrode space [6, 15]. The presented compound influence on the process of transferring the molten metal during the arc welding can be corrected using various chemical compounds.

### Purpose

Purpose of the article is the comparative analysis of the chemical compounds influence on the process of electric arc forming and the conditions of its burning.

### Methodology

The low carbon wire with the diameter 3 mm, of the steel with 0.15% carbon was used as a material for electrode. As the substances determining the conditions of electric arc formation were used the kaolin;  $CaCO_3$  with admixtures of gypsum up to 60%;  $SiO_2$  and  $Fe-Si$  if the iron concentration is up to 50%.

The studies were conducted with the use of electric current of constant direction and the arc of reverse polarity. As a source of electric current the welding transformer of the type PSO-500 was used. On the special stand the initial gap between the electrode and metal plate was 1-1.5 mm. Interelectrode space was filled with the studied substance and the electrical discharge was formed.

At the moment of the electric arc ignition the values of electric current and arc voltage were determined. After natural break of electric arc the final size of the space between electrodes is taken as the maximum arc length.

### Findings

Except the dependency of metal heating temperature on the electric current force [7, 10] the formation process of molten metal droplets is determined by the joint action of several factors. First of all, the existence of inverse proportion between the heating temperature and the force of metal surface tension shows that the growth  $I$  would enhance the fluidity of liquid.

At the same time the rise of electrodynamic influence on the process of droplets formation is observed. The joint influence of the mentioned factors leads to increase in the dispersion degree of molten metal droplets [6].

The process of transferring the molten metal through interelectrode space can be decomposed into successive stages: detachment of the formed droplet from the surface of one electrode and its transferring to another one. Thus, the size of droplets that are detached from the electrode surface will decrease proportionally to the increase of  $I$ . At the same time the number of droplets that are being transferred through the space between the electrodes per time unit will increase.

When the electric current force is so that the droplets form a continuous chain it is considered reaching the critical conditions that determine the qualitative changes in the nature of metal transfer

(from the drop to the spray one). Thus, the definition of metal transfer mechanism is of practical importance to assess the influence of the studied substances on the process of electric discharge forming.

The critical value of electric current ( $I_c$ ) meets the conditions when the diameter of molten metal column reaches about 0.7 of the electrode diameter [6]. On this basis, the value  $I_c$  is estimated by the ratio:

$$I_c = k\sqrt{\sigma d}, \quad (1)$$

where  $k$  and  $\sigma$  – are the coefficients of proportionality and surface tension of the metal respectively,  $d$  – is the electrode diameter.

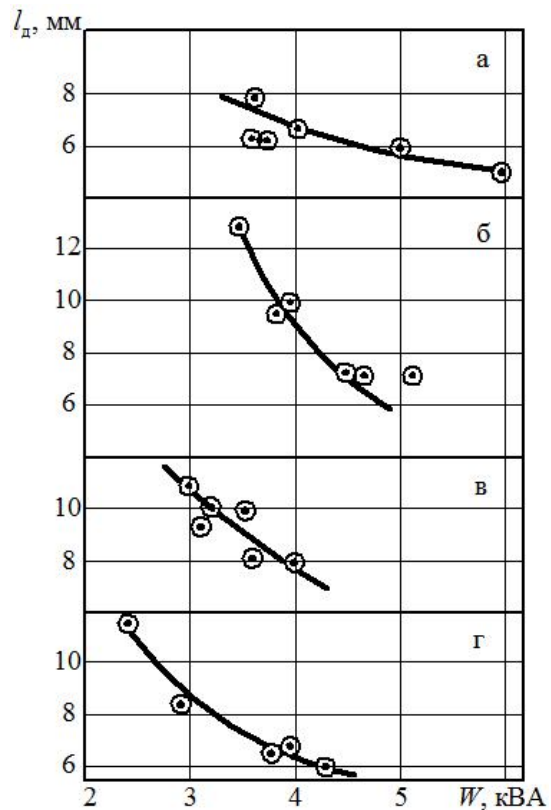


Fig. 1. Influence of kaolin – (a),  $SiO_2$  – (b),  $Fe-Si$  – (c) and  $CaCO_3$  – (d) on the ratio between the arc length and the electric current power

Uncertainty of the values  $k$  and  $\sigma$  can be removed using the known experimental data. So, the surface tension force for iron is 1.22 n/m, and when increasing the content of alloying elements it decreases, reaching the grade for complex alloyed steel KH18N9T for example 1.1 n/m [6]. Substitut-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

ing in to (1)  $\sigma = 1.1$  n/m, for different electrode diameters: 1-3 mm and the corresponding values of  $I_c$  (190-350 A), obtained from the full-scale investigations (according to detachment of molten metal droplets from the electrode surface) for steel KH18N9T the value  $k$  was 18.1-18.8 A/dyne<sup>0.5</sup>.

Taking into account the change range of  $\sigma$  for low-carbon steel can be taken  $\sigma = 1.2$  n/m and  $k = 18.5$  A/dyne<sup>0.5</sup>. According to ratio (1) it has been determined that for low-carbon steel of electrode with  $d = 3$  mm,  $I_c$  should be equal 375-380 A. Comparing with the installation current 200 A it should be assumed that upon the experimental conditions the metal transfer in the interelectrode space corresponded to the droplet mechanism.

Under conditions of electric current of constant direction with reverse polarity the search for correlations between the maximum arc length ( $l_o$ ) separately for the strength of electric current or arc voltage ( $U$ ) have shown the need to considerate the influences of  $I$  and  $U$  at the same time. The results of the constructed dependences for the components under study are presented in the Fig. 1.

According to external characteristics one can talk of inverse relationship between  $l_o$  and electric current capacity ( $W = UI$ ). The deviation of dependences  $l_o = f(W)$  from the rectilinear appearance indicates the need to reconstruct them in logarithmic coordinates (Fig. 2).

In the first approximation, the specified dependences are clearly subordinated to relation of the type:

$$\ln(l_o) = A + K \ln(W) \quad (2)$$

where  $A$  and  $K$  are the constant characteristics. After transformation the expression (2) takes the form:

$$l_o \approx B \frac{e^A}{W^K} \quad (3)$$

where  $B$  – is a proportionality coefficient.

For each component under study from the graphic solutions of dependences (Fig. 2) the values  $A$  and  $K$ , for the dimension  $l_o$  [mm],  $W$  [VA] were determined. Thus, in the order of decreasing the values  $A$  (14.75; 13.7; 10.5 and 8.8), the studied components are placed in the corresponding order:  $SiO_2$ ,  $Fe-Si$ ,  $CaCO_3$  and kaolin. The similar

pattern of change is also observed for the value  $K$  in the specified order ( $SiO_2$ ,  $Fe-Si$ ,  $CaCO_3$  and kaolin): 1.5; 1.4; 1.03 and 0.817.

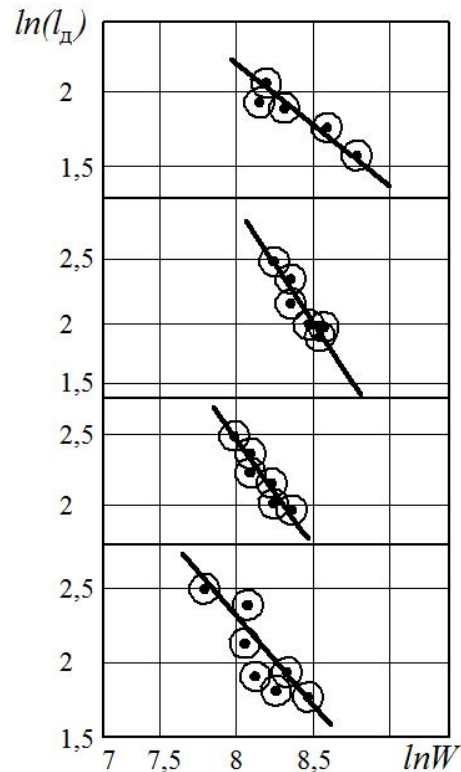


Fig. 2. Dependences  $l_o = f(W)$  for the studied components in the logarithmic coordinates. The identifications are similar to the Fig. 1

For more detailed explanation of the reasons leading to the influence on the formation process of electric arc components in the presented order from  $SiO_2$  to kaolin, the additional analysis of the obtained relations was made. Thus, in a first approximation, accounting the known decrease in surface tension force of the iron from the oxygen concentration [6], the presented influence nature (Fig. 1) may be stipulated by the presence of oxygen atoms of different concentration as a result of the dissociation reaction of the studied components. On the other hand, at the initial stages of the arc forming, the increase of electric current strength is accompanied by proportional increase in the metal mass transfer through the interelectrode space [5, 10]. At the same time, due to the joint action of electric and magnetic fields that appear in the space between electrodes, the axial force determining the mechanical nature of the influence on the molten metal is being formed. The

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

voltage that is appearing according to its action represents the pressure voltage.

Under conditions of permanency of the most of factors influencing the formation process of electric arc the specified voltage can be estimated using the power that is appearing ( $\rho$ ) with the use of dependence [6]:

$$\rho = k_{\delta} I^2, \quad (4)$$

where  $k_{\delta}$  – is a coefficient that determines the electrode diameter influence and the electric arc polarity. At the same time, according to the presented dependence the influence of ionizing ability of interelectrode environment is absent. Although using the form of the ratios  $l_{\delta} = f(W)$  (Fig. 1) one can still identify the influence peculiarities of the studied substances on the environment of interelectrode space.

Using the electric arc power at the moment of arc forming as the characteristics determining the conditions for its further combustion, the maximum arc length should reflect the state of the interelectrode space environment. Indeed, the analysis of dependences  $l_{\delta} = f(W)$  shows that one can quite often observe the change  $l_{\delta}$  in a certain range of values for the same levels  $W$ . In order to try to determine the index, which may allow assessing the influence of the studied substances on the process of arc formation, we use the dependence  $l_{\delta} = f(W)$  (Fig. 1). But as an argument we take the value  $l_{\delta}$ . The next step, after approximation of dependence  $W = f(l_{\delta})$  with the use of straight lines, the slope coefficient determination allows assessing the degree of influence of the substances under study.

For the range of values  $W$  and  $l_{\delta}$  (Fig. 1), let us assess the slope coefficient ( $C$ ) using the ratio:

$$C = \frac{\Delta W}{\Delta l_{\delta}}, \quad (5)$$

where –  $\Delta W$  and  $\Delta l_{\delta}$  are the corresponding change intervals  $W$  and  $l_{\delta}$ .

Taking into account the fact that to each chemical element corresponds its own value of ionization potentials (the first ionization potential, the second and so on [16]) one can make an attempt to assess the specified characteristics of the studied substance ( $P$ ) with the defined simplification degree.

First of all, to determine  $P$  let us use only the first ionization potential of chemical elements whose values are shown in the diagram (Fig. 3).

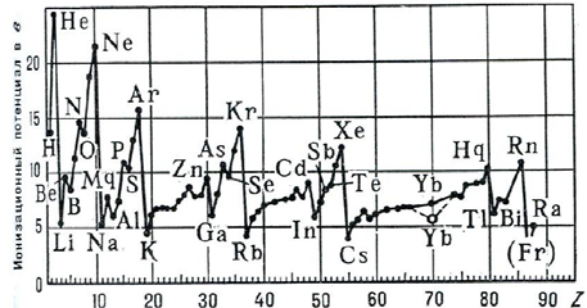


Fig. 3. Value of the first ionization potential of the chemical elements depending on the serial number of the periodic table.

The presented position is stipulated by the fact that during the electric arc formation mainly the extraction of outer (valence) electrons takes place, when the extraction of the electrons closest to the nucleus requires several times more energy [13, 16].

In order to take into account the complicated joint influence of different chemical elements presented in the area of electric arc discharge at the same time, it is necessary to make two assumptions.

The first assumption – is an assessment of the  $P$  values of the studied substances excluding the energy spent on complete dissociation of molecules or chemical compounds to atomic state. The second assumption – the additive nature of ionization potentials influence of chemical elements forming the molecule or chemical compound in proportion to their number is accepted.

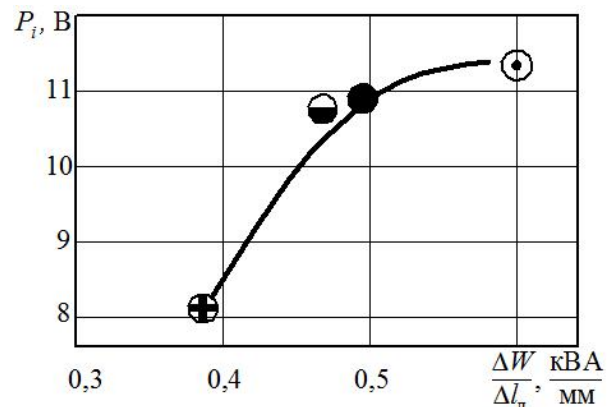


Fig. 4. The ratios between the values  $P$  and  $C$  for the studied substances (⊕ – is a kaolin; ● – is  $SiO_2$ ; ◐ – is  $CaCO_3$ ; ⊕ – is  $Fe-Si$ ).

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

The influence efficiency of the studied substances on the process of electrical discharge forming that is assessed according to the values  $C$  (Fig. 1), in fact, should be connected with the peculiarities of the atomic structure of the chemical elements that form the substances. On the basis of this, one can expect the existence of correlation between the values  $C$  and  $P$ . The result of pair plotting of the specified characteristics is shown in Fig. 4.

Considering the nature of the presented relation one can talk of the proportional relationship between the angular coefficient ( $C$ ) and the value  $P$ . If we assume that under certain conditions the formation of electric arc discharge the value  $C$  characterizes the substance influence on the process of arc ignition, it is reasonable to expect the existence of relation with the values characterizing the state of interelectrode space. According to the presented dependence as compared to the other substances under study, filling the interelectrode space of  $Fe-Si$  is accompanied by the electric arc formation at the lowest values of specific power. Around 20% more of electric current power is necessary to have to enable the arc discharge excitation while filling the interelectrode space and even greater one for kaolin.

### Originality and practical value

1. Based on the influence analysis of the studied substances on the formation processes of electric arc, the inverse relationship between electric current power and the maximum arc length until its natural break was determined.

2. The ratio between the maximum arc length and the electric current power, with a sufficiently high correlation coefficient are subordinated to the exponential dependence. The influence of the studied substances on the electric arc formation is determined using the degree indicators of the proposed relationship.

3. The value of specific power of electric current at the moment of electric arc formation, which is attributed to the arc length, can be taken as a parameter characterizing the state of the interelectrode environment.

Under conditions of the identical adjusting force of electric current the gradation of the studied substances in the order of increase of their influence on the arcing process is determined. Thus, the

minimal influence is observed from kaolin, and the maximum one – for  $Fe-Si$ . Using the value  $C$  allows assessing the influence degree of chemical mixture on the formation of electric arc in practice.

### Conclusions

1. Under conditions of the research the metal transfer in the interelectrode space corresponds to the droplet mechanism.

2. The ratio between the maximum arc length and electric current at the moment of forming the electric discharge for the conditions of inverse polarity, has the form of exponential dependence.

3. Substance influence on the state of environment of the interelectrode space can be estimated using the ratio of the change speed of electric discharge power at the moment of arc ignition per unit of length.

### LIST OF REFERENCE LINKS

1. Вакулєнко, И. А. Морфология структуры и деформационное упрочнение стали / И. А. Вакулєнко, В. И. Большаков. – Д. : Маковецкий, 2008. – 196 с.
2. Вакулєнко, І. О. Структурні перетворення в металі залізничного колеса після дії імпульсів електричного струму / І. О. Вакулєнко, В. А. Сокірко, О. С. Баскевич // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 42. – С. 160–163.
3. Кривцун, И. В. Модель процессов тепло-, массо- и электропереноса в анодной области и столбе сварочной дуги с тугоплавким катодом / И. В. Кривцун, В. Ф. Демченко, И. В. Крикет // Автомат. сварка. – 2010. – № 6. – С. 3–11.
4. Лесков, Г. И. Электрическая сварочная дуга / Г. И. Лесков. – М. : Машиностроение, 1970. – 336 с.
5. Приэлектродные процессы в дуговых разрядах / М. Ф. Жуков, Н. П. Козлов, А. В. Пустогаров [и др.]. – Новосибирск : Наука, 1982. – 157 с.
6. Сварка в машиностроении : справ. / под ред. Н. А. Ольшанского – М. : Машиностроение, 1978. – Т. 1. – 504 с.
7. Щербаков, И. П. Исследование изменения субмикрорельефа поверхности медных образцов при пропускании по ним импульсов электрического тока большой плотности / И. П. Щербаков, Д. В. Чураев, В. Н. Светлов // Журн. техн. физики. – 2004. – № 4. – С. 139–142.
8. Boulos, M. I. Thermal plasmas: Fundamentals and applications / M. I. Boulos, P. Fauchais,

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

- E. Pfender. – N.-Y. ; London : Plenum press, 1997. – Vol. 1. – 454 p.
9. Electric pulse treatment of welding joint of aluminum alloy / I. A. Vakulenko, Yu. L. Nadezhdin, V. A. Sokirko [et al.] // Наука та прогрес трансп. Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2013. – № 4 (46). – С. 73–82.
  10. Hu, J. Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Pt. I : The arc / J. Hu, H. L. Tsai // Intern. Heat and Mass Transfer. – 2007. – № 50. – P. 833–846. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.08.025
  11. Investigation of cathode spot behavior of atmospheric argon arcs by mathematical modeling / J. Wendelstorf, G. Simon, I. Decker, H. Wohlfahrt // Proc. 12th Intern. Conf. Gas Discharges & Their Applications. – Greifswald, 1997. – Vol. 1. – P. 62–65.
  12. Metal vapour behaviour in gas tungsten arc thermal plasma during welding / M. Tanaka, K. Yamamoto, S. Tashiro et al. // Welding in the World. – 2008. – № 11/12. – P. 82–88.
  13. Moore, Ch. E. Ionization potentials and ionization limits derived from the analysis of optical spectra / Ch. E Moore. – Washington : NSRDS–NBS 34, 1970. – P. 22.
  14. Nestor, O. H. Heat intensity and current density distributions at the anode of high current, inert gas arcs / O. H. Nestor // J. of Appl. Phys. – 1962. – vol. 33, № 5. – P. 1638–1648. doi: 10.1063/1.1728803.
  15. Prediction of anode temperatures of free burning arcs / P. Zhu, J. J. Lowke, R. Morrow [et al.] // J. Phys. D : Appl. Phys. – 1995. – № 28. – P. 1369–1376. doi: 10.1088/0022-3727/28/7/014.
  16. Sanders, N. A. Measurement of anode falls and anode heat transfer in atmospheric pressure high intensity arcs / N. A. Sanders, E. Pfender // J. of Appl. Phys. – 1984. – vol. 55, № 3. – P. 714–722. doi: 10.1063/1.333129.

И. А. ВАКУЛЕНКО<sup>1\*</sup>, С. А. ПЛИТЧЕНКО<sup>2</sup>, Д. Н. МАКАРЕВИЧ<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Каф «Технология материалов», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, эл. почта dnuzt\_texmat@ukr.net, ORCID 0000-0002-7353-1916

<sup>2</sup>Каф. «Технология материалов», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, эл. почта dnuzt\_texmat@ukr.net, ORCID 0000-0002-0613-2544

<sup>3</sup>Каф. «Технология материалов», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, эл. почта dnuzt\_texmat@ukr.net, ORCID 0000-0003-4327-9809

## ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО РАЗРЯДА

**Цель.** Целью работы является сравнительный анализ влияния химических соединений на процесс формирования электрической дуги и условия ее горения. **Методика.** Материалом для электрода была низкоуглеродистая проволока диаметром 3 мм из стали с содержанием углерода 0,15 %. В качестве соединений, которые определяют условия формирования электродугового разряда, использовали: каолин;  $CaCO_3$  с примесями гипса до 60 %;  $SiO_2$  и  $Fe-Si$  при концентрации железа до 50 %. Исследования проводились с использованием постоянного электрического тока и дуги обратной полярности. В качестве источника электрического тока использовали сварочный преобразователь типа ПСО-500. На специальном стенде начальный зазор между электродом и металлической пластиной составлял значение 1–1,5 мм. Межелектродный промежуток заполняли исследуемым соединением и формировали электрический разряд. В момент возникновения электрической дуги определяли величины электрического тока и напряжения на дуге. После природного разрыва электрической дуги окончательную величину зазора между электродами принимали в качестве максимального значения длины дуги. **Результаты.** В условиях эксперимента перенос металла в межелектродном промежутке отвечал капельному механизму. За внешними признаками соотношение между максимальной длиной дуги и мощностью электрического тока имеет вид экспоненциальной зависимости. Удельная мощность электрического дугового разряда в момент формирования дуги на единицу ее длины характеризует состояние среды в межелектродном промежутке. **Научная новизна.** 1) На основе анализа влияния исследуемых химических соединений на процессы формирования электрического дугового разряда определена обратно-пропорциональная связь между мощностью электрического тока и максимальной длиной дуги к моменту ее природного разрыва. 2) Соотношение между максимальной длиной дуги и мощно-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

стю електричного тока, с достаточно высоким коэффициентом корреляции, подчиняется экспоненциальной зависимости. Влияние исследуемых соединений на процесс формирования электрического дугового разряда определяется через показатели степени полученного соотношения. 3) Величина удельной мощности электрического тока в момент формирования электрического разряда на единицу длины дуги может быть принята в качестве параметра, который характеризует состояние среды в межэлектродном промежутке. **Практическая значимость.** В условиях одинаковой установочной силы электрического тока определена последовательность расположения исследуемых химических соединений в порядке увеличения их влияния на процесс горения дуги. Минимальное влияние наблюдается от каолина, а максимальное – от  $Fe - Si$ .

*Ключевые слова:* электрический дуговой разряд; длина дуги; мощность электрического тока; химическое соединение

І. О. ВАКУЛЕНКО<sup>1\*</sup>, С. О. ПЛІТЧЕНКО<sup>2</sup>, Д. М. МАКАРЕВИЧ<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Технологія матеріалів», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. пошта dnuzt\_texmat@ukr.net, ORCID 0000-0002-7353-1916

<sup>2</sup>Каф. «Технологія матеріалів», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. пошта dnuzt\_texmat@ukr.net, ORCID 0000-0002-0613-2544

<sup>3</sup>Каф. «Технологія матеріалів», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. пошта dnuzt\_texmat@ukr.net, ORCID 0000-0003-4327-9809

## ВПЛИВ ХІМІЧНИХ РЕЧОВИН НА ФОРМУВАННЯ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО РОЗРЯДУ

**Мета.** Метою роботи є порівняльний аналіз впливу хімічних речовин на процес запалювання електричної дуги та умови її горіння. **Методика.** Матеріалом для електроду був використаний низьковуглецевий дріт діаметром 3 мм із сталі з 0,15 % вуглецю. В якості речовин, що визначають умови формування електродугового розряду, були використані: каолін;  $CaCO_3$  з домішками гіпсу до 60 %;  $SiO_2$  та  $Fe - Si$  при концентрації заліза до 50 %. Дослідження проводилися при використанні електричного струму постійного напрямку, дуги зворотної полярності. В якості джерела електричного струму був використаний зварювальний перетворювач типу ПСО-500. На спеціальному стенді початковий зазор між електродом та металевою пластинною складав значення 1–1,5 мм. Міжелектродний проміжок заповнювали досліджуваною речовиною і формували електричний розряд. В момент запалювання електричної дуги визначали величини електричного струму та напруги на дузі. Після природного розриву електричної дуги остаточну величину зазору між електродами приймали в якості максимальної довжини дуги. **Результати.** В умовах експерименту перенос металу в міжелектродному проміжку відповідав краплинному механізму. За зовнішніми ознаками співвідношення між максимальною довжиною дуги і потужністю електричного струму має вигляд експоненціальної залежності. Питома потужність електричного дугового розряду в момент запалення дуги на одиницю її довжини відображає стан середовища в міжелектродному проміжку. **Наукова новизна.** 1) На основі аналізу впливу досліджуваних речовин на процеси формування електричного дугового розряду визначений обернено-пропорційний зв'язок між потужністю електричного струму і максимальною довжиною дуги до моменту її природного розриву. 2) Співвідношення між максимальною довжиною дуги і потужністю електричного струму, з достатньо високим коефіцієнтом кореляції, підпорядковуються експоненціальній залежності. Вплив досліджуваних речовин на процес формування електричного дугового розряду визначається через показники ступеня розглянутого співвідношення. 3) Величина питомої потужності електричного струму в момент формування електричного розряду на одиницю довжини дуги може бути прийнята в якості параметра, що характеризує стан міжелектродного середовища. **Практична значимість.** За умов однакової установочної сили електричного струму визначена послідовність розташування досліджуваних речовин в порядку збільшення їх впливу на процес горіння дуги. Мінімальний вплив спостерігається з боку каоліну, а максимальний – для  $Fe - Si$ .

*Ключові слова:* електричний дуговий розряд; довжина дуги; потужність електричного струму; хімічна речовина

## REFERENCES

1. Vakulenko I.A., Bolshakov V.I. *Morfologiya struktury i deformatsionnoye uprochneniye stali* [Structure morphology and work hardening of the steel]. Dnipropetrovsk, Makovetskiy Publ., 2008. 196 p.
2. Vakulenko I.O., Sokirko V.A., Baskevych O.S. Strukturni peretvorennia v metali zaliznychnoho koleasa pislia dii impulsiv elektrychnoho strumu [Structural transformations in the rail wheel metal after effect of electric current pulses]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 42, pp. 160-163.
3. Krivtsun I.V., Demchenko V.F., Kriket I.V. Model protsessov teplo-, masso- i elektroperenosa v anodnoy oblasti i stolbe svarochnoy dugi s tugoplavkim katodom [Model of processes of heat-, mass and electrical transfer in the anode region and the welding arc column with a heat-proof cathode]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, 2010, no. 6, pp. 3-11.
4. Leskov G.I. *Elektricheskaya svarochnaya duga* [Electric welding arc]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1970. 336 p.
5. Zhukov M.F., Kozlov N.P., Pustogarov A.V. *Prielektroodnyye protsessy v dugovykh razryadakh* [Near-electrode processes in the electric arc]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1982. 157 p.
6. Olshanskiy N.A. *Svarka v mashinostroyenii. Tom 1.* [Welding in the mechanical engineering. Volume 1]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1978. 504 p.
7. Shcherbakov I.P., Churayev D.V., Svetlov V. N. Issledovaniye izmeneniya submikrorelyefa poverkhnosti mednykh obraztsov pri propuskaniy po nim impulsiv elektricheskogo toka bolshoy plotnosti [Study of submikrorelief changes of the copper samples surface by passing on them of electric current pulses of large density]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki – Journal of technical physics*, 2004, no. 4, pp. 139-142.
8. Boulos M.I., Fauchais P., Pfender E. Thermal plasmas: Fundamentals and applications. Vol. 1. New York; London, Plenum press Publ., 1997. 454 p.
9. Vakulenko I.A., Nadezhdin Yu.L., Sokirko V.A. Electric pulse treatment of welding joint of aluminum alloy. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2013, no. 4 (46), pp. 73-82.
10. Hu J., Tsai H.L. Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Pt. I: The arc. *International Heat and Mass Transfer*, 2007, no. 50, pp. 833-846. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.08.025
11. Wendelstorf J., Simon G., Decker I., Wohlfahrt H. Investigation of cathode spot behavior of atmospheric argon arcs by mathematical modeling. Proc. 12th Int. Conf. Gas Discharges & Their Applications, Greifswald, 1997, vol. 1, pp. 62-65.
12. Tanaka M., Yamamoto K., Tashiro S. Metal vapour behaviour in gas tungsten arc thermal plasma during welding. *Welding in the World*, 2008, no. 11/12, pp. 82-88.
13. Moore Ch. E. Ionization potentials and ionization limits derived from the analysis of optical spectra. Washington, NSRDS–NBS 34 Publ., 1970. 22 p.
14. Nestor O.H. Heat intensity and current density distributions at the anode of high current, inert gas arcs. *Journal of Applied Physics*, 1962, vol. 33, no. 5, pp. 1638-1648. doi: 10.1063/1.1728803.
15. Zhu. P., Lowke J.J., Morrow R. Prediction of anode temperatures of free burning arcs. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1995, no. 28, pp. 1369-1376. doi: 10.1088/0022-3727/28/7/014.
16. Sanders N.A., Pfender E. Measurement of anode falls and anode heat transfer in atmospheric pressure high intensity arcs. *Journal of Applied Physics*, 1984, vol. 55, no. 3, pp. 714-722. doi: 10.1063/1.333129.

*Associate Professor S. V. Proidak, Ph.D. (Tech.); Associate Professor O. O. Chaikovskiy, Ph.D. (Tech.) recommended this article to be published*

Received: June 27, 2014

Accepted: Sept. 20, 2014

## УДК 669.715:621.785.9

І. П. ВОЛЧОК<sup>1\*</sup>, О. Л. СКУЙБИДА<sup>2</sup>, О. В. ЛЮТОВА<sup>3</sup>, Н. В. ШИРОКОБОКОВА<sup>4</sup><sup>1\*</sup>Каф. «Технологія металів», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063, тел. +38 (061) 764 13 51, ел. пошта tmzntu@gmail.com, ORCID 0000-0003-1580-0556<sup>2</sup>Каф. «Охорона праці і навколишнього середовища», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063, тел. +38 (050) 972 40 73, ел. пошта eskuybeda@gmail.com, ORCID 0000-0003-1488-8568<sup>3</sup>Каф. «Нарисна геометрія, інженерна та комп'ютерна графіка», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063, тел. +38 (097) 141 85 66, ел. пошта lyutova2014@gmail.com, ORCID 0000-0002-8818-2608<sup>4</sup>Каф. «Технологія металів», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063, тел. +38 (093) 817 13 44, ел. пошта tmzntu@gmail.com, ORCID 0000-0002-7009-6218**ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ВТОРИННИХ СИЛУМІНІВ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ РАФІНУВАЛЬНО-МОДИФІКУВАЛЬНОЇ, ТЕРМІЧНОЇ ТА ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБОК**

**Мета.** Вторинним силумінам притаманна, як правило, нижча за їх первинні аналоги якість. При виготовленні сплавів не враховується наявність великої кількості інтерметалідів, передусім на основі заліза, в їх структурі. Для досягнення оптимального рівня властивостей необхідно шукати шляхи адаптації рафінувально-модифікувальної, термічної та лазерної обробок до особливостей структури вторинних Al-Si сплавів.

**Методика.** Дослідження здійснювали з використанням стандартних методик металографічного аналізу, визначення ливарних, механічних та експлуатаційних властивостей сплавів за рототабельними планами багатofакторних експериментів. **Результати.** Встановлено, що рафінувально-модифікувальна обробка є обов'язковою операцією при виготовленні вторинних силумінів, оскільки дозволяє ефективно впливати на виділення залізовмісних фаз, змінюючи їх морфологію, розмір та розподіл, а також підвищувати ефективність подальшої обробки в твердому стані. Виявлено, що стандартні режими термічної обробки не є оптимальними для вторинних силумінів. Лазерна обробка показала високу ефективність в підвищенні міцності, зносостійкості, корозійної та кавітаційної стійкості вторинних Al-Si сплавів, а підвищений вміст заліза сприяв додатковому твердорозчинному зміцненню. **Наукова новизна.** Встановлено, що після рафінувально-модифікувальної обробки фаза  $Al_5SiFe$ , яка кристалізується у вигляді довгих витягнутих пластин, трансформується в фазу  $Al_{15}(FeMn)_3Si_2$  у скелетоподібній або багатогранній формі. Отримано залежність між вмістом заліза у вторинних силумінах з часом витримки при термічній обробці, який забезпечує оптимум механічних властивостей. Доведено, що наявність залізовмісних інтерметалідів  $Al_5SiFe$  призводить до зменшення глибини зміцненого шару при лазерній обробці. Встановлено, що зі збільшенням концентрації заліза швидкість корозії вторинних силумінів в середовищах 3 % NaCl + 0,1 %  $H_2O_2$  та 10 % HCl підвищується. **Практична значимість.** Запропоновані технічні рішення сприяють підвищенню якості вторинних силумінів до рівня, який дозволяє використовувати їх як сировину для виготовлення сплавів на основі алюмінію.

*Ключові слова:* силуміни; модифікування; термічна обробка; імпульсна лазерна обробка; ливарні; механічні та експлуатаційні властивості

**Вступ**

Нині алюмінієві сплави, виготовлені із вторинної сировини, все ширше використовуються в автомобілебудуванні, авіаційній промисловості, цивільному та промисловому будівництві тощо. Так, за даними [3], обсяг випуску вторинного алюмінію в країнах ЄС сягає 5,2 млн т/р, що знаходиться на приблизно однаковому рівні з випуском первинного алюмінію (5,1 млн т/р). Використання вторинної сировини дозволяє по-

збутися проблеми накопичення відходів, ослабити техногенне навантаження на довкілля та знизити собівартість випуску продукції.

Поряд із безсумнівними перевагами використання вторинних ресурсів існує і суттєвий недолік – низька якість сплавів, пов'язана із значною кількістю інтерметалідних фаз, розчинених газів та неметалевих включень в структурі, а також підвищеною пористістю. При цьому основний вклад в погіршення фізико-механічних властивостей вторинних Al-Si сплавів на-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

лежить залізовмісним фазам  $Al_5SiFe$ ,  $Al_4Si_2Fe$ ,  $Al_8Fe_2Si$  та ін., що мають грубокристалічну будову, несприятливу пластинчасту форму і полегшують процес руйнування матеріалу, відіграючи роль концентраторів напружень [14, 15].

У ході аналізу літературних джерел було з'ясовано, що найбільш дієвим способом впливу на виділення залізовмісних фаз в структурі вторинних силумінів є модифікування. Термічна обробка є однією з основних технологічних операцій, застосування якої забезпечує отримання певних механічних та експлуатаційних властивостей. Виходячи з того, що вміст інтерметалідних фаз під час використання вторинної сировини значно зростає, у нас виникло припущення, що стандартні режими термічної обробки для вторинних Al-Si сплавів не можна вважати оптимальними, проте цьому питанню в літературних джерелах уваги не приділяється. Незважаючи на суттєве підвищення властивостей, яке вдається досягти модифікувальною та термічною обробками, недоліком силумінів залишаються низькі втомна міцність, кавітаційна та корозійна стійкість. Достатньо ефективним і технологічним способом вирішення цієї проблеми є поверхнева лазерна обробка. Відомі сьогодні роботи з лазерної обробки стосуються первинних силумінів. Нами зроблено припущення, що застосування лазерної обробки може виявити кращі результати для вторинних сплавів за рахунок твердорозчинного зміцнення домішковими елементами, передусім залізом.

### Мета

Мета роботи – адаптація рафінувально-модифікувальної, термічної та лазерної обробок до особливостей структури та властивостей Al-Si сплавів, виготовлених із вторинної сировини.

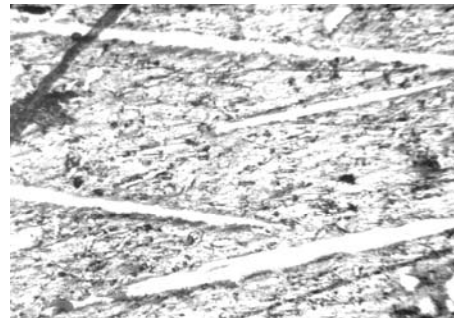
### Методика

Дослідження здійснювали з використанням методів математичного планування експерименту, регресійного та кореляційного аналізів, а також методів статистичної обробки експериментальних результатів. Під час виконання досліджень здійснювали хімічний аналіз складу сплавів, металографічні дослідження, випробування ливарних, механічних та експлуатаційних властивостей за стандартними методиками.

### Результати

Дослідження на кафедрі технології металів ЗНТУ (м. Запоріжжя) сприяли розробці низки рафінувально-модифікувальних комплексів вторинних силумінів [6–10], до складу яких в різних комбінаціях та концентраціях увійшли такі компоненти, як SiC, Ti, C, S,  $Na_2CO_3$ ,  $SrCO_3$ ,  $KBF_4$ ,  $K_2TiF_6$ ,  $MnCl_2$ , KCl, NaCl,  $AlF_3$ . Склад сумішей підбирався з метою збільшення дисперсності та компактності структурних складових, зміни складу та морфології інтерметалідів на основі заліза, а також зменшення вмісту водню. Провідна роль в нейтралізації шкідливого впливу заліза при цьому належить присадкам сірки. Так, за даними [5, 13], присутній в структурі немодифікованих силумінів інтерметалід  $Al_5SiFe$  має моноклінну ґратку з параметрами  $a = b = 0,612$  нм та  $c = 4,15$  нм і ковалентний тип міжатомних зв'язків, що зумовлює тонкопластинчасту форму виділень (рис. 1, а). Легування фази сіркою призводить до металізації міжатомних зв'язків, втрати їх направленості та зміни форми залізовмісних інтерметалідів (рис. 1, б).

а – а



б – б



Рис. 1. Зміна морфології залізовмісних інтерметалідів в структурі сплаву АК9М2 під впливом модифікування ( $\times 500$ ):  
а – фаза  $Al_5SiFe$ ; б – фаза  $Al_{15}(FeMn)_3Si_2$

Fig. 1. Change of iron-containing intermetallides' morphology in the structure of alloy АК9М2 under the influence of modification ( $\times 500$ ):  
а – phase  $Al_5SiFe$ ; б – phase  $Al_{15}(FeMn)_3Si_2$

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Зокрема, збільшення твердості, міцності та пластичності сплавів, виготовлених з лому та відходів виробництва, пов'язані зі зміною морфологічних параметрів структури під впливом модифікування [1, 7]. Замість фази  $Al_3SiFe$  несприятливої морфології в структурі вторинних силумінів ми спостерігали утворення сполуки  $Al_{15}(FeMn)_3Si_2$ , що приймала скелетоподібну або многогранну форму залежно від концентрації заліза та режиму термічної обробки. Значення параметру форми залізовмісних інтерметалідів зменшувалось при цьому в середньому в 2,5...3,5 рази, що позначалось на ослабленні дії концентраторів напружень, якими є вершини голчастих вкраплень. Після обробки модифікатором сплавів АК5М2 та АК6М2 відбулось підвищення твердості НВ на 23...31 %, границі міцності під час випробування на розтяг на 11...12 % та відносного видовження на 26...67 %.

Дослідження на вторинному силуміні АК9М2 виявили, що зі збільшенням стружки в шихті з 1 % до 19 %, а також кількості заліза в сплаві з 0,66 мас. % до 2,34 мас. % відбувалось зниження рідинноплинності на 30...35 %, лінійної усадки та тріщиностійкості на 18...25 %, спостерігався ріст пористості з 0,5 до 2...2,5 балу. Присадки модифікатора у кількості 0,15 % від маси сплаву призводили до підвищення рідинноплинності в середньому на 10...15 %, лінійної усадки на 30...35 % та зменшення балу газової пористості з 2,5 до 0,5. До того ж, під час застосування рафінувально-модифікувальної обробки метал зварних з'єднань успадковував властивості основного литого металу та за твердістю, міцністю і пластичністю навіть перевершував його [4]. Однорідність та диференціація структури зварного шва зберігалася після термічної обробки, причому макро- та мікροструктура зварного шва були дисперсними за основний метал (рис. 2).

На наступному етапі досліджували взаємозв'язок вмісту заліза у складі вторинних силумінів з часовими параметрами гартування та старіння. В результаті експерименту з'ясовано, що інтерметаліди на основі заліза після попередньої рафінувально-модифікувальної обробки здатні змінювати свої форму, розмір та розподіл під час термічного впливу. Одні режими термічної обробки виявилися сприятливішими за інші залежно від концентрації заліза, про що

свідчили структурні зміни та результати випробування механічних властивостей [2, 11].

Встановлено, що при вмісті заліза на рівні 0,5 мас. % доцільно використовувати час витримки при гартуванні до 7 год.

При концентрації  $Fe = 1,2$  мас. % виникає потреба в збільшенні часу витримки при гартуванні до 8 год. Що стосується старіння, то для силумінів із вмістом близько 0,5 мас. %  $Fe$  використання нижньої межі стандартного часу витримки (5...10 год відповідно до ДСТУ 2839-94) не дає оптимального результату. При такій концентрації заліза необхідно використовувати час витримки при старінні на рівні 7 год. На кожні 0,1 мас. %  $Fe$  при його вмісті у вторинних силумінах більше за 0,5 мас. % потрібно додатково передбачити 0,5 год витримки. Необхідність збільшення часу витримки при збільшенні концентрації заліза в сплавах ми пов'язуємо зі зростанням кількості інтерметалідних фаз, які гальмують дифузійні процеси при гартуванні та старінні.

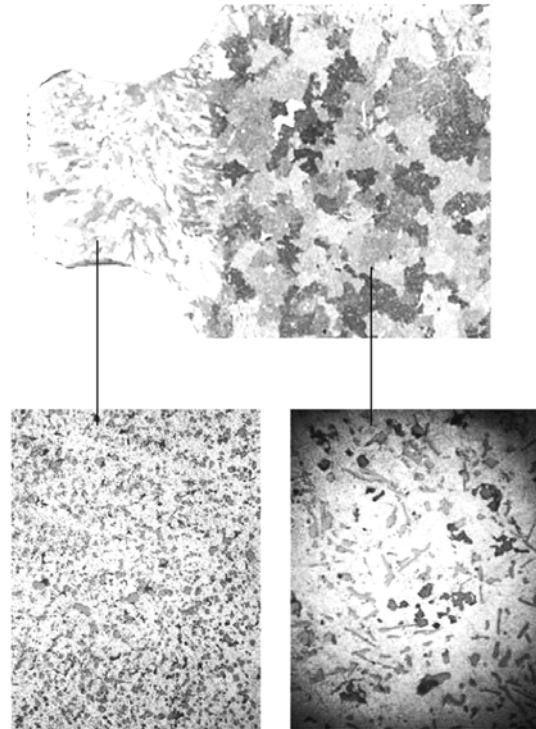


Рис. 2. Макро- та мікροструктура ( $\times 100$ ) зварного шва та основного металу сплаву АК9М2 після аргонно-дугового плавлення

Fig. 2. Macro- and microstructure ( $\times 100$ ) of the welding joint and basic metal of the alloy АК9М2 after argon-arc melting

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Під час збільшення часу витримки при гартуванні  $\tau_r$  попередньо рафінованого та модифікованого вторинного силуміну АК8МЗ із вмістом Fe = 1,2 мас % з 6 до 8 год та часу витримки при старінні  $\tau_{ст}$  з 7 до 11 год відбулись сприятливі зміни в структурі: зменшились розміри та збільшилась диференціація структурних складових, що показано на рис. 3. При цьому спостерігали підвищення значень границі міцності та плинності в середньому на 7...8 %, границі витривалості – на 12 %, малоциклової витривалості ( $\epsilon = 0,3$  %) – на 30 %, твердості НВ на – 9 % та відносного видовження на 10 %.

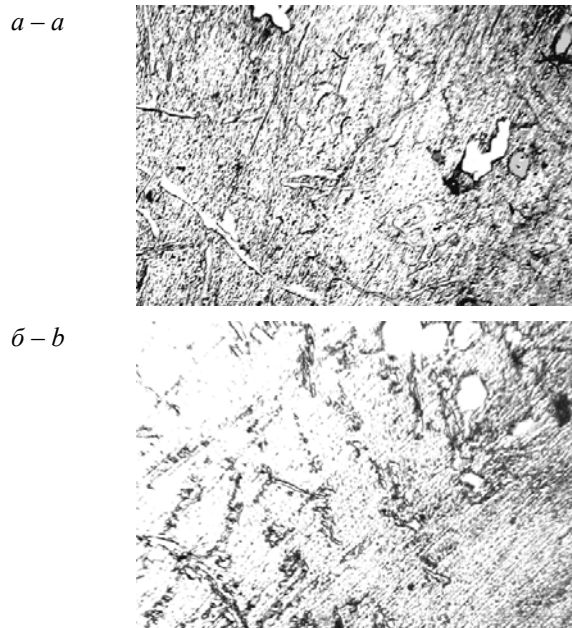


Рис. 3. Вплив часових параметрів термічної обробки на структуру вторинного силуміну АК8МЗ ( $\times 200$ ):  
*a* –  $\tau_r = 6$  год,  $\tau_{ст} = 7$  год; *b* –  $\tau_r = 8$  год,  $\tau_{ст} = 11$  год

Fig. 3. Influence of heat treatment time parameters on the structure of secondary silumin AK8M3 ( $\times 200$ ):  
*a* –  $\tau_r = 6$  hrs,  $\tau_{ag} = 7$  hrs; *b* –  $\tau_r = 8$  hrs,  $\tau_{ag} = 11$  hrs

В результаті лазерної обробки відбувалося суттєве подрібнення структури, збільшення дефектів кристалічної будови та утворення метастабільних фаз. Поверхнева лазерна обробка вторинного сплаву АК8МЗ привела до підвищення поверхневої мікротвердості в середньому в 1,7 разу та міцності в 3 рази порівняно з алюмінієвим твердим розчином (табл. 1). Проте наявність залізозмісних інтерметалідів типу  $Al_5SiFe$  внаслідок їх великих розмірів та несприятливої морфології збільшувала тепловий опір між зоною оплавлення і матрицею та,

відповідно, викликала зменшення глибини зміцненого шару. Таким чином, ефективній лазерній обробці сприяло попереднє модифікування сплавів.

Таблиця 1

**Мікротвердість та границі міцності сплаву АК8МЗ після однократної лазерної обробки**

Table 1

**Microhardness and strength limits of AK8M3 alloy after single laser treatment**

Вміст Fe, мас. %	Показник	Зміцнений шар (100 мкм від поверхні)	Матриця (Al)
0,40	Hц, МПа	1 605	975
	$\sigma_B$ , МПа	515	172
0,92	Hц, МПа	1 625	994
	$\sigma_B$ , МПа	523	180
1,45	Hц, МПа	1 620	1 000
	$\sigma_B$ , МПа	524	174

Зі зростанням концентрації заліза від 0,4 мас. % до 1,45 мас. % спостерігали збільшення границі витривалості силуміну АК8МЗ в середньому на 19 %, зменшення втрати маси зразків в умовах зношування об нежорстко закріпленій абразив на 25 %, при сухому терті «метал по металу» – на 41 % та при кавітаційному зношуванні – на 60 %.

За даними корозійних випробувань у водному розчині 3 % NaCl + 0,1 %  $H_2O$  ( $t = 28$  °C,  $\tau = 720$  год) збільшення концентрації заліза з 0,4 мас. % до 1,45 мас. % призвело до зростання кількості пітингів з 35 шт/см<sup>2</sup> до 103 шт/см<sup>2</sup>. Структурні складові сплаву із вмістом заліза на нижньому рівні були дисперсними та невеликими за розмірами, тому і площа розтравлювання навколо них, і глибина пітингової корозії були незначними. Під час збільшення концентрації заліза, а, отже, і кількості та розмірів інтерметалідів на його основі, зростали протяжність меж «матриця-вкраплення», площа руйнування матриці та швидкість проникнення пітингу вглиб матеріалу. Лазерна обробка дозволила підвищити опір вторинного силуміну АК8МЗ пітингоутворенню в 5...8 разів. Корозійна стійкість сплаву в 10 %-му розчині HCl після обробки лазером зросла в середньому на два порядки, а бал корозійної стійкості зменшився з 10 до 5...7 відповідно до ГОСТ 13819-68.

### Наукова новизна та практична значимість

Встановлено, що модифікування вторинних силумінів [6–10] дозволяє трансформувати фазу  $Al_5SiFe$ , яка кристалізується у вигляді довгих витягнутих пластин, у фазу  $Al_{15}(FeMn)_3Si_2$  із більш сприятливою (скелетоподібною або многогранною) формою. Застосування розроблених і запатентованих рафінувально-модифікувальних комплексів дозволило зменшити бал газової пористості, суттєво збільшити рідинноплинність, лінійну усадку, твердість, міцність та пластичність силумінів, виготовлених із вторинної сировини.

Виявлено залежність між концентрацією заліза в Al-Si сплавах з часом витримки при термічній обробці, який забезпечує оптимум механічних властивостей. Встановлено, що для силумінів із вмістом більше за 0,5 мас. % Fe необхідно збільшувати передбачений стандартом ДСТУ 2839-94 час витримки при гартуванні та старінні, що пов'язано з підвищеною кількістю інтерметалідів на основі заліза в структурі сплавів, які гальмують перебіг дифузійних процесів.

Доведено, що несприятлива форма та розміри виділень фази  $Al_5SiFe$  збільшує тепловий опір між матрицею та зоною оплавлення, що позначається на зменшенні глибини зміцненого шару під час лазерної обробки. Це виявило необхідність обов'язкового застосування попередньої операції модифікування для силумінів з підвищеним вмістом заліза.

Доведено, що лазерна обробка викликає підвищення зносостійкості вторинних силумінів в умовах абразивного зношування та при сухому терті «метал по металу» внаслідок утворення у поверхневому шарі високодисперсної структури. При цьому концентрація заліза в інтервалі 0,40...1,45 мас. % на ці показники практично не впливає, що розширює перспективи використання вторинних силумінів з підвищеним вмістом заліза.

Встановлено, що збільшення вмісту заліза призводить до зростання швидкості корозії вторинних силумінів у розчинах 3 % NaCl + 0,1 %  $H_2O_2$  та 10 % HCl. Після імпульсної лазерної обробки швидкість корозії зразків у середовищі 3 % NaCl + 0,1 %  $H_2O_2$  була в 5...7 разів, а у середовищі 10 % HCl на 2...3 порядки нижчою за швидкість корозії вихідних сплавів.

Запропановані технічні рішення сприяють підвищенню якості вторинних силумінів до рівня, який дозволяє використовувати їх як сировину для виготовлення сплавів на основі алюмінію.

### Висновки

1. Виконані дослідження виявили, що якісні Al-Si сплави можна отримати із вторинної сировини при помітному вмісті заліза (до 1,45 мас. %) за рахунок застосування рафінувально-модифікувальної обробки.

2. Оскільки залізовмісні інтерметаліди гальмують дифузійні процеси під час термічної обробки, то при збільшенні їх кількості в структурі сплавів потрібно збільшувати час витримки при гартуванні та особливо при старінні.

3. Доцільно збільшувати час витримки при старінні замість використання додаткового відпалу після лазерної обробки.

4. В цілому ефективність як термічної обробки, так і поверхневого лазерного зміцнення залежить багато в чому від попереднього модифікування, яке дозволяє вплинути на виділення найбільш шкідливого інтерметаліду на основі заліза –  $Al_5SiFe$ , і, відповідно, на можливість залізовмісних фаз трансформуватись під впливом інших видів обробки.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Волчок, И. П. Применение вторичных алюминевых сплавов в транспортном машиностроении / И. П. Волчок, О. В. Лютова // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2007. – Вип. 14. – С. 225–227.
2. Волчок, И. П. Термическая обработка железосодержащих силуминов / И. П. Волчок, Е. Л. Скуйбеда // Литье и металлургия. – 2012. – № 3 (67). – С. 94–97.
3. Ищенко, А. А. Об использовании отходов алюминиевой тары / А. А. Ищенко, С. И. Андреев, Д. С. Андреев // Металлургия машиностроения. – 2012. – № 5. – С. 18–19.
4. Лютова, О. В. Свариваемость вторичных силуминов / О. В. Лютова, И. П. Волчок // Стр-во, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. – Вып. 58. – Д. : ГВУЗ «ПГАСиА», 2011. – С. 440–445.
5. Немененок, Б. М. Теория и практика комплексного модифицирования силуминов : моногр. / Б. М. Немененок. – Минск : Технопринт, 1999. – 272 с.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

6. Пат. 42653 Україна, МПК (2009) C22C 1/100. Модифікатор алюмінієвих сплавів / Волчок І. П., Міт'яєв О. А., Островська А. Є., Скуйбіда О. Л. (Україна); заявник та патентовласник Запорізь. націон. техн. ун-т. – № u200902454; заявл. 19.03.2009; опубл. 10.07.2009, Бюл. № 13. – 4 с.
7. Пат. 32929 Україна, МПК (2006) C22C1/00. Модифікатор для алюмінієвих сплавів / Волчок І. П., Міт'яєв О. А., Лютова О. В., Широкобокова Н. В., Повзло В. М. (Україна); заявник та патентовласник Запорізь. націон. техн. ун-т. – № 200800105; заявл. 02.01.2008; опубл. 10.06.2008, Бюл. № 11. – 4 с.
8. Пат. 69720 Україна, МПК C22 C1/06(2006.1). Рафінувально-модифікувальний комплекс для алюмінієвих сплавів / Широкобокова Н. В., Міт'яєв О. А., Волчок І. П., Кюрчев С. В., Колодій О. С. (Україна); заявник та патентовласник Запорізь. націон. техн. ун-т. – № u201112705; заявл. 31.10.2011; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9. – 4 с.
9. Пат. 31862 Україна, МПК (2006) C22B21/00 C22B9/00. Флюс для оброблення алюмінієвих сплавів / Волчок І. П., Міт'яєв О. А., Лютова О. В., Широкобокова Н. В., Повзло В. М. (Україна); заявник та патентовласник Запорізь. націон. техн. ун-т. – № 200713840; заявл. 10.12.2007; опубл. 25.04.2008, Бюл. № 8. – 4 с.
10. Пат. 44463 Україна, МПК (2009) C22B 1/00, C22B 9/00. Флюс для оброблення алюмінієвих сплавів / Волчок І. П., Міт'яєв О. А., Островська А. Є., Скуйбіда О. Л. (Україна); заявник та патентовласник Запорізь. націон. техн. ун-т. – № 200902450; заявл. 19.03.2009; опубл. 12.10.2009, Бюл. № 19. – 4 с.
11. Скуйбеда, Е. Л. Особенности изменения морфологии железистых интерметаллидов в структуре вторичных силуминов под воздействием термической обработки / Е. Л. Скуйбеда // *Литье и металлургия*. – 2013. – № 4 (73). – С. 42–44.
12. Скуйбіда, О. Л. Підвищення механічних властивостей вторинного силуміну АК5М2 / О. Л. Скуйбіда, І. П. Волчок // *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. – Д., 2010. – Вип. 34. – С. 215–218.
13. Cao Xinjin. Morphology of  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi Phase in Al-Si Cast Alloys [Електронний ресурс] / Xinjin Cao, John Campbell // *Materials Transactions*. – 2006. – Vol. 47, № 5 (2006). – P. 1303–1312. – Режим доступу: <http://www.jim.or.jp/journal/e/pdf3/47/05/1303.pdf>. – Назва з екрана. – Перевірено: 25.09.2014. doi: 10.2320/materials.47.1303.
14. Gorny, Anton. Characterization of Major Intermetallic Phases in solidified Al-xSi-yFe-zSr (x = 2 to 12,5 wt. %, y = 0 to 0,5 wt. % and z = 0 and 0,02 wt. %) alloys : (Open Access Dissertations and Theses. Paper 7445) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://digitalcommons.mcmaster.ca/opendissertations/7445/>. – Назва з екрана. – Перевірено: 25.09.2014.
15. Mityayev, A. The role of intermetallic phases in fracture of aluminium alloys / A. Mityayev, S. Belikov, K. Loza // *Problems of modern techniques in engineering and education*. – Cracow, 2009. – P. 59–66.

И. П. ВОЛЧОК<sup>1\*</sup>, Е. Л. СКУЙБЕДА<sup>2</sup>, О. В. ЛЮТОВА<sup>3</sup>, Н. В. ШИРОКОБОКОВА<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Технология металлов», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, Запорожье, Украина, 69063, тел. +38 (061) 764 13 51, эл. почта [tmzntu@gmail.com](mailto:tmzntu@gmail.com), ORCID 0000-0003-1580-0556

<sup>2</sup>Каф. «Охрана труда и окружающей среды», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, Запорожье, Украина, 69063, тел. +38 (050) 972 40 73, эл. почта [eskuibeda@gmail.com](mailto:eskuibeda@gmail.com), ORCID 0000-0003-1488-8568

<sup>3</sup>Каф. «Начертательная геометрия, инженерная и компьютерная графика», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, Запорожье, Украина, 69063, тел. +38 (097) 141 85 66, эл. почта [lyutova2014@gmail.com](mailto:lyutova2014@gmail.com), ORCID 0000-0002-8818-2608

<sup>4</sup>Каф. «Технология металлов», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, Запорожье, Украина, 69063, тел. +38 (093) 817 13 44, эл. почта [tmzntu@gmail.com](mailto:tmzntu@gmail.com), ORCID 0000-0002-7009-6218

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВТОРИЧНЫХ СИЛУМИНОВ ПУТЁМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАФИНИРУЮЩЕ-МОДИФИЦИРУЮЩЕЙ, ТЕРМИЧЕСКОЙ И ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТОК

**Цель.** Вторичным силуминам свойственно, как правило, более низкое, по сравнению с их первичными аналогами, качество. При изготовлении сплавов не учитывается наличие большого количества интерметаллидов, в первую очередь, на основе железа, в их структуре. Для достижения оптимального уровня свойств необходимо искать пути адаптации рафинирующе-модифицирующей, термической и лазерной обработок к особенностям структуры вторичных Al-Si сплавов. **Методика.** Исследования проводили с использованием стандартных мето-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

дик металлографического анализа, определения литейных, механических и эксплуатационных свойств сплавов по ротатбельным планам многофакторных экспериментов. **Результаты.** Установлено, что рафинирующе-модифицирующая обработка является обязательной операцией при производстве вторичных силуминов, поскольку позволяет эффективно влиять на выделения железосодержащих фаз, изменяя их морфологию, размер и распределение, а также повышать эффективность дальнейшей обработки в твёрдом состоянии. Обнаружено, что стандартные режимы термической обработки не являются оптимальными для вторичных силуминов. Лазерная обработка показала высокую эффективность в повышении прочности, износостойкости, коррозионной и кавитационной стойкости вторичных Al-Si сплавов, а повышенное содержание железа способствовало дополнительному твёрдорастворному упрочнению. **Научная новизна.** Установлено, что после рафинирующе-модифицирующей обработки фаза  $Al_5SiFe$ , кристаллизующаяся в виде длинных вытянутых пластин, трансформируется в фазу  $Al_{15}(FeMn)_3Si_2$  в скелетообразной или многогранной форме. Получена зависимость между содержанием железа во вторичных силуминах и временем выдержки при термической обработке, которое обеспечивает оптимум механических свойств. Доказано, что наличие железосодержащих интерметаллидов  $Al_5SiFe$  приводит к уменьшению глубины упрочнённого слоя при лазерной обработке. Установлено, что с повышением концентрации железа скорость коррозии вторичных силуминов в средах 3 % NaCl + 0,1 %  $H_2O_2$  та 10 % HCl повышается. **Практическая значимость.** Предложенные технические решения способствуют повышению качества вторичных силуминов до уровня, который позволяет использовать их как сырьё для изготовления сплавов на основе алюминия.

*Ключевые слова:* силумины; модифицирование; термическая обработка; импульсная лазерная обработка; литейные, механические и эксплуатационные свойства

I. P. VOLCHOK<sup>1\*</sup>, O. L. SKUIBIDA<sup>2</sup>, O. V. LIUTOVA<sup>3</sup>, N. V. SHYROKOBOKOVA<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Metal Technology», Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovskiy St., 64, Zaporizhzhia, Ukraine, 69063, tel. +38 (061) 764 13 91, e-mail tmzntu@gmail.com, ORCID 0000-0003-1580-0556

<sup>2</sup>Dep. «Labour and Environment Protection», Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovskiy St., 64, Zaporizhzhia, Ukraine, 69063, tel. +38 (050) 972 40 73, e-mail eskuybeda@gmail.com, ORCID 0000-0003-1488-8568

<sup>3</sup>Dep. «Descriptive Geometry, Engineering and Computer Graphics», Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovskiy St., 64, Zaporizhzhia, Ukraine, 69063, tel. +38 (097) 141 85 66, e-mail lyutova2014@gmail.com, ORCID 0000-0002-8818-2608

<sup>4</sup>Dep. «Metal Technology», Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovskiy St., 64, Zaporizhzhia, Ukraine, 69063, tel. +38 (093) 817 13 44, e-mail tmzntu@gmail.com, ORCID 0000-0002-7009-6218

## QUALITY IMPROVEMENT OF SECONDARY SILUMINS BY USING REFINING-MODIFYING, HEAT AND LASER TREATMENTS

**Purpose.** As a rule secondary silumins are characterized by lower quality than their primary analogues. During manufacture of alloys a large quantity of intermetallides, first of all on the basis of iron, in their structure is ignored. To achieve the optimum level of properties it is necessary to search for ways to adapt refining-modifying, heat and laser treatments to peculiarities of the structure of secondary Al-Si alloys. **Methodology.** The research was carried out by using standard methods of metallographic analysis, determination of foundry, mechanical and service properties of alloys according to rotatable plans of multifactor experiments. **Findings.** It was established, that refining-modifying treatment is a required procedure during manufacture of secondary silumins as it permits to effectively influence the iron-containing phases' segregations by changing their morphology, size and distribution and to increase the effectiveness of further treatment in solid state. It was found that standard modes of heat treatment are not optimal for secondary silumins. Laser treatment has shown high effectiveness in increasing of strength, wear resistance, corrosion and cavitation resistance of secondary Al-Si alloys, and the increased iron content contributed to additional solid solution hardening. **Originality.** It was established, that after refining-modifying treatment the phase  $Al_5SiFe$ , which crystallizes in the shape of long stretched plates transformed into phase  $Al_{15}(FeMn)_3Si_2$  in skeletal or polyhedral shape. The relationship between iron content in secondary silumins and holding time during heat treatment that ensures optimum of mechanical properties was obtained. It was proved that the presence of iron-containing intermetallides  $Al_5SiFe$  results in the decrease of hardened layer's depth during laser treatment. It was established, that with increasing of iron concentration the corrosion rate of secondary silumins in 3 % NaCl + 0.1 %  $H_2O_2$  and 10 % HCl environments increases. **Practical value.** The offered technical solutions are instrumental in upgrading second silumins to the level which allows to utilize them as raw material for making of alloys on the basis of aluminium.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

*Keywords:* silumins; modification; heat treatment; pulse laser treatment; foundry, mechanical and service properties

## REFERENCES

1. Volchok I.P., Lyutova O.V. Primeneniye vtorichnykh alyuminiyevykh splavov v transportnom mashinostroyeni [Use of secondary aluminium alloys in transport engineering]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2007, issue 14, pp. 225-227.
2. Volchok I.P., Skuybeda Ye.L. Termicheskaya obrabotka zhelezosoderzhashchikh siluminov [Heat treatment of iron-containing silumins]. *Litye i metallurgiya – Foundry and metallurgy*, 2012, no. 3 (67), pp. 94-97.
3. Ishchenko A.A., Andreyev S.I., Andreyev D.S. Ob ispolzovanii otkhodov alyuminiyevoy tary [About usage of waste of aluminium containers]. *Metallurgiya mashinostroyeniya – Metallurgy of engineering*, 2012, no. 5, pp. 18-19.
4. Lyutova O.V., Volchok I.P. Svarivayemost vtorichnykh siluminov [Weld ability of secondary silumins]. *Stroitelstvo, materialovedeniye, mashinostroyeniye* [Construction, material science, machine building], Dnipropetrovsk, 2011, issue 58, pp. 440-445.
5. Nemenenok B.M. *Teoriya i praktika kompleksnogo modifitsirovaniya siluminov* [Theory and practice of silumins complex modification]. Minsk, Tekhnoprint Publ., 1999. 272 p.
6. Volchok I.P., Mitiaiev O.A., Ostrovska A.Ye., Skuibida O.L. *Modyfikator aliuminiyevykh splaviv* [Modifier of aluminium alloys]. Patent UA, no. u200902454, 2009.
7. Volchok I.P., Mitiaiev O.A., Lyutova O.V., Shyrokobokova N.V., Povzlo V.M. *Modyfikator dlia aliuminiyevykh splaviv* [Modifier for aluminium alloys]. Patent UA, no. 200800105, 2008.
8. Shyrokobokova N.V., Mitiaiev O.A., Volchok I.P., Kiurchev S.V., Kolodii O.S. *Rafinuvanno-modyfikovalnyi kompleks dlia aliuminiyevykh splaviv* [Refining and modifying complex for aluminium alloys]. Patent UA, no. u201112705, 2012.
9. Volchok I.P., Mitiaiev O.A., Lyutova O.V., Shyrokobokova N.V., Povzlo V.M. *Flius dlia obroblenni aliuminiyevykh splaviv* [Flux for aluminium alloys processing]. Patent UA, no. 200713840, 2008.
10. Volchok I.P., Mitiaiev O.A., Ostrovska A.Ye., Skuibida O.L. *Flius dlia obroblenni aliuminiyevykh splaviv* [Flux for aluminium alloys processing]. Patent UA, no. 200902450, 2009.
11. Skuybeda Ye.L. Osobennosti izmeneniya morfologii zhelezistykh intermetallidov v strukture vtorichnykh siluminov pod vozdeystviyem termicheskoy obrabotki [Peculiarities of changes of iron-based intermetallides morphology in the structure of secondary silumins under the influence of heat treatment]. *Litye i metallurgiya – Foundry and metallurgy*, 2013, no. 4 (73), pp. 42-44.
12. Skuibida O.L., Volchok I.P. Pidvyshchennia mekhanichnykh vlastyvopei vtorynnoho syluminu AK5M2 [Improving of mechanical properties of secondary silumin AK5M2]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 34, pp. 215-218.
13. Xinjin C., Campbell J. *Morphology of  $\beta$ -Al<sub>3</sub>FeSi Phase in Al-Si Cast Alloys*. *Materials Transactions*, 2006, vol. 47, no. 5 (2006), pp. 1303-1312. Available at: <http://www.jim.or.jp/journal/e/pdf3/47/05/1303.pdf> (Accessed 25 September 2014). doi: 10.2320/matertrans.47.1303.
14. Gorny A. Characterization of Major Intermetallic Phases in solidified Al-xSi-yFe-zSr (x = 2 to 12,5 wt. %, y = 0 to 0,5 wt. % and z = 0 and 0,02 wt. %) alloys : (Open Access Dissertations and Theses. Paper 7445). Available at: <http://digitalcommons.mcmaster.ca/opensdissertations/7445/> (Accessed 25 September 2014).
15. Mityayev A. The role of intermetallic phases in fracture of aluminium alloys. *Problems of modern techniques in engineering and education*. Cracow, 2009, pp. 59-66.

*Стаття рекомендована до публікації д.т.н., доц. М. М. Бриковим (Україна); д.т.н., проф. І. О. Вакулєнком (Україна)*

Надійшла до редколегії: 20.05.2014

Прийнята до друку: 14.08.2014

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ

УДК 629.065:620.178.5

Р. Д. ІСКОВИЧ-ЛОТОЦЬКИЙ<sup>1</sup>, Я. В. ІВАНЧУК<sup>2\*</sup>, Я. П. ВЕСЕЛОВСЬКИЙ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Металорізальні верстати та обладнання автоматизованих виробництв», Вінницький національний технічний університет, вул. Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, Україна, 21021, тел. +38 (0432) 59 85 23, ел. пошта ivanchuck@ukr.net, ORCID 0000-0003-3920-3019

<sup>2\*</sup>Каф. «Металорізальні верстати та обладнання автоматизованих виробництв», Вінницький національний технічний університет, вул. Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, Україна, 21021, тел. +38 (067) 301 83 73, ел. пошта ivanchuck@ukr.net, ORCID 0000-0002-4775-6505

<sup>3</sup>Каф. «Металорізальні верстати та обладнання автоматизованих виробництв», Вінницький національний технічний університет, вул. Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, Україна, 21021, тел. +38 (0432) 59 85 23, ел. пошта ivanchuck@ukr.net, ORCID 0000-0002-6665-6278

### ОСНОВИ РЕЗОНАНСНО-СТРУКТУРНОЇ ТЕОРІЇ ВІБРОУДАРНОГО РОЗВАНТАЖЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

**Мета.** Робота спрямована на застосування основних положень резонансно-структурної теорії для теоретичного дослідження основних фізико-механічних процесів, що відбуваються в розвантажувальному матеріалі під час віброударного розвантаження, з метою обґрунтування ефективності їх застосування. **Методика.** Розвантажувальний матеріал під час віброударного розвантаження в якості досліджуваного об'єкта представляється у вигляді феноменологічної моделі просторового дисперсного середовища. Розглянуто рівняння динаміки невстановленого вимушеного коливання частинок «зв'язаної» структури під дією вібраційних та ударних навантажень, із урахуванням віброреологічного ефекту, із встановленням зон резонансу. **Результати.** При розгляді резонансних зон невстановленого вимушеного коливання частинок «зв'язаної» структури встановлено, що при дії вібраційних навантажень можливо ефективно впливати на систему моногармонійним імпульсом зовнішніх сил. Даний імпульс має вигляд синусоїдальної хвилі з кутовою частотою, яка рівна основній частоті власних коливань розвантажувального матеріалу. При ударному навантаженні необхідно впливати на неї сукупністю імпульсів зовнішніх сил у вигляді одиночного миттєвого імпульсу. За даних умов навантаження в даних системах має місце явище резонансу, що забезпечує в розвантажувальній системі «зв'язаної» структури матеріалу абсолютну деформацію за рахунок дискретного зростання в інтервалі пластичних деформацій. Абсолютні деформації, що виникають при цьому в розвантажувальному матеріалі, перевищують допустимі пружні деформації для частинок даної системи; до того ж відбувається руйнування зон контактів даних частинок. **Наукова новизна.** Авторами досліджені невстановлені вимушені коливання частинок «зв'язаної» структури на основі феноменологічної моделі просторового дисперсного середовища розвантажувального матеріалу. При цьому, для кожного типу віброударного навантаження, що представлялося відповідним видом збуджуючої сили, розраховано умови для проходження резонансних процесів. **Практична значимість.** Основні положення резонансно-структурної теорії при теоретичному дослідженні процесів віброударного розвантаження дозволяють обґрунтувати ефективність використання віброударного обладнання для підвищення інтенсивності розвантаження транспортних засобів. Використання резонансно-структурної теорії дозволяє спрогнозувати необхідні параметри віброударного навантаження на розвантажувальний матеріал, у залежності від його фізико-механічних властивостей. Це забезпечує йому найефективніше розвантаження за рахунок руйнування силових зв'язків частинок розвантажувального матеріалу.

*Ключові слова:* реологія; коливання; резонанс; розвантаження; деформація; напруження

## Вступ

У сучасних умовах науково-технічного розвитку широко використовуються вібраційні та віброударні технології для інтенсифікації виробничих процесів у різних галузях промисловості [1–3, 8, 10].

У ході дослідження [5, 6] було виявлено, що для підвищення ефективності процесів розвантаження доцільно застосовувати примусові вібрації та удари, які впливають на фізико-механічні параметри оброблюваного матеріалу.

Ці технології реалізуються за допомогою машин та пристроїв з різними типами приводів – механічним, електричним, гідравлічним, пневматичним, комбінованим.

Під час дії віброударного навантаження на дисперсійний матеріал, в останньому відбувається низка перетворень [2, 11], характер яких залежить від інтенсивності і виду віброударного навантаження.

## Мета

Для обґрунтування усіх особливостей протікання процесу віброударного розвантаження необхідно, застосовуючи основні положення резонансно-структурної теорії, теоретично дослідити основні фізико-механічні процеси, що відбуваються в розвантажувальному матеріалі під час віброударного розвантаження, з метою обґрунтування ефективності їх застосування на транспортних засобах.

## Методика

Розглядаючи резонансно-структурну теорію, процес віброударного (імпульсного) руйнування кускових і змерзлих вантажів можна подати як попадання в резонанс головних коливань системи, коли усі частинки зв'язаної структури коливаються з однією і тією ж власною частотою, яка відповідає частоті зовнішньої коливної дії [4] від збуджуючої сили  $F_{із}$ . Під час попадання системи в резонанс між частинками зв'язаної структури порушуються початково-встановлені силові зв'язки  $R_i$ , контакти і зчеплення – відбувається руйнування матеріалу. Процес руйнування супроводжується як відносним проковзуванням частинок, що викликає між частинками зв'язаної структури критичні напруження зсуву і розтягу, так і відносним повертанням частинок матеріалу вантажу, що

також викликає між частинками зв'язаної структури критичні напруження згину і розтягу, яке може виникнути у разі руйнації пружних зон контакту в точках 1–4 (рис. 1).

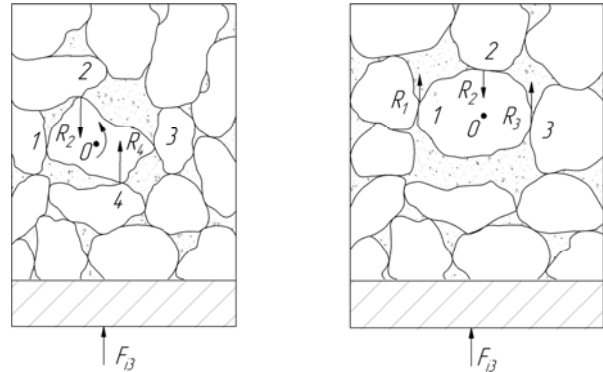


Рис. 1. Принципова система зв'язаної структури матеріалу вантажу

Fig. 1. Principle system of linked structure of the freight material

Розвантажувальний матеріал у загальному вигляді може бути поданий феноменологічною моделлю просторового багатомасового дисперсного середовища у вигляді пружнов'язкопластично-інерційних систем (рис. 2). Кожна реологічна комірочка такої системи має свої інерційні властивості, які характеризуються її масами  $m_{i-1}$ ,  $m_i$ ,  $m_{i+1}$ , пружними властивостями, які закладені в пружних елементах  $c_{x,y,z}^i$ , а також гістерезисними властивостями, які моделюються в'язкими  $\varepsilon_{x,y,z}^i$ . Реологічні комірочки взаємодіють через пружні елементи та пари в'язкого і сухого тертя.

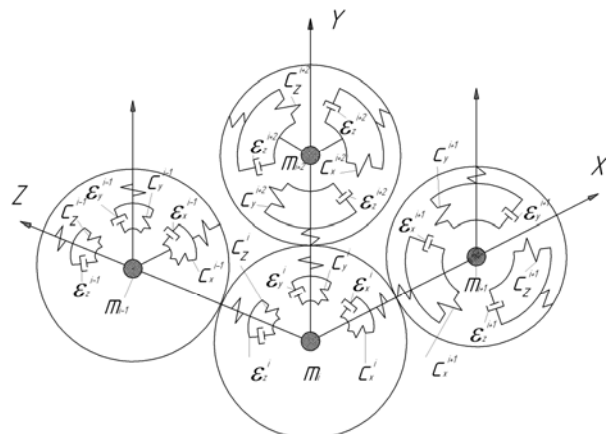


Рис. 2. Феноменологічна модель просторового дисперсного середовища

Fig. 2. Phenomenological model of spatial dispersion medium

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ

Розвантажувальний матеріал в замкненому об'ємі кузова транспортного засобу є складною системою структурних утворень, що складається з простих окремих твердих частинок з  $w$  ступенями вільності. Коливальні рухи в складній системі описуються  $r$  координатами, вибір яких довільний, а число ступенів вільності визначається мінімальним числом змінних, що описують рух простих систем. Фактичний рух частинок основи розвантажувального матеріалу є зв'язаним, тобто коливання в будь-якій з простих систем впливають на коливання в іншій і навпаки.

Для фізичного аналізу коливальних явищ в складній системі розвантажувального матеріалу необхідно знати характер коливань в окремих простих, як їх прийнято називати, парціальних системах, з яких вона складається [12]. З цією метою слід визначити: парціальні системи, що утворюють складну систему; встановити зв'язок – взаємодію між коливаннями в парціальних системах; оцінити величину цього зв'язку за ступенем його впливу на характер коливань. Для виділення парціальної системи в складній системі розвантажувального матеріалу скористаємось відомим правилом, [12] згідно з яким парціальна система, поведінка якої описується даною узагальненою координатою, виходить з системи, якщо решту координат беремо рівними нулю. Тоді частоти коливань виділених парціальних систем називаються парціальними частотами складної системи і завжди лежать між її власними частотами. Зменшення інтенсивності зв'язку між парціальними системами збільшує ступінь збіжності власної частоти системи з найближчою парціальною частотою. Тому у низці випадків для оцінювання власних частот складної системи, що має слабкі зв'язки, достатньо визначити її парціальні частоти [8].

В складній системі розвантажувального матеріалу, умовно названої зв'язаною структурою, типова парціальна система може бути подана у вигляді елементарного просторового анізотропного осцилятора (рис. 3) – твердої частинки розвантажувального матеріалу масою  $m_i$ , що взаємодіє з нерухомими частинками основи, що оточують її [3].

Загалом віброударний процес можна розглядати як послідовний вплив на розвантажувальний матеріал полігармонійних імпульсів зовнішніх сил, у вигляді косинусоїдальних (си-

нусоїдальних) хвиль з кутовими частотами  $\omega_j$ , результатом якого є суперпозиція гармонійних коливань, що відповідає складному імпульсу зовнішніх сил кінцевої тривалості [8]. Віброударний процес, який подається у вигляді полігармонійного зовнішнього впливу, складається з низки частотних компонент з постійною різницею частот  $\delta\omega$  і утворює хвильовий пакет, що лежить у вузькому частотному інтервалі  $\Delta\omega = \omega_B - \omega_H$  (рис. 3, а). Аналіз поведінки такого хвильового пакету  $\Delta\omega$  з однаковою, наприклад амплітудою  $r$  у часі, дає можливість синтезувати зовнішнє навантаження у вигляді імпульсу сили.

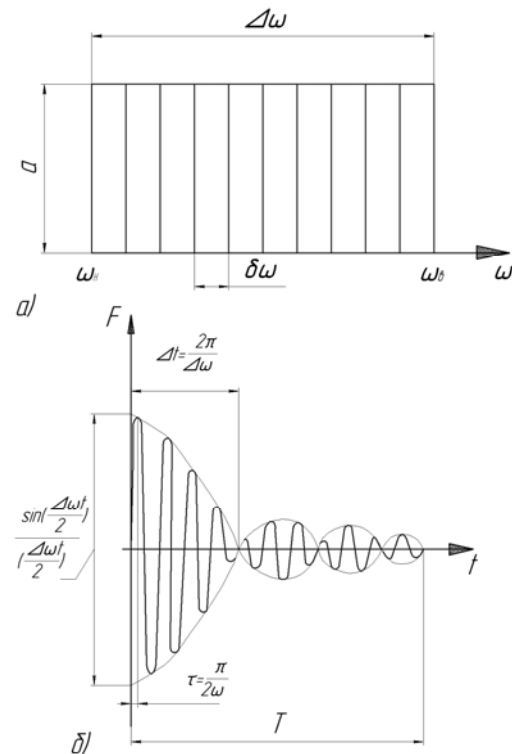


Рис. 3. Схема полігармонійного зовнішнього навантаження:

а – пакет хвиль; б – сумарна амплітуда

Fig. 3. The scheme of polyharmonic external loading: a – wave packet; b – the total amplitude

Цей висновок підтверджує особливу ефективність вібраційного або ударного зовнішнього навантаження під час віброударного розвантаження матеріалів. Як приклад синтезування імпульсного зовнішнього навантаження досить розглянути вплив на систему хвильового пакету  $\Delta\omega$ , кожна компонента якого відповідає гармонійному коливанню:

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ

$$F_i = r \sin(\omega_i t),$$

де  $\omega_i = \omega_H + (i-1) \delta\omega$ ;  $k = \Delta\omega/(\delta\omega) + 1$ ;  $i = 1, 2, 3, \dots$ .

Сума низки таких гармонійних компонент забезпечує вплив:

$$F(t) = r \sum_{i=1}^{k-1} \sin(\omega_H t + k\delta\omega t).$$

Середнє значення частоти хвильового пакету  $\Delta\omega$ :

$$\bar{\omega} = \omega_H + \frac{k-1}{2} \delta\omega,$$

а залежність сумарної амплітуди від часу при великих  $k$  можна навесити у вигляді:

$$F(t) = kr \frac{\sin\left(\frac{\Delta\omega t}{2}\right)}{\left(\frac{\Delta\omega t}{2}\right)} \sin \bar{\omega} t. \quad (1)$$

Графік тимчасової зміни  $F(t)$  (рис. 3, б) побудований на основі виразу (1) і відповідає окремому згасальному імпульсу, є результатом додавання гармонічних компонент, частоти яких обмежені хвильовим пакетом  $\Delta\omega = \omega_B - \omega_H$ . Значні амплітуди  $F(t)$  спостерігаються тільки в інтервалі  $0 < t < 2\pi/(\Delta\omega)$ , а тривалість цієї основної частини синтезованого імпульсу ( $\Delta t$ ) визначається величиною  $\Delta\omega$ . При зменшенні хвильового пакета ( $\Delta\omega \rightarrow 0$ ) відбувається перехід до одночастотного гармонійного впливу  $\omega = \omega_B = \omega_H$ , тривалість якого не обмежена (теоретично); збільшення  $\Delta\omega$  характерно для ударної дії, коли  $\Delta t = 2\pi/(\Delta\omega) \rightarrow 0$ .

Розглянемо вимушене коливання окремої  $i$ -ої частинки дисперсного середовища (рис. 4), в узагальнених координатах  $q$ , на яку діє збуджуюча сила  $F(t)$ . Кожна  $i$ -та частинка системи вантажу має свої інерційні властивості, які характеризуються її масами  $m_i$ , пружними властивостями, що закладені в пружних елементах  $c_{iq}$ , а також гістерезисними властивостями, що моделюються узагальненими в'язками  $\varepsilon_{iq}$  елементами.

Рівняння динаміки частинок зв'язаної структури розвантажуючого ударними імпульсами матеріалу з урахуванням віброреологічного

ефекту під час зовнішньої ударної дії на вантаж, розглядається, як невстановлені коливання в системі і описуються рівнянням:

$$\ddot{q} + 2\varepsilon_i \dot{q} + \omega_0^2 q = \frac{1}{a} F(t), \quad (2)$$

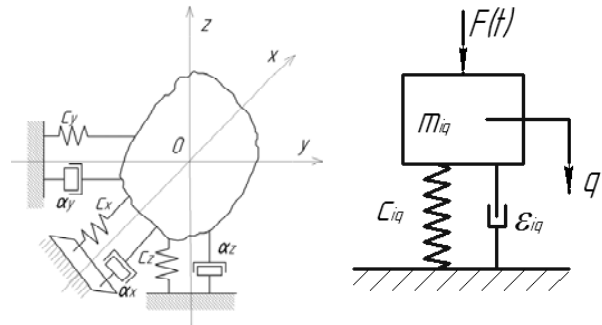


Рис. 4. Розрахункова модель коливання зв'язаної структури матеріалу вантажу

Fig. 4. The estimated model of «linked» structure oscillation of the freight material

з початковими умовами  $q(0) = q_0, \dot{q}(0) = \dot{q}_0$ , де  $\omega_0$  – власна частота коливання частинки зв'язаної структури матеріалу вантажу.

Розглянемо допоміжну задачу про дію на систему одиничного миттєвого імпульсу  $\delta(t - \tau)$ , прикладеного в момент часу  $t = \tau$ , при нульових початкових умовах. Розв'язком диференціального рівняння (2) є імпульсна перехідна функція  $h(t, \tau)$  (іноді цю функцію називають ваговою функцією або функцією Гріна) [11].

Розв'язок має вигляд:

$$h(t, \tau) = \begin{cases} 0, & t \leq \tau \\ \frac{1}{\omega_\varepsilon} e^{-\varepsilon_i(t-\tau)} \sin \omega_{\varepsilon_i}(t-\tau), & t > \tau. \end{cases} \quad (3)$$

Нехай початкові умови – нульові. Подамо зовнішню збуджуючу силу  $F(t)$  у вигляді сукупності нескінченно малих імпульсів  $F(\tau)d\tau$ . Складаючи реакцію системи від кожного такого імпульсу на відрізок часу  $[0, t]$ , отримаємо розв'язок, який ще називається інтегралом Дюамеля:

$$q_*(t) = \frac{1}{a} \int_0^t h(t, \tau) F(\tau) d\tau, \quad (4)$$

де  $a$  – коефіцієнт підсилення.

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ

Якщо збуджуючу силу  $F(t)$  можна подати у вигляді послідовності нескінченно малих приростів  $dF(\tau)d\tau$ , тоді частинний розв'язок рівняння (4):

$$q_*(t) = \frac{1}{c} F(t) \frac{1}{c} F(0) e^{-\varepsilon_i t} (\cos \omega_{\varepsilon_i} t + \frac{\varepsilon_i}{\omega_{\varepsilon_i}} \sin \omega_{\varepsilon_i} t) - \frac{1}{c} \int_0^t \dot{F}(\tau) e^{-\varepsilon_i(t-\tau)} [\cos \omega_{\varepsilon_i} (t-\tau) + \frac{\varepsilon_i}{\omega_{\varepsilon_i}} \sin \omega_{\varepsilon_i} (t-\tau)] d\tau, \quad (5)$$

де  $\omega_{\varepsilon_i}$  – вимушена частота коливання частинки зв'язаної структури матеріалу вантажу.

Загальний розв'язок рівняння (2). Його подають у вигляді суми загального розв'язку відповідного однорідного рівняння, що задовольняє початковим умовам, і частинного розв'язку, записаного у формі (4) або (5). Наприклад, використовуючи вираз (5), отримаємо:

$$q(t) = q_0 e^{-\varepsilon_i t} (\cos \omega_{\varepsilon_i} t + \frac{\varepsilon_i}{\omega_{\varepsilon_i}} \sin \omega_{\varepsilon_i} t) + \frac{\dot{q}}{\omega_{\varepsilon_i}} e^{-\varepsilon_i t} \sin \omega_{\varepsilon_i} t + \frac{q_0}{a \omega_{\varepsilon_i}} \int_0^t F(\tau) e^{-\varepsilon_i(t-\tau)} \sin \omega_{\varepsilon_i} (t-\tau) d\tau. \quad (6)$$

Аналізуючи процес віброударного руйнування, необхідно розглядати окремо вібраційний і ударний режими навантаження.

Для вібраційного навантаження збуджуюча сила виражається у вигляді полігармонійної сили  $F(t) = F_0 \sin(\frac{1}{2} b t^2 + \varphi)$ , де  $b$  – кутове прискорення;  $\varphi$  – початковий фазовий кут збуджуючої сили;  $\omega = bt$  – миттєва частота сили (в момент резонансу  $t^*$  миттєва частота дорівнює частоті власних коливань системи  $\omega_{0i}$ , тобто  $t^* = \omega_{0i} / b$ ). Реакцію системи визначимо, використовуючи розв'язок (3):

$$q(t) = \frac{F_0}{2 a \omega_0} \int_0^t e^{-\varepsilon_i(t-\tau)} \sin(\omega_{\varepsilon_i} (t-\tau)) - \sin(\frac{1}{2} b t^2 + \varphi) d\tau. \quad (7)$$

Відповідно до положень фізико-хімічної механіки дисперсних систем розвиток деформації в структурованому твердоподібному тілі характеризується тим, що під час збільшення напруження зсуву вище межі текучості відбувається руйнація структури, внаслідок чого ефективна узагальнена в'язкість  $\varepsilon_i$  системи різко знижується, і при гранично повній руйнації структури досягає найменшого значення. Для вищевказаного випадку, коли  $\varepsilon_i = 0$ , розв'язок інтеграла (7) наведено на графіку залежності коефіцієнта динамічного підсилення –  $\chi = \frac{q}{q_{ст}}$  і співвідно-

шення  $\frac{bt}{\omega_{0i}}$  (рис. 5), де  $q_{ст}$  – статичне зміщення,

а  $q$  – динамічне зміщення коливальної частинки «зв'язаної» структури розвантажуючого матеріалу. На діаграмі (рис. 5) видно, як коливальна система переходить у резонансний стан, що призводить до виникнення критичних напружень руйнування між частинками зв'язаної структури розвантажуючого матеріалу. Для кожного параметра  $\omega_0^2/2\pi b$ , змінюючи фазовий кут  $\varphi$ , можна отримати сімейство подібних кривих, за якими можна визначити найбільшу амплітуду, що спричиняє. Чим більше кутове прискорення  $b$ , тим менше максимальна амплітуда коливань і тим більше її зміщення від резонансу  $\omega_0 = bt^*$ .

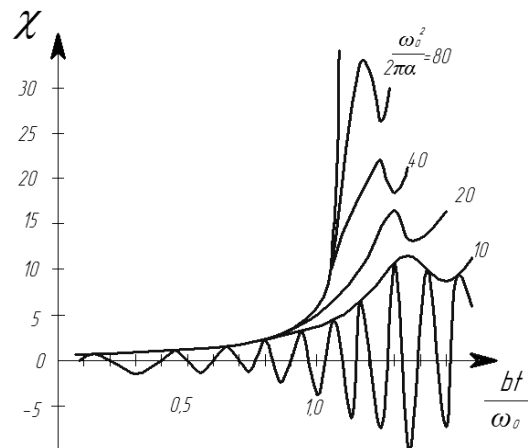


Рис. 5. Діаграма амплітудно-частотної характеристики системи коливальної частинки зв'язаної структури матеріалу під час віброударного розвантаження

Fig. 5. Diagram of amplitude frequency response of oscillation particle of linked structure of the material at vibroimpulsive unloading

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ

Якщо ми подаємо систему зв'язаної структури матеріалу однорідною, тим самим підкреслюючи континуальний характер зв'язаної структури розвантажувального матеріалу, і на таку систему будемо впливати моногармонійним імпульсом зовнішніх сил, що триває нескінченно, у вигляді синусоїдальної хвилі з кутовою частотою  $\omega$ , що рівна основній частоті  $\omega_0$  і власних коливань розвантажувального матеріалу, то в останній повинні бути коливання (хвилі деформацій), що проходять в умовах резонансу. Абсолютні деформації, що виникають при цьому в розвантажувальному матеріалі, перевищують допустимі пружні деформації для частинок цієї системи. Відбувається руйнування зон контактів цих частинок [6].

Для ударного навантаження постійна збуджуюча сила  $F_0$ , раптово прикладена до системи в момент часу  $t = 0$ , діє протягом певного проміжку часу  $\tau$ . Коливання системи при нульових початкових умовах ( $t < \tau$ ) описуються за формулою:

$$q(t) = \frac{F_0}{a\omega^2} \left[ 1 - e^{-\varepsilon_i t} \left[ (\cos \omega_{ei} t + \frac{\varepsilon_i}{\omega_{ei}} \sin \omega_{ei} t) \right] \right], \quad (8)$$

де  $\omega_{ei}$  – вимушена частота коливання частинки зв'язаної структури розвантажувального матеріалу.

Після припинення дії сили рух системи стає вільним і здійснюється за рахунок початкових умов  $q_\tau$  і  $\dot{q}_\tau$ , що надаються системі в момент часу  $t = \tau$ :

$$q(t) = q_\tau e^{-\varepsilon_i(t-\tau)} \left[ (\cos \omega_{ei}(t-\tau) + \frac{\varepsilon_i}{\omega_{ei}} \sin \omega_{ei}(t-\tau)) \right] + \frac{\dot{q}_\tau}{\omega_{ei}} e^{-\varepsilon_i(t-\tau)} \sin \omega_{ei}(t-\tau). \quad (9)$$

Виходячи з рівняння (8) і (9), графік коливань зображено на рис. 6, крива 1.

Оскільки імпульсом сили  $S$  називають величину  $F_0\tau$ , і якщо  $\tau$  зменшується, а величина  $F_0\tau$  залишається постійною, то межу  $F = \lim(F_0\tau)$  називають ударним імпульсом. Після переходу у виразі (10) до межі отримуємо:

$$q(t) = F(a\omega_{ei})^{-1} e^{-\varepsilon_i t} \sin \omega_{ei} t. \quad (10)$$

Нехай на систему діють через рівні проміжки часу  $\tau$  однакові ударні імпульси. При співпа-

дінні  $\tau$  з періодом коливань  $T_\varepsilon = 2\pi / \omega_{ei}$  має місце ударний резонанс.

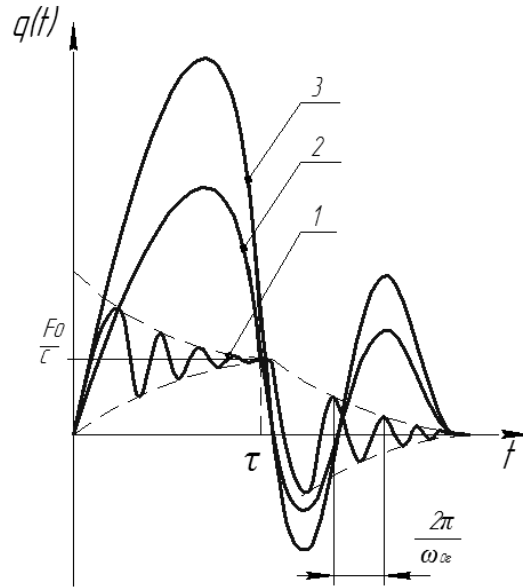


Рис. 6. Графік реакції системи коливної частинки зв'язаної структури розвантажувального матеріалу під час віброударного розвантаження:

1 – графік коливання системи при дії однієї постійної сили; 2 – графік коливання системи при дії ударних імпульсів; 3 – графік коливання системи при дії ударних імпульсів, для системи без дисипативних сил ( $\varepsilon_i = 0$ )

Fig. 6. Reaction diagram of the system of oscillation particles of the linked structure of unloading material at vibroimpulsive unloading

Максимальне значення порівняно з дією однієї постійної сили збільшується в  $\frac{[1 - \exp(-n\varepsilon T_\varepsilon)]}{[1 - \exp(-\varepsilon T_\varepsilon)]}$

раз, крива 2 на рис. 6. При  $\varepsilon_i = 0$  це збільшення буде відбуватися в  $n$  раз, крива 3 на рис. 6.

Отже, щоб забезпечити в розвантажувальній системі зв'язаної структури матеріалу абсолютну деформацію за рахунок дискретного зростання в інтервалі пластичних деформацій, необхідно впливати на неї сукупністю  $n$  імпульсів зовнішніх сил [6], у вигляді одиничного миттєвого імпульсу.

## Результати

У ході розгляду резонансних зон невідновленого вимушеного коливання частинок зв'язаної структури встановлено, щоб забезпечити в розвантажувальній системі зв'язаної структури матеріалу абсолютну деформацію, за раху-

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ

нок дискретного зростання в інтервалі пластичних деформацій, залежно від типу матеріалу, необхідно прикладати як вібраційне, так і віброударне навантаження. До того ж встановлено, що під час дії вібраційного навантаження найкраще на систему впливати моногармонійним імпульсом зовнішніх сил, у вигляді синусоїдальної хвилі з кутовою частотою, яка рівна основній частоті власних коливань частинок розвантажувального матеріалу, що призводить до резонансного явища (виникають хвилі деформацій). Під час ударного навантаження необхідно впливати на систему сукупністю імпульсів зовнішніх сил у вигляді одиничного миттєвого імпульсу, час проходження яких рівний періоду власних коливань частинок розвантажувального матеріалу, що також призводить до резонансного явища (виникають хвилі деформацій). Абсолютні деформації, що виникають за даних режимів навантаження в розвантажувальному матеріалі, перевищують допустимі пружні деформації для частинок цієї системи і відбувається руйнування зон контактів цих частинок.

#### Наукова новизна та практична значимість

Авторами досліджено невстановлені вимушені коливання частинок зв'язаної структури на основі феноменологічної моделі просторового дисперсного середовища розвантажувального матеріалу. При цьому, для кожного типу віброударного навантаження, що подавалося відповідним видом збуджуючої сили, розраховані умови для проходження резонансних процесів. Основні положення резонансно-структурної теорії під час теоретичного дослідження процесів віброударного розвантаження дозволяють обґрунтувати ефективність використання віброударного обладнання для підвищення інтенсивності розвантаження. Використання резонансно-структурної теорії дозволяє спрогнозувати необхідні параметри віброударного навантаження на розвантажувальний матеріал, залежно від його фізико-механічних властивостей, що забезпечує йому найефективніше розвантаження за рахунок руйнування силових зв'язків частинок розвантажувального матеріалу. Результати досліджень знайшли своє наукове використання в низці публікацій авторів у спе-

ціальних та науково-популярних виданнях, виступах на наукових конференціях.

#### Висновки

Основні положення резонансно-структурної теорії під час теоретичного дослідження процесів віброударного розвантаження дозволяють обґрунтувати ефективність використання віброударного обладнання для підвищення інтенсивності розвантаження транспортних засобів [9].

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабичев, А. П. Вибрационные станки для обработки деталей / А. П. Бабичев, В. Б. Трунин, Ю. В. Самодумский. – М. : Машиностроение, 1984. – 168 с.
2. Бауман, В. А. Вибрационные машины и процессы в строительстве / В. А. Бауман, Н. Н. Быховский. – М. : Высш. шк., 1977. – 255 с.
3. Вибрации в технике : справочник в 6-ти т. / Ред. совет : В. Н. Челомей (пред.). – Т. 1 : Колебание линейных систем / под ред. В. В. Болотина. – М. : Машиностроение, 1979. – 352 с.
4. Вибрации в технике : справочник в 6-ти т. / Ред. совет : В. Н. Челомей (пред.). – Т. 2 : Колебание нелинейных механических систем / под ред. И. И. Блехмана. – М. : Машиностроение, 1979. – 351 с.
5. Вибрационные машины в строительстве и производстве строительных материалов : справочник / под ред. В. А. Баумана, Н. И. Быховского, Б. Г. Гольдштейна. – М. : Машиностроение, 1970. – 548 с.
6. Волкова, В. Е. Динамическое поведение систем с несимметричными кусочно-линейными упругими характеристиками / В. Е. Волкова // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2003. – Вип. 1. – С. 137–141.
7. Волкова, В. Е. Численное моделирование полигармонических колебаний нелинейных динамических систем / В. Е. Волкова // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2004. – Вип. 3. – С. 115–120.
8. Гончаревич, И. Ф. Теория вибрационной техники и технологии / И. Ф. Гончаревич, К. В. Фролов. – М. : Наука, 1981. – 365 с.
9. Искович-Лотоцкий, Р. Д. Вибрационные процессы: обзор / Р. Д. Искович-Лотоцкий, И. Б. Матвеев. – М. : НИИМаш, 1979. – 50 с.
10. Искович-Лотоцкий, Р. Д. Вибраційні та віброударні пристрої для розвантаження транспортних засобів : монографія / Р. Д. Искович-Лотоцкий, Я. В. Иванчук. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 156 с.

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ

11. Іскович-Лотоцький, Р. Д. Основи теорії розрахунку та розробка процесів і обладнання для віброударного пресування : монографія / Р. Д. Іскович-Лотоцький. – Вінниця : Універсум, 2006. – 338 с.
12. Разрушение деформируемых сред при импульсных нагрузках / Б. Л. Глушак, С. А. Новиков, А. И. Рузанов, А. И. Садырин. – Ниж. Новгород : Нижегород. ун-т, 1992. – 192 с.
13. Cheli, F. On rail vehicle vibrations induced by track unevenness: Analysis of the excitation mechanism / F. Cheli, R. Corradi // J. of Sound and Vibration. – 2011. – Vol. 330. – Iss. 15. – P. 3744–3765. doi: 10.1016/j.jsv.2011.02.025.
14. Nejez, J. Cableway oscillation problems / J. Nejez // Intern. Ropeway Review. – 2011. – № 6. – P. 47.
15. Thelisson, G. Overhead line from start to finish / G. Thelisson // Railway Gazette Intern. – 2012. – July. – P. 48–49.

Р. Д. ИСКОВИЧ-ЛОТОЦКИЙ<sup>1</sup>, Я. В. ИВАНЧУК<sup>2\*</sup>, Я. П. ВЕСЕЛОВСКИЙ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Металлорежущие станки и оборудование автоматизированных производств», Винницкий национальный технический университет, ул. Хмельницкое шоссе, 95, Винница, Украина, 21021, тел. +38 (0432) 59 85 23, эл. почта ivanchuck@ukr.net, ORCID 0000-0003-3920-3019

<sup>2\*</sup>Каф. «Металлорежущие станки и оборудование автоматизированных производств», Винницкий национальный технический университет, ул. Хмельницкое шоссе, 95, Винница, Украина, 21021, тел. +38 (067) 301 83 73, эл. почта ivanchuck@ukr.net, ORCID 0000-0002-4775-6505

<sup>3</sup>Каф. «Металлорежущие станки и оборудование автоматизированных производств», Винницкий национальный технический университет, ул. Хмельницкое шоссе, 95, Винница, Украина, 21021, тел. +38 (0432) 59 85 23, эл. почта ivanchuck@ukr.net, ORCID 0000-0002-6665-6278

## ОСНОВЫ РЕЗОНАНСНО-СТРУКТУРНОЙ ТЕОРИИ ВИБРОУДАРНОЙ РАЗГРУЗКИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

**Цель.** Работа направлена на применение основных положений резонансно-структурной теории для теоретического исследования основных физико-механических процессов, происходящих в разгрузочном материале во время виброударной разгрузки, с целью обоснования эффективности их применения.

**Методика.** Разгрузочный материал во время виброударной разгрузки в качестве исследуемого объекта представлялся в виде феноменологической модели пространственной дисперсной среды. Рассмотрены уравнения динамики неустановившихся вынужденных колебаний частиц «связанной» структуры под действием вибрационных и ударных нагрузок, с учетом виброреологического эффекта, с установлением зон резонанса.

**Результаты.** При рассмотрении резонансных зон неустановившихся вынужденных колебаний частиц «связанной» структуры установлено, что при воздействии вибрационных нагрузок возможно эффективно влиять на систему моногармоническим импульсом внешних сил. Данный импульс имеет вид синусоидальной волны с угловой частотой, которая равна основной частоте собственных колебаний разгрузочного материала. При ударной нагрузке необходимо воздействовать на нее совокупностью импульсов внешних сил в виде единичного мгновенного импульса. При данных условиях нагрузки в данных системах имеет место явление резонанса, которое обеспечивает в разгрузочной системе «связанной» структуры материала абсолютную деформацию за счет дискретного роста в интервале пластических деформаций. Абсолютные деформации, возникающие при этом в разгрузочном материале, превышают допустимые упругие деформации для частиц данной системы; к тому же происходит разрушение зон контактов данных частиц. **Научная новизна.** Авторами исследованы неустановившиеся вынужденные колебания частиц «связанной» структуры на основе феноменологической модели пространственной дисперсной среды разгрузочного материала. При этом, для каждого типа виброударной нагрузки, что представлялось соответствующим видом возбуждающей силы, рассчитаны условия для прохождения резонансных процессов. **Практическая значимость.** Основные положения резонансно-структурной теории при теоретическом исследовании процессов виброударной разгрузки позволяют обосновать эффективность использования виброударного оборудования для повышения интенсивности разгрузки транспортных средств. Использование резонансно-структурной теории позволяет спрогнозировать необходимые параметры виброударной нагрузки на разгрузочный материал в зависимости от его физико-механических свойств. Это обеспечивает ему эффективную разгрузку за счет разрушения силовых связей частиц разгружаемого материала.

*Ключевые слова:* реология; колебания; резонанс; разгрузка; деформация; напряжение

R. D. ISKOVYCH-LOTOTSKYI<sup>1</sup>, YA. V. IVANCHUK<sup>2\*</sup>, YA. P. VESELOVSKYI<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dep. «Machine Tools and Automated Production Equipment», Vinnytsia National Technical University, Khmelnytske shose St., 95, Vinnytsia, Ukraine, 21021, tel. +38 (0432) 59 85 23, e-mail ivanchuck@ukr.net, ORCID 0000-0003-3920-3019

<sup>2\*</sup>Dep. «Machine Tools and Automated Production Equipment», Vinnytsia National Technical University, Khmelnytske shose St., 95, Vinnytsia, Ukraine, 21021, tel. +38 (067) 301 83 73, e-mail ivanchuck@ukr.net, ORCID 0000-0002-4775-6505

<sup>3</sup>Dep. «Machine Tools and Automated Production Equipment», Vinnytsia National Technical University, Khmelnytske shose St., 95, Vinnytsia, Ukraine, 21021, tel. +38 (0432) 59 85 23, e-mail ivanchuck@ukr.net, ORCID 0000-0002-6665-6278

## THE BASIS OF RESONANCE-STRUCTURE THEORY FOR VIBROIMPACT UNLOADING OF THE VEHICLES

**Purpose.** The use of the main provisions of the resonance-structure theory for theoretical study of basic physical and mechanical processes taking place in unloading material during the vibroimpact discharge in order to substantiate the efficiency of their application. **Methodology.** Unloading material during vibroimpact unloading, as the study object, appeared as phenomenological model of spatial dispersion medium. The dynamics equations of unsteady forced particle oscillations of the "linked" structure under the action of vibration and impact loadings, taking into account the vibro rheological effect, with the establishment of resonance zones were considered. **Findings.** When considering the resonance zones of unstable forced oscillations of the "linked" structure particles it was found out that under the influence of vibration loadings the system is effectively affected by the monoharmonic pulse of external forces in the form of sinusoidal wave with an angular frequency. This frequency is equal to the main frequency of the natural oscillations of the unloading material. Under the impact loading it is necessary to affect the system by the accumulation of external force pulses in the form of single instant impulse. Under the given load conditions in these systems the phenomenon of resonance, which provides absolute deformation in handling system of the "linked" structure of the material due to discrete growth in the range of plastic deformations takes place. Absolute deformation, resulting in handling material exceed the permissible elastic deformations for the particles of this system and the destruction of the contact zones of these particles takes place. **Originality.** The authors studied unstable forced oscillations of the "linked" structure particles based on the phenomenological model of the spatial dispersion medium of unloading material. Thus, for each type of vibro-impact loads were calculated the conditions for resonant processes. That was presented by the relevant type of the actuating force. **Practical value.** The main provisions of the resonance-structural theory in theoretical study of the vibroimpact load processes prove the use efficiency of the vibroimpact equipment to increase the intensity of the vehicles unloading. The use of resonance-structural theory allows predicting the required parameters of vibro-impact loading on the unloading material, depending on its physical and mechanical properties that ensures the efficient unloading due to the destruction of the power relations of unloading material particles.

*Keywords:* rheology; oscillations; resonance; unloading; deformation; strain

### REFERENCES

1. Babichev A.P., Trunin V.B., Samodumskiy Yu.V. *Vibratsionnyye stanki dlya obrabotki detaley* [Vibration machines for parts processing]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1984. 168 p.
2. Bauman V.A., Bykhovskiy N.N. *Vibratsionnyye mashiny i protsessy v stroitelstve* [Vibration machines and processes in construction]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1977. 255 p.
3. Chelomey V.N., Bolotin V.V. *Vibratsii v tekhnike. T. 1: Kolebaniye lineynykh sistem* [Vibrations in engineering, Vol. 1: Oscillations of linear systems]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1979. 352 p.
4. Chelomey V.N., Blekhnman I.I. *Vibratsii v tekhnike. T. 2: Kolebaniye nelineynykh mekhanicheskikh sistem* [Vibrations in engineering, Vol. 2: Oscillations of non-linear mechanical systems]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1979. 351 p.
5. Bauman V.A., Bykhovskiy N.I., Goldshteyn B.G. *Vibratsionnyye mashiny v stroitelstve i proizvodstve stroitelnykh materialov* [Vibrating machines in the construction and production of building materials]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1970. 548 p.
6. Volkova V.Ye. *Dinamicheskoye povedeniye sistem s nesimmetrichnymi kusochno-lineynymi uprugimi kharakteristikami* [Dynamic behavior of systems with unsymmetrical piecewise linear elastic characteristics].

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ

- Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznichnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2003, issue 1, pp. 137-141.
7. Volkova V.Ye. Chislennoye modelirovaniye poligarmonicheskikh kolebaniy nelineynykh dinamicheskikh sistem [Numerical simulation of polyharmonic fluctuations of non-linear dynamical systems]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznichnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2004, issue 3, pp. 115-120.
  8. Goncharevich I.F., Frolov K.V. *Teoriya vibratsionnoy tekhniki i tekhnologi* [The theory of vibrating equipment and technology]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 365 p.
  9. Iskovich-Lototskiy R.D., Matveyev I.B. *Vibratsionnyye protsessy* [Vibration processes]. Moscow, NIIMash Publ., 1979. 50 p.
  10. Iskovych-Lototskiy R.D., Ivanchuk Ya.V. *Vibratsiini ta vibroudarni prystroi dlia rozvantazhennia transportnykh zasobiv* [Vibration and vibroimpact devices for unloading of the vehicles]. Vinnytsia, VNTU Publ., 2012. 156 p.
  11. Iskovych-Lototskiy R.D. *Osnovy teorii rozrakhunku ta rozrobka protsesiv i obladnannia dlia vibroudarnoho presuvannia* [Fundamentals of the theory for calculation and development of processes and equipment for vibro-pressing]. Vinnytsia, Universum Publ., 2006. 3308 p.
  12. Glushak B.L., Novikov S.A., Ruzanov A.I. Sadyrin A.I. *Razrusheniye deformiruyemykh sred pri impulsnykh nagruzkakh* [The destruction of deformable media under pulse loading]. Nizhniy Novgorod, Nizhegorodskiy universitet Publ., 1992. 192 p.
  13. Cheli F. On rail vehicle vibrations induced by track unevenness: Analysis of the excitation mechanism. *Journal of Sound and Vibration*, 2011, vol. 330, issue 15, pp. 3744-3765. doi: 10.1016/j.jsv.2011.02.025.
  14. Nejez J. Cableway oscillation problems. *Intern. Ropeway Review*, 2011, no. 6, pp. 47.
  15. Thelisson G. Overhead line from start to finish. *Railway Gazette Intern.*, 2012, July, pp. 48-49.

*Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. І. О. Сиваком (Україна); д.т.н., проф. В. Ф. Анісімовим (Україна); д.т.н., проф. С. В. Ракишою (Україна)*

Надійшла до редколегії: 20.06.2014

Прийнята до друку: 15.09.2014

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

UDC 629.4.027.11-46

S. R. KOLESNYKOV<sup>1\*</sup>, M. R. ROMANIUKHA<sup>2</sup>, I. YU. KEBAL<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Planning and Design Technological Office, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 371 51 12, e-mail blaze777@inbox.ru, ORCID 0000-0002-0487-9257\$

<sup>2</sup>Planning and Design Technological Office, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 371 51 12, e-mail romaniuha.nikolay@gmail.com, ORCID 0000-0002-9514-6365

<sup>3</sup>Planning and Design Technological Office, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 371 51 12, e-mail spyhernter-08@mail.ru, ORCID 0000-0002-8408-8294

### WHEELSET AXLE WITH THE CAVITY OF UNIFORM CROSS SECTION

**Purpose.** Due to operation in complex loading conditions, the rolling stock wheelsets should provide high reliability, since the train traffic safety largely depends on them. Design and technical condition of wheelsets affect the smoothness, intensity of forces generated by the interaction between the car and track, and the motion resistance. Specificity of the axle operation consists in the fact that it undergoes the bending stresses under loading. These stresses are unevenly distributed along the cross-sectional area, reaching the highest values in the outer fibers and the minimal values in the internal ones. This aspect sets the problem of replacement of the uniform cross section with the hollow cross section. The disadvantages of hollow axle design, which are used at the present time, should include a significant manufacturing complexity of the variable section cavity. The purpose is to develop a modernized design of the wheelset axle. **Methodology.** A construction of the hollow axle having an inner longitudinal cylindrical through hole of the constant diameter throughout its length was proposed. The item is made of steel seamless tube. The inner surface of the tube is treated by mechanical means to remove the voltage concentrations in the internal longitudinal cylindrical through hole, which has a constant diameter along the entire length of the axle. **Findings.** Application of this design will facilitate manufacturing of the hollow axle and the machining of the inner longitudinal through hole, while retaining all the use advantages of the hollow axle in the rolling stock wheel pairs. Another use advantage of the hollow axle of this design is the absence of partial heterogeneity of the metal, which is inevitably, occurs during the solid axles blanking. **Originality.** A new design of the wheelset hollow axle of railway rolling stock was proposed. **Practical value.** Introduction of the new design simplifying the manufacture and mechanical treatment of the inner cavity of the wheel pair axle will bring significant economic benefits. According to preliminary calculations, the use of the axle with the uniform cross section cavity will reduce the metal consumption by 100-110 kg.

**Keywords:** wheelset; solid axle of wheelset; hollow axle of wheelset; railway rolling stock; railway car, unsprung weight of car

#### Introduction

One of the most popular and large-capacity rail purposed metal products is the production of wheelsets for rolling stock.

The scale assessment of the global market for railway wheelsets made by All Russian Market Research Institute based on data for the production of cars (about 100 thousand per year) and their park (more than 4 million pieces), taking into ac-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

count the needs in repair and modernization of the fleet, shows that each year about 1.500 thousand of wheelsets are produced worldwide. According to assessment of All Russian Market Research Institute based on the statistics of UN and UNECE, and data of national statistics in several countries [4], the total physical volume of production of these products in the world at the moment is about 1.5 million tons per year.

Due to operation in complex loading conditions, the wheelsets should provide high reliability [9, p. 3], since the train traffic safety largely depends on them. Therefore the special, high standardization requirements are imposed on them. They are regulated by the Rules of Technical Operation of the Railways, the Specifications on the inspection, repair and forming of car wheelsets and other regulations for the design, construction and maintenance.

The issues of the design, construction, manufacturing, quality control and maintenance of the wheelset axles abroad are clearly regulated by the European standardization documents. High-speed train traffic, increase in the number of passenger and freight transportations and other factors required the creation of new standards for the wheelsets of solid and hollow shafts of rolling stock too: 1) Railway applications – Wheelsets and bogies – Non powered axles – Design method; German version EN 13103:2009 + A2:2012; 2) Railway applications – Wheelsets and bogies – Powered axles – Design method; German version EN 13104:2009 + A2:2012; 3) Railway applications – Wheelsets and bogies – Axles – Product requirements; German version EN 13261:2009 + A1:2010, etc.

At the same time F. Murawa in his research emphasizes that the constant striving to increase the environmentally safe and cost-efficient railway transportations involves not only the strict adherence to technical standards, but also the opportunities for innovations and new solutions [13].

Design and technical condition of wheelsets affect the smoothness, intensity of forces generated by the interaction between the car and track, and the motion resistance. These issues are discussed by scientists and practitioners from different countries. Thus, M. Novosad, R. Fajkos, B. Reha and R. Reznicek [12], S. Myamlin, V. Horobets and A. Bondarev [6] in their articles emphasize the importance of testing for fatigue failure of the wheelset axle metal. S. Beretta, M. Carbonia and other researchers

[11], developing the given subject, research, corrosion-fatigue failure of steels. D. Dani-lov and A. Andreyev [2] study the stress-strain state of the car wheelset when driving on the straight and curved track sections, taking into account the impact of wind load by means of PC ANSYS. L. Lubenskaya [5] describes a method for increasing the performance properties of wheelset axles due to the hardening of their surface. At the same time, in spite of the number of studies on this issue, the problem of significant increase in performance properties of wheelset axles up to this day is still unresolved.

### Purpose

The purpose of the work is to create a design of wheelset axle that will satisfy a number of basic requirements. The requirements are: 1) the availability of sufficient strength with minimum unsprung weight that is dictated by the need to reduce the empty weight of the rolling stock and reduce the direct impact on the rail track and the car elements during the passage of rail track irregularities; 2) provision (together with axle boxes) of the lesser resistance during the car moving and the greater resistance to the wear of elements undergoing the wear during operation.

### Methodology

Specificity of the axle operation consists in the fact that it undergoes the bending stresses under loading. These stresses are unevenly distributed along the cross-sectional area, reaching the highest values in the outer fibers and the minimal values in the internal ones. This aspect sets the problem of replacement of the uniform cross section by the hollow cross section without notable increase in the overall dimension. But it should promote the weight reduction as compared to the axle of uniform cross section.

It was found that the endurance limit in all parts of the hollow axles is not lower and the sensitivity to stress concentration is lesser than that of the standard solid axles [1, p. 94]. The carrying capacity, which is estimated by the endurance limit product at the moment of the cross section resistance to the bending in the wheel seat of the hollow axle is 15% higher than this figure for the comparable solid axle.

Therefore the designs and technologies of the hollow axles manufacturing using the method of helical rolling [10] (Fig. 1) are developed.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

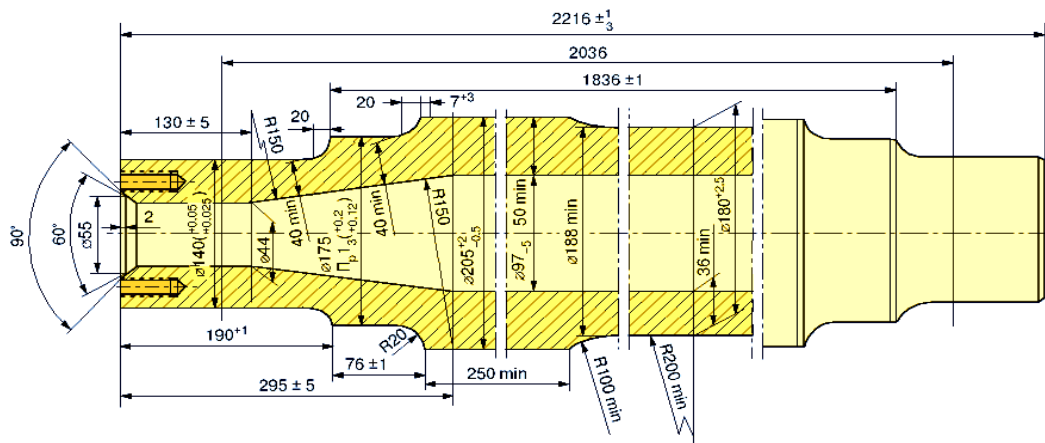


Fig. 1. Wheelset axle with a cavity of variable cross section

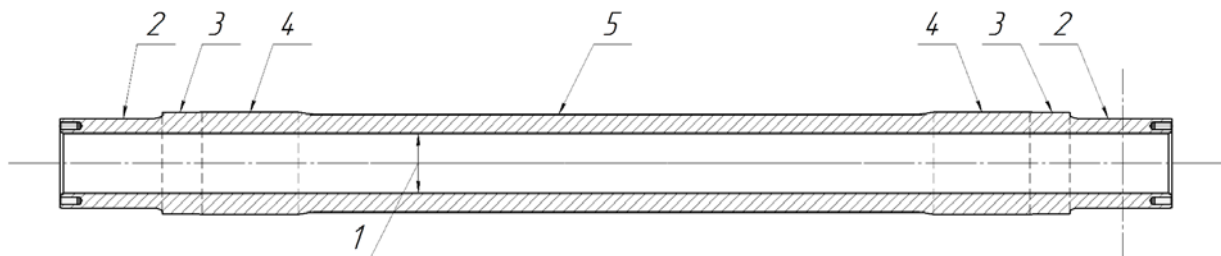


Fig. 2. Wheelset axle with a cavity of uniform cross section:

1 – inner longitudinal through cylindrical hole of constant diameter throughout the length of axle; 2 – neck of the hollow axle for bearings; 3 – prewheel seat; 4 – wheel seat; 5 – hollow axle body

Technical and economic advantages of the wheelsets with hollow axes are defined by the following parameters [3]:

- 1) decrease in the metal consumption;
- 2) reduction of the empty weight ratio and increase of the car capacity (without changing the load from the wheel on the rail);
- 3) cost reduction for the non-productive transportation of the empty weight of cars;
- 4) reduction of forces of the dynamic interaction of rolling stock and track due to the reduction of the unsprung weight of cars.

The disadvantages of such structure should include significant manufacturing complexity of the cavity of variable cross-section. Internal configuration of the designed hollow axle is a longitudinal cylindrical hole with the same diameter in the middle part and wheel seat. It radially passes into the hole in the form of truncated cones in the prewheel seat with smaller bases to the openings of axle necks.

In turn, the openings in the necks of hollow axle are also in the form of truncated cones. The larger bases of these cones are directed to the butt ends of the axle or the cylindrical ones in case the

necks forming in the black collar axle is made without a drawbar or mandrel. Smaller bases of the truncated cones of the wheel seat parts and the necks are mated together smoothly along the radius. Longitudinal holes in the necks at the butt are ended by the center holes with a protection cone. Through the holes all the internal surface of the blanks is descaled with the steel shot. As a result the surface layer from the inner side of the axle is somewhat strengthened due to work hardening.

Thus, the technical task, which would allow the efficient use of the hollow axes, is to develop the structure facilitating the manufacturing and machining of the inner cavity.

The specialists of Planning and Design Technological Office of the Rolling Stock, Track and the man-made structures of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (Ukraine) have developed the hollow axle construction with internal longitudinal through cylindrical hole of the constant diameter throughout length (Fig. 2).

The item is made of steel seamless tube. The inner diameter of this tube should be a little

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

smaller than the diameter of inner longitudinal through cylindrical hole, when the outer diameter of the is somewhat larger than the diameter of wheel seat part. The outer surface of the tube is welded to the diameters equal to the diameters of necks for the bearings, prewheel seat, wheel seat and the hollow axle body. The inner surface of the tube is treated by mechanical means to remove the voltage concentrations in the internal longitudinal cylindrical through hole, which has a constant diameter along the entire length of the axle.

Another use advantage of the hollow axle of this design is the absence of partial heterogeneity of the metal, which is inevitably, occurs during the solid axles blanking [8]. Black collar solid axles are made of axle billet or directly from the steel ingots by forging, stamping, screw rolling or radial-rotational deformation [7]. With such production method the metal heterogeneity often leads to the radial runout, which is corrected by the labor-consuming balancing on the special stands. Applying the same all-rolled metal to produce the hollow axles eliminates this problem, when the manufacturing technology of the cavity with the same diameter throughout the length of the axle allows a conducting finishing cut of the surface with the exact accuracy that further improves the item balancing.

It should be also noted that due to the increase in the outer diameter of the axle neck, increases the inner diameter of the axle box bearings. Thus, to provide the necessary contact area for load transfer from the body car to the axle, the bearing width decreases. This prevents significant increase in weight and material costs for the axle box of the wheelset.

### Findings

During the study the variants of wheelset axles were analyzed and the use advantages of the hollow axles were illustrated. The authors have developed the design of axle with the cavity of uniform cross-section, which would simplify the production of the item.

### Originality and practical value

The authors have proved the need to improve the hollow axle of the wheelset and developed its new design. Production of wheelset axle with the cavity of uniform cross-section simplifies the hollow axles manufacturing. According to preliminary

calculations, the use of the axle with the cavity of uniform cross-section would reduce the metal consumption by 100-110 kg.

### Conclusions

As a result of the study the authors have found that for a significant increase in performance properties of the wheelset axles is necessary:

1) Creation of the wheelset design, having sufficient strength with minimum unsprung weight in order to reduce the empty weight of rolling stock and to reduce the direct impact on the rail track and the car elements during the passage of the rail track irregularities;

2) Ensuring (together with the axle boxes) the lesser motion resistance and larger wear resistance of the elements undergoing the wear during operation;

3) Application of the construction proposed by the authors, simplifies the manufacturing of the hollow axle and the machining of the inner longitudinal through-hole, while retaining all the use advantages of the hollow axle in the wheelsets of the rolling stock.

### LIST OF REFERENCE LINKS

1. Вагоны : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / Л. А. Шадур, И. И. Челноков, Л. Н. Никольский и др. – Москва : Транспорт, 1980. – 439 с.
2. Данилов, Д. В. Исследование НДС колесной пары при прохождении криволинейных участков пути / Д. В. Данилов, А. Г. Андреев // Вісн. НТУ «ХПІ». – Х., 2013. – Вип. 58 (1031). – С. 63–70.
3. Длительные эксплуатационные испытания колесных пар с полыми осями / Л. М. Школьник, Н. И. Мартынов, В. В. Новиков и др. // Вестн. ВНИИЖТа. – 1980. – № 4. – С. 36–41.
4. Краткий обзор мирового рынка колесных пар и колес для вагонных тележек [Electronic resource]. – Access Mode: <http://ukrbascompany.at.ua/>. – Title from the screen. – Accessed : 02.06.2014.
5. Лубенская, Л. М. Повышение эксплуатационных свойств осей колесных пар за счет упрочнения их поверхности / Л. М. Лубенская, П. В. Колодяжный // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 38. – С. 41–46.
6. Мямлін, С. В. Порівняльна оцінка опору втому матеріалу напівоброблених осей, виготовлених за прогресивними технологіями / С. В. Мямлін, В. Л. Горобець, О. М. Бондарев // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 41. – С. 35–42.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

7. Оси черновые (заготовки профильные) для подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм. Технические условия: ГОСТ 30272-96 [Electronic resource]. – Введ. 01.01.1998 с изм. и доп. от 01.08.2003. – Москва : ИПК Изд-во стандартов, 2003. – 19 с. – Available at: <http://vsegost.com/Catalog/71/7181.shtml#7182>. – Title from the screen. – Accessed : 02.05.2014.
8. Расщупкин, В. П. Дефекты металла: учеб. пособие / В. П. Расщупкин, М. С. Корытов. – Омск : Изд-во СиБАДИ, 2006. – 36 с.
9. Харитонов, М. И. Изучение конструкции колесных пар, осей и колес / М. И. Харитонов, В. Н. Панкин. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2009. – 25 с.
10. Целиков, А. И. Непрерывные процессы в металлургии и машиностроении [Electronic resource] // В мире науки. – 1983. – Вып. 12. – Available at: <http://vivovoco.astronet.ru/VV/JOURNAL/SCIAM/METAL/METAL.HTM>. – Title from the screen. – Accessed : 02.06.2014.
11. Crack Growth Studies in Railway Axles under Corrosion Fatigue: Full-scale Experiments and Model Validation / S. Beretta, M. Carbonia, A. Lo Contea [et al.] // Procedia Engineering. – 2011. – № 10. – P. 3650–3655. doi: 10.1016/j.proeng.2011.04.601.
12. Fatigue tests of railway axles / M. Novosad, R. Fajkoš, B. Reha, R. Reznicek // Procedia Engineering. – 2010. – Vol. 2. – Iss. 1. – P. 2259–2268. doi: 10.1016/j.proeng.2010.03.242.
13. Murawa, F. Axles – Requirements and realization [Radsatzwellen – Anforderungen und Verwirklichung] / F. Murawa // Materialpruefung/Materials Testing. – 2011. – Vol. 53. – Iss. 4. – P. 198–205.

С. Р. КОЛЕСНИКОВ<sup>1\*</sup>, Н. Р. РОМАНИУХА<sup>2</sup>, И. Ю. КЕБАЛ<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Проектно-конструкторское технологическое бюро, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 371 51 12, эл. почта [blaze777@inbox.ru](mailto:blaze777@inbox.ru), ORCID 0000-0002-0487-9257\$

<sup>2</sup>Проектно-конструкторское технологическое бюро, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 371 51 12, эл. почта [romaniuha.nikolay@gmail.com](mailto:romaniuha.nikolay@gmail.com), ORCID 0000-0002-9514-6365

<sup>3</sup>Проектно-конструкторское технологическое бюро, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 371 51 12, эл. почта [sphyhernter-08@mail.ru](mailto:sphyhernter-08@mail.ru), ORCID 0000-0002-8408-8294

## ОСЬ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ С ПОЛОСТЬЮ ПОСТОЯННОГО СЕЧЕНИЯ

**Цель.** Вследствие эксплуатации в сложных условиях нагружения колёсные пары подвижного состава железных дорог должны обеспечивать высокую надёжность, так как от них во многом зависит безопасность движения поездов. Конструкция и техническое состояние колёсных пар оказывают влияние на плавность хода, величину сил, возникающих при взаимодействии вагона и пути, и сопротивление движению. Специфика работы оси заключается в том, что при нагружении она испытывает изгибные напряжения, которые по площади поперечного сечения распределяются неравномерно, достигая наибольших значений в наружных и наименьших – во внутренних волокнах. Это обстоятельство ставит задачу замены сплошного сечения оси полым. К недостаткам конструкции полых осей, применяемых в настоящее время, следует отнести значительную сложность изготовления полости переменного сечения. Целью работы является создание модернизированной конструкции оси колесной пары. **Методика.** Предложена конструкция полой оси, имеющей внутреннее продольное сквозное отверстие цилиндрической формы постоянного диаметра по всей длине. Деталь изготавливается из стальной цельнокатаной трубы. Внутреннюю поверхность трубы обрабатывают механическим способом для снятия концентраций напряжений во внутреннем продольном сквозном отверстии цилиндрической формы, который имеет постоянный диаметр по всей длине оси. **Результаты.** Применение данной конструкции позволит упростить изготовление полой оси и механическую обработку внутреннего продольного сквозного отверстия, сохраняя при этом все преимущества применения полой оси в колесных парах подвижного состава. Еще одним преимуществом применения полой оси данной конструкции является отсутствие частичной неоднородности металла, неизменно возникающей при производстве заготовок сплошных осей. **Научная новизна.** Разработана новая конструкция полой оси колесной пары подвижного состава железных дорог. **Практическая значимость.** Внедрение новой конструкции, упрощающей изготовление и механическую обработку внутренней полости оси колесной пары, принесет значимый экономический эффект. Согласно предварительным расчетам применение оси 4 с полостью постоянного сечения позволит снизить расход металла на 100–110 кг.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

*Ключевые слова:* колесная пара; сплошная ось колесной пары; полая ось колесной пары; подвижной состав железных дорог; железнодорожный вагон; неподрессоренная масса вагона

С. Р. КОЛЕСНИКОВ<sup>1\*</sup>, Н. Р. РОМАНИУХА<sup>2</sup>, І. Ю. КЕБАЛ<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Проектно-конструкторське технологічне бюро, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 371 51 12, ел. пошта blaze777@inbox.ru, ORCID 0000-0002-0487-9257\$

<sup>2</sup>Проектно-конструкторське технологічне бюро, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 371 51 12, ел. пошта romaniuha.nikolay@gmail.com, ORCID 0000-0002-9514-6365

<sup>3</sup>Проектно-конструкторське технологічне бюро, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 371 51 12, ел. пошта blaze spyhernter-08@mail.ru, ORCID 0000-0002-8408-8294

## ВІСЬ КОЛІСНОЇ ПАРИ З ПОРОЖНИНОЮ ПОСТІЙНОГО ПЕРЕРІЗУ

**Мета.** Внаслідок експлуатації в складних умовах навантаження колісні пари рухомого складу залізниць повинні забезпечувати високу надійність, так як від них багато в чому залежить безпека руху поїздів. Конструкція та технічний стан колісних пар впливають на плавність ходу, величину сил, що виникають при взаємодії вагона та колії, а також опір руху. Специфіка роботи осі полягає в тому, що при навантаженні вона відчуває напруги вигинів, які за площею поперечного перерізу розподіляються нерівномірно, досягаючи найбільших значень у зовнішніх і найменших – у внутрішніх волокнах. Ця обставина ставить задачу заміни суцільного перерізу осі порожнистим. До недоліків конструкції порожнистих осей, вживаних у даний час, слід віднести значну складність виготовлення порожнини змінного перерізу. Метою роботи є створення модернізованої конструкції осі колісної пари. **Методика.** Запропоновано конструкцію порожнистої осі, що має внутрішній поздовжній наскрізний отвір циліндричної форми постійного діаметра по всій довжині. Деталь виготовляється зі сталеві суцільнокатані труби. Внутрішню поверхню труби обробляють механічним способом для зняття концентрацій напружень у внутрішньому поздовжньому наскрізному отворі циліндричної форми, який має постійний діаметр по всій довжині осі. **Результати.** Застосування даної конструкції дозволить спростити виготовлення порожнистої осі та механічну обробку внутрішнього поздовжнього наскрізного отвору, зберігаючи при цьому всі переваги застосування порожнистої осі в колісних парах рухомого складу. Ще однією перевагою застосування порожнистої осі даної конструкції є відсутність часткової неоднородності металу, що незмінно виникає при виробництві заготовок суцільних осей. **Наукова новизна.** Розроблено нову конструкцію порожнистої осі колісної пари рухомого складу залізниць. **Практична значимість.** Впровадження нової конструкції, що спрощує виготовлення та механічну обробку внутрішньої порожнини осі колісної пари, принесе значущий економічний ефект. Згідно з попередніми розрахунками застосування осі з порожниною постійного перетину дозволить знизити витрату металу на 100-110 кг.

*Ключові слова:* колісна пара; суцільна вісь колісної пари; порожниста вісь колісної пари; рухомий склад залізниць; залізничний вагон; безпружинна маса вагона

### REFERENCES

1. Shadur L.A., Chelnokov I.I., Nikolskiy L.N. *Vagony* [Cars]. Moscow, Transport Publ., 1980. 439 p.
2. Danilov D.V., Andreyev A.G. Issledovaniye NDS kolesnoy pary pri prokhozhdenni krivolinyenykh uchastkov puti [Research of the stress-strain state of wheelset when passing the curved track sections]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiyi politekhnichnyi instytut»* [Bulletin of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institution»], 2013, issue 58 (1031), pp. 63-70.
3. Shkolnik L.M., Martynov N.I., Novikov V.V. Dlitelnyye ekspluatatsionnyye ispytaniya kolesnykh par s polymi osyami [Long time operation testes of the wheel sets with the hollow axles]. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Bulletin of All-Russian Research Institute of Railway Transport*, 1980, no. 4, pp. 36-41.
4. *Kratkiy obzor mirovogo rynka kolesnykh par i koles dlya vagonnykh telezhek* (Brief review of the world market of the wheels and wheelsets for car bogies). Available at: <http://ukrbascompany.at.ua/> (Accessed 02 June 2014).

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

5. Lubenskaya L.M., Kolodyazhnyy P.V. Povysheniye ekspluatatsionnykh svoystv osey kolesnykh par za schet uprochneniya ikh poverkhnosti [Improving the performance properties of wheelset axles due to hardening of their surface]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 38, pp. 41-46.
6. Miamlin S.V., Horobets V.L., Bondariyev O.M. Porivnialna otsinka oporu vtomi materialu napivobroblyenykh osei, vyhotovlenykh za prohresyvnymy tekhnolohiiamy [Comparative evaluation of resistance to the material fatigue of the semi processed axles made by advanced technologies]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 41, pp. 35-42.
7. GOST 30272-96. Osi chernovyie (zagotovki profilnye) dlya podvizhnogo sostava zheleznykh dorog kolei 1520 mm. Tekhnicheskie usloviya [State Standard 30272-96. Draft axles (profile billets) for railway rolling stock with the track of 1520 mm. Specifications]. Moscow, IPK Izd-vo standartov Publ., 2003. 19 p.
8. Rasshchupkin V.P., Korytov M.S. Defekty metalla [Metal defects]. Omsk, Izd-vo SibADI Publ., 2006. 36 p.
9. Kharitonov M.I., Pankin V.N. Izucheniye konstruksii kolesnykh par, osey i koles [Study of the structure of wheel sets, axles and wheels]. Khabarovsk, Izd-vo DVGUPS Publ., 2009. 25 p.
10. Tselikov A.I. Nepreryvnyye protsessy v metallurgii i mashinostroyenii (Uninterrupted processes in metallurgy and mechanical engineering). *V mire nauki* (In the world of science), 1983, issue 12. Available at: <http://vivovoco.astronet.ru/VV/JOURNAL/SCIAM/METAL/METAL.HTM> (Accessed 02 June 2014).
11. Beretta S., Carbonia M., Lo Conte A., Regazzia D., Trasattib S., Rizzib M. Crack Growth Studies in Railway Axles under Corrosion Fatigue: Full-scale Experiments and Model Validation. *Procedia Engineering*, 2011, no. 10, pp. 3650-3655. doi: 10.1016/j.proeng.2011.04.601.
12. Novosad M., Fajkoš R., Reha B., Reznicek R. Fatigue tests of railway axles. *Procedia Engineering*, 2010, vol. 2, issue 1, pp. 2259-2268. doi: 10.1016/j.proeng.2010.03.242.
13. Murawa F. Axles – Requirements and realization [Radsatzwellen – Anforderungen und Verwirklichung]. *Materialpruefung/Materials Testing*, 2011, vol. 53, issue 4, pp. 198-205.

*Prof. S. V. Myamlin, D. Sc. (Tech.); Senior Researcher, N. Yu. Naumenko, Ph.D. (Tech.) recommended this article to be published*

Received: June 09, 2014

Accepted: Aug. 21, 2014

## UDC 629.463.65.027.2

S. V. MYAMLIN<sup>1</sup>, V. M. BUBNOV<sup>2</sup>, YE. O. PYSMENNYI<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Dep. «Cars and Car Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St. 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 776 84 98, e-mail sergeymyamin@gmail.com., ORCID 0000-0002-7383-9304

<sup>2</sup>JSC «Main Specialized Design Bureau of Car Building named after Valerii Mykhailovych Bubnov», Mashynobudivnyky Sq., 1, Donetsk region, Mariupol, Ukraine, 87535, tel. +38 (0629) 56 08 67, e-mail bubnov@azovmash.com, ORCID 0000-0002-5896-801X

<sup>3\*</sup>Research Institute of the Rolling Stock, Track and Transport Constructions, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St. 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (0562) 33 55 38, e-mail diit\_nda@ua.fm, ORCID 0000-0003-1957-0292

## INVESTIGATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF GONDOLA CARS ON PERSPECTIVE BOGIES

**Purpose.** In this paper, it is necessary to examine the dynamic properties of the gondola car with bogies, model 18-1711 when it moves on straight and curved sections of a track. **Methodology.** The calculations were performed using the object-oriented programming on the program "Dynamics of Rail Vehicles" ("DYNRAIL" Myamlin S.V. registered 20.03.2003). Mathematical models of a gondola car and bogies 18-100 and 18-711 were created for the calculations. **Findings.** Dynamic performances comparison of the gondola car with bogies 18-1711 and the gondola car with bogies 18-100, obtained by calculation method was carried out. **Originality.** Firstly calculations in order to determine the dynamic properties of the gondola car with bogies 18-1711 when it moves on straight and curved sections of track were performed. At the same time an assessment of the dynamic characteristics of the gondola car was made. The following dynamic standards were determined: the coefficient of vertical dynamics ( $C_{dv}$ ), the coefficient of horizontal dynamics ( $C_{dh}$ ), and the safety factor against derailment ( $SF_d$ ). Track irregularities in vertical and horizontal transverse planes were assigned as perturbations. They should be so that the dynamic indexes of the widely used in operation gondola car on bogies model 18-100 keep in admissible range of speeds up to 80km / h for the empty gondola car and at speeds up to 90km / h for the loaded gondola cars. **Practical value.** As a result of the calculations and comparisons of their results, we have findings that the use of bogies with bilinear characteristic of the central suspension will improve the dynamic performances of gondola cars, currently operating on bogies, model 18-100. And by improving the dynamic performances it is possible to increase the permissible speeds of these cars motion.

*Keywords:* dynamic qualities of gondola car; bogie of the model 18-1711; dynamic performances of gondola car

### Introduction

The design of cars improvement and increase of train speeds requires solution of a question concerning safety in operating, reliability of rolling stock and a track. In seeking to resolve such matter the important factor is operations on modernization of existing ones and creation of new structures of a truck. Dynamic and strength qualities of cars in general depend on their workability.

These requirements were the basis for the development of a new freight bogie, model 18-1711 with increased axle load [3, 7].

The bogie 18-1711 is a three-element structure consisting of two side frames and a bolster. In the bogie the central bilinear suspension and friction wedge-type shock absorbers of spatial actions were implemented.

One of the bogie 18-1711 features is the presence of elastic coupling between the side frames

and wheel sets implementing through the herring-bone absorber that works in all three planes. Therefore, the bogie 18-1711 can be considered as having two stages of suspension.

### Purpose

The aim of this work is the dynamic properties research of the gondola car with bogies, model 18-1711 when it moves on straight and curved sections of a track and their comparison with the dynamic qualities of the gondola car with bogies, model 18-100. Results comparison of such calculations will determine the direction of scientific research in order to improve the dynamic qualities of gondola cars.

### Methodology

A mathematical model of bogies, model 18-1711 was built in this study. The dynamic characteris-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

tics of the gondola car in empty and loaded state, when it is installed on these trucks were determined too [1, 2].

Dynamic properties determination of gondola cars with bogies 18-1711 was performed during its movement on straight and curved sections of a track. At the same time the dynamic characteristics evaluation of the gondola cars was carried out ac-

ording to the following regulatory dynamic parameters: coefficient of vertical dynamics ( $C_{dv}$ ), the coefficient of horizontal dynamics ( $C_{dh}$ ), the safety factor against derailment ( $SF_d$ ) [4, 5].

For the calculations a typical gondola car with the following inertia characteristics was chosen (table 1).

Table 1

**Inertial parameters of gondola cars objects (in the numerator – loaded, in the dominator – empty)**

Object	Weight [t]	Moments of inertia [ $t \cdot m^2$ ]			Coordinates of the center of mass [m]		
		Jz	Jy	Jx	X	Y	Z
1	2	3	4	5	6	7	8
Basis	0	0	0	0	0	0	0
Bogie 1							
Left rail 1	0,5	0	0	0	0	-0,79	0
Right rail 1	0,5	0	0	0	0	0,79	0
Wheelset 1	1,37	1	0,1	1	0	0	0,475
Left rail 2	0,5	0	0	0	1,85	-0,79	0
Right rail 2	0,5	0	0	0	1,85	0,79	0
Wheelset 2	1,37	1	0,1	1	1,85	0	0,475
The left side frame 1	0,68	0,22	0,22	0	0,925	-1,02	0,5
The Right side frame 1	0,68	0,22	0,22	0	0,925	1,02	0,5
Bogie-bolster 1	0,45	0,3	0,05	0,3	0,925	0	0,6
Bogie 2							
Left rail 3	0,5	0	0	0	8,66	-0,79	0
Right rail 3	0,5	0	0	0	8,66	0,79	0
Wheelset 3	1,37	1	0,1	1	8,66	0	0,475
Left rail 4	0,5	0	0	0	10,51	-0,79	0
Right rail4	0,5	0	0	0	10,51	0,79	0
Wheelset 4	1,37	1	0,1	1	10,51	0	0,475
The left side frame 2	0,68	0,22	0,22	0	9,585	-1,02	0,5
The right side frame 2	0,68	0,22	0,22	0	9,585	1,02	0,5
Bogiebolster 2	0,45	0,3	0,05	0,3	9,585	0	0,6
Body							
Body	76,5/12,3	1100/215	1050/214	75/24,6	5,255	0	1,92/1,67

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

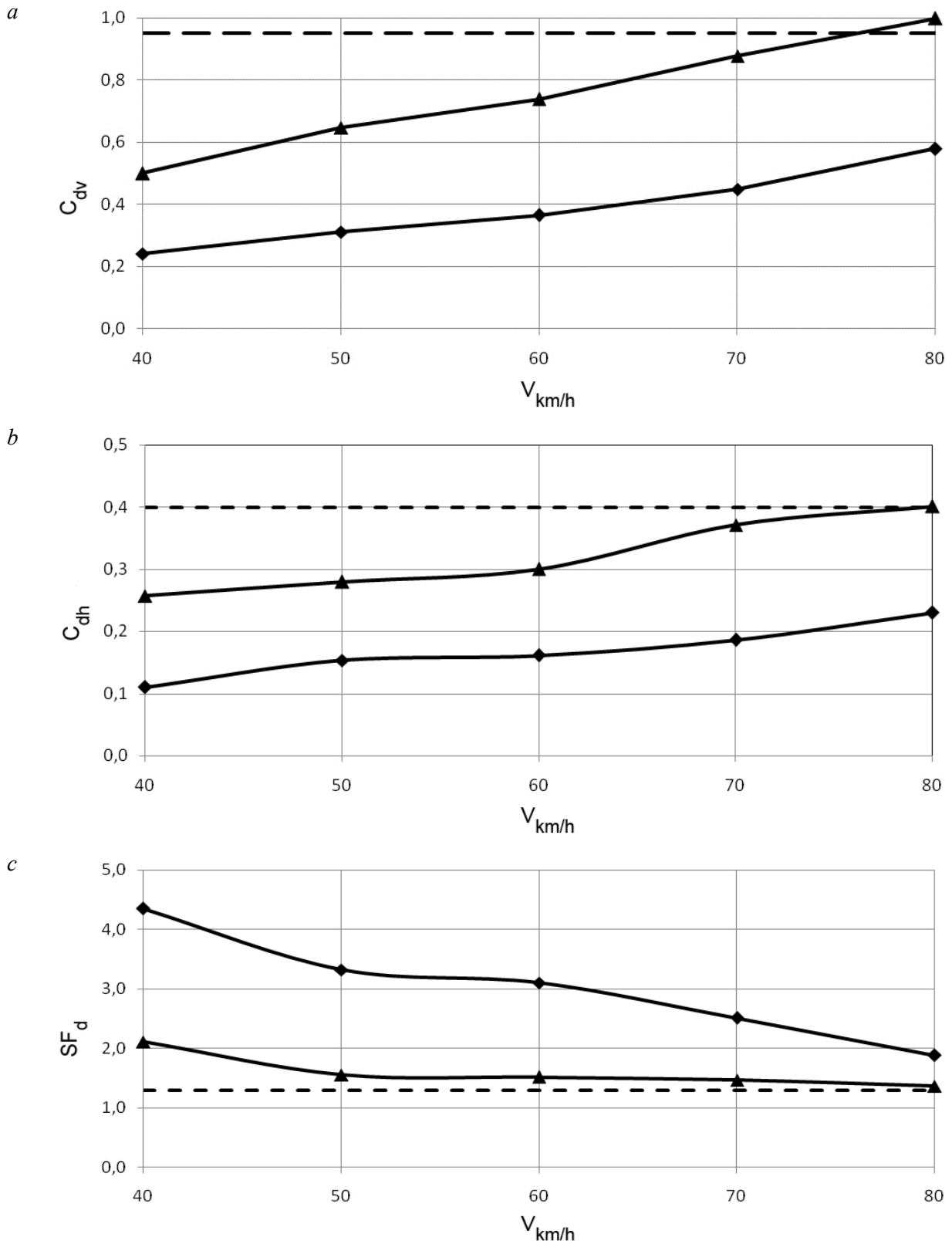


Fig. 1. Dependence graphs of the dynamic parameters of the empty gondola car on the speed movement (Direct):  
*a* – coefficients of the vertical dynamics; *b* – coefficients of the horizontal dynamics; *c* – the safety factor

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

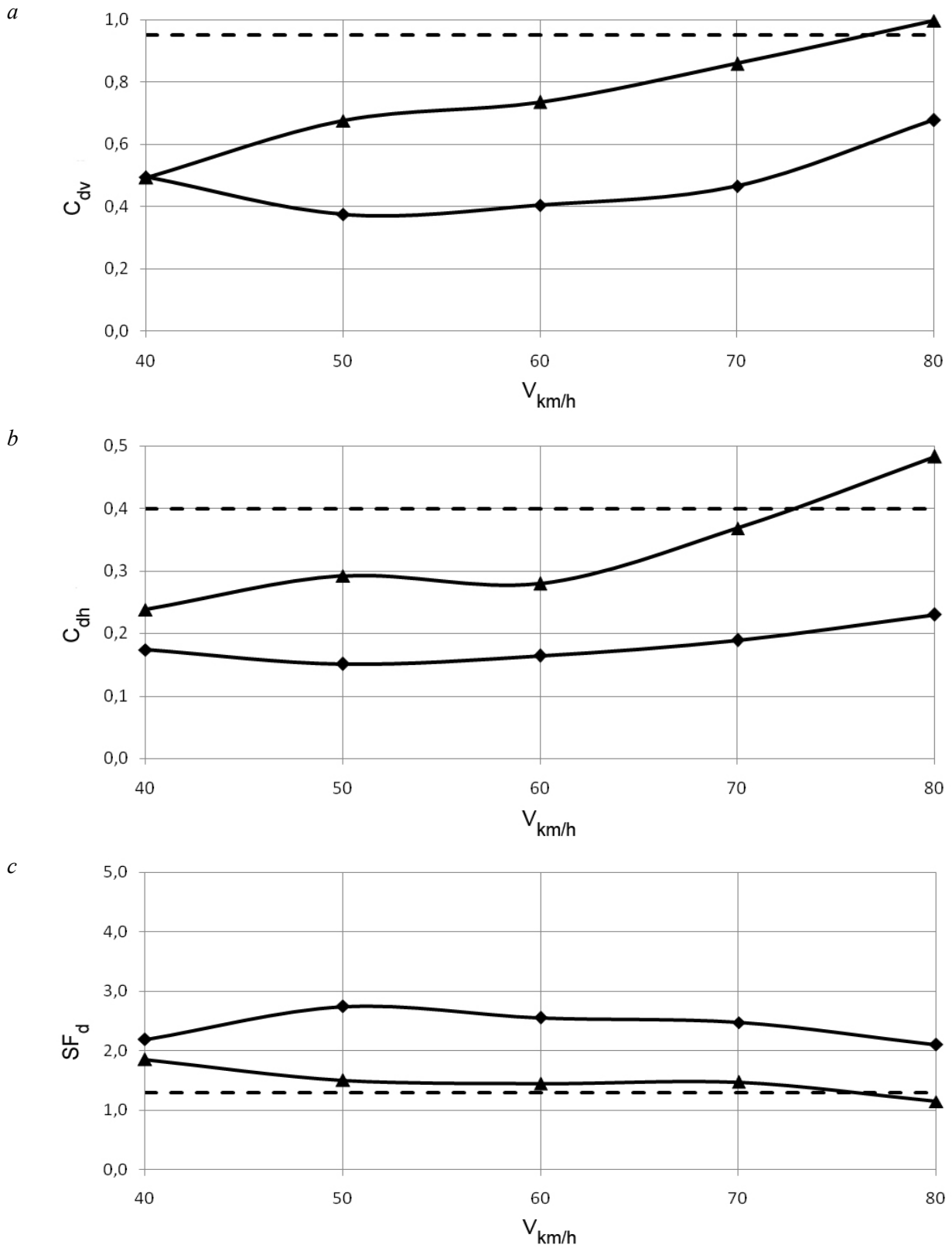


Fig. 2. Dependence graphs of the dynamic parameters of the empty gondola car on the speed movement (Curve 600 m):  
*a* – coefficients of vertical dynamics; *b* – coefficients of the horizontal dynamics; *c* – the safety factor

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

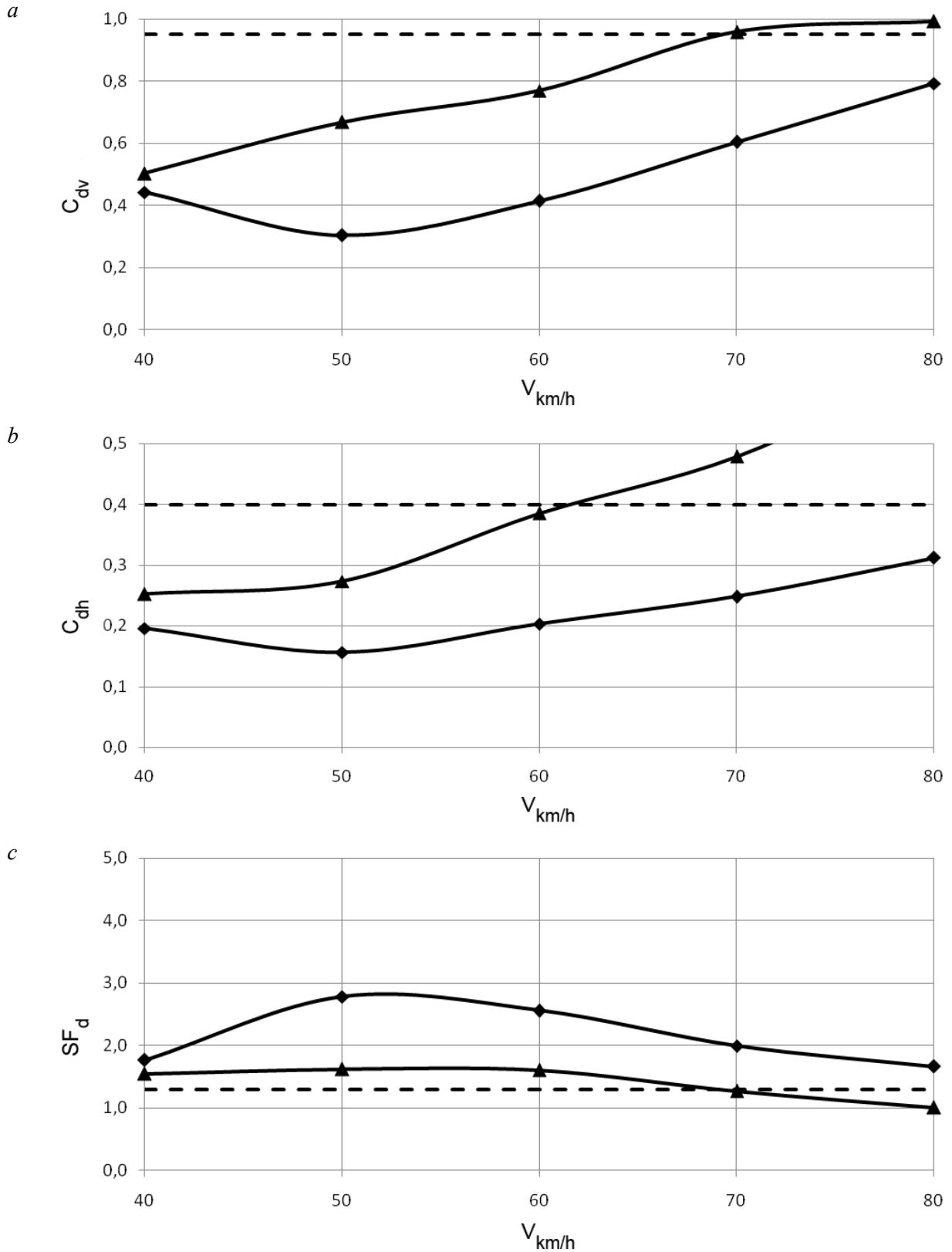


Fig. 3. Dependence graphs of the dynamic parameters of the empty gondola car on the speed movement (Curve 300 m):  
*a* – coefficients of vertical dynamics; *b* – coefficients of the horizontal dynamics; *c* – the safety factor

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

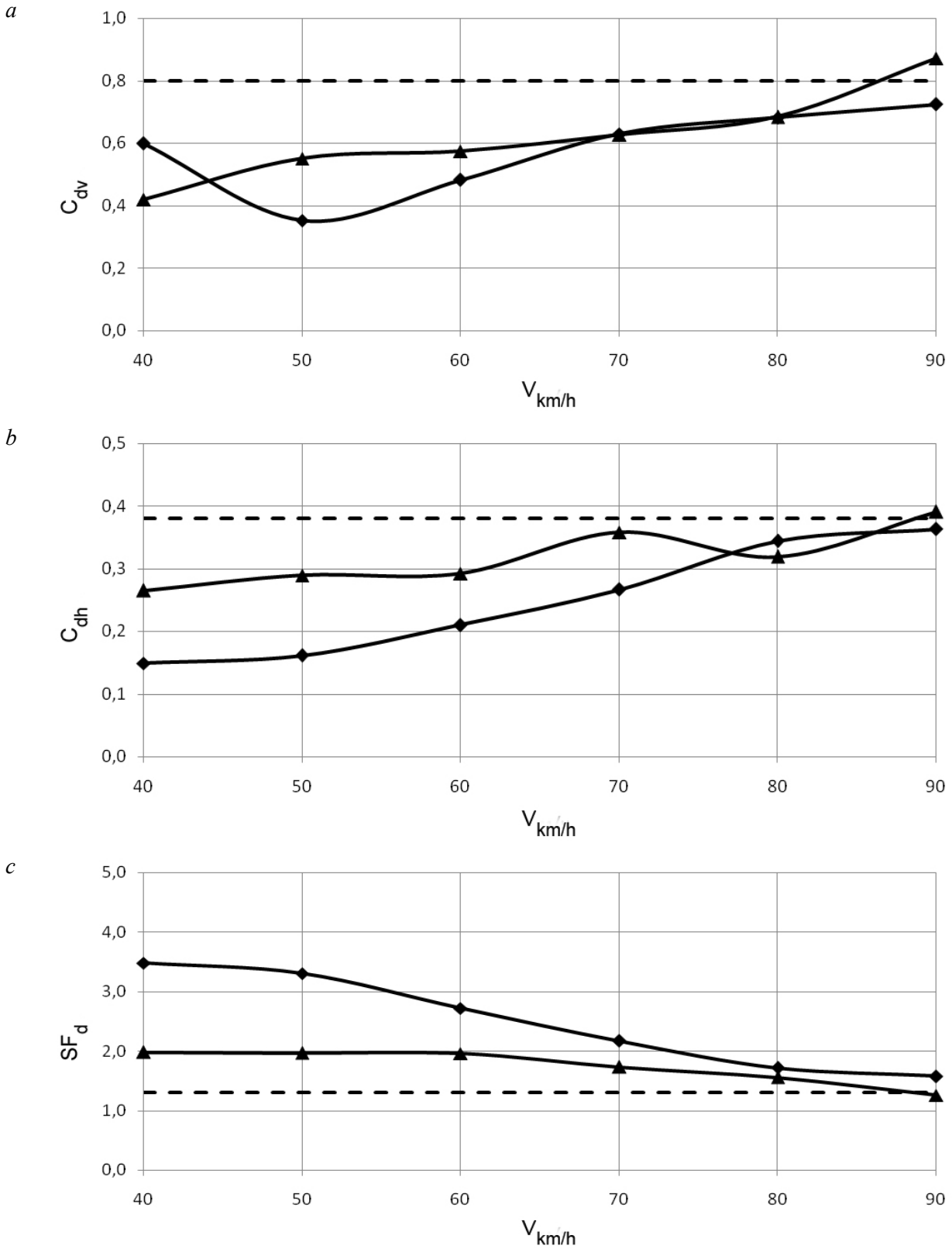


Fig. 4. Dependence graphs of the dynamic parameters of the loaded gondola car on the speed movement (Direct):  
*a* – coefficients of vertical dynamics; *b* – coefficients of the horizontal dynamics; *c* – the safety factor

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

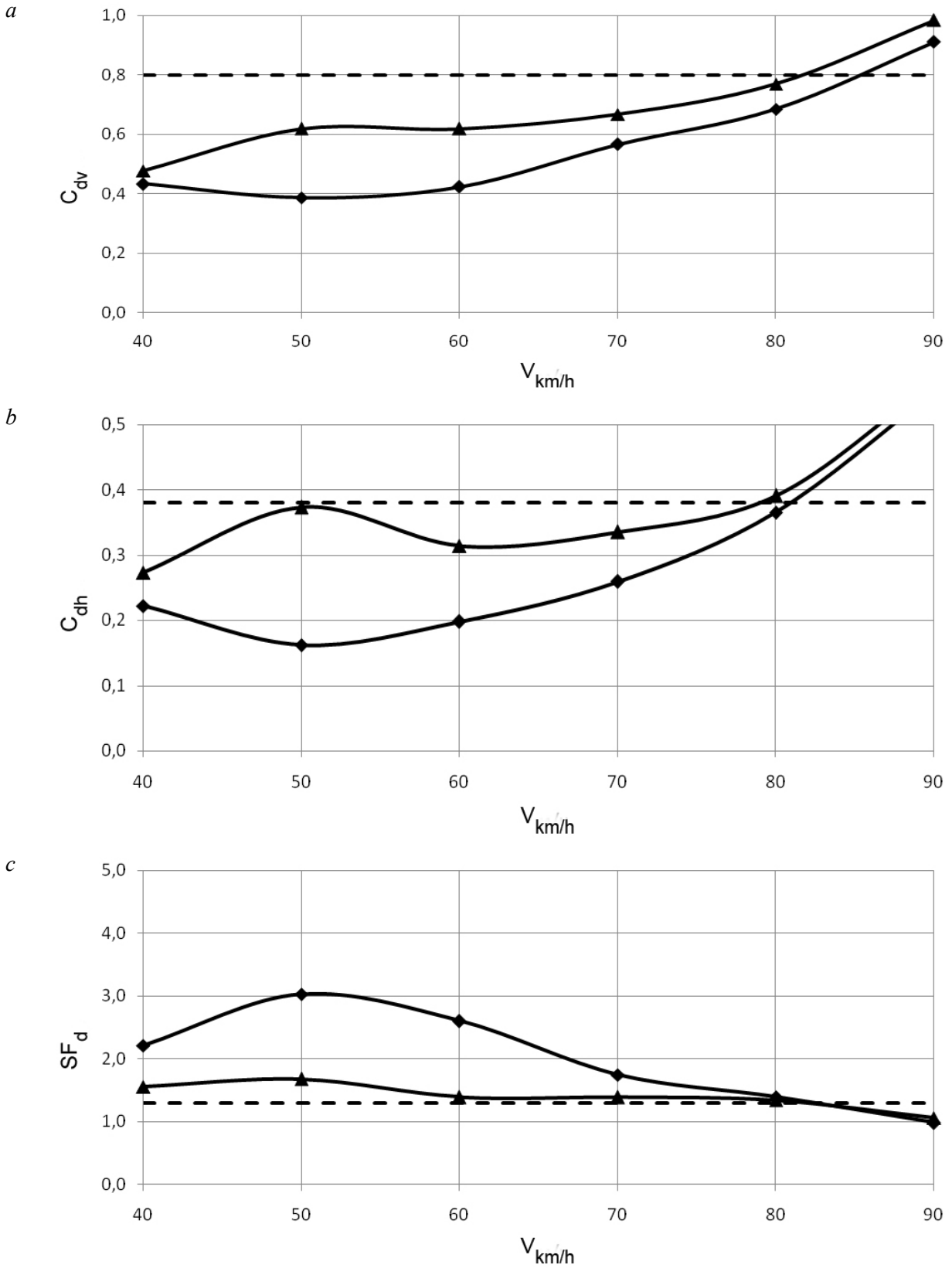


Fig. 5. Dynamic indexes of the loaded gondola car (Curve 600 m)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

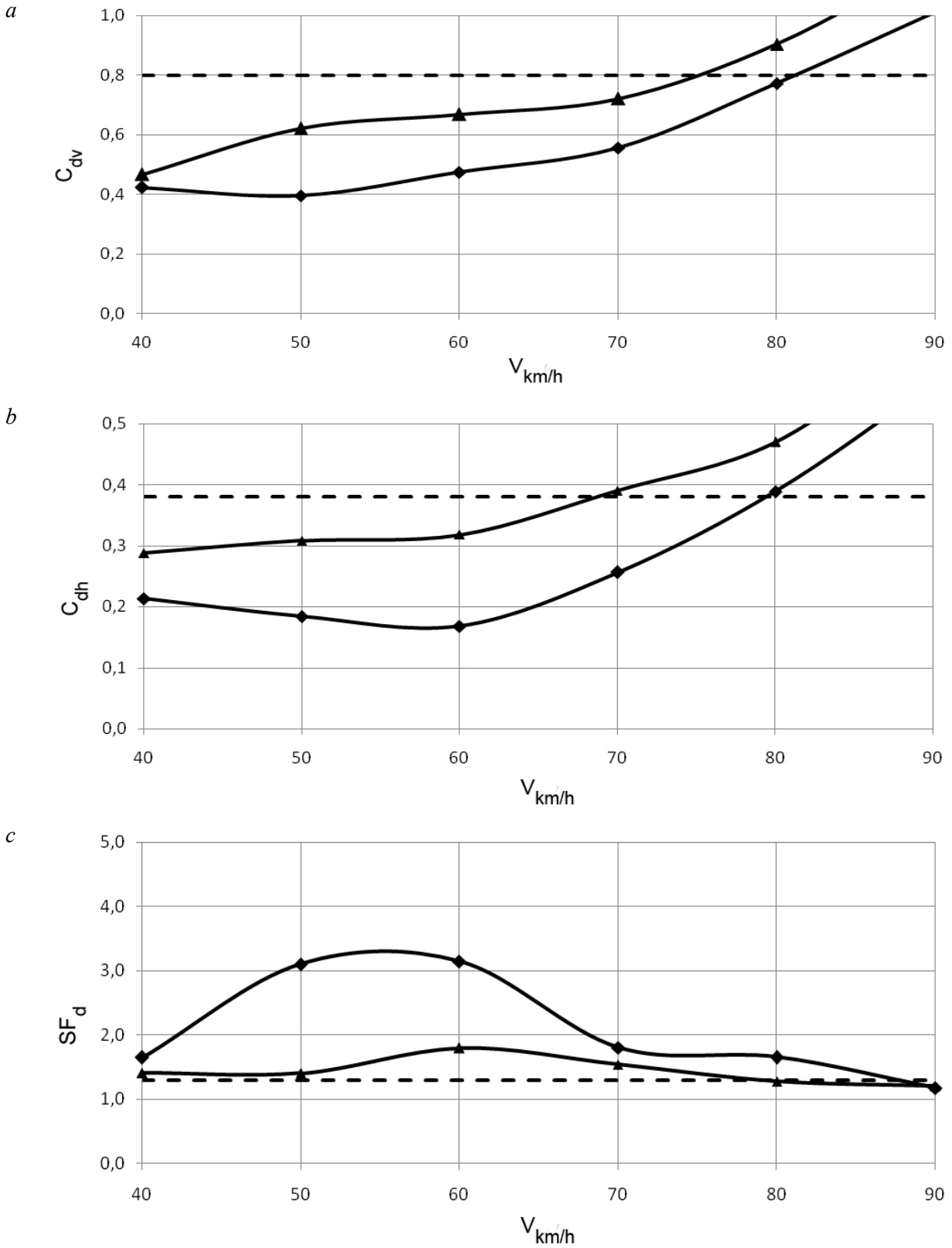


Fig. 6. Dependence graphs of the dynamic parameters of the loaded gondola car on the speed movement (Curve 600 m):  
*a* – coefficients of vertical dynamics; *b* – coefficients of the horizontal dynamics; *c* – the safety factor

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Maximum permissible values of determined dynamic parameters for gondola cars with bogies having over axle box suspension are presented in the Table 2.

Table 2

**The maximum permissible values of the main dynamic parameters for gondola cars with the bogie, model 18-1711**

Index	Index value	
	Empty	Loaded
Coefficient of vertical dynamics ( $C_{dv}$ )	0,95	0,8
Frame strength (fs)	0,4	0,38
Safety factor (SF)	1,4	1,4

The calculations were performed using the object-oriented programming on the program "Dynamics of Rail Vehicles" ("DYNRAIL" Myamlin S. V. registered 20.03.2003). Mathematical models of a gondola car and bogies 18-100 and 18-711 were created for the calculations [6, 8, 9].

In order to compare the obtained results calculations were performed for gondola cars on bogies of the typical model 18-100 and new bogie 18-1711.

Track irregularities in vertical and horizontal transverse planes were assigned as perturbations. They should be so that the dynamic indexes, of the widely used in operation gondola cars on bogies, model 18-100 keep in admissible range of speeds up to 80 km/h for the empty gondola car and at speeds up to 90 km/h for the loaded gondola cars.

Next, movement simulation of empty and loaded cars on straight and curved section of a track with middle (600 m) and small (300 m) radii with the above mentioned irregularities of tracks was carried out. The results of these calculations will be used as reference values for comparison of them with the results for the gondola car on the bogies, model 18-1711 [10-14].

### Findings

In all the figures the results for cars on bogies 18-100 are shown by the line with a triangular marker and for cars on bogies 18-1711 – by the line with rhomboid markers.

Analysis of the results obtained during the research let us make the following conclusions:

1. The use of the spring grouping bogie with a bilinear characteristic in the central stage of sus-

pension has improved dynamic performances of described gondola cars.

2. To a large extent dynamic performances of empty gondola cars have improved in comparison with loaded. This explains the fact that the static deflection of spring grouping in the empty gondola car is on a section characteristic with less rigidity. Dynamic performances of loaded gondola cars on bogies, model 18-1711, were improved too, though to a lesser extent.

Improving the dynamic performances is more evident in the modeling of freight gondola cars motion on a straight section of the track than at motion on curve of medium and small radii. This is due to the fact that the dynamic performances of gondola cars during motion on curves are largely determined by the centrifugal forces that operate on cars.

### Originality and practical value

Firstly calculations to determine the dynamic performances of gondola cars with bogies, model 18-1711 during its motion on straight and curved sections of the track were carried out. At the same time the assessment of dynamic characteristics of a gondola car was made and the following regulatory dynamic performances were identified: the coefficient of the vertical dynamics ( $C_{dv}$ ), the coefficient of horizontal dynamics ( $C_{dh}$ ), and the stability factor against derailment ( $SF_d$ ). The use of bogies with bilinear characteristic of the central suspension will improve the dynamic performances of gondola cars, currently operating on bogies, model 18-100. And by improving the dynamic performances it may increase the permissible speed of these cars.

### Conclusions

Analysis of the calculations results and comparison of dynamic parameters of the gondola car with bogies 18-1711 and the gondola car with bogies 18-100 shows that the bilinear characteristic of the central suspension of freight car bogie has a positive effect on its dynamic performances both during motion on a straight sector and in the curved sections of the track. Besides the dynamic performances improvements are more pronounced in the gondola car in empty state. Thus, the use of bogies 18-1711 with bilinear characteristic of the central suspension for gondola cars will enable to

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

increase the maximum permissible motion speeds in unloaded state, which is very actual for modern railway transportations.

## LIST OF REFERENCE LINKS

1. Бубнов, В. М. Воздействие на путь грузовых вагонов на тележках моделей 18-1711 с разной конструкцией клина рессорного подвешивания / В. М. Бубнов, С. В. Мямлин, Н. Б. Манкевич // Трансп. Рос. Федерации. – 2013. – № 3. – С. 36–38.
2. Коваленко, А. В. Силовое взаимодействие пути и грузового вагона с упругими связями колесных пар с рамой тележки : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Коваленко Александр Владимирович. – М. : ВНИИЖТ, 2006. – 28 с.
3. Конструирование и расчет вагонов : учебник / В. В. Лукин [и др.] ; под ред. П. С. Анисимова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : ФГОУ УМЦ ЖДТ, 2011. – 688 с.
4. Моделирование пространственных колебаний поезда / С. В. Мямлин, Е. А. Письменный, В. В. Жижко, И. В. Юрцевич // Вестн. ВНИИЖТа. – 2008. – № 3. – С. 45–47.
5. Мямлин, С. В. Моделирование динамики рельсовых экипажей / С. В. Мямлин. – Д. : Новая идеология, 2002. – 240 с.
6. Объектно-ориентированная математическая модель пространственных колебаний рельсовых экипажей / А. Н. Пшинько, С. В. Мямлин, В. И. Приходько, Е. А. Письменный // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2005. – Вип. 7. – С. 87–90.
7. Параметры тележки грузового вагона и безопасность движения / И. И. Галиев, В. А. Нехаев, В. А. Николаев, Г. И. Давыдов // Ж.-д. трансп. – 2003. – № 3. – С. 36–40.
8. Свидетельство о регистрации авторского права на произведение № 7305. Компьютерная программа «Dynamics of Rail Vehicles» («DYNRAIL») / С. В. Мямлин ; зарег. 20.03.2003. – 1 с.
9. Boronenko, Yu. Influence of construction schemes and parameters of three-piece freight bogies on wagon stability, ride and curving qualities / Yu. Boronenko, A. Orlova, E. Rudakova // Vehicle System Dynamics. – 2006. – Vol. 44. – P. 402–414. doi: 10.1080/00423110600872341.
10. Bubnov, V. M. Dynamic performance of freight cars on bogies model 18-1711 / V. M. Bubnov, S. V. Myamlin, N. B. Mankevych // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2013. – № 4. – С. 118–126.
11. Determination of dynamic performance of freight cars taking into account technical condition of side bearers / S. Myamlin, L. Neduzha, O. Ten, A. Shvets // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2013. – № 1. – С. 162–169.
12. Garg, V. K. Dynamics of Railway Vehicle Systems / V. K. Garg, R. V. Dukkipati. – New York : Academic Press, 1984. – 407 p.
13. Guidelines to best practices for heavy haul railway operations: wheel and rail interface issues. – Virginia Beach, Va : Intern. Heavy Haul Association, 2001. – 408 p.
14. On measuring vertical forces in freight car bogies / O. Pshin'ko, L. Manashkin, B. Bodnar, S. Myamlin // Vehicle system dynamics, identification and anomalies (8.11–10.11.2004) : Proc. of 9th mini Conf. – Budapest, 2004. – P. 11–12.

С. В. МЯМЛІН<sup>1</sup>, В. М. БУБНОВ<sup>2</sup>, Є. О. ПИСЬМЕННИЙ<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 776 84 98, ел. пошта sergeyuyamlin@gmail.com, ORCID 0000-0002-7383-9304

<sup>2</sup>ТОВ «Головне спеціалізоване конструкторське бюро вагонобудування ім. Валерія Михайловича Бубнова», пл. Машинобудівників, 1, Донецька обл., Маріуполь, Україна, 87535, тел. +38 (0629) 56 08 67, ел. пошта bubnov@azovmash.com, ORCID 0000-0002-5896-801X

<sup>3\*</sup>Науково-дослідний інститут рухомого складу, колії та транспортних споруд, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (0562) 33 55 38, ел. пошта diit\_ndi@ua.fm, ORCID 0000-0003-1957-0292

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПІВВАГОНІВ НА ПЕРСПЕКТИВНИХ ВІЗКАХ

**Мета.** У роботі необхідно дослідити динамічні якості піввагону з візками моделі 18-1711 при його русі по прямолінійних і криволінійних ділянках колії. **Методика.** Розрахунки проводилися за допомогою об'єктно-орієнтованого програмування на програмі «Dynamics of Rail Vehiles» («DYNRAIL» Мямлін С. В. заре-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

естр. 20.03.2003 р.). Для розрахунків були створені математичні моделі піввагона та візків 18-100 і 18-1711. **Результати.** Виконано порівняння динамічних показників піввагону з візками 18-1711 та піввагону з візками 18-100, отриманих розрахунковим шляхом. **Наукова новизна.** Вперше виконано розрахунки по визначенню динамічних якостей піввагону з візками 18-1711 при його русі по прямолінійних і криволінійних ділянках колії. При цьому була виконана оцінка динамічних характеристик піввагона і визначено такі нормативні динамічні показники: коефіцієнт вертикальної динаміки ( $K_{дв}$ ), коефіцієнт горизонтальної динаміки ( $K_{дг}$ ), коефіцієнт стійкості від сходу коліс з рейок ( $K_y$ ). В якості збурень були задані геометричні нерівності колії у вертикальній і горизонтальній поперечній площинах, такі, щоб динамічні показники широко використовуваного в експлуатації піввагону на візках моделі 18-100 вкладалися в допустимий діапазон при швидкостях руху до 80 км/год для порожнього піввагону і при швидкостях до 90 км/год для навантаженого піввагону. **Практична значимість.** У результаті проведених розрахунків і порівняння їх результатів було встановлено, що застосування візків із білінійною характеристикою центрального підвішування дозволить поліпшити динамічні показники піввагонів, експлуатованих у даний час на візках моделі 18-100. І за рахунок поліпшення динамічних показників можливе збільшення допустимих швидкостей руху цих вагонів.

*Ключові слова:* динамічні якості піввагона; візок моделі 18-1711; динамічні показники піввагона

С. В. МЯМЛИН<sup>1</sup>, В. М. БУБНОВ<sup>2</sup>, Е. А. ПИСЬМЕННИЙ<sup>3\*</sup>

1Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 776 84 98, эл. почта sergeyuyamlin@gmail.com, ORCID 0000-0002-7383-9304

2ООО «Главное специализированное конструкторское бюро вагоностроения им. Валерия Михайловича Бубнова», пл. Машиностроителей, 1, Донецкая обл., г. Мариуполь, Украина, 87535, тел. +38 (0629) 56 08 67, эл. почта bubnov@azovmash.com, ORCID 0000-0002-5896-801X

3\*Научно-исследовательский институт подвижного состава, пути и транспортных сооружений, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (0562) 33 55 38, эл. почта diit\_ndi@ua.fm, ORCID 0000-0003-1957-0292

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУВАГОНОВ НА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕЛЕЖКАХ

**Цель.** В работе необходимо исследовать динамические качества полувагона с тележками модели 18-1711 при его движении по прямолинейным и криволинейным участкам пути. **Методика.** Расчеты производились с помощью объектно-ориентированного программирования на программе «Dynamics of Rail Vehiles» («DYNRAIL» Мямлин С. В. зарегестр. 20.03.2003 г.). Для расчетов были созданы математические модели полувагона и тележек 18-100 и 18-1711. **Результаты.** Выполнено сравнение динамических показателей полувагона с тележками 18-1711 и полувагона с тележками 18-100, полученных расчетным путем. **Научная новизна.** Впервые выполнены расчеты по определению динамических качеств полувагона с тележками 18-1711 при его движении по прямолинейным и криволинейным участкам пути. При этом была выполнена оценка динамических характеристик полувагона и определены следующие нормативные динамические показатели: коэффициент вертикальной динамики ( $K_{дв}$ ), коэффициент горизонтальной динамики ( $K_{дг}$ ), коэффициент устойчивости от схода колес с рельсов ( $K_y$ ). В качестве возмущений были заданы геометрические неровности пути в вертикальной и горизонтальной поперечной плоскостях, такие, чтобы динамические показатели широко используемого в эксплуатации полувагона на тележках модели 18-100 укладывались в допустимый диапазон при скоростях движения до 80 км/ч для порожнего полувагона и при скоростях до 90 км/ч для груженого полувагона. **Практическая значимость.** В результате проведенных расчетов и сравнения их результатов было установлено, что применение тележек с билинейной характеристикой центрального подвешивания позволит улучшить динамические показатели полувагонов, эксплуатируемых в настоящее время на тележках модели 18-100. И за счет улучшения динамических показателей возможно увеличение допустимых скоростей движения этих вагонов.

*Ключевые слова:* динамические качества полувагона; тележка модели 18-1711; динамические показатели полувагона

### REFERENCES

1. Bubnov V.M., Myamlin S.V., Mankevich N.B. Vozdeystviye na put gruzovykh vagonov na telezhkakh modely 18-1711 s raznoy konstruktivnoy klina ressonnogo podveshivaniya [Impact on the track of freight cars on

Doi 10.15802/stp2014/30789

© S. V. Myamlin, V. M. Bubnov, YE. O. Pysmennyi, 2014

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

- bogies, a model 18-1711 with different design of the wedge spring suspension]. *Transport Rossiyskoy Federatsii – Russian Federation Transport*, 2013, no. 3, pp. 36-38.
2. Kovalenko A.V. *Silovoye vzaimodeystviye puti i gruzovogo vagona s uprugimi svyazyami kolesnykh par s ramoy telezhki*. Avtoreferat Diss. [Force interaction of a track and a freight car with elastic constraints of wheelsets with a bogie frame. Author's abstract]. Moscow, VNIIZhT Publ., 2006. 28 c.
  3. Lukin V.V., Anisimov P.S. *Konstruirovaniye i raschet vagonov* [Design and calculation of cars]. Moscow, FGOU UMTs ZhDT Publ., 2011. 688 c.
  4. Myamlin S.V., Pismenny Ye.A., Zhizhko V.V., Yurtsevich I.V. Modelirovaniye prostranstvennykh kolebaniy poyezda [Modeling the spatial fluctuations of the train]. *Vestnik VNIIZhTa – Bulletin of VNIIZhT*, 2008, no. 3, pp. 45-47.
  5. Myamlin S.V. *Modelirovaniye dinamiki relsovykh ekipazhey* [Simulation of railway vehicles dynamics]. Dnipropetrovsk, Novaya ideologiya Publ., 2002. 240 c.
  6. Pshinko A.N., Myamlin S.V., Prikhodko V.I., Pismenny Ye.A. Obyektno-orientirovannaya matematicheskaya model prostranstvennykh kolebaniy relsovykh ekipazhey [Object-oriented mathematical model of spatial oscillations of railway vehicles]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2005, issue 7, pp. 87-90.
  7. Galiyev I.I., Nekhayev V.A., Nikolayev V.A., Davydov G.I. Parametry telezhki gruzovogo vagona i bezopasnost dvizheniya [Options of a freight car bogie and traffic safety]. *Zheleznodorozhnyy transport – Railway Transport*, 2003, no. 3, pp. 36-40.
  8. Myamlin S.V. *Svidelstvo o registratsii avtorskogo prava na proizvedeniye № 7305. Kompyuternaya programma «Dynamics of Rail Vehicles» («DYN-RAIL»)* [Certificate of copyright registration for a paper no. 7305. Computer program «Dynamics of Rail Vehicles» («DYN-RAIL»)]. Registered, 20.03.2003. 1 p.
  9. Boronenko Yu., Orlova A., Rudakova E. Influence of construction schemes and parameters of three-piece freight bogies on wagon stability, ride and curving qualities. *Vehicle System Dynamics*, 2006, vol. 44, pp. 402-414. doi. 10.1080/00423110600872341.
  10. Bubnov V.M., Myamlin S.V., Mankevych N.B. Dynamic performance of freight cars on bogies model 18-1711. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2013, no. 4, pp. 118-126.
  11. Myamlin S., Neduzha L., Ten O., Shvets A. Determination of dynamic performance of freight cars taking into account technical condition of side bearers. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2013, no. 1, pp. 162-169.
  12. Garg V.K., Dukkipati R.V. *Dynamics of Railway Vehicle Systems*. New York, Academic Press Publ., 1984. 407 p.
  13. Guidelines to best practices for heavy haul railway operations: wheel and rail interface issues. Virginia Beach, Va, Intern. Heavy Haul Association Publ., 2001. 408 p.
  14. Pshin'ko O., Manashkin L., Bodnar B., Myamlin S. On measuring vertical forces in freight car bogies. Proc. of 9th mini Conf. «Vehicle system dynamics, identification and anomalies». Budapest, 2004, pp. 11-12.

*Prof. Afanasov A. M., D. Sc. (Tech.) recommended this article to be published*

Received: June 09, 2014

Accepted: Aug. 21, 2014

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 691.3:669.431.6

В. И. БОЛЬШАКОВ<sup>1</sup>, М. А. ЕЛИСЕЕВА<sup>2\*</sup>, С. А. ЩЕРБАК<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Материаловедение и обработка металлов», Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24 а, Днепропетровск, Украина, 49600, тел. +38 (056) 745 23 72, эл. почта bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-0790-6473

<sup>2\*</sup>Каф. «Реконструкция и управление в строительстве», Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24 а, Днепропетровск, Украина, 49600, тел. +38 (096) 377 01 36, эл. почта SMU.TGO@yandex.ua, ORCID 0000-0003-4474-3255

<sup>3</sup>Каф. «Технология строительных материалов, изделий и конструкций», Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24 а, Днепропетровск, Украина, 49600, тел. +38 (095) 243 32 09, эл. почта aspirant@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-0346-4436

### КОНТАКТНАЯ ПРОЧНОСТЬ МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ ИЗ ДОМЕННЫХ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ШЛАКОВ

**Цель.** Исследование предполагает упрочнение контактной зоны мелкозернистого бетона за счет механической обработки всех компонентов бетонной смеси в смесителе-активаторе и применение заполнителя с шероховатой поверхностью. **Методика.** Для достижения поставленной цели в качестве смесителя-активатора был использован активатор роторного типа РС-06, разработанный научно-исследовательским институтом строительного производства. В виде мелкого заполнителя применялся доменный гранулированный шлак, имеющий более развитую шероховатую поверхность, чем песок. Данная установка обеспечивает интенсивное гомогенное перемешивание компонентов бетонной смеси, обогащение сырьевых материалов (очистение их частичек от загрязняющих веществ), а также механическую деструкцию поверхностных слоев доменного гранулированного шлака и других входящих в смесь компонентов. **Результаты.** При подготовке работы проводились экспериментальные исследования с определением состава новообразований мелкозернистых бетонов при помощи дифференциально-термического и рентгенофазового методов анализа, а также физико-механических свойств мелкозернистых бетонов в соответствии с действующими стандартами Украины. Установлено, что фазовый состав новообразований мелкозернистых бетонов, приготовленных из активированных и неактивированных смесей, не изменяется. Их главное различие состоит в величине создаваемых эффектов и температурных интервалов возникновения этих пиков. Так, у мелкозернистых бетонов, изготовленных на основе активированных смесей, величина эффектов меньше, что свидетельствует о более высокой степени гидратации его компонентов. Кроме того, на кривых ТГ на дериватограммах образцов бетона потеря массы гелеобразных гидросиликатов кальция бетона из механоактивированной смеси на 0,5...0,7 % выше, чем в бетоне из неактивированной смеси, что свидетельствует о большем количестве этих новообразований в бетонах из активированных смесей. В целом, бетоны различного состава, изготовленные на основе смеси, обработанной в смесителе-активаторе, имеют более высокую механическую прочность. **Научная новизна.** Получили дальнейшее развитие представления о влиянии механической активации компонентов мелкозернистых бетонных смесей формовочной влажности в смесителе-активаторе роторного типа на значение контактной прочности цементного камня и заполнителя. **Практическая значимость.** Упрочнение контактной зоны мелкозернистого бетона при проведении совместной обработки всех компонентов бетонной смеси в смесителе-активаторе достигается благодаря повышению степени гидратации сырье-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

вых компонентов бетона; созданию условий для протекания твердофазных химических реакций между его компонентами; улучшению структуры полученного материала. Это способствует существенному увеличению механической прочности механоактивированных мелкозернистых бетонов приблизительно в 5 раз в сравнении с бетонами, изготовленными из неактивированных смесей, что дает возможность снизить расход цемента при изготовлении 1 м<sup>3</sup> бетона до 59 %.

*Ключевые слова:* контактная прочность; мелкозернистые бетонные смеси; доменные гранулированные шлаки; механоактивация; смеситель-активатор роторного типа; степень гидратации; состав новообразованного бетона; механическая прочность бетона

### Введение

Наиболее слабым элементом в бетоне, подверженном разрушению при действии внешних нагрузок является контактная зона, т. е. участок контакта цементного камня и заполнителя. Происходит это из-за существенного различия их физико-механических свойств (модуля деформации, коэффициента Пуассона, коэффициента линейного термического расширения) и размеров контактирующих фаз, а также наличия микродефектов на поверхности раздела фаз [1, 19]. Для исключения данной проблемы некоторые ученые предлагают применять в качестве заполнителей материалы, схожие по своим физико-химическим и механическим свойствам с цементом. Например, доменные гранулированные шлаки. Вопросы исследования свойств и возможности использования вторичных материальных ресурсов в производстве бетонов посвящено ряд работ как украинских ученых [8, 10, 13–16], так и зарубежных [5, 17, 20–24]. Достоинством доменных гранулированных шлаков является их сходный с цементом химический состав, высокая химическая активность, высокоразвитая шероховатая поверхность его зерен. К главным недостаткам следует отнести высокую пустотность, что при его использовании в бетонах ведет к повышенному расходу вяжущего или получению бетонов с неудовлетворительными прочностными показателями. Ученые по-разному решают эту проблему. Так, в работе [14] авторы предлагают использовать рациональный зерновой состав компонентов бетона, который, по их мнению, достигается при соотношении расхода крупной фракции к средней и к мелкой 52:23:25, а их размеров примерно 100:10:1. Для того, чтобы обеспечить такой зерновой состав компонентов бетона исследователи в качестве тонкодисперсной фракции к цементу вводили золу-уноса Приднепровской ТЭС, а в качестве легкого заполнителя использовали доменный гранулированный шлак металлургического за-

вода им. Петровского. Подбор состава производился путем рассева вышеперечисленных материалов. Немецкий ученый Andreas Ehrenberg [21] предлагал оптимизацию гранулометрического состава доменных гранулированных шлаков путем их измельчения и просеивания в различных специальных установках. В основу этой работы положено сочетание в растворах сверхтонкой фракции доменного гранулированного шлака с удельной поверхностью > 10 000 см<sup>2</sup>/г, крупного песка доменного гранулированного шлака с удельной поверхностью < 2 000 см<sup>2</sup>/г и портландцементного клинкера средней дисперсности. Ученому удалось получить материал, имеющий высокую раннюю прочность и улучшенные технологические свойства формируемой смеси. При этом, он указывает на недостаточную распространенность своей разработки из-за высоких энергетических затрат при получении сверхтонкого шлака.

В последнее время для улучшения свойств готовых строительных материалов из вторичных материальных ресурсов широко используют различные химические добавки. Так, в работе [24] исследователь предложил в бетоны вводить новую органо-минеральную добавку, состоящую из молотого доменного гранулированного шлака и суспензии микрокремнезема в водном растворе щелочного активатора шлака. При этом, следует отметить, чем больше компонентов в бетонной смеси используется, тем больше будут дополнительные затраты, связанные с оборудованием емкостей для их хранения, приемных бункеров, дозаторов, транспортными расходами на их привоз и пр. К тому же недостаточно изучен вопрос влияния химических добавок в строительных материалах на организм людей.

Мы предлагаем, проводить механоактивацию компонентов бетона в смесителе-активаторе роторного типа. Это позволяет не только оптимизировать гранулометрический состав доменного гранулированного шлака и улучшить ряд других

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

свойств у обрабатываемых материалов, но и повысить прочность сцепления материалов между собой, в данном случае цементного камня и доменного гранулированного шлака.

### Цель

Упрочнение контактной зоны мелкозернистого бетона за счет механической обработки всех компонентов бетонной смеси в смесителе-активаторе и применения заполнителя с шероховатой поверхности.

### Методика

Для достижения поставленной цели в качестве смесителя-активатора был использован активатор роторного типа РС-06, разработанный научно-исследовательским институтом строительного производства; в виде мелкого заполнителя применялся доменный гранулированный шлак, имеющий более развитую шероховатую поверхность, чем песок. Данная установка обеспечивает интенсивное гомогенное перемешивание компонентов бетонной смеси, обогащение сырьевых материалов (очищение их частичек от загрязняющих веществ), а также механическую деструкцию поверхностных слоев доменного гранулированного шлака и других входящих в смесь компонентов.

### Результаты

Еще в 50-х годах опыты, проведенные советским ученым Ю. М. Лещинским, подтвердили факт целесообразности применения гранулированных доменных шлаков вместо песка при изготовлении бетонов. Исследователь заменил 50 % мелкого песка на шлак и получил механическую прочность бетона на 60 % выше [19]. Полученный эффект исследователь объяснил тем, что между цементным камнем и доменным гранулированным шлаком имеется высокое химическое взаимодействие и высокая степень их механического зацепления из-за высокоразвитого микрорельефа поверхности шлака.

Как было установлено ранее [5, 19], доменный гранулированный шлак в составе портландцементного бетона выполняет функцию активного микрозаполнителя. Его поверхностный слой реагирует с гидроксидом кальция, выделяющимся при гидролизе цемента. При этом образуется дополнительное количество

гидросиликатов кальция, обеспечивающих создание чрезвычайно прочной связи заполнителя с цементной матрицей. Это значительно улучшает адгезионную прочность бетона, его коррозионную стойкость и ряд других физико-механических характеристик.

Кроме того, известно [5, 8], что при обычной комнатной температуре доменные гранулированные шлаки практически не проявляют химической активности при взаимодействии с водой и очень медленно твердеют. Лишь при воздействии механических, химических или тепловых факторов их реакционная способность повышается и они начинают активно взаимодействовать с водой и цементом, быстро твердеть и образовывать монолитный камень. Связано это с тем, что в их минералогическом составе практически отсутствуют активные фазы. Более интенсивно, чем кристаллические фазы, взаимодействуют с водой шлаковые стекла. Их химическая активность зависит от температуры получаемого из печи шлакового расплава, его химического состава, характера и скорости грануляции. При быстром охлаждении шлаковых расплавов шлаковые стекла приобретают очень высокую потенциальную реакционную способность, а шлаки – способность реагировать с портландцементом при добавлении воды [8, 12].

В настоящее время наиболее применяемым способом повышения химической активности доменных гранулированных шлаков как в Украине [10, 16, 18], так и за рубежом остается химический, а именно их щелочная активизация [17, 22, 23]. При введении щелочных добавок, таких как NaOH или Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, добавляемых в количестве до 7 % от массовой части шлаков, нарушается термодинамически неустойчивое равновесие шлакового стекла. Это способствует его перестройке и образованию гидросиликатов, гидроалюмосиликатов, щелочных гидроалюмосиликатов, что и приводит к ускорению твердения и упрочнению искусственного шлакового камня [8, 12].

Метод механической активации доменных гранулированных шлаков менее распространен, чем химический, вследствие требуемых для его осуществления дополнительных затрат. Однако, он позволяет получить и более существенный эффект. Достоинством данного метода является то, что при нем происходит не только увеличение реакционной способности обраба-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

тываемых материалов, а комплексное улучшение ряда их физико-химических и механических свойств, что в конечном итоге положительно сказывается на качестве и эксплуатационных свойствах бетона, изготовленного из механоактивированного сырья.

Вопросы повышения реакционной способности доменных гранулированных шлаков, влияния высокоскоростной механоактивации на их свойства и механизм воздействия механической энергии на обрабатываемые материалы рассматривались нами в работах [2–4].

Совместная механическая активация заполнителя (доменного гранулированного шлака) и вяжущего (портландцемента) в присутствии воды позволяет увеличить значение контактной прочности бетона за счет более интенсивного протекания химических реакций между заполнителем и вяжущим, в результате чего на границе их контакта образуются гидросиликаты кальция. Это происходит вследствие того, что в результате механического воздействия на заполнитель его поверхностные слои аморфизуются, образуются трещины, которые заполняются цементным тестом. Вследствие высокой щелочности цемента растворимость аморфизированной поверхности шлака значительно повышается. Все это обеспечивает существенное увеличение сцепления цементного камня и заполнителя.

Мы предлагаем, проводить механоактивацию компонентов мелкозернистого бетона в смесителе-активаторе роторного типа РС-06, разработанного научно-исследовательским институтом строительного производства. Техническая характеристика и оптимальный режим работы данной установки при активации доменных гранулированных шлаков и приготовлении мелкозернистых бетонных смесей приведены в статье [2]. Он обеспечивает осуществление одновременно однородного перемешивания, обогащения (очищения частичек обрабатываемых материалов от загрязняющих веществ), механической активации и частичного домола компонентов бетонной смеси в присутствии необходимого количества воды. Приготовление смесей формочной влажности дает возможность повысить их качество и значительно упростить технологию приготовления.

В качестве количественных оценок, определяющих интенсивность химического взаимодейст-

вия цементного камня с заполнителем и упрочнение контактной зоны бетона, были приняты:

1) состав новообразований мелкозернистых бетонов, изготовленных из активированных и неактивированных смесей;

2) механическая прочность этих бетонов.

При реализации экспериментальных исследований применялись дифференциально-термический и рентгенофазовый методы анализа состава новообразований бетонов; методы определения прочности бетонов, согласно действующих стандартов Украины. Оценивание проводилось путем сравнения свойств мелкозернистых бетонов, изготовленных из бетонных смесей разного приготовления: в смесителе принудительного действия (неактивированные смеси) и в высокоскоростном смесителе-активаторе роторного типа (активированные смеси) при строго одинаковых их составах, степени удобоукладываемости, условий твердения и методов испытания.

В качестве сырьевых материалов при изготовлении мелкозернистой бетонной смеси использовались доменный гранулированный шлак производства ПАО «Евраз – Днепропетровский металлургический завод им. Петровского» с модулем крупности 3,2, насыпной плотностью – 780 кг/м<sup>3</sup>, пустотностью – 70 %, водопотребностью – 35,73 %; портландцемент с минеральными добавками марки ПЦ II / Б – Ш – 400 ДСТУ Б В.2.7-46:2010 производства Криворожского цементного завода ПАО «ХайдельбергЦемент Украина» с нормальной густотой 27 %, остатком на сите № 008 – 7,1 %, прочностью при сжатии – 40,8 МПа, прочностью при изгибе – 6,4 МПа; вода техническая.

В исследованиях состава новообразований в мелкозернистых бетонах в качестве проб использовались внутренние зоны образцов-кубов бетонов, которые измельчались в ступке до порошкообразного состояния. Результаты исследований представлены на рис. 1–4.

На всех дериватограммах мелкозернистых бетонов (рис. 1–2) наблюдаются процессы окисления, что свидетельствует о наличии пирротина, гетита и магнетита. Магнетит Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> имеет два экзотермических эффекта при температуре 350–400 °С, которому соответствует окисление магнетита до маггемита γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, и при температуре 600–1 000 °С, при которой происходит переход маггемита в гематит α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [7].

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Для гетита ( $\alpha\text{-FeO}\cdot\text{OH}$ ) характерен эндотермический эффект в интервале температур от 300 до 400 °С, связанный с его дегидратацией. По данным В.С. Горшкова [7] температура этого эффекта зависит от размера частиц гетита. Крупные частицы в пробе материала сдвигают эндотермический эффект дегидратации в сторону более высоких температур, мелкие частицы, наоборот, в сторону низких температур. После эндотермического пика кривая ДТА находится немного выше основной линии, а в некоторых случаях сразу происходит кристаллизация остатка в гематит  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ , что сопровождается небольшим экзотермическим эффектом. При температуре 680 °С возникает эндотермический эффект, связанный с полиморфным превращением гематита  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  в магнетит  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  [6].

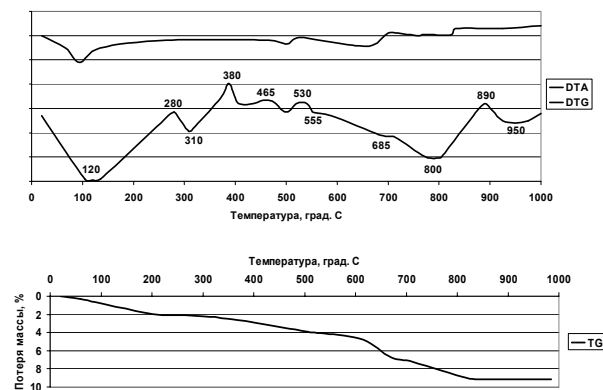


Рис. 1. Дериватограмма образца мелкозернистого бетона из неактивированной смеси состава 1:3

Fig. 1. Derivation of the sample of fine-grained concrete from inactive mixture composition 1:3

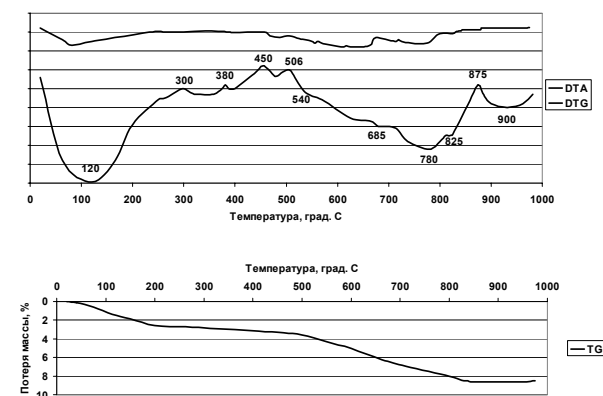


Рис. 2. Дериватограмма образца мелкозернистого бетона из активированной смеси состава 1:3

Fig. 2. Derivation of the sample of fine-grained concrete from active mixture composition 1:3

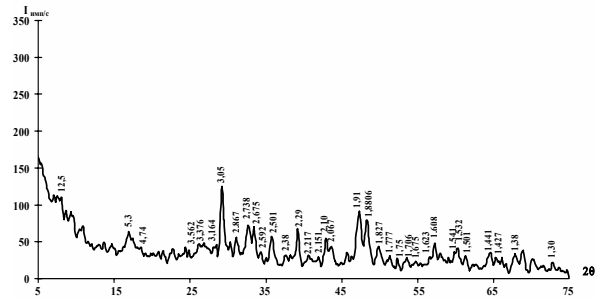


Рис. 3. Дифрактограмма образца мелкозернистого бетона из неактивированной смеси состава 1:3

Fig. 3. Diffractogram of the sample of fine-grained concrete from inactive mixture composition 1:3

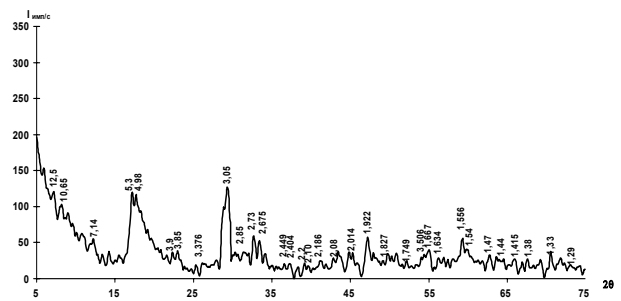


Рис. 4. Дифрактограмма образца мелкозернистого бетона из активированной смеси состава 1:3

Fig. 4. Diffractogram of the sample of fine-grained concrete from active mixture composition 1:3

На дифференциальных кривых всех образцов бетонов имеется эндотермический эффект при температуре 120 °С, свидетельствующий о дегидратации тоберморитового геля, близкого к аморфному, слабозакристаллизованному гидросиликату кальция тоберморитоподобной группы.

Также на дериватограммах наблюдается экзотермический эффект при 875–890 °С, соответствующий кристаллизации стекла или окислению магнетита кислородом воздуха. Ему предшествует эндотермический эффект при температуре 825–830 °С, который накладывается на другой эндотермический эффект при 775–800 °С. Первый пик связан, по-видимому, с затратами энергии на перегруппировку связей в стекловидной фазе перед ее кристаллизацией, так как при нем не наблюдается потеря массы материала. Второй эндотермический эффект (775–800 °С) может быть вызван полиморфным превращением шеннонита ( $\gamma \rightarrow \alpha$ ) или разложением кальцита на  $\text{CaO}$  и  $\text{CO}_2$ . На присутствие карбоната кальция ( $\text{CaCO}_3$ ) указывает также широкий эндотермический эффект при температуре 935–950 °С.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Экзоэффект при 250–300 °С указывает на наличие в бетоне гелеобразного (аморфного) окисла железа состава  $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ . Он образуется в результате реакции между щелочью (цементом) и солями железа. На величину эффекта и его температурный диапазон влияет начальное значение рН среды. Чем больше показатели рН, тем выше значение температуры эндотермического пика [7].

Другие небольшие экзоэффекты указывают, по-видимому, на кристаллизацию стекол различного состава [6, 11, 19], эндоэффекты – на дегидратацию гидроалюминатов кальция.

Кроме того, следует обратить внимание на характер кривых ТГ мелкозернистых бетонов из активированных и неактивированных смесей. Так, образец мелкозернистого бетона из активированной смеси состава 1:3 в интервале температур 50–200 °С (рис. 2) теряет примерно 2,6 % массы, тогда как образец из неактивированной смеси того же состава (рис. 1) – 2 %. Поскольку в этом температурном диапазоне происходит дегидратация гелеобразных гидросиликатов кальция, то это свидетельствует о большем количестве этих новообразований в бетонах из активированных смесей.

Наличие перечисленных фаз подтверждается результатами рентгенофазового анализа. На рентгенограмме образца мелкозернистого бетона из неактивированной (рис. 3) и активированной смеси (рис. 4) идентифицируется наличие низкоосновных гидросиликатов кальция типа CSH(I) по дифракционным отражениям  $d/n = 1,25; 0,53; 0,307; 0,24; 0,183; 0,167; 0,153$  нм; мелилита ( $Ca_2(Al, Mg, Si)Si_2O_7$ ) по  $d/n = 0,2858; 0,2291; 0,1881; 0,1608; 0,1429; 0,1384$  нм; магнетита ( $Fe_3O_4$ ) по  $d/n = 0,2098; 0,171; 0,1612; 0,1479; 0,1277$  нм; гетита ( $\alpha-FeO \cdot OH$ ) по  $d/n = 0,5; 0,336; 0,245; 0,20; 0,18; 0,1359; 0,1317; 0,1291$  нм; шеннонита ( $\gamma-2CaO \cdot SiO_2$ ) по  $d/n = 0,202; 0,1908; 0,144; 0,1411; 0,1303$  нм; трехкальциевого силиката ( $3CaO \cdot SiO_2$ ) по  $d/n = 0,2957; 0,267; 0,2304; 0,1979; 0,1926; 0,1771; 0,1623; 0,1497; 0,1392$  нм. Перечисленные ниже дифракционные отражения могут принадлежать как шеннониту, так и трехкальциевому силикату ( $3CaO \cdot SiO_2$ ):  $d/n = 0,2738; 0,2592; 0,2185; 0,1752; 0,1633; 0,1543; 0,1377$  нм.

С целью определения механической прочности приготавливались бетоны 3-х составов (1:3, 1:5 и 1:10) на основе активированных смесей одинакового водотвердого отношения ( $B/T = 0,135$ )

и неактивированных смесей с водотвердым отношением  $B/T = 0,21$ . В первом случае смеси перемешивались в смесителе-активаторе роторного типа в течение 45 с, во втором – в смесителе принудительного действия в течение – 3–4 мин. Образцы-кубы бетона испытывались на прочность при сжатии в ранние и поздние сроки твердения согласно ДСТУ Б В. 2.7-214:2009 [9]. Результаты сравнительных испытаний мелкозернистых бетонов приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты сравнительных испытаний мелкозернистых бетонов одинаковой жесткости и состава при разных способах приготовления бетонных смесей**

Table 1

**The result of comparative tests of fine-grained concrete with the same rigidity and composition at different modes of concrete mixes preparation**

Состав бетона	Расход материалов на 1 м <sup>3</sup> бетона, кг			Жесткость бетонной смеси, с	Прочность при сжатии образцов бетона в возрасте 28 суток, МПа
	цемент	шлак	вода		
Бетон, приготовленный в смесителе-активаторе РС-06					
1:3	466	1 398	252,6	5	33,8
1:5	307,4	1 537	249,9	7,2	9,68
1:10	166,1	1 661	247,5	13	7,59
Бетон, приготовленный в смесителе принудительного действия					
1:3	406	1 218	341	5	6,52
1:5	268,2	1 341	338,1	7,2	1,74

Нами также был изучен характер нарастания прочности во времени для мелкозернистых бетонов, изготовленных из активированных и неактивированных смесей различного состава (табл. 2).

Полученные результаты исследований свидетельствуют о том, что прочность бетонов, изготовленных из активированных смесей выше, чем прочность бетонов из неактивированных в среднем в 5,2 раза. Существенное повышение прочности бетона объясняется аморфизацией поверхностных слоев заполнителя, уве-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

личением реакционной способности вяжущего и заполнителя в результате возникновения кристаллоструктурных нарушений, образования свежих поверхностей с химически активными центрами и изменения энергетического состояния обрабатываемых материалов под воздействием механической энергии.

Таблица 2

**Наращение прочности мелкозернистых бетонов во времени**

Table 2

**The increase in fine-grained concrete strength through time**

Бетонная смесь	Прочность при сжатии, при продолжительности твердения, суток, МПа			
	3	7	14	28
Активированная:				
состав 1:3, Ж1 (5 с);	10,8	20,8	26,4	33,8
состав 1:5, Ж1 (7 с);	2,68	5,12	6,93	9,68
состав 1:10, Ж2 (13 с)	1,88	2,57	5,52	7,59
Неактивированная:				
состав 1:3, Ж1 (5 с);	1,2	3,6	5	6,52
состав 1:5, Ж1 (7 с)	–	0,63	0,87	1,74

Кроме того, проведение совместной активации заполнителя и вяжущего в присутствии воды способствует увеличению значения контактной прочности бетона за счет более интенсивного протекания химических реакций между заполнителем и вяжущим, в результате чего на границе их контакта образуются гидросиликаты кальция. Это происходит вследствие обеспечения цементом щелочности среды, которая повышает растворимость аморфизированной поверхности шлака.

**Научная новизна и практическая значимость**

Получили дальнейшее развитие представления о влиянии механической активации компо-

нентов мелкозернистых бетонных смесей формочной влажности в смесителе-активаторе роторного типа на контактную прочность цементного камня и заполнителя. Практическая значимость. Упрочнение контактной зоны мелкозернистого бетона при проведении совместной обработки всех компонентов бетонной смеси в смесителе-активаторе достигается благодаря повышению степени гидратации сырьевых компонентов бетона; созданию условий для протекания твердофазных химических реакций между его компонентами; усовершенствованию структуры полученного материала. Это способствует существенному увеличению механической прочности механоактивированных мелкозернистых бетонов приблизительно в 5 раз в сравнении с бетонами, изготовленными из неактивированных смесей, что дает возможность снизить расход цемента при изготовлении 1 м<sup>3</sup> бетона до 59 %.

**Выводы**

Таким образом, проведение механической активации бетонной смеси в смесителе-активаторе роторного типа позволило повысить контактную прочность мелкозернистого бетона из доменных гранулированных шлаков, доказательством чего служит:

1. Повышение степени гидратации компонентов бетона в контактной зоне, а также увеличение содержания образовавшихся гидросиликатов кальция в его составе. Так, образец мелкозернистого бетона из активированной смеси состава 1:3 при дегидратации гелеобразных гидросиликатов кальция теряет примерно 2,6 % массы, тогда как образец из неактивированной смеси того же состава – 2 %. Это свидетельствует о большем количестве этих новообразований в бетонах из активированных смесей. В целом, фазовый состав образцов мелкозернистых бетонов, приготовленных различным образом, не изменяется. Их главное различие состоит в величине создаваемых эффектов и температурных интервалов возникновения этих пиков. Так, у мелкозернистых бетонов, изготовленных на основе активированных смесей величина эффектов меньше, что свидетельствует о более высокой степени гидратации его компонентов.

2. Увеличение механической прочности бетонов из активированных смесей примерно в 5,2 ра-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

за, по сравнению с бетонами из неактивированных смесей. Кроме того, бетоны на основе активированных смесей имеют меньшую водопотребность вследствие того, что у используемого шлака при активации снижаются показатели водопотребности и пустотности. Для получения равнопрочных бетонов из активированных смесей по сравнению с бетонами из неактивированных можно снизить расход цемента в 3,3 раза, используя 10 и менее % вяжущего от массы гранулированного шлака.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Баженов, Ю. М. Технология бетонов : учеб. для студ. высш. учебн. заведений / Ю. М. Баженов. – 3-е изд. – М. : АСВ, 2002. – 500 с.
2. Большаков, В. И. Влияние высокоскоростной обработки доменных гранулированных шлаков на их свойства / В. И. Большаков, М. А. Елисеева, С. А. Щербак // Вісн. Придніпр. держ. акад. буд-ва та архіт. – 2013. – № 8. – С. 4–9.
3. Большаков, В. И. Повышение прочности мелкозернистого бетона путем механохимической активации его компонентов / В. И. Большаков, М. А. Елисеева, С. А. Щербак // Стр-во, материаловедение, машиностроение. Сер. : Создание высокотехнолог. социоэкокомплексов в Украине на основе концепции сбалансир. (устойчивого) развития : сб. науч. тр. – Д., 2011. – Вып. 60. – С. 26–31.
4. Большаков, В. И. Повышение реакционной способности доменного гранулированного шлака / В. И. Большаков, С. А. Щербак, М. А. Елисеева // Стр-во, материаловедение, машиностроение. Сер. : Стародубовские чтения : сб. науч. тр. – Д., 2011. – Вып. 59, том II. – С. 34–38.
5. Гилязидинова, Н. В. Коррозионная стойкость шлакобетонов / Н. В. Гилязидинова, Н. Ю. Рудковская, Т. Н. Санталова // Бетон и железобетон. – 2013. – № 3. – С. 24–25.
6. Горшков, В. С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ : учеб. пособие / В. С. Горшков, В. В. Тимашев, В. Г. Савельев. – М. : Высш. шк., 1981. – 335 с.
7. Горшков, В. С. Термография строительных материалов / В. С. Горшков. – М. : Изд-во лит. по стр-ву, 1968. – 237с.
8. Дворкин, Л. И. Строительные материалы из отходов промышленности : учеб.-справоч. пос. / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. – Ростов н/Д. : Феникс, 2007. – 368 с.
9. Державний стандарт України ДСТУ Б В. 2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. – На заміну ГОСТ 10180-90 ; надано чинності 2009-12-22. – К. : Мінрегіонбуд України, 2010. – 43 с.
10. Лужно-активовані лакопортландцементи / П. В. Кривенко, О. М. Петропавловський, О. Г. Гелевера та ін. // Вісн. Донбас. нац. акад. буд-ва та архіт. – 2009. – № 1. – С. 123–131.
11. Марченко, А. А. Металлургические шлаки и применение их в строительстве / А. А. Марченко. – М. : Госстройиздат, 1962. – 547 с.
12. Напрямки і перспективи використання відходів металургійної, гірничорудної та хімічної промисловості в будівництві / В. І. Большаков, Г. М. Бондаренко, А. І. Головка та ін. – 2-е вид., виправ. та доп. – Д. : Gaudeamus, 2000. – 140 с.
13. Нетеса, Н. И. Легкие бетоны на основе граншлака завода имени Петровского / Н. И. Нетеса, Д. В. Паланчук // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – Вип. 35. – С. 156–161.
14. Нетеса, Н. И. Легкие бетоны с золой уноса Приднепровской ТЭС / Н. И. Нетеса, Д. В. Паланчук, А. Н. Нетеса // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. – 2013. – № 5. – С. 137–145.
15. Нетеса, Н. И. Снижение пустотности бетонных смесей подбором рационального зернового состава компонентов / Н. И. Нетеса // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2007. – Вип. 15. – С. 200–204.
16. Особливості процесів структуроутворення лужних шлакопортландцементів та бетонів на їх основі / К. К. Пушкарьова, О. А. Гончар, О. П. Бондаренко, І. С. Магдичанська // Ресурсоекономі матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. пр. – К., 2009. – Вип. 17. – С. 54–61.
17. Пат. 69109688 Германия, МПК С 04 В 7/153. Verfahren zur Verbesserung der Aktivierung latent hydraulischer basischer Hochofenschlacke zur Herstellung eines Baumaterials / Kurz F., Lidingö SE (Германия) ; заявитель и патентообладатель Kurz F., Lidingö SE. – № 0553131 ; заявл. 04.08.93 ; опубл. 22.02.96, Бюл. № 7. – 12 с.
18. Пушкарьова, К. К. Особливості технології отримання лужного шлако-портландцементу та бетонів на його основі / К. К. Пушкарьова, О. А. Гончар, О. П. Бондаренко // Вісн. Донбас. нац. акад. буд-ва та архіт. – 2009. – № 1. – С. 82–88.
19. Федьнин, Н. И. Высокопрочный мелкозернистый шлакобетон / Н. И. Федьнин, М. И. Диамант. – М. : Стройиздат. – 1975. – 176 с.
20. Aggarwal, Y. Microstructure and properties of concrete using bottom ash and waste foundry sand

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

- as partial replacement of fine aggregates / Y. Aggarwal, R. Siddique // Construction and Building Materials. – 2014. – № 54. – P. 210–223. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.12.051.
21. Ehrenberg, A. Hohe Frühfestigkeit bei Zementen mit Hüttensand – (k)ein Widerspruch? / A. Ehrenberg // Beton-Informationen. – 2005. – № 2. – P. 22–51.
  22. Garbach, A. Alkaliaktivierte Bindemittel auf der Grundlage von Eisenhüttenschlacken / A. Garbach, A. Ehrenberg // Report des FEhS-Instituts. – 2008. – № 1. – P. 7–10.
  23. Li, C. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements / Chao Li, Henghu Sun, Longtu Li // Cement and Concrete Research. – 2010. – Vol. 40. – P. 1341–1349. doi: 10.1016/j.cemconres.2010.03.020.
  24. Živica, V. Effectiveness of new silica fume alkali activator / V. Živica // Cement and Concrete Composites. – 2006. – Vol. 28, № 1. – P. 21–25. doi: 10.1016/j.cemcomcomp.2005.07.004.

В. І. БОЛЬШАКОВ<sup>1</sup>, М. О. ЄЛИСЕЄВА<sup>2\*</sup>, С. А. ЩЕРБАК<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Каф. «Матеріалознавство та обробка матеріалів», Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24 а, Дніпропетровськ, Україна, 49600, тел. +38 (056) 745 23 72, ел. пошта bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-0790-6473

<sup>2\*</sup> Каф. «Реконструкція та управління в будівництві», Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24 а, Дніпропетровськ, Україна, 49600, тел. +38 (096) 377 01 36, ел. пошта SMU.TGO@uandex.ua, ORCID 0000-0003-4474-3255

<sup>3</sup> Каф. «Технологія будівельних матеріалів, виробів та конструкцій», Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24 а, Дніпропетровськ, Україна, 49600, тел. +38 (095) 243 32 09, ел. пошта aspirant@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-0346-4436

## КОНТАКТНА МІЦНІСТЬ МЕХАНОАКТИВОВАНИХ ДРІБНОЗЕРНИСТИХ БЕТОНІВ ІЗ ДОМЕННИХ ГРАНУЛЬОВАНИХ ШЛАКІВ

**Мета.** Дослідження передбачає зміцнення контактної зони дрібнозернистого бетону за рахунок механічної обробки всіх компонентів бетонної суміші в змішувачі-активаторі та застосування заповнювача із шорсткуватою поверхнею. **Методика.** Для досягнення поставленої мети в якості змішувача-активатора був використаний активатор роторного типу РС-06, розроблений науково-дослідним інститутом будівельного виробництва. У вигляді дрібного заповнювача застосовувався доменний гранульований шлак, який має більш розвинену шорсткувату поверхню, ніж пісок. Дана установка забезпечує інтенсивне гомогенне перемішування компонентів бетонної суміші, збагачування сировинних матеріалів (очищення їхніх часточок від забруднюючих речовин), а також механічну деструкцію поверхневих шарів доменного гранульованого шлаку та інших компонентів, що входять у суміш. **Результати.** При підготовці роботи проводилися експериментальні дослідження з визначенням складу новоутворень дрібнозернистих бетонів за допомогою диференційно-термічного та рентгено-фазового методів аналізу, а також фізико-механічних властивостей дрібнозернистих бетонів відповідно до діючих стандартів України. Встановлено, що фазовий склад новоутворень дрібнозернистих бетонів, виготовлених із активованих і неактивованих сумішей, не змінюється. Їх головна відмінність полягає у величині утворюваних ефектів і температурних інтервалів виникнення цих піків. Так, у дрібнозернистих бетонів, виготовлених на основі активованих сумішей, величина ефектів менше, що свідчить про більш високий ступінь гідратації його компонентів. Крім того, на кривих ТГ на дериватограмах зразків бетону втрата маси гелеподібних гідросилікатів кальцію бетону з механоактивованої суміші на 0,5...0,7 % вище, ніж у бетону з неактивованої суміші, що свідчить про більшу кількість цих новоутворень у бетонах з активованих сумішей. В цілому, бетони різного складу, виготовлені на основі суміші, обробленої в змішувачі-активаторі, мають більш високу механічну міцність. **Наукова новизна.** Одержали подальший розвиток уявлення про вплив механічної активації компонентів дрібнозернистих бетонних сумішей формувальної вологості в змішувачі-активаторі роторного типу на значення контактної міцності цементного каменю та заповнювача. **Практична значимість.** Зміцнення контактної зони дрібнозернистого бетону при проведенні сумісної обробки всіх компонентів бетонної суміші в змішувачі-активаторі досягається завдяки підвищенню ступеня гідратації сировинних компонентів бетону; створенню умов для протікання твердофазних хімічних реакцій між його компонентами; поліпшенню структури отриманого матеріалу. Це сприяє істотному збільшенню механічної міцності механоактивованих дрібнозернистих бетонів приблизно в 5 разів у порівнянні

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

з бетонами, виготовленими з неактивованих сумішей, що дає можливість знизити витрату цементу при виготовленні 1 м<sup>3</sup> бетону до 59 %.

*Ключові слова:* контактна міцність; дрібнозернисті бетонні суміші; доменні гранульовані шлаки; механоактивація; змішувач-активатор роторного типу; ступінь гідратації; склад новоутворень бетону; механічна міцність бетону

V. I. BOLSHAKOV<sup>1</sup>, M. O. YELISIEIEVA<sup>2\*</sup>, S. A. SHCHERBAK<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dep. «Materials Science», State Higher Educational Establishment «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», Chernyshevskiy St. 24 a, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49600, tel. (056) 745-23-72, e-mail bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-0790-6473

<sup>2\*</sup>Dep. «Reconstruction and Construction Management», State Higher Educational Establishment «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», Chernyshevskiy St., 24 a, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49600, tel. +38 (096) 377 01 36, e-mail SMU.TGO@yandex.ua, ORCID 0000-0003-4474-3255

<sup>3</sup>Dep. «Building Materials, Products and Structures Technology», State Higher Educational Establishment «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», Chernyshevskiy St., 24 a, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49600, tel. +38 (095) 243 32 09, e-mail aspirant@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-0346-4436

## CONTACT STRENGTH OF MECHANOACTIVATED FINE CONCRETES FROM GRANULATED BLAST-FURNACE SLAGS

**Purpose.** Strengthening of fine concrete contact zone by mechanical processing of all components of the concrete mix in a mixer-activator and aggregate application with rough surface. **Methodology.** Rotary activator PC-06, developed by Scientific and Research Institute of Construction Technology, was used as a mixer-activator to achieve this purpose. Granulated blast furnace slag, having a more developed rough surface than sand, was used as fine aggregate. This apparatus provides intensive homogeneous mixing of concrete mix components, processing of raw materials (purification of their particles from contaminants), and mechanical destruction of granulated blast furnace slag surface layers and other components of the mix. **Findings.** During the preparation work, experimental research of new formations composition of fine concretes, using differential thermal and x-ray phase analysis methods, and physical-mechanical properties of fine concretes in accordance with the applicable standards of Ukraine, were carried out. It is established that the phase composition of new formations of fine concretes made from activated and non-activated mixes, is not changed. Their main difference is the size of generated effects and temperature intervals of occurrence of these peaks. Thus, in fine concretes made on the basis of the activated mixes, magnitude of effects is less, indicating a higher hydration degree of its components. Besides, TG curves of concrete specimens show that weight loss of gel calcium hydrosilicate of concrete from a mechanically activated mix is 0.5...0.7 % more than of concrete from a non-activated mix, which indicates a larger number of these formations in concrete from activated mixes. In general, concretes of different composition, made from a mix, processed in the mixer-activator, have higher mechanical strength. **Originality.** Ideas about the influence of mechanical activation of components of fine concrete mixes with forming humidity in a rotary mixer-activator on the value of the contact strength of cement and aggregates got further development. **Practical value.** Strengthening of contact area of fine concrete in the exercise of the combined machining of all concrete mix components in the mixer-activator is achieved owing to increment of hydration degree of raw concrete components; creation of conditions for solid-phase chemical reactions between its components; structure improvement of the received material. It promotes significant increase of mechanical strength of mechanoactivated fine concretes (around 5 times) in comparison with concretes, made from a non-activated mix, which makes it possible to decrease the cement consumption when manufacturing 1 m<sup>3</sup> of concrete up to 59 %.

*Keywords:* contact strength; fine concrete mixes; granulated blast-furnace slag; mechanoactivation; rotary mixer-activator; hydration degree; new formation composition of concrete; mechanical strength of concrete

### REFERENCES

1. Bazhenov Yu.M. *Tekhnologiya betonov* [Concretes technology]. Moscow, ASV Publ., 2002. 500 p.
2. Bolshakov V.I., Yeliseyeva M.A., Shcherbak S.A. Vliyaniye vysokoskorostnoy obrabotki domennykh granulirovannykh shlakov na ikh svoystva [Influence of high-speed processing of blast-furnace granulated slag on its properties]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury – Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2013, no. 8, pp. 4-9.
3. Bolshakov V.I., Yeliseyeva M.A., Shcherbak S.A. Povysheniye prochnosti melkozernistogo betona putem mekhanokhimicheskoy aktivatsii yego komponentov [Fortification of fine concrete by mechanochemical acti-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

- vation of its components]. *Sbornik nauchnykh trudov «Stroitelstvo, materilovedeniye, mashynostroyeniye. Seriya: Sozdaniye vysokotekhnologicheskikh sotsioekokompleksov v Ukraine na osnove kontseptsii sbalansirovannogo (ustoychivogo) razvitiya»* [Proc. «Construction, Material Science, Mechanical Engineering. Series: Creation a high-tech sociocomplexes in Ukraine on the basis of balance (sustainable) development concept»], 2011, issue 60, pp. 26-31.
4. Bolshakov V.I., Shcherbak S.A., Yeliseyeva M.A. Povyseniye reaktivnoy sposobnosti domennogo granulirovannogo shlaka [Increase of reactionary ability of blast-furnace granulated slag]. *Sbornik nauchnykh trudov «Stroitelstvo, materilovedeniye, mashynostroyeniye»* [Proc. «Construction, Material Science, Mechanical Engineering»], 2011, issue 59, vol. II, pp. 34-38.
  5. Gilyazindova N.V., Rudkovskaya N.Yu., Santalova T.N. Korroziionnaya stoykost shlakobetonov [Corrosion resistance of slag concretes]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete*, 2013, no. 3, pp. 24-25.
  6. Gorshkov V.S., Timashev V.V., Savelyev V.G. *Metody fiziko-khimicheskogo analiza vyazhushchikh veshchestv* [Methods of physical-chemical analysis of binding materials]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1981. 335 p.
  7. Gorshkov V.S. *Termografiya stroitelnykh materialov* [Thermography of building materials]. Moscow, Izdatelstvo literatury po stroitelstvu Publ., 1968. 237 p.
  8. Dvorkin L.I., Dvorkin O.L. *Stroitelnyye materialy iz otkhodov promyshlennosti* [Building materials from industrial waste]. Rostov-on-Don, Feniks Publ., 2007. 368 p.
  9. DSTU B V. 2.7-214:2009. *Budivelni materialy. Betony. Metody vyznachennia mitsnosti za kontrolnymy zrazkamy*. [State Standard B V. 2.7-214:2009. Building materials. Concretes. Methods of strength evaluation on check specimens]. Kyiv, Minrehionbud Ukrainy Publ., 2010. 43 p.
  10. Kryvenko P.V., Petropavlovskiy O.M., Helevera O.H., Vozniuk H.V., Pushkar V.I., Hots V.I., Tymoshenko S.A. Luzhno-aktivovani shlakoportlandtsementy [Alkali-activated slag portland cements]. *Visnyk Donbaskoi natsionalnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture], 2009, issue 1, pp. 123-131.
  11. Marchenko A.A. *Metallurgicheskiye shlaki i primeneniye ikh v stroitelstve* [Metallurgical slag and its application in construction]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1981. 335 p.
  12. Bolshakov V.I., Bondarenko H.M., Holovko A. I., Zilberman O.Yu., Kryvenko P.V., Neviedomskiy V.O., Nikiforov O.P., Shimon M.I., Shcherbak S.A. *Napriamky i perspektyvy vykorystannia vidkhodiv metalurhiinoi, hirnychorudnoi ta khimichnoi promyslovosti v budivnytstvi* [Areas and perspectives of application of metallurgical, ore mining and chemical industry wastes in construction]. Dnipropetrovsk, Gaudeamus Publ., 2000. 140 p.
  13. Netesa N.I., Palanchuk D.V. Legkiyye betony na osnove granshlaka zavoda imeni Petrovskogo [Lightweight-concretes on the basis of granulated slag from the iron and steel plant named after Petrovskiy]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 33, pp. 156-161.
  14. Netesa N.I., Palanchuk D.V., Netesa A.N. Legkiyye betony s zoloy unosa Pridneprovskoy TES [Lightweight concretes with fly-ash of Prydniprovsk thermal power station]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 2013, no. 5, pp. 137-145.
  15. Netesa N.I. Snizheniye pustotnosti betonnykh smesey podborom ratsionalnogo zernovogo sostava komponentov [Descent of voidage of concrete mixes by design of rational grain distribution of components]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2007, issue 15, pp. 200-204.
  16. Pushkarova K.K., Honchar O.A., Bondarenko O.P., Mahdychanska I.S. Osoblyvosti protsesiv strukturotvorennya luzhnykh shlakoportlandtsementiv ta betoniv na yikh osnovi [Features of structure formation processes of alkali slag portland cements and concretes on their basis]. *Zbirnyk naukovykh prats «Resursoekonomni materialy, konstruktivni, budivni ta sporudy»* [Resource-saving materials, constructions, buildings and structures], 2009, issue 17, pp. 54-61.
  17. Kurz F., Lidingö SE. Verfahren zur Verbesserung der Aktivierung latent hydraulischer basischer Hochofenschlacke zur Herstellung eines Baumaterials. Patent DE, no. 0553131, 1996.
  18. Pushkarova K.K., Honchar O.A., Bondarenko O.P. Osoblyvosti tekhnologii otrymannia luzhnoho shlakoportlandtsementu ta betoniv na yikh osnovi [Technology features of alkali slag portland cement and concretes on its basis]. *Visnyk Donbaskoi natsionalnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture], 2009, issue 1, pp. 82-88.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

19. Fedynin N.I., Diamant M.I. *Vysokoprochnyy melkozernisty shlakobeton* [High-strength fine slag concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1975. 176 p.
20. Aggarwal Y., Siddique R. Microstructure and properties of concrete using bottom ash and waste foundry sand as partial replacement of fine aggregates. *Construction and Building Materials*, 2014. no. 54, pp. 210-223. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.12.051.
21. Ehrenberg A. Hohe Frühfestigkeit bei Zementen mit Hüttensand – (k)ein Widerspruch? *Beton-Informationen*, 2005, no. 2, pp. 22-51.
22. Garbach A., Ehrenberg A. Alkaliaktivierte Bindemittel auf der Grundlage von Eisenhüttenschlacken. *Report des FehS-Instituts*, 2008, no. 1, pp. 7-10.
23. Li Chao, Sun Henghu, Li Longtu. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and meta-kaolin (Si+Al) cements. *Cement and Concrete Research*, 2010, vol. 40, pp. 1341-1349. doi: 10.1016/j.cemconres.2010.03.020.
24. Živica V. Effectiveness of new silica fume alkali activator. *Cement and Concrete Composites*, 2006, vol. 28, no. 1, pp. 21-25. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2005.07.004.

*Статья рекомендована к публикации д.т.н.,проф. Н. В. Шпирько (Украина); д.т.н., проф. Н. И. Нетесой (Украина)*

Поступила в редколлегию: 10.06.2014

Принята к печати: 28.07.2014

## УДК 624:691

А. П. ИВАНОВА<sup>1\*</sup>, О. И. ТРУФАНОВА<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Строительство, геотехника и геомеханика», ГВУЗ «Национальный горный университет», пр. Карла Маркса, 19, Днепропетровск, Украина, 49000, тел. +38 (050) 45 29 945, эл.почта ivaso94@mail.ru, ORCID 0000-0003-4219-7916

<sup>2\*</sup>Каф. «Строительство, геотехника и геомеханика», ГВУЗ «Национальный горный университет», пр. Карла Маркса, 19, Днепропетровск, Украина, 49000, тел. +38 (066) 87 19 081, эл.почта olga.trufanova.90@mail.ru, ORCID 0000-0001-8281-0354

## АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ БЕТОНА

**Цель.** Целью проведенных исследований была оценка перспективности использования наноматериалов в строительных технологиях, при одновременном соблюдении требований по сохранению экологической безопасности и рациональном использовании природных ресурсов. **Методика.** В ходе проведения исследований были изучены и проанализированы строительные композиты, в частности бетоны, получаемые на основе сырья, которые нагружаются на масштабных микро- и наноровнях; промоделированы процессы деформирования и разрушения наноструктурированных бетонов, в зависимости от их состава и технологических параметров получения. **Результаты.** Производство бетона напрямую зависит от компонентов, которые входят в его состав. Вследствие добычи и переработки этих компонентов происходит деградация земель из-за уничтожения почвы крупными карьерами, что несет угрозу экологии окружающей среды. В связи с этим возникает необходимость в создании иной концепции получения строительных материалов для изготовления бетона. В ее основу должна быть положена новая отрасль науки, базирующаяся на понятиях нано-технологий, наноматериалов и наноструктурирования. Особенностью наноструктурированных бетонов является введение в их состав нанодобавок (углеродные нанотрубки, механоактивированные доменные шлаки). Изучение закономерностей деформирования и разрушения бетона на основе механоактивированного сырья позволит направленно воздействовать на структуру, физико-химические, механические и деформационные свойства. **Научная новизна.** Проведенные исследования показали, что наноструктурированные бетонные смеси имеют большую подвижность. Прочность таких композитов повышается на 13 % – без сокращения расхода цемента и на 8,8 % – при сокращении расхода цемента на 10 %. **Практическая значимость.** Применение структурированных бетонов на основе механоактивированного сырья позволит повысить эффективность переработки промышленных отходов, улучшить физико-механические и технологические свойства получаемых композитов. С точки зрения экономической целесообразности применение наноструктурированного бетона является выгодным, так как он набирает высокую прочность, при этом вес и объем конструкции уменьшается. Использование новых технологий позволит улучшить экологические показатели строительных материалов и уменьшить вредное воздействие на атмосферу в процессе их производства.

*Ключевые слова:* бетоны; механоактивация; прочность; наноматериалы; наноструктурирование; астралены

### Введение

Бетон является одним из основных материалов, применяемых в гражданском и промышленном строительстве.

Бетоны можно классифицировать, как многокомпонентные композиционные материалы на основе минеральных вяжущих, свойства которых определяются видом, размерностью и характером взаимодействия компонентов. При этом одним из самых существенных факторов, определяющих их свойства, является учет особенностей взаимодействия этих компонентов и их соединений на межфазных границах в уже затвердевших бетонах. В целом,

можно утверждать, что технология любого бетона, в силу высокой дисперсности компонентов, особенно цемента – классический пример издавна существовавшей промышленной нанотехнологии [7, 3].

В последние годы развитие наноиндустрии приобрело широкомасштабный характер в различных областях человеческой деятельности. Особое внимание уделяется развитию использования наноматериалов в строительстве [5, 10].

Область применения наноматериалов постоянно расширяется, поэтому вопрос о возможности их использования в строительных материалах очень актуален.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

При этом стоит отметить, что охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов – одна из самых актуальных проблем современности [9, 2]. В последнее время в Украине наблюдается проблема недостатка материальных и энергетических ресурсов, который требует разработки прогрессивных малозэнергоёмких технологий производства строительных материалов и изделий. Проблема полной переработки отходов предприятий также является экологически важной.

**Цель**

Целью проведенных исследований была оценка перспективности использования наноматериалов в строительных технологиях, при одновременном соблюдении требований по сохранению экологической безопасности и рациональном использовании природных ресурсов. Также целью данной работы является установление закономерностей формирования структуры материала, его прочностных и упруго-пластических свойств.

**Методика**

Работа посвящена изучению строительных композиций, в частности бетонов, на основе сырья, которое нагружается на масштабном микро- и наноуровнях. Методика заключается:

- в исследовании свойств и гранулометрических характеристик компонентов бетонных смесей;
- в исследовании влияния гранулометрических характеристик и удельной поверхности материалов на их активность (прочность);
- в изучении физико-химических и технологических свойств наноструктурированных строительных композиций;
- в моделировании процессов деформирования и разрушения наноструктурированных бетонов в зависимости от их состава и технологических параметров получения.

**Результаты**

Производство бетона напрямую зависит от компонентов, входящих в его состав. Основой для бетона является цемент – самый дорогой компонент бетонной смеси. По итогам 6 месяцев 2013 года емкость рынка цемента в Украине сократилась на 13 % и составила 4,71 млн тонн (рис. 1).

Doi 10.15802/stp2014/30453

По сравнению с 2012 годом в 2013 году спад цементного производства за период январь–октябрь составил 3 % (рис. 2).

Для щебеночной отрасли начало 2013 года ознаменовалось стремлением выдать больше продукции – около 70 млн тонн, из которых порядка 30 млн тонн будет затрачено на производство бетона [8].

Песка в Украине ежегодно добывают около 22 млн тонн, из которых порядка 15 млн тонн идет на производство бетона. Производство бетона занимает второе место в мире по потреблению водных ресурсов.

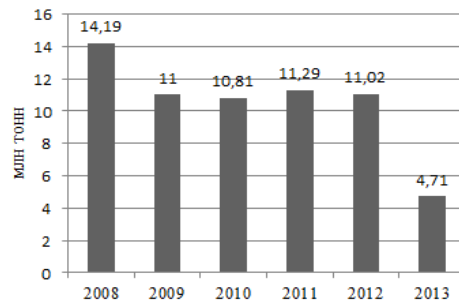


Рис. 1. Емкость рынка цемента в 2008–2013 годах

Fig. 1. Market capacity of the cement in 2008–2013

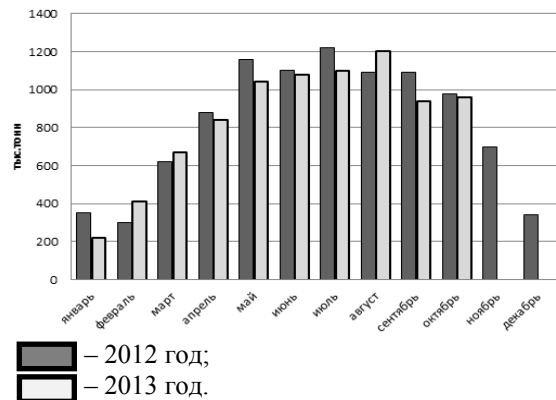


Рис. 2. Производство цемента в Украине за 2013 год

Fig. 2. Cement production in Ukraine in 2013

Исходя из вышеизложенного, стоит отметить, что крупные карьеры строительного сырья уничтожают почвы на значительных площадях и вызывают эффект гидрогеологической депрессионной воронки, в результате чего понижается уровень подземных вод на территории, наблюдается деградация земель, в 10–15 раз превышающей площадь открытых разработок. Ежегодно образуется около 50 тыс. га нарушенных земель, объемы рекультивации которых состав-

© А. П. Иванова, О. И. Труфанова, 2014

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

ляют около 60 % площади отчуждаемых земель, что не обеспечивает их своевременного возвращения в хозяйственный оборот [4].

В связи с этим возникает необходимость в создании иной концепции строительного бетона. В ее основу положена новая отрасль науки, базирующаяся на понятиях нанотехнологий, наноматериалов и наноструктурирования.

Наноматериалы можно разделить на четыре основные категории.

Первая категория включает материалы в виде твердых тел, размеры которых в одном, двух или трех пространственных координатах не превышают 100 нм. К таким материалам можно отнести наноразмерные частицы (нанопорошки), нановолокна, нанопроволоки, очень тонкие пленки (толщиной менее 100 нм), нанотрубки и т. п. Такие материалы могут содержать от одного структурного элемента или кристаллита (для частиц порошка) до нескольких их слоев (для пленки). В связи с этим первую категорию можно классифицировать как наноматериалы с малым числом структурных элементов или наноматериалы в виде наноизделий.

Вторая категория включает в себя материалы в виде малоразмерных изделий с характеризующим размером в примерном диапазоне 1 мкм – 1 мм. Обычно это проволоки, ленты, фольги. Такие материалы содержат уже значительное число структурных элементов и их можно классифицировать как наноматериалы с большим числом структурных элементов (кристаллитов) или наноматериалы в виде микроизделий.

Третья категория представляет собой массивные (или иначе объемные) наноматериалы с размерами изделий из них в макродиапазоне (более нескольких миллиметров). Такие материалы состоят из очень большого числа наноразмерных элементов (кристаллитов) и фактически являются поликристаллическими материалами с размером зерна 1–100 нм [11].

Четвертая категория включает композиционные материалы, содержащие в своем составе компоненты из наноматериалов из первой категории и второй категории (рис. 3) [1].

Особенностью наноструктурированных бетонов является введение в состав бетонов и цементных растворов нанодобавок. Нанодисперсные наполнители являются высокоточными минеральными веществами, которые формируют адгезионную прочность в цементном камне и, со-

ответственно, повышают долговечность бетона, морозостойкость, водонепроницаемость и другие физико-механические характеристики [12]. Как пример, можно рассмотреть углеродные нанотрубки фуллероидного типа – астралены. Введение астраленов в бетонные смеси в самом незначительном количестве приводит к росту в составе цементного камня протяженных структур длиной в сотни мкм. Наличие таких образований является микродисперсным самоармированием цементного камня, что приводит к соответствующему упрочнению бетонов [6].



Рис. 3. Классификация наноматериалов

Fig. 3. Classification of nanomaterials

В качестве добавок могут быть использованы механоактивированные шлаки и шламы металлургического производства. Одним из наиболее эффективных способов использования вторичных материалов в качестве сырья, ускорения процессов их переработки является механоактивация за счет применения скоростных режимов механических нагрузок на масштабных микро- и наноуровнях. Изучение закономерностей деформирования и разрушения бетона на основе механоактивированного сырья позволит направленно воздействовать на структуру, физико-химические, механические и деформационные свойства. Также это будет способствовать разработке технологий получения строительных материалов, изделий и конструкций с улучшенными прочностными и деформационными свойствами [13].

Благодаря своим качествам, наноструктурированные бетоны и материалы получают все более широкое распространение в строительной отрасли.

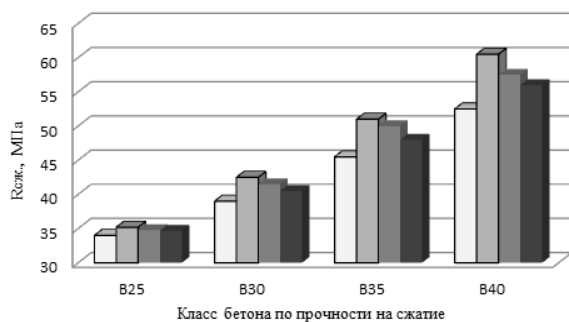
Немаловажным фактором рентабельности применения высококачественного бетона явля-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

ется оценка экологической безопасности и воздействия на окружающую среду. Основные компоненты, используемые для изготовления структурированного бетона, появляются после переработки отходов промышленности, а также измельчения исходных материалов и сырья. Сравнительный анализ экологических характеристик наиболее распространенных строительных материалов и наноматериалов показал, что нанобетон и нановолокно безвредны при соблюдении правил безопасности.

### Научная новизна и практическая значимость

В общем смысле нанотехнологии включают создание и использование материалов, свойства которых определяется наноструктурой, то есть ее упорядоченными фрагментами размером от 1 до 100 нм. Область применения наноматериалов постоянно расширяется, поэтому вопрос о возможности их использования в строительных материалах очень актуален. В строительстве широкое распространение получили нанобетоны, прочность которых почти на 150 % превышает среднюю прочность конструкционных бетонов, их морозостойкость выше на 50 %, а вероятность появления трещин в разы ниже. Так же стоит отметить и тот факт, что вес конструкции, произведенной из такого бетона, уменьшается в шесть раз.



- без наноматериалов;
- с наноматериалами без сокращения расхода цемента;
- с наноматериалами с сокращением расхода цемента на 10 %;
- с наноматериалами с сокращением расхода цемента на 15 %.

Рис. 4. Зависимость прочности бетона при сжатии по классам

Fig. 4. Dependence of the concrete strength during compression by classes

Проведенные исследования показали, что наноструктурированные бетонные смеси имеют большую подвижность. Прочность таких композитов повышается на 13 % – без сокращения расхода цемента и на 8,8 % – при сокращении расхода цемента на 10 % (рис. 4).

С точки зрения экономической целесообразности применения наноструктурированного бетона является выгодным, так как он набирает высокую прочность, при этом вес и объем конструкции уменьшается. Все это позволяет надеяться, что уже в обозримом будущем произойдет промышленное внедрение нанобетонов, которое позволит получить значительный экономический эффект, поскольку при увеличении потребительских характеристик нанобетонов в 4–6 раз их стоимость выше обычных не более чем на 10–20 % (что наглядно иллюстрирует рис. 4).

Как пример, можно привести пешеходный мост в Японии, где применение нанобетонов сэкономило 15 % денежных средств.

### Выводы

Рассмотренный и проанализированный набор методов и средств формирования свойств высококачественных бетонов с применением наноматериалов и соответствующих технологий, в том числе предложенных авторами настоящей работы, открывает систему новых возможностей для перехода строительного материаловедения на принципы создания материалов с заданными свойствами в диапазоне очень высоких значений их параметров.

Важно отметить, что преимущества нанобетонов обусловлены особой структурой, формируемой вследствие самоорганизации цементного камня на наноуровне. Использование новых технологий позволит улучшить экологические показатели строительных материалов и уменьшить вредное воздействие на атмосферу в процессе их производства. Вполне возможно, что развитие нанотехнологий приведет к появлению на строительном рынке принципиально новых видов материалов.

В настоящее время в мире зарегистрировано и выпускается промышленностью более 1 800 наименований наноматериалов. Самые развитые страны борются за лидерство в этой сфере. При этом доля США на рынках наукоемкой продукции составляет 36 %, Японии – 30 %, тогда как для Украины эта сфера является новой. В стра-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

нах Европы создаются научные лаборатории и центры по изучению наноматериалов. В то время как в Украине эта проблема носит, в основном, фрагментарный характер.

Решение этих задач должно быть выведено на государственный уровень, так как за нанотехнологиями стоит будущее.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алферов, Ж. И. О состоянии и перспективах развития полупроводниковой электроники в России / Ж. И. Алферов // Нано- и микросистемная техника. – 2005. – № 8. – С. 2–19.
2. Иванова, А. П. Исследование долговечности центрально сжатых стержней с изменяющимися геометрическими характеристиками / А. П. Иванова // Науч. вестн. НГУ. – 2013. – № 3. – С. 87–92.
3. Коваленко, В. В. Исследование влияния размера заполнителя на прочность фибробетона на изгиб / В. В. Коваленко // Науч. вестн. НГУ. – 2011. – № 6. – С. 40–42.
4. Королев, Е. В. Модифицирование строительных материалов нанокремнеземными трубками и фуллеренами / Е. В. Королев, Ю. М. Баженов, В. Д. Береговой // Строит. Материалы–Наука. – 2006. – № 8. – С. 2–4.
5. Пономарев, А. Н. Перспективные конструкционные материалы и технологии, создаваемые с применением нанодисперсных фуллероидных систем / А. Н. Пономарев // Вопр. материаловедения. – 2001. – Т. 26, № 2. – С. 65.
6. Раков, Э. Г. Нанотрубки и фуллерены : учеб. пособие / Э. Г. Раков. – М. : Логос, 2006. – 371 с.
7. Рудак, В. Н. Нанотехнологические аспекты оценки нормативных физико-механических характеристик конструкционного бетона в рамках теории скольжения микрополяризованной среды (мпс) при доверительной вероятности  $v_{bkn1} = (1-1,64 \times 0,135 \times 0,01b_i)$  / В. Н. Рудак, Г. А. Молодченко, Д. В. Абракитов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 39. – С. 173–179.
8. Труфанова, О. И. Анализ перспектив развития бетонного производства в Украине с учетом структурирования самого бетона на наноуровне / Стр-во, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. – Д., 2014. – Вып. 75. – С. 247–250.
9. Шашенко, А. Н. Моделирование процессов накопления геометрических повреждений вследствие коррозии в стержнях при осевом растяжении / А. Н. Шашенко, А. С. Штельмах // Metallurg. и горноруд. пром-сть. – 2012. – № 5. – С. 75–78.
10. Юдович, М. Е. Поверхностно-активные свойства наномодифицированных пластификаторов / М. Е. Юдович, А. Н. Пономарев, С. И. Гареев // Строит. материалы. – 2008. – № 3. – С. 2–3.
11. Panek, J. The implementation of nanotechnology in concrete / J. Panek, S. Maguire // Engineering Freshman Engineering Conference (14.04.2012) : 12 Annual Conference / Pittsburgh : University of Pittsburgh Swanson School, 2012. – P. 1–5.
12. Solomon, G. Improved technique of dispersing carbon nano-tubes may help to revolutionize concrete / G. Solomon // J. of the Eden Energy. – December 2011. – Level 40. – P. 1–3.
13. Will, K. Nanoengineering ultra-high-performance concrete with multiwalled carbon nanotubes / K. Will, J. Loh // J. of the Transportation Research Board. – 2010. – № 2142. – P. 1–8.

Г. П. ИВАНОВА<sup>1\*</sup>, О. И. ТРУФАНОВА<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Будівництво, геотехніка і геомеханіка», ДВНЗ «Національний гірничий університет», пр. Карла Маркса, 19, Дніпропетровськ, Україна, 49000, тел. +38 (050) 45 29 945, ел. пошта ivaso94@mail.ru, ORCID 0000-0003-4219-7916

<sup>2\*</sup>Каф. «Будівництво, геотехніка і геомеханіка», ДВЗН «Національний гірничий університет», пр. Карла Маркса, 19, Дніпропетровськ, Україна, 49000, тел. +38 (066) 87 19 081, ел. пошта olga.trufanova.90@mail.ru, ORCID 0000-0001-8281-0354

## АНАЛІЗ І ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЕФЕКТИВНИХ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ВИРОБНИЦТВІ БЕТОНУ

**Мета.** Метою проведеного дослідження була оцінка перспективи використання наноматеріалів у будівельних технологіях при одночасному дотриманні вимог по збереженню екологічної безпеки та раціональному використанні природних ресурсів. **Методика.** У ході проведення досліджень було вивчено та проаналізовано будівельні композити, зокрема бетони, що отримують на основі сировини, які навантажуються на масштабних мікро- і нанорівнях; промодельовані процеси деформування і руйнування наноструктурованих бетонів, в залежності від їх складу і технологічних параметрів отримання. **Результати.** Виробництво бетону безпосередньо

Doi 10.15802/stp2014/30453

© А. П. Иванова, О. И. Труфанова, 2014

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

залежить від компонентів, що входять до його складу. При видобуванні цих компонентів відбувається деградація земель через знищення ґрунту великими кар'єрами, що несе загрозу екології. У зв'язку з цим виникає необхідність у створенні іншої концепції отримання будівельного бетону. В її основу повинна бути покладена нова галузь науки, яка базується на поняттях нанотехнологій, наноматеріалів та наноструктурування. Особливістю наноструктурованих бетонів є введення до їх складу нанодобавок (вуглецеві нанотрубки, механоактивовані доменні шлаки). Вивчення закономірностей деформування і руйнування бетону на основі механоактивованої сировини дозволить направлено впливати на структуру, фізико-хімічні, механічні та деформаційні властивості. **Наукова новизна.** Проведені дослідження показали, що наноструктуровані бетонні суміші мають велику рухомість. Міцність таких композитів підвищується на 13 % – без скорочення витрат цементу і на 8,8 % – при скороченні витрат цементу на 10 %. **Практична значимість.** Застосування структурованих бетонів на основі механоактивованої сировини дозволить підвищити ефективність переробки промислових відходів, поліпшити фізико-механічні та технологічні властивості одержуваних композитів. З точки зору економічної доцільності застосування наноструктурованого бетону є вигідним, так як він набирає високу міцність, при цьому вага та об'єм конструкції зменшується. Використання нових технологій дозволить покращити екологічні показники будівельних матеріалів та зменшити шкідливий вплив на атмосферу у процесі їх виготовлення.

*Ключові слова:* бетони; механоактивація; міцність; наноматеріали; наноструктурування; астралени

Н. Р. IVANOVA<sup>1\*</sup>, О. І. TRUFANOVA<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Construction, Geotechnics and Geomechanics», National Mining University, Karl Marx Av., 19, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49000, tel. + 38 (050) 45 29 945, e-mail ivaso94@mail.ru, ORCID 0000-0003-4219-7916

<sup>2\*</sup>Dep. «Construction, Geotechnics and Geomechanics», National Mining University, Karl Marx Av., 19, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49000, tel. +38 (066) 87 19 081, e-mail olga.trufanova.90@mail.ru, ORCID 0000-0001-8281-0354

## ANALYSIS AND APPLICATION PROSPECTS OF EFFECTIVE RESOURCES-SAVING TECHNOLOGIES IN CONCRETE MANUFACTURE

**Purpose.** Prospectivity assessments of the nano-materials usage in construction technologies at the same time meeting the requirements of environmental safety and rational use of the natural resources. **Methodology.** During the study the building composites, in particular concretes, which are obtained on the base of the raw materials, which are introduced in the array of micro- and nanolevels were researched and analyzed. The deformation and deterioration processes of nanostructured concrete depending on their composition and manufacture parameters were simulated. **Findings.** Concrete manufacture is in the direct dependence on its components. Due to the extraction and processing of these components land degradation occurs because of soil destruction with oversize pits, which threatens the ecology of the environment. In this connection there is a need for another concept of building materials receiving for concrete manufacture. The new branch of science based on nanotechnologies, nanomaterials and nanostructuring is a key to its foundation. The special features of nanostructured concretes are the nanoagents in their composition (carbon nanotubes, mechanoactivated slags of blast furnace production). The study of deformation patterns and concrete deterioration based on the mechanoactivated material will purposefully affect the structure, physical and chemical properties, as well as the mechanical and deformational ones. **Originality.** The researches have shown that nano-structured concrete had high fluidity. The strength of such compositions is enhanced up to 13 % without reduction of concrete consumption and up to 8.8% at 10% reduced concrete consumption. **Practical value.** The application of the structured concretes based on the mechanoactivated material will increase the efficiency of the industrial wastes recycling and improve the physical, mechanical and technological properties of the produced composites. From the standpoint of the economic benefits, the application of the nano-structured concrete is profitable, as it develops high strength along with the decrease in the weight and volume of the constructions. The use of new technologies will improve the environmental performance of building materials and reduce the harmful effects on the environment during their production.

*Keywords:* concrete; mechanical activation; strength; nano-materials; nano-structuring; astralenes

### REFERENCES

1. Alferov Zh.I. O sostoyanii i perspektivakh razvitiya poluprovodnikovoy elektroniki v Rossii [About the state and prospects of semiconductor electronics development in Russian]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Nano and Microsystem Technology*, 2005, no. 8, pp. 2-19.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

2. Ivanova A.P. Issledovaniye dolgovechnosti tsentralno szhatykh sterzhney s izmenyayushchimisya geometricheskimi kharakteristikami [Investigation of centrally compressed bars life with varying geometric characteristics]. *Nauchnyy vestnik NGU – Scientific Bulletin of NSU*, 2013, no. 3, pp.87-92.
3. Kovalenko V.V. Issledovaniye vliyaniya razmera zapolnitelya na prochnost fibrobetona na izgib [Effect investigation of the filler size on strength of fiber-reinforced concrete on flexural]. *Nauchnyy vestnik NGU – Scientific Bulletin of NSU*, 2011, no. 6, pp. 40-42.
4. Korolev Ye.V., Bazhenov Yu.M., Beregovoy V.D. Modifitsirovaniye stroitelnykh materialov nanouglerodnymi trubkami i fullerenami [Modification of building materials with carbon nano tubes and fullerenes]. *Stroitelnyye Materialy–Nauka – Building Materials–Science*, 2006, no. 8, pp. 2-4.
5. Ponomarev A.N. Perspektivnyye konstruksionnyye materialy i tekhnologii, sozdavayemye s primeneniyyem nano-dispersnykh fulleroidnykh system [Promising construction materials and technologies that are created with the use of nano-disperse fulleroid systems]. *Voprosy materialovedeniya – Problems of Materials Science*, 2001, vol. 26, no. 2, p. 65.
6. Rakov Ye.G. *Nanotrubki i fullereny* [The nano-tubes and fullerenes]. Moscow, Logos Publ., 2006. 371 p.
7. Rudakov V.N., Molodchenko G.A., Abrakitov D.V. Nanotekhnologicheskiye aspekty otsenki normativnykh fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik konstruksionnogo betona v ramkakh teorii skolzheniya mikropolyarizovannoy sredy (mps) pri doveritelnoy veroyatnosti vbkni = (1-1,64×0,135×0,01bi) [Standart physical and mechanical carachteristics of consructial concrete and their nanotechnological valuation aspects in frame of the theory sliding into a micro-polarized sphere (mps) with an acceptable probability vbkni = (1-1,64 × 0,135 × 0,01bi)]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 36, pp. 173-179.
8. Trufanova O.I. Analiz perspektiv razvitiya betonogo proizvodstva v Ukraine s uchetom strukturirovaniya samogo betona na nanourovne [Analysis of prospects for the development of concrete manufacture in Ukraine, including the structuring of the concrete at the nanoscale]. *Stroitelstvo, materialovedeniye, mashinostroyeniye* [Construction, materials science, engineering], 2014, no. 75, pp. 247-250.
9. Shashenko A.N., Shtelmakh A.S. Modelirovaniye protsessov nakopleniya geometricheskikh povrezhdeniy vsledstviye korrozii v sterzhnyakh pri osevom rastyazhenii [Modeling the processes of accumulation of geometric damage due to corrosion in the bars under axial tension]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost – Metallurgical and Mining Industry*, 2012, no. 5, pp. 75-78.
10. Yudovich M.Ye., Ponomarev A.N., Gareyev S.I. Poverkhnostno-aktivnyye svoystva nanomodifitsirovannykh plastifikatorov [Surface-active properties of nano-modified plasticizers]. *Stroitelnyye materialy – Building materials*, 2008, no. 3, pp. 2-3.
11. Panek J. The implementation of nanotechnology in concrete. Twelfth Annual Conference. Pittsburgh, March 2012, pp.1-5.
12. Solomon G. Improved technique of dispersing carbon nano-tubes may help to revolutionize concrete. *Journal of Eden Energy*, December 2011, level 40, pp.1-3.
13. Will K., Loh J. Nanoengineering ultra-high-performance concrete with multiwalled carbon nanotubes. *Journal of the Transportation Research Board*, December 2010, no. 2142, pp. 1-8.

*Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. А. Н. Шашенко (Украина); д.т.н., проф. В. Д. Петренко (Украина)*

Поступила в редколлегию: 10.06.2014

Принята к печати: 28.07.2014

## UDC [539.51:625.06]-047.58

S. P. PANCHENKO<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Structural Mechanics and Strength of Materials», Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskiy St., 24a, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49600, tel. +38 (0562) 46 98 22, e-mail serpanko@mail.ru, ORCID 0000-0001-5826-3645

## NUMERICAL SIMULATION OF VISCOELASTIC MATERIALS

**Purpose.** The main goal of this paper is to develop the numerical model of viscoelastic material using finite element method (FEM). The model was applied to asphalt-aggregate mixtures. Additionally the obtained numerical results with use of different FEM software were compared with experimental data. **Methodology.** In order to perform the investigation, the numerical specimen was built within FEM software. Material of the specimen was assumed to be viscoelastic. Viscoelastic materials are characterized by a combination of elastic behavior, which stores energy during deformation, and viscous behavior, which dissipates energy during deformation. It was assumed that the behavior of the material corresponds to generalized Maxwell model. The model consists of a spring element in parallel with a number of spring and dashpot Maxwell elements. Generalized Maxwell model consisting of 5 elements was offered at  $\mu^\infty = 0$ . Mechanical properties of the material correspond to the properties of real asphaltic material. **Findings.** As the result of calculations the stress and strain state of the asphalt specimen were obtained. To compare mechanical characteristics of the model with experimental data the dynamic elastic modulus and phase angle values were calculated. **Originality.** Viscoelastic material model based on generalized Maxwell scheme was developed using ANSYS software. In order to compare the numerical model of the material with real asphalt-aggregate mix data, the values of dynamic modulus and phase angle were selected. Analyzing the results of calculations one can see good correspondence of numerical material model to experimental data. Moreover, the numerical data obtained with ANSYS and LS-DYNA software were compared. **Practical value.** It should be emphasized that FEM gives the possibility of determining stresses and strains for asphalt pavement non-elastic models what is of great importance using mechanistic design procedures.

*Keywords:* mechanical properties; numerical model; viscoelastic material; generalized Maxwell model; finite element method

## Introduction

The constitutive behaviour of many engineering materials combines with its elastic, viscous, plastic and fracturing response. Determining the parameters of such materials within a wide range of loadings is extremely complicated. Even in such a case when plasticity and fracture are not considered, material viscosity causes temperature and strain rate dependence of the stiffness, what is of great importance analysing asphaltic materials [1, 2] or polymers. For that reason, temperature and strain rate are sometimes integrated in the elastic parameters of the models.

Another problem arising from application of non-elastic materials in the process of structural design is to perform appropriate experimental test in order to calibrate material parameters. While such tests are performed, we need to use special optimization algorithms which allow obtaining the best curve fitting results. This problem is especially important in case of cyclic tests used for viscoelastic materials [5, 7, 9-11, 14, 15].

## Purpose

The main goal of this paper is to develop the numerical model of viscoelastic material using finite element method. The model will be applied to asphalt-aggregate mixtures. Additionally the obtained numerical results with use of different FEM software will be compared with experimental data.

## Methodology

In order to perform the investigation, the numerical specimen was built within FEM software. Material of the specimen was assumed to be viscoelastic. Viscoelastic materials are characterized by a combination of elastic behavior, which stores energy during deformation, and viscous behavior, which dissipates energy during deformation. The elastic behavior is rate-independent and represents the recoverable deformation due to mechanical loading. The viscous behavior is rate-dependent and represents dissipative mechanisms within the material [3, 4, 8]. A wide range of materials such

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

as polymers, glassy materials, soils, biologic tissue, and textiles exhibit viscoelastic behavior. Material is viscoelastic if its stress response consists of an elastic part and viscous part. Upon application of a load, the elastic response is instantaneous while the viscous part changes over time. Generally, the stress function of viscoelastic materials can be defined in an integral form. Within the context of small strain theory, the constitutive equation for isotropic viscoelastic material can be written as follows:

$$\sigma = \int_0^t 2G(t - \tau) \frac{de}{d\tau} d\tau + I \int_0^t K(t - \tau) \frac{d\Delta}{d\tau} d\tau,$$

where  $e$  – denotes deviatoric part of the strain,  $\Delta$  – represents volumetric part of the strain,  $G(t)$  – represents shear relaxation kernel function,  $K(t)$  – bulk relaxation kernel function,  $t$  – current time,  $\tau$  – past time and  $I$  – is unit tensor.

The kernel functions are represented in terms of Prony series, which assumes that

$$G = G_\infty + \sum_{i=1}^{n_G} G_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i^G}\right),$$

$$K = K_\infty + \sum_{i=1}^{n_K} K_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i^K}\right),$$

where  $G_\infty, G_i$  – shear elastic moduli,  $K_\infty, K_i$  – bulk elastic moduli,  $\tau_i^G, \tau_i^K$  – relaxation times for each Prony component.

Introducing the relative moduli

$$\alpha_i^G = \frac{G_i}{G_0}, \quad \alpha_i^K = \frac{K_i}{K_0},$$

where

$$G_0 = G_\infty + \sum_{i=1}^{n_G} G_i,$$

$$K_0 = K_\infty + \sum_{i=1}^{n_K} K_i,$$

the kernel functions can be equivalently expressed as

$$G = G_0 \left[ \alpha_\infty^G + \sum_{i=1}^{n_G} \alpha_i^G \exp\left(-\frac{t}{\tau_i^G}\right) \right],$$

$$K = K_0 \left[ \alpha_\infty^K + \sum_{i=1}^{n_K} \alpha_i^K \exp\left(-\frac{t}{\tau_i^K}\right) \right].$$

The integral function can recover the elastic behaviour at the limits of very slow and very fast loadings. Here,  $G_0$  and  $K_0$  denote shear and bulk moduli at the fast load limit (i.e. the instantaneous moduli), while  $G_\infty$  and  $K_\infty$  are the moduli at the slow limit. The elasticity parameters input correspond to those of the fast load limit. Moreover, by admitting, the deviatoric and volumetric parts of the stress are assumed to follow different relaxation behaviour. The number of Prony terms for shear  $n_G$  and for volumetric behavior  $n_K$  need not be the same, nor do the relaxation times  $\tau_i^G$  and  $\tau_i^K$ .

The Prony representation has a prevailing physical meaning in that it corresponds to the solution of the classical differential model (the parallel Maxwell model) of viscoelasticity. This physical rooting is the key to understand the extension of the above constitutive equations to large-deformation cases as well as the appearance of the time-scaling law (for example, pseudo time) at the presence of time-dependent viscous parameters.

At the same time, generalized Maxwell material model was offered. The following Fig. 1 shows one dimensional representation of a generalized Maxwell solid. It consists of a spring element in parallel with a number of spring and dashpot Maxwell elements.

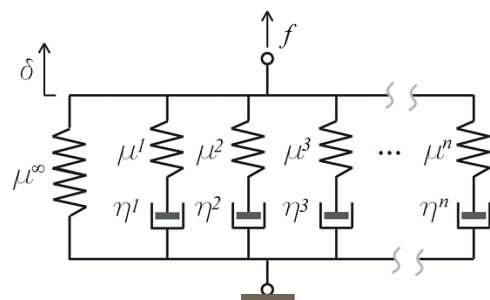


Fig. 1. Generalized Maxwell model

The development of material model was accomplished with software based on FEM. In order to solve the problem the numerical specimen of asphalt pavement was built. The specimen and its coordinate system are shown in Fig. 2, *a*, while the loading scheme is shown in Fig. 2, *b*.

Mechanical properties of the material correspond to the properties of real asphaltic material. It

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

was assumed that the behavior of the material corresponds to generalized Maxwell model. Generalized Maxwell model consisting of 5 elements was offered at  $\mu^\infty = 0$ .

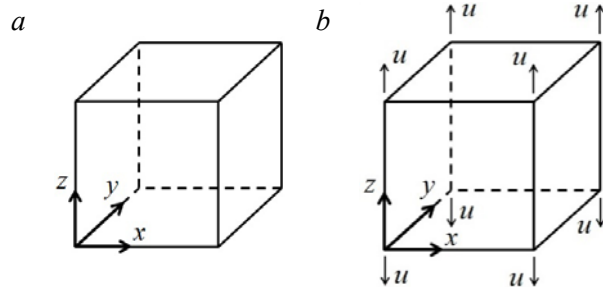


Fig. 2. Numerical specimen (a) and loading scheme (b)

In order to develop the numerical model of the material the data based on [13, 14] was used. Corresponding parameters of Maxwell model are shown in Table 1.

Table 1

Optimized data of Maxwell model				
№	Volumetric parameters		Deviatoric parameters	
	$K_m$	$\mu_m^{vol}$	$G_m$	$\mu_m^{dev}$
1	923	700	426	323
2	1 391	24 357	642	11 241
3	1 068	23	493	11
4	2 626	6	1212	3
5	945	118	436	54

In Table 1, volumetric (bulk elastic modulus) and deviatoric (shear elastic modulus) parts of the Maxwell elements are given. Moreover, corresponding viscosities are shown for each modulus. In order to implement appropriate loading and boundary conditions and to eliminate rigid motion, the 1/8 part of the specimen was investigated (see Fig. 3, a). Corresponding boundary and symmetry conditions were applied to reduced model (see Fig. 3, b).

The specimen was loaded kinematically applying a displacement in z-direction on the upper part of the cube (Fig. 3, b). The magnitude of the displacement was determined in such a way the strain in this direction to be equal  $5 \cdot 10^{-5}$ . Thus, the small deformations theory can be assumed. For our specimen, the displacement of the upper part of the

cube was determined to be equal  $5 \cdot 10^{-5}$  m. Moreover, the loading was taken with different frequencies corresponding to formula:  $u = A \sin(\omega t)$ . The following frequencies were proposed:  $f = 0.1, 0.5, 1.0, 5.0, 10.0, 25.0$  Hz (see Table 2). Here, A denotes amplitude of the load ( $A = 5 \cdot 10^{-5}$  m),  $\omega$  is circular frequency,  $\omega = 2\pi f$ .

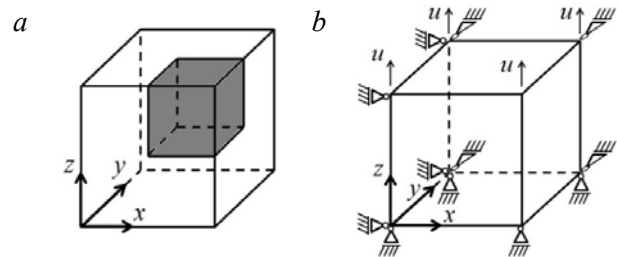


Fig. 3. Investigated scheme

Table 2 shows frequencies and corresponding values of dynamic moduli ( $E_{dyn}$ ) and phase angles ( $\varphi$ ) obtained in experiments.

Table 2

Experimental data of specimen investigation		
Frequency, Hz	Dynamic modulus, MPa	Phase angle, °
0.1	1 991	20.3
0.5	2 914	18.5
1.0	3 322	17.4
5.0	4 376	14.5
10.0	4 974	13.7
25.0	5 575	14.2

In the paper, the comparison of results is shown obtained with ANSYS and LS-DYNA software, based on finite element method.

**Findings**

As the result of calculations the stress and strain state of the asphalt specimen were obtained. It is necessary to note that the aim of this part was to develop numerical model of asphaltic material and to compare mechanical characteristics of the model with experimental data. To fulfill the task we had to calculate the dynamic elastic modulus and phase angle.

We can note that stress and strain at such type of loading can be written as:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t),$$

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0(\omega) \sin(\omega t - \varphi(\omega)),$$

where  $\sigma_0, \varepsilon_0(\omega)$  – amplitude values of stress and strain.

To determine dynamic elastic modulus and phase angle we have to write some relationships. So, to define the modulus we used such formulas:

$$E^*(i\omega) = E_{dyn}(\omega) \exp(i\varphi(\omega)),$$

where  $E_{dyn}(\omega) = |E^*(i\omega)| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0(\omega)}$  – dynamic elastic modulus.

Thus, to calculate the dynamic modulus, we have to know the amplitude values of stress and strain in the model.

In order to visualize the relations between stress and strain during numerical experiment the history graphs were built. The diagram of stress and strain changes for load case with 0.1 Hz frequency is shown in Fig. 4.

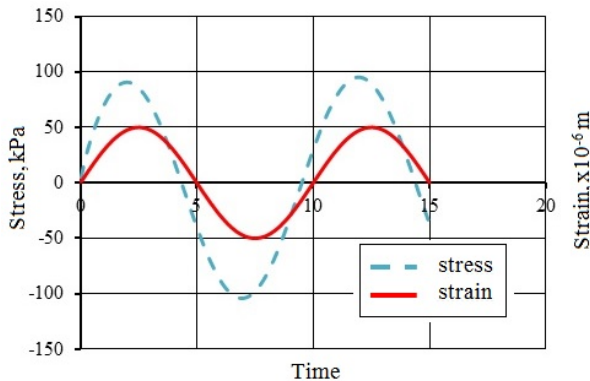


Fig. 4. Diagrams of stress and strain

To obtain the needed values we can use the diagrams of stress and strain as functions of time (Fig. 4). The amplitude values of stresses and strains are shown in the table 3. Also, obtained dynamic modulus are written in the table 3.

It is necessary to note that the characteristics achieve their maximal values at different time. So, maximal stress in the specimen appears early than maximal strain. To calculate phase angle we will use this difference.

To calculate phase angle, we also can use the diagrams (Fig. 4). On the diagrams we can see that there is the difference in time between maximal values of stresses and strains. It is equaled to the phase angle. To obtain the angle value it is necessary to determine the difference between maximal

values of stresses and strains on the time-axis and take into account the scale of the time. Also, we need to use the formula:

$$\varphi = 2\pi f \Delta t \text{ (in radians)}$$

Table 3

Frequency, Hz	Stresses, Pa	Strains	Dynamic modulus, MPa
0.1	99 685	50 · 10 <sup>-6</sup>	1 994
0.5	146 474		2 930
1.0	167 619		3 352
5.0	221 609		4 432
10.0	247 190		4 944
25.0	278 014		5 560

The difference as time between values of stresses and strains in the model and obtained values of the angle are shown in the table 4.

Table 4

Frequency, Hz	Time, Δt	Phase angle, °
0.1	0.57	20.52
0.5	0.1035	18.63
1.0	0.05	18.0
5.0	0.008	14.4
10.0	0.0038	13.68
25.0	0.00153	13.77

So, we can write main results (elastic dynamic modulus and phase angle) in the table 5.

Table 5

**Numerical results (ANSYS)**

Frequency, Hz	Dynamic modulus, MPa	Phase angle, °
0.1	1 994	20.52
0.5	2 930	18.63
1.0	3 352	18.0
5.0	4 432	14.4
10.0	4 944	13.68
25.0	5 560	13.77

The obtained results of investigation can be given as amplitude-phase characteristics. The storage modulus  $E'$  is situated on the x-axis, and loss one  $E''$  is situated on the y-axis, according to relations:

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

$$E^*(i\omega) = E'(\omega) + iE''(\omega),$$

$$E'(\omega) = E_{dyn}(\omega) \cos \varphi(\omega),$$

$$E''(\omega) = E_{dyn}(\omega) \sin \varphi(\omega)$$

The modulus were calculated based on the formulas. Obtained results are shown in the table 6.

Table 6

Numerical (ANSYS) and experimental results				
Frequency, Hz	ANSYS		Experiment	
	Storage modulus, MPa	Loss modulus, MPa	Storage modulus, MPa	Loss modulus, MPa
0.1	1 868	699	1 867	691
0.5	2 777	936	2 763	925
1.0	3 188	1 035	3 170	993
5.0	4 293	1 102	4 237	1 096
10.0	4 804	1 169	4 832	1 178
25.0	5 400	1 323	5 405	1 368

Also, in the table 6 experimental results are written.

Using data showed in the table 6, we can obtain the diagram of the modulus to compare experimental and numerical results (Fig. 5).

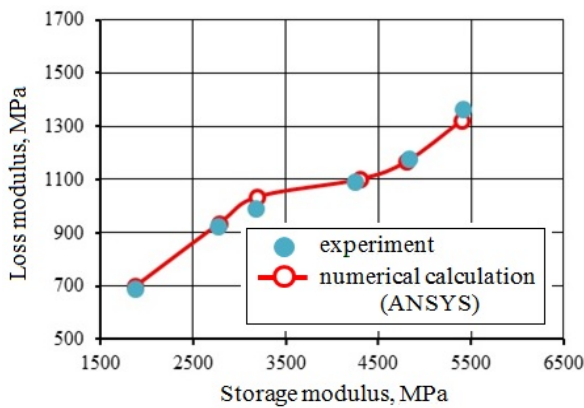


Fig. 5. Comparison of experimental and numerical (ANSYS) results

On the Fig. 5 we can see good agreement between experimental and numerical (ANSYS) data.

To estimate the different software, we will give the data obtained in LS-DYNA [14]. The values are showed in the table 7.

The comparison of experimental and numerical (LS-DYNA) data is shown in Fig. 6.

Table 7

Numerical results (LS-DYNA)

Frequency, Hz	LS-DYNA	
	Storage modulus, MPa	Loss modulus, MPa
0.1	1 868	689
0.5	2 762	913
1.0	3 189	971
5.0	4 252	1 154
10.0	4 701	1 167
25.0	5 402	1 492

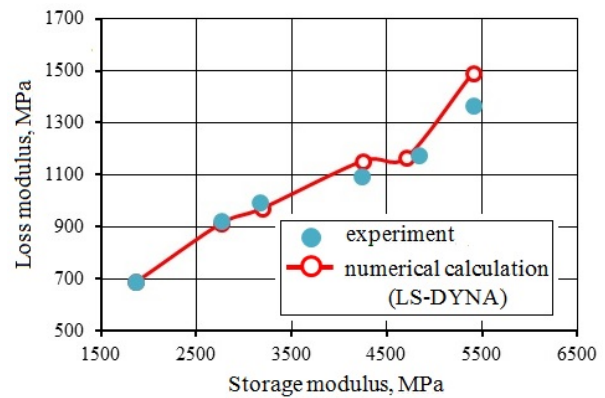


Fig. 6. Comparison of experimental and numerical (LS-DYNA) results

Comparing the diagrams (Figs. 5, 6) for numerical results obtained with ANSYS and LS-DYNA software we can see that the results of ANSYS calculations are better satisfied to experimental data.

Table 8

Results of numerical investigations

Frequency, Hz	ANSYS		LS-DYNA	
	Dynamic modulus, MPa	Phase angle, °	Dynamic modulus, MPa	Phase angle, °
0.1	1 994	20.52	1 991	20.24
0.5	2 930	18.63	2 909	18.31
1.0	3 352	18.0	3 334	16.94
5.0	4 432	14.4	4 406	15.19
10.0	4 944	13.68	4 844	13.94
25.0	5 560	13.77	5 605	15.45

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Let us to estimate the values of the corresponding modulus and phase angles obtained with different software. To do it, the values were written to common table 8.

As we can see from the table 8, the differences between the values are not essential. To confirm it the ratios of results obtained in ANSYS and LS-DYNA were determined and written to the table 9.

Table 9

**Comparison of numerical results**

Frequency, Hz	$E_{dyn}^{ANSYS} / E_{dyn}^{LS-DYNA}$	$\varphi^{ANSYS} / \varphi^{LS-DYNA}$
0.1	1.002	1.014
0.5	1.007	1.017
1.0	1.005	1.063
5.0	1.006	0.948
10.0	1.021	0.981
25.0	0.992	0.891

In the table 9, the ratios of elastic dynamic modulus and phase angles are shown. The relations of ANSYS results to LS-DYNA ones were calculated. It is necessary to note that every value is clothed to 1. It points on similarity of the results.

We can note that differences in dynamic modulus are small, and in phase angle are bigger. So, for the elastic dynamic modulus ratios the averaged difference in the results does not exceed 1%. As an exception, maximal difference is about 2% for load case with 10 Hz frequency. Minimal difference is 0.15% for load case with 0.1 Hz frequency.

If we speak about differences between phase angle results we can note such ratios. The maximal difference is 10.9% for load case with 25 Hz frequency. And minimal difference is 1.6% for load case with 0.1 Hz frequency.

So, the results of calculations for different software at load case with 0.1 Hz frequency coincided most exactly.

**Originality and practical value**

In the article, viscoelastic material model based on generalized Maxwell scheme was developed using ANSYS software. In order to compare the numerical model of the material with real asphalt-

aggregate mix data, the values of dynamic modulus and phase angle were selected. The procedure of the calculation was explained in [14]. Moreover, in this work the experimental data are given. To visualize the results the diagram of storage modulus vs. loss modulus was built (so called Cole-Cole graph) (Fig. 5). Analyzing the diagram one can see good correspondence of numerical material model to experimental data.

Moreover, the numerical data obtained with ANSYS and LS-DYNA software were compared. The compared data are written in Table 8. In Figs. 5, 6 the diagrams of ANSYS and LS-DYNA results are shown.

It should be emphasized that FEM gives the possibility of determining stresses and strains for asphalt pavement non-elastic models what is of great importance using mechanistic design procedures.

**Conclusions**

Comparing numerical results obtained with ANSYS and LS-DYNA software we can see that the results of ANSYS calculations are better satisfied to experimental data.

Analysis of data are written to the table 8 showed. Increasing of load frequency causes in increasing of elastic dynamic modulus and decreasing of phase angle. It can be noted that dynamic modulus increase from 1 to 6 load cases. But, values of phase angles decrease from 1 to 5 load cases and increase at 6 load case. Such behavior of the values is fulfilled for every investigated software.

Also, we can see that for load cases 1-5 dynamic modulus obtained with ANSYS software is bigger than the modulus obtained with LS-DYNA one. For load case 6, the LS-DYNA modulus is bigger than ANSYS one.

For values of phase angle, we note that phase angle is bigger for ANSYS software at load cases 1-3. And it is smaller for load cases 4-6.

It can be noted that relationships between load frequency and obtained values (elastic dynamic modulus and phase angle) are nonlinear. By the way, at little load frequency the velocity of value changing is bigger than at big one. So, most significant changes occur at load cases 1-3 (frequency 0.1; 0.5; 1.0 Hz).

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

## LIST OF REFERENCE LINKS

- Петренко, В. Д. Особливості моделювання шаруватої основи при її дослідженні методом скінченних елементів / В. Д. Петренко, Т. О. Селіхова // Транспорт. зв'язи. Проблеми и перспективы : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. (29.05-30.05. 2008) / Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна. – Днепропетровск, 2008. – С. 60–61.
- Рябошапка, А. Н. Асфальтобетон из горячих смесей / А. Н. Рябошапка, Е. И. Кошман // Будівництво : зб. наук. пр. / Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2001. – Вип. 9. – С. 120–122.
- Bland, D. R. The Theory of Linear Viscoelasticity / D. R. Bland. – Oxford : Pergamon Press, 1960. – 67 p.
- Christensen, R. M. Theory of Viscoelasticity / R. M. Christensen. – New York : Academic Press, 1982. – 384 p.
- Grzesikiewicz, W. Zastosowanie pochodnej ułamkowego rzędu do modelowania mieszanek mineralno-asfaltowych / W. Grzesikiewicz, A. Zbiciak // Pomiar Automatyka Kontrola. – 2011. – № 9. – P. 1048–1051.
- Kalabińska, M. Właściwości reologiczne asfaltów i kompozytów mineralno-asfaltowych. Seria „Budownictwo” / M. Kalabińska, J. Piłat. – Warszawa : OWPW, 1993. – 121 p.
- Kim, Y. R. Modeling of Asphalt Concrete / Y. R. Kim. – New York : ASCE Press, McGraw-Hill. – 2009. – 460 p.
- Nowacki, W. Teoria pełzania / W. Nowacki. – Warszawa : Arkady, 1963. – 407 p.
- Papagiannakis, A. T. Pavement Design and Materials / A. T. Papagiannakis, E. A. Masad. – Hoboken, NJ : Wiley, 2008. – 552 p. doi: 10.1002/9780470259924.
- Wang, L. Mechanics of Asphalt, Microstructure and Micromechanics / L. Wang. – New York : McGraw Hill, 2011. – 481 p.
- Zbiciak, A. Application of elasto-visco-plastic constitutive model for asphalt pavement creep simulation / A. Zbiciak // Archives of Civil Engineering. – 2008. – № 54, 3. – P. 635–647.
- Zbiciak, A. Constitutive modelling and numerical simulation of dynamic behaviour of asphalt-concrete pavement / A. Zbiciak // Engineering Transactions. – 2008. – № 56, 4. – P. 311–324.
- Zbiciak, A. Identification of constitutive model for asphalt-aggregate mixes using linear rheological schemes / A. Zbiciak, W. Grzesikiewicz // Polioptymalizacja i Komputerowe Wspomaganie Projektowania. – 2012. – № 10. – P. 187–196.
- Zbiciak, A. Identyfikacja doświadczalna i implementacja numeryczna modelu reologicznego mieszanki mineralno-asfaltowej / A. Zbiciak, R. Michalczyk // Monografie Zakładu Wytrzymałości Materiałów, „Teorii Sprężystości i Plastyczności. T. 3 : Deformacje i wytrzymałość materiałów i elementów konstrukcji. – Warszawa : OWPW, 2013. – Rozdz. 3. – P. 41–50.
- Zbiciak, A. Mathematical description of rheological properties of asphalt-aggregate mixes / A. Zbiciak // Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences. – 2013. – № 61 (1). – P. 65–72. doi: 10.2478/bpasts-2013-0005.
- Zbiciak, A. One-dimensional rheological models of asphalt-aggregate mixtures / A. Zbiciak, W. Grzesikiewicz, A. Wakulicz // Logistyka. – 2010. – № 6. – P. 3825–3832.

С. П. ПАНЧЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Будівельна механіка та опір матеріалів», ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24а, Дніпропетровськ, Україна, 49600, тел. +38 (0562) 46 98 22, ел. пошта serpanko@mail.ru, ORCID 0000-0001-5826-3645

## ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В'ЯЗКОПРУЖНИХ МАТЕРІАЛІВ

**Мета.** Основною метою статті є розробка чисельної моделі в'язкопружного матеріалу з використанням методу скінченних елементів. Побудована модель застосовувалась до асфальтної суміші. Додатково, чисельні результати, отримані за допомогою різних програмних комплексів, основаних на методі скінченних елементів, були порівняні з експериментальними даними. **Методика.** Для виконання дослідження був побудований чисельний зразок матеріалу в середовищі програмного комплексу, заснованому на методі скінченних елементів. Матеріал зразка припускався в'язкопружним. В'язкопружні матеріали характеризуються комбінацією пружної поведінки, яка накопичує енергію впродовж деформації, та в'язкої поведінки, яка розсіює енергію впродовж деформації. Передбачалось, що поведінка матеріалу відповідає узагальненій моделі Максвелла. Така модель складається з пружного елемента, з'єданого паралельно з набором пружних та демпферних максвеллових елементів. Була запропонована узагальнена модель матеріалу Максвелла, що

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

складалася з 5 елементів при  $\mu^\infty = 0$ . Механічні властивості матеріалу відповідали властивостям дійсного матеріалу асфальту. **Результати.** В якості результату розрахунків було отримано напружено-деформований стан зразка матеріалу асфальту. Для порівняння механічних характеристик моделі з експериментальними даними були обчислені величини динамічного модуля пружності та кута фазового зсуву. **Наукова новизна.** З використанням програмного комплексу ANSYS, розроблена модель в'язкопружного матеріалу, що базується на схемі узагальненої моделі Максвелла. Для порівняння чисельної моделі матеріалу з даними про дійсну асфальтну суміш були вибрані величини динамічного модуля пружності та кута фазового зсуву. Аналізуючи результати розрахунків, можна побачити хорошу відповідність чисельної моделі матеріалу до даних експерименту. Крім того, були порівняні дані чисельних розрахунків, отриманих в програмних комплексах ANSYS та LS-DYNA. **Практична значимість.** Необхідно відзначити, що метод скінченних елементів дає можливість визначення напружень та деформацій в непружних моделях матеріалу асфальтного покриття, що є важливим при конструюванні.

*Ключові слова:* механічні властивості; чисельна модель; в'язкопружний матеріал; узагальнена модель Максвелла; метод скінченних елементів

С. П. ПАНЧЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Строительная механика и сопротивление материалов», ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24а, Днепропетровск, Украина, 49600, тел. +38 (0562) 46 98 22, эл. почта serpanko@mail.ru, ORCID 0000-0001-5826-3645

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЯЗКОУПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ

**Цель.** Основной целью статьи является разработка численной модели вязкоупругого материала с использованием метода конечных элементов. Построенная модель применялась к асфальтной смеси. Дополнительно, численные результаты, полученные с помощью различных программных комплексов, основанных на методе конечных элементов, сравнивались с экспериментальными данными. **Методика.** Для выполнения исследования был построен численный образец материала в среде программного комплекса, основанного на методе конечных элементов. Материал образца предполагался вязкоупругим. Вязкоупругие материалы характеризуются комбинацией упругого поведения, при котором накапливается энергия при деформировании, и вязкого поведения, при котором рассеивается энергия при деформировании. Предполагалось, что поведение материала соответствует обобщенной модели Максвелла. Такая модель состоит из упругого элемента, соединенного параллельно с набором упругих и демпфирующих максвелловых элементов. Была предложена обобщенная модель материала Максвелла, которая состояла из 5 элементов при  $\mu^\infty = 0$ . Механические свойства материала соответствовали свойствам реального материала асфальта. **Результаты.** В качестве результата расчетов было получено напряженно-деформированное состояние образца материала асфальта. Для сравнения механических характеристик модели с экспериментальными данными были вычислены величины динамического модуля упругости и угла фазового сдвига. **Научная новизна.** С использованием программного комплекса ANSYS разработана модель вязкоупругого материала, которая базируется на схеме обобщенной модели Максвелла. Для сравнения численной модели материала с данными о реальной асфальтной смеси были выбраны величины динамического модуля упругости и угла фазового сдвига. Анализируя результаты расчетов, можно увидеть хорошее соответствие численной модели материала данным эксперимента. Кроме того, сравнивались данные численных расчетов, полученные в программных комплексах ANSYS и LS-DYNA. **Практическая значимость.** Необходимо отметить, что метод конечных элементов дает возможность определять напряжения и деформации в неупругих моделях материала асфальтного покрытия, что является важным при конструировании.

*Ключевые слова:* механические свойства; численная модель; вязкоупругий материал; обобщенная модель Максвелла; метод конечных элементов

## REFERENCES

1. Petrenko V.D., Selikhova T. O. Osoblyvosti modelivannia sharuvatoi osnovy pry yii doslidzhenni metodom skinchennykh elementiv [Features modeling of layered basis during its study with finite elements method]. *Sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Transportnyye svyazi. Problemy i*

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

- perspektivy»* [Proc. of Int. Sci. and Practical Conf. «Transport relations. Problems and prospects»]. Dnipropetrovsk, 2008, pp. 60-61.
2. Ryaboshapka A.N., Koshman Ye.I. Asfaltobeton iz goryachikh smesey [Hot-mixture asphalt concrete]. *Zbirnyk naukovykh prats «Budivnytstvo»* [Proc. «Construction»]. Dnipropetrovsk, 2001, issue 9, pp. 120-122.
  3. Bland D.R. The Theory of Linear Viscoelasticity. Oxford, Pergamon Press Publ., 1960. 67 p.
  4. Christensen R.M. Theory of Viscoelasticity. New York, Academic Press Publ., 1982. 384 p.
  5. Grzesikiewicz W., Zbiciak A. Zastosowanie pochodnej ułamkowego rzędu do modelowania mieszanek mineralno-asfaltowych. *Pomiary Automatyka Kontrola*, 2011, no. 9, pp. 1048-1051.
  6. Kalabińska M., Piłat J. Właściwości reologiczne asfaltów i kompozytów mineralno-asfaltowych. Seria «Budownictwo». Warszawa, OWPW Publ., 1993. 121 p.
  7. Kim Y.R. Modeling of Asphalt Concrete. New York, ASCE Press, McGraw-Hill, 2009. 460 p.
  8. Nowacki W. Teoria pełzania. Warszawa, Arkady Publ., 1963. 407 p.
  9. Papagiannakis A.T., Masad E.A. Pavement Design and Materials. NJ, Wiley Publ., 2008. 552 p. doi: 10.1002/9780470259924.
  10. Wang L. Mechanics of Asphalt, Microstructure and Micromechanics. New York, Mc Graw Hill, 2011. 481 p.
  11. Zbiciak A. Application of elasto-visco-plastic constitutive model for asphalt pavement creep simulation. *Archives of Civil Engineering*, 2008, no. 54, 3, pp. 635-647.
  12. Zbiciak A. Constitutive modelling and numerical simulation of dynamic behavior of asphalt-concrete pavement. *Engineering Transactions*, 2008, no. 56, 4, pp. 311-324.
  13. Zbiciak A., Grzesikiewicz W. Identification of constitutive model for asphalt-aggregate mixes using linear rheological schemes. *Poliptymalizacja i Komputerowe Wspomaganie Projektowania*, 2012, no. 10, pp. 187-196.
  14. Zbiciak A., Michalczyk R. Identyfikacja doświadczalna i implementacja numeryczna modelu reologicznego mieszanki mineralno-asfaltowej. Monografie Zakładu Wytrzymałości Materiałów, «Teorii Sprężystości i Plastyczności», tom 3 pt. «Deformacje i wytrzymałość materiałów i elementów konstrukcji». Warszawa, OWPW. 2013, rozdz. 3, pp. 41-50.
  15. Zbiciak A. Mathematical description of rheological properties of asphalt-aggregate mixes. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 2013, no. 61 (1), pp. 65-72. doi: 10.2478/bpasts-2013-0005.
  16. Zbiciak A., Grzesikiewicz W., Wakulicz A. One-dimensional rheological models of asphalt-aggregate mixtures. *Logistyka*, 2010, no. 6, pp. 3825-3832.

*Prof. V. L. Krasovskyy, D. Sc. (Tech.); Prof. V. D. Petrenko, D. Sc. (Tech.) recommended this article to be published*

Received: June 09, 2014

Accepted: Aug. 21, 2014

# ЗМІСТ

## **НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ**

**С. С. БЕЛІМЕНКО, В. О. ІЩЕНКО**

РОЗРОБКА КРИТЕРІВ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАРЯДУ Й РОЗРЯДУ ТВЕРДОТІЛЬНОГО ТЕПЛООВОГО АКУМУЛЯТОРА.....7

## **АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ**

**О. О. ГОЛОЛОБОВА, В. І. ГАВРИЛЮК, М. О. КОВРИГІН, С. Ю. БУРЯК**

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ НА РОБОТУ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОЇ ЛОКОМОТИВНОЇ СИГНАЛІЗАЦІЇ НЕПЕРЕРВНОЇ ДІЇ .....17

## **ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ**

**М. М. БІЛЯЄВ, О. В. БЕРЛОВ, О. В. ШЕВЧЕНКО**

МОДЕЛЮВАННЯ АВАРІЙНОГО ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ ПРИ НАДЗВИЧАЙНІЙ СИТУАЦІЇ В СХОВИЩІ ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ПАЛИВА .....29

## **ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ**

**Т. М. ГРУШЕВСЬКА**

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ПАСАЖИРОПОТОКІВ У ЗАЛІЗНИЧНОМУ ПРИМІСЬКОМУ СПОЛУЧЕННІ .....39

**А. Р. МІЛЯНИЧ**

ПОШКОДЖЕННЯ РОБОЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІНСТРУМЕНТУ, ПОВ'ЯЗАНИХ ІЗ ПЛАСТИЧНИМ ДЕФОРМУВАННЯМ ЗАТВЕРДЛИХ ОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН.....48

**А. В. ПРОХОРЧЕНКО**

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТІ МАСШТАБНОЇ ІНВАРІАНТНОСТІ СИСТЕМИ ОРГАНІЗАЦІЇ ПОЇЗДОПОТОКІВ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ПЕРКОЛЯЦІЇ.....56

## **ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ**

**Д. О. ЗАБАРИЛО**

ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСТОТИ ВИСОКОЧАСТОТНОЇ ЛАНКИ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОЇ СХЕМИ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ .....65

**Т. М. МІЩЕНКО**

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ТА МЕТОДИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ПРИСТРОЇВ СИСТЕМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ. МЕТОД ВАГОВОЇ ФУНКЦІЇ.....74

## **ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ**

**В. Д. ПЕТРЕНКО, В. В. КОВАЛЕВИЧ**

РЕЗУЛЬТАТИ ОБСТЕЖЕННЯ ГЕОРАДАРНИМ КОМПЛЕКСОМ ДЕФЕКТНИХ МІСЦЬ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ДОНЕЦЬКОЇ ЗАЛІЗНИЦІ .....83

## **МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО**

**І. О. ВАКУЛЕНКО, С. О. ПЛІТЧЕНКО, Д. М. МАКАРЕВИЧ**

ВПЛИВ ХІМІЧНИХ РЕЧОВИН НА ФОРМУВАННЯ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО РОЗРЯДУ .....92

**І. П. ВОЛЧОК, О. Л. СКУЙБІДА, О. В. ЛЮТОВА, Н. В. ШИРОКОБОКОВА**

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ВТОРИННИХ СИЛУМІНІВ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ РАФІНУВАЛЬНО-МОДИФІКУВАЛЬНОЇ, ТЕРМІЧНОЇ ТА ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБОК .....101

## **НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ**

**Р. Д. ІСКОВИЧ-ЛОТОЦЬКИЙ, Я. В. ІВАНЧУК, Я. П. ВЕСЕЛОВСЬКИЙ**

ОСНОВИ РЕЗОНАНСНО-СТРУКТУРНОЇ ТЕОРІЇ ВІБРОУДАРНОГО РОЗВАНТАЖЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ .....109

## **РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ**

**С. Р. КОЛЕСНИКОВ, Н. Р. РОМАНЮХА, І. Ю. КЕБАЛ**

ВІСЬ КОЛІСНОЇ ПАРИ З ПОРОЖНИНОЮ ПОСТІЙНОГО ПЕРЕРІЗУ .....119

<b>С. В. МЯМЛІН, В. М. БУБНОВ, Є. О. ПИСЬМЕННИЙ</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПІВВАГОНІВ НА ПЕРСПЕКТИВНИХ ВІЗКАХ .....	126
---	-----

***ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО***

<b>В. І. БОЛЬШАКОВ, М. О. ЄЛІСЄЄВА, С. А. ЩЕРБАК</b> КОНТАКТНА МІЦНІСТЬ МЕХАНОАКТИВОВАНИХ ДРІБНОЗЕРНИСТИХ БЕТОНІВ ІЗ ДОМЕННИХ ГРАНУЛЬОВАНИХ ШЛАКІВ.....	138
---	-----

<b>Г. П. ІВАНОВА, О. І. ТРУФАНОВА</b> АНАЛІЗ І ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЕФЕКТИВНИХ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ВИРОБНИЦТВІ БЕТОНУ .....	150
---	-----

<b>С. П. ПАНЧЕНКО</b> ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В'ЯЗКОПРУЖНИХ МАТЕРІАЛІВ .....	157
--	-----

# СОДЕРЖАНИЕ

## **НАУКА И ПРОГРЕСС ТРАНСПОРТА**

**С. С. БЕЛИМЕНКО, В. А. ИЩЕНКО**

РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАРЯДА И РАЗРЯДА  
ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ТЕПЛООВОГО АККУМУЛЯТОРА .....7

## **АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ**

**О. А. ГОЛОЛОБОВА, В. И. ГАВРИЛЮК, М. А. КОВРИГИН, С. Ю. БУРЯК**

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА РАБОТУ СИСТЕМЫ  
АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКОМОТИВНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ .....17

## **ЭКОЛОГИЯ НА ТРАНСПОРТЕ**

**Н. Н. БЕЛЯЕВ, А. В. БЕРЛОВ, А. В. ШЕВЧЕНКО**

МОДЕЛИРОВАНИЕ АВАРИЙНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ  
СИТУАЦИИ В ХРАНИЛИЩЕ ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА .....29

## **ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА**

**Т. Н. ГРУШЕВСКАЯ**

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПАССАЖИРОПОТОКА  
В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ПРИГОРОДНОМ СООБЩЕНИИ .....39

**А. Р. МИЛЯНИЧ**

ПОВРЕЖДЕНИЯ РАБОЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ ИНСТРУМЕНТА, СВЯЗАННЫХ  
С ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ ЗАТВЕРДЕВШИХ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ .....48

**А. В. ПРОХОРЧЕНКО**

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВА МАСШТАБНОЙ ИНВАРИАНТНОСТИ  
СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПОЕЗДОПОТОКОВ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ПЕРКОЛЯЦИИ .....56

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ**

**Д. А. ЗАБАРИЛО**

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЗВЕНА  
ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА .....65

**Т. Н. МИЩЕНКО**

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ  
УСТРОЙСТВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ. МЕТОД ВЕСОВОЙ ФУНКЦИИ .....74

## **ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ**

**В. Д. ПЕТРЕНКО, В. В. КОВАЛЕВИЧ**

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБСЛЕДОВАНИЯ ГЕОРАДАРНЫМ КОМПЛЕКСОМ ДЕФЕКТНЫХ  
МЕСТ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ДОНЕЦКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ .....83

## **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

**И. А. ВАКУЛЕНКО, С. А. ПЛИТЧЕНКО, Д. Н. МАКАРЕВИЧ**

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ  
ЭЛЕКТРОДУГОВОГО РАЗРЯДА .....92

**И. П. ВОЛЧОК, Е. Л. СКУЙБЕДА, О. В. ЛЮТОВА, Н. В. ШИРОКОБОКОВА**

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВТОРИЧНЫХ СИЛУМИНОВ ПУТЁМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
РАФИНИРУЮЩЕ-МОДИФИЦИРУЮЩЕЙ, ТЕРМИЧЕСКОЙ И ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТОК .....101

## **НЕТРАДИЦИОННЫЕ ВИДЫ ТРАНСПОРТА**

**Р. Д. ИСКОВИЧ-ЛОТОЦКИЙ, Я. В. ИВАНЧУК, Я. П. ВЕСЕЛОВСКИЙ**

ОСНОВЫ РЕЗОНАНСНО-СТРУКТУРНОЙ ТЕОРИИ ВИБРОУДАРНОЙ  
РАЗГРУЗКИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ .....109

## **ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ И ТЯГА ПОЕЗДОВ**

**С. Р. КОЛЕСНИКОВ, Н. Р. РОМАНЮХА, И. Ю. КЕБАЛ**

ОСЬ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ С ПОЛОСТЬЮ ПОСТОЯННОГО СЕЧЕНИЯ .....119

<b>С. В. МЯМЛИН, В. М. БУБНОВ, Е. А. ПИСЬМЕННЫЙ</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУВАГОНОВ НА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕЛЕЖКАХ .....	126
---	-----

***ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО***

<b>В. И. БОЛЬШАКОВ, М. А. ЕЛИСЕЕВА, С. А. ШЕРБАК</b> КОНТАКТНАЯ ПРОЧНОСТЬ МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ ИЗ ДОМЕННЫХ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ШЛАКОВ .....	138
--	-----

<b>А. П. ИВАНОВА, О. И. ТРУФАНОВА</b> АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ БЕТОНА .....	150
---	-----

<b>С. П. ПАНЧЕНКО</b> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЯЗКОУПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ .....	157
--	-----

# CONTENTS

## ***SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS***

**S. S. BELYMENKO, V. O. ISHCHEENKO**

DEVELOPMENT OF CRITERIA OF CHARGE AND DISCHARGE EFFICIENCY  
OF SOLID STATE OF HEAT ACCUMULATOR.....7

## ***TRANSPORT AUTOMATED CONTROL SYSTEMS***

**O. O. HOLOLOBOVA, V. I. HAVRYLIUK, M. O. KOVRYHIN, S. YU. BURIAK**

STUDY OF TRANSMISSION LINES EFFECT ON THE SYSTEM OPERATIONON  
OF CONTINUOUS AUTOMATIC CAB SIGNALLING .....17

## ***TRANSPORT ECOLOGY***

**M. M. BILIAIEV, A. V. BERLOV, A. V. SHEVCHENKO**

SIMULATION OF THE ACCIDENTAL POLLUTION AFTER THE EMERGENCY  
IN TO THE STORAGE OF ROCKET SOLID PROPELLANT.....29

## ***OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS***

**T. M. HRUSHEVSKA**

RESEARCH OF REGULARITIES OF PASSENGER FLOWS IN THE RAIL SUBURBAN TRAFFIC .....39

**A. R. MILIANYCH**

OPERATING ELEMENTS DAMAGE OF TOOLS CONNECTED WITH  
THE PLASTIC DEFORMATION OF HARDENED ORGANIC COMPOUNDS.....48

**A. V. PROKHORCHENKO**

INVESTIGATION OF SCALE-INVARIANT PROPERTY OF ORGANIZATION  
SYSTEM OF TRAIN TRAFFIC VOLUME BASED ON THE PERCOLATION THEORY .....56

## ***ELECTRIC TRANSPORT***

**D. O. ZABARYLO**

FREQUENCY DETERMINATION OF HIGH-FREQUENCY LINK  
FOR PERPECTIVE ELECTRIC ROLLING STOCK.....65

**T. N. MISHCHENKO**

THEORETICAL ASPECTS AND METHODS OF PARAMETERS IDENTIFICATION  
OF ELECTRIC TRACTION SYSTEM DEVICES. METHOD OF WEIGHT FUNCTION .....74

## ***RAILWAY TRACK***

**V. D. PETRENKO, V. V. KOVALEVYCH**

THE RESULTS OF THE DEFECT PLACES INVESTIGATION OF DONETSK  
RAILWAY ROAD BED BY GROUND PENETRATING RADAR COMPLEX.....83

## ***MATERIAL SCIENCE***

**I. O. VAKULENKO, S. O. PLITCHENKO, D. M. MAKAREVICH**

INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOUNDS ON THE FORMING OF WELDING ARC .....92

**I. P. VOLCHOK, O. L. SKUIBIDA, O. V. LIUTOVA, N. V. SHYROKOBOKOVA**

QUALITY IMPROVEMENT OF SECONDARY SILUMINS BY USING  
REFINING-MODIFYING, HEAT AND LASER TREATMENTS.....101

## ***NON-TRADITIONAL TRANSPORT MODES***

**R. D. ISKOVYCH-LOTOTSKYI, YA. V. IVANCHUK, YA. P. VESELOVSKYI**

THE BASIS OF RESONANCE-STRUCTURE THEORY FOR VIBROIMPACT  
UNLOADING OF THE VEHICLES .....109

## ***ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION***

**S. R. KOLESNYKOV, M. R. ROMANIUKHA, I. YU. KEBAL**

WHEELSET AXLE WITH THE CAVITY OF UNIFORM CROSS SECTION .....119

<b>S. V. MYAMLIN, V. M. BUBNOV, YE. O. PYSMENNYI</b> INVESTIGATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF GONDOLA CARS ON PERSPECTIVE BOGIES .....	126
---	-----

***TRANSPORT CONSTRUCTION***

<b>V. I. BOLSHAKOV, M. O. YELISIEIEVA, S. A. SHCHERBAK</b> CONTACT STRENGTH OF MECHANOACTIVATED FINE CONCRETES FROM GRANULATED BLAST-FURNACE SLAGS.....	138
---	-----

<b>H. P. IVANOVA, O. I. TRUFANOVA</b> ANALYSIS AND APPLICATION PROSPECTS OF EFFECTIVE RESOURCES-SAVING TECHNOLOGIES IN CONCRETE MANUFACTURE .....	150
---	-----

<b>S. P. PANCHENKO</b> NUMERICAL SIMULATION OF VISCOELASTIC MATERIALS.....	157
---	-----

## ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

До публікації в журналі приймаються статті українською, російською або англійською мовами проблемного, узагальнюючого, методичного характеру, оригінальні наукові, практичні дослідження, які раніше ніде не видавалися.

Матеріали необхідно надавати в друкованому та електронному вигляді у програмі Microsoft Word 2003 або більш ранній версії – файли \*.doc (файли \*.docx, \*.docm не приймаються).

Наукова стаття повинна відповідати вимогам п. 3 Постанови ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 року.

Матеріали рецензуються членами редакційної колегії збірника та сторонніми незалежними експертами, виходячи з принципу об'єктивності та з позицій вищих міжнародних академічних стандартів якості, та редагуються. Редакція залишає за собою право на стилістичну правку рукопису.

**Вимоги щодо обсягу наукових статей, повідомлень, відгуків та рецензій:**

- оглядові та проблемні статті – до 45 000 знаків з пробілами (7–10 с.);
- загальні статті за рубриками видання – до 30 000 знаків з пробілами (5–7 с.);
- наукове повідомлення – до 8 000 знаків з пробілами (до 2,5 с.);
- відгук або рецензія – до 6 000 знаків з пробілами (до 2 с.).

Матеріал надається у форматі А4, враховуючи таблиці, ілюстрації, список використаних джерел. Статті, більші за обсягом, можуть бути прийняті до розгляду на підставі рішення редколегії.

**Увага!** Згідно з міжнародними стандартами якості наукових публікацій необхідним є: наявність авторських розширених і структурованих резюме (рефератів – abstracts), у т.ч. англійською мовою, рецензій, пристатейних списків літератури в романському алфавіті тощо.

**Рекомендуємо скористатися правилами до оформлення статей журналу:**  
<http://library.diit.edu.ua/HTMLs/scientists/Vumogu/Vumogu.pdf>.

**Для здачі статті до друку автору/авторам необхідно:**

**1. Для електронної інформації сформувані всі матеріали в п'яти файлах:**

- **Перший** – із текстом статті та анотацій з ключовими словами. Назва файлу – прізвище та ініціали автора (першого співавтора) латинськими літерами, наприклад: Ivanov\_P\_stattia.doc.
- **Другий** – з розширеними відомостями про автора/авторів (прізвище, ім'я, по батькові; посада; науковий ступінь; учене звання; місце роботи або навчання; адреса електронної пошти; номери контактних телефонів). Назва файлу – Ivanov\_P\_vidomosti.doc.
- **Третій** – рецензія (відсканована). Назва файлу – Ivanov\_P\_recenziia.jpg.
- **Четвертий** – Експертний висновок (відсканований, складається у вільній формі). Назва файлу – Ivanov\_P\_vysnovok.jpg.
- **П'ятий** – Ліцензійний договір (відсканований). Назва файлу – Ivanov\_P\_dogovir.jpg. Текст договору: <http://library.diit.edu.ua/HTMLs/scientists/Vumogu/license.doc>.

**2. Для друкованої інформації.** До редакції надаються особисто або надсилаються поштою такі матеріали: 1) два друкованих примірники рукопису з підписами всіх співавторів на останньому аркуші роботи; 2) оригінал Ліцензійного договору з підписами всіх співавторів; 3) оригінал експертного висновку; 4) рекомендація до друку за підписом відповідального редактора розділу (для співробітників ДНУЗТ).

**Відповідальність за зміст статті, правильність, точність і коректність цитування, посилань та перекладу покладається на авторів.**

**Остаточне рішення щодо публікації ухвалює редакційна колегія журналу.**

**Статті, відхилені редакційною колегією, повертаються авторам для доопрацювання.**

**Шановні автори, запрошуємо до співробітництва!**

**З питань опублікування звертайтеся до редакції журналу за адресою:**

Науково-технічна бібліотека (ауд. 166),  
 Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,  
 вул. Лазаряна, 2,  
 м. Дніпропетровськ,  
 Україна,  
 49010  
 e-mail: [visnik@diit.edu.ua](mailto:visnik@diit.edu.ua)  
 Адреса сайту журналу: <http://stp.diit.edu.ua/>

**З питань придбання примірників журналу телефонуйте за номером (056) 776 90 59 Грідасова А. В.**



## Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна веде підготовку докторантів та аспірантів за рахунок коштів Державного бюджету України – за державним замовленням – за такими спеціальностями:

### ДОКТОРАНТУРА

№	Спеціальність	Шифр
1	Теоретичні основи інформатики та кібернетики	01.05.01
2	Управління проектами і програмами	05.13.22
3	Залізнична колія	05.22.06
4	Рухомий склад залізниць і тяга поїздів	05.22.07
5	Електротранспорт	05.22.09
6	Експлуатація та ремонт засобів транспорту	05.22.20
7	Будівельні конструкції, будівлі та споруди	05.23.01
8	Будівельні матеріали та вироби	05.23.05

На підставі угод, що укладаються з докторантом і керівником вищого навчального закладу, до докторантури приймаються громадяни України, кандидати наук, що мають наукові досягнення в обраній галузі.

Строк навчання 3 роки.

Вступники до докторантури подають:

- заяву на ім'я ректора,
- копію першої сторінки паспорта,
- особистий листок з обліку кадрів з фотокарткою, який засвідчено відділом кадрів за місцем основної роботи,
- витяг з трудової книжки,
- довідку з бухгалтерії про заробітну платню,
- засвідчену копію диплома про закінчення вищого навчального закладу із зазначенням одержаної кваліфікації спеціаліста,
- копію диплома кандидата наук,
- копію атестата доцента, с.н.с. за їх наявності,
- розгорнутий план докторської дисертації,
- список опублікованих наукових праць та винаходів,
- медичну довідку про стан здоров'я за формою № 286-у,
- ідентифікаційний код,
- одну фотокартку розміром 3x4.

### АСПІРАНТУРА

№	Спеціальність	Шифр
1	Фізика твердого тіла	01.04.07
2	Теоретичні основи інформатики та кібернетики	01.05.01
3	Математичне моделювання та обчислювальні методи	01.05.02
4	Неорганічна хімія	02.00.01
5	Управління проектами і програмами	05.13.22
6	Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика	05.14.06
7	Залізнична колія	05.22.06
8	Рухомий склад залізниць і тяга поїздів	05.22.07
9	Електротранспорт	05.22.09
10	Експлуатація та ремонт засобів транспорту	05.22.20
11	Основи і фундаменти	05.23.02
12	Будівельні конструкції, будівлі та споруди	05.23.01
13	Будівельні матеріали та вироби	05.23.05
14	Технологія та організація промислового та цивільного будівництва	05.23.08
15	Економіка та управління підприємствами (за видами економічної діяльності)	08.00.04
16	Історія філософії	09.00.05
17	Екологічна безпека	21.06.01

На підставі угод, що укладаються з аспірантом і керівником вищого навчального закладу, до аспірантури приймаються громадяни України, які мають вищу освіту і кваліфікацію спеціаліста.

Строк навчання в аспірантурі з відривом від виробництва – 3 роки, без відриву від виробництва – 4 роки.

Особи, допущені до вступних іспитів у аспірантуру, складають три іспити за програмою вищого навчального закладу:

- спеціальну дисципліну,
- філософію,
- іноземну мову.

За консультаціями звертатися на відповідні кафедри університету.

Особи, що вступають до аспірантури, подають:

- заяву на ім'я ректора,
- письмовий висновок передбачуваного наукового керівника про можливість навчання в аспірантурі,
- рекомендацію вченої ради вищого навчального закладу до вступу в аспірантуру (для випускників поточного року),
- копію першої сторінки паспорта,
- особистий листок з обліку кадрів з фотокарткою, який засвідчено відділом кадрів за місцем основної роботи,
- витяг з трудової книжки,
- довідку про заробітну платню,
- засвідчену копію диплома про закінчення вищого навчального закладу,
- посвідчення про складання кандидатських іспитів (за їх наявності),
- список опублікованих наукових праць та винаходів або реферат з обраної наукової спеціальності з рецензією передбачуваного наукового керівника,
- медичну довідку про стан здоров'я за формою № 286-у,
- ідентифікаційний код,
- одну фотокартку розміром 3×4.

**Прийом документів до докторантури та аспірантури з 01.09 по 30.09 щорічно.**

Вступні іспити до аспірантури з 10.10 по 30.10 щорічно.

Початок занять з 01.12 щорічно.

**За інформацією звертатися:**

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту,  
вул. Лазаряна, 2,  
м. Дніпропетровськ,  
Україна,  
49010.

Тел. : (056) 373-15-44 – ректор, проф. Пшінько Олександр Миколайович, приймальня;  
(056) 373-15-29 – проректор з наукової роботи, проф. Мямлін Сергій Віталійович;  
(056) 373-15-63 – завідувача аспірантурою та докторантурою Лахнова Ірина Анатоліївна, кімн. 320).

#### **Інформація про спеціалізовані вчені ради університету**

В університеті працює три спеціалізовані вчені ради із захисту докторських та кандидатських дисертацій за спеціальностями:

- Д 08.820.01 – залізнична колія (05.22.06) та електротранспорт (05.22.09); 05.22.12 – промисловий транспорт.
- Д08.820.02 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів (05.22.07) і експлуатація та ремонт засобів транспорту (05.22.20); транспортні системи (05.22.01);
- К08.820.03 – економіка та управління підприємствами (за видами економічної діяльності).

Для нотаток

Наукове видання

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

№ 5 (53) 2014

(українською, російською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – А. І. Миргородська  
Комп'ютерне верстання – Ю. С. Марков  
Літературна обробка – О. М. Врублевська

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ум. друк. арк. 20,46. Тираж 300 пр. Зам. № 985.

**Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна**

*Адреса редакції, видавця:*

вул. Лазаряна, 2, кім. 267, м. Дніпропетровськ, 49010, Україна

*Тел.:* +38 (056) 371-51-05

*E-mail:* lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

*Адреса дільниці оперативної поліграфії:*

вул. Лазаряна, 2, кім. 1201, м. Дніпропетровськ, 49010, Україна

*Тел.:* +38 (056) 47-19-66, *факс:* +38 (056) 47-19-83



Научное издание

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

**(НАУКА И ПРОГРЕСС ТРАНСПОРТА. ВЕСТНИК ДНЕПРОПЕТРОВСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО  
УНИВЕРСИТЕТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ИМЕНИ АКАДЕМИКА В. ЛАЗАРЯНА)**

№ 5 (53) 2014

(на украинском, русском и английском языках)

Ответственный за выпуск – А. И. Миргородская  
Компьютерная верстка – Ю. С. Марков  
Литературная обработка – О. М. Врублевская

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ус. печат. лист. 20,46. Тираж 300 экз. Зак. № 985.

**Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта  
имени академика В. Лазаряна**

*Адрес редакции, издателя:*

ул. Лазаряна, 2, ком. 267, г. Днепропетровск, 49010, Украина

*Тел.:* +38 (056) 371-51-05

*E-mail:* lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

*Адрес участка оперативной полиграфии:*

ул. Лазаряна, 2, ком. 1201, г. Днепропетровск, 49010, Украина

*Тел.:* +38 (056) 47-19-66, *факс:* +38 (056) 47-19-83



Scientific Edition

**NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU. VİSNIK DNİPROPETROVS'KOGO NACİONAL'NOGO  
UNİVERSİTETU ZALİZNIČNOGO TRANSPORTU**

**(SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS. BULLETIN OF DNIPROPETROVSK NATIONAL  
UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT NAMED AFTER ACADEMICIAN V. LAZARYAN)**

No. 5 (53) 2014

(in Ukrainian, Russian and English languages)

Responsible for issue – А. І. Myrhorodska  
Computer makeup – Yu. S. Markov  
Redaction – О. М. Vrublevska

Format 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Conventional printed sheet 20,46. Circulation 300. Order no. 985.

**Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan**

*Address of editor and editorial office*

Lazaryan St., 2, r. 267, Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine

*Tel.:* +38 (056) 371-51-05

*E-mail:* lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

*Address of small offset printing office*

Lazaryan St., 2, r. 1201, Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine

*Tel.:* +38 (056) 47-19-66, *Fax:* +38 (056) 47-19-83



СУЧАСНІ ЗАКЛАДИ ОСВІТИ - 2014  
П'ята Міжнародна Виставка

# CERTIFICATE

ЯКОСТІ НАУКОВИХ ПУБЛІКАЦІЙ  
УДОСТОЄНИЙ

Дніпропетровський національний університет  
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна



Міністерство освіти і науки України

Міністр

С. Квіт

Підстава:  
показники наукометричної  
бази даних Scopus  
за 2013 рік



Національна академія  
педагогічних наук України

Президент

В. Кремень



Україна, м. Київ

Асоціація користувачів  
Української науково-освітньої  
телекомунікаційної мережі «Уран»

Голова Ради

Ю. Якименко



Передплатний індекс - 68926  
Подписной индекс - 68926  
Subscription index - 68926

