



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



---

# НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ  
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

№ 3(75)

---

•• 2018 ••

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

№ 3 (75) 2018

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

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

Дніпро

2018

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):*

Афанасов А. М., Банніков Д. О., Бараш Ю. С., Біляєв М. М., Бобирь Д. В., Бобровський В. І., Боднар Б. Є., Босов А. А., Вакулєнко І. О., Власова Т. І., Волкова В. Є., Габринєць В. О., Гаврилюк В. І., Гєтьман Г. К., Главацький К. Ц., Гненний О. М., Головокова Л. С., Гончаров К. В., Горобєць В. Л., Доценко О. М., Дудкіна В. В., Ейтутіс Г. Д., Жуковицький І. В., Заблудовський В. О., Казакевич М. І., Капіца М. І., Копитко В. І., Костін М. О., Кравець В. В., Краснюк А. В., Кривчик Г. Г., Кузнецов В. Г., Курган М. Б., Муха А. М., Настєчик М. П., Нетєса М. І., Оковитий С. І., Очкасов О. Б., Петренко В. Д., Пічугов С. О., Пічурін В. В., Полішко Т. В., Радкевич А. В., Радченко М. О., Ракша С. В., Скалозуб В. В., Сніжко Л. О., Урсуляк Л. В., Шинкаренко В. І., Штапенко Е. П., Яришкіна Л. О.

*ІНОЗЕМНІ ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:*

Анісімов П. С. (Московський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація); Бялонь А. (Інститут залізничного транспорту, Варшава, Рєспубліка Польща); Вайчунас Г. (Вільнюський технічний університет ім. Гєдимінаса, Литва); Васяк І. (Інститут електроенєргєтики Лодзинської політехніки, Рєспубліка Польща); Гусєв Б. В. (Московський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація); Долежел І. (Університет Західної Богємії, Чєська Рєспубліка); Зіммер К. (Інститут Електротехніки Варшавської політехніки, Рєспубліка Польща); Куанишев Б. М. (Казахська академія транспорту і комунікацій, Рєспубліка Казахстан); Лінгайтіс В. Л. (Вільнюський технічний університет ім. Гєдимінаса, Литва); Манашкін Л. А. («ALGAE ENERGY SOLUTION, LLC», США); Сладковські А. (Сілезька політехніка, Рєспубліка Польща); Стржелицькі Р. (Гданська морська академія, Рєспубліка Польща); Тітова Т. С. (Пєтербурзький державний університет шляхів сполучення Імператора Олєксандра І, Російська Федерація); Худзікевич А. (Варшавський політехнічний університет, Рєспубліка Польща); Шєпонг Адам (Варшавський політехнічний університет, Рєспубліка Польща).

Журнал зарєєстровано Дєржавною рєєстраційною службою Міністерства юстиції України. Свідєцтво про рєєстрацію KB № 19609-9409ПР від 29.12.2012 р. Видання внесєно до Перєліку наукових фахових видань України наказом Міністерства освїти і науки України 29.12.2014 р. № 1528 (технічні науки). Журнал зарєєстровано: в міжнародних каталогах періодичних видань Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; наукометричних системах Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus та ін. Друкуєтьєся за рїшенням вченої ради університету від 25.06.2018 р., протокол № 11

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

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

Видання публікуєтьєся з 1936 р.:

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

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта  
имени академика В. Лазаряна

## НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Научный журнал

№ 3 (75) 2018

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

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

Днепро

2018

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

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОГО  
СОВЕТА УНИВЕРСИТЕТА

Пшинько А. Н., доктор технических наук

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛА

Мямлин С. В., доктор технических наук

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Козаченко Д. Н., доктор технических наук

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Колесникова Т. А., кандидат наук  
по социальным коммуникациям

*ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ (УКРАИНА):*

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

*ИНОСТРАННЫЕ ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:*

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

Журнал  
зарегистрирован

Государственной регистрационной службой Министерства юстиции Украины.  
Свидетельство о регистрации КВ № 19609-9409ПР от 29.12.2012 г.  
Издание внесено в Перечень научных специализированных изданий Украины приказом Министерства образования и науки Украины 29.12.2014 г. № 1528 (технические науки).  
Журнал зарегистрирован: в международных каталогах периодических изданий Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; наукометрических системах Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus и др.  
Печатается по решению ученого совета университета от 25.06.2018 г., протокол № 11

Издатель

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

Адрес  
учредителя

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

Издание публикуется с 1936 г.:

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

Dnipropetrovsk National University of Railway Transport  
named after Academician V. Lazaryan

**NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU**  
**VÌSNIK DNÌPROPETROVS'KOGO NACÌONAL'NOGO UNÌVERSITETU**  
**ZALÌZNIČNOGO TRANSPORTU**  
=  
**SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS**

**Scientific journal**

**No. 3 (75) 2018**

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

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

Dnipro  
2018

Founder:

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

Chairman of the Editorial Board of the University  
Editor-in-Chief  
Deputy Chief Editor  
Executive Secretary

Pshinko O. M., Doctor of Technical Sciences  
Myamlin S. V., Doctor of Technical Sciences  
Kozachenko D. M., Doctor of Technical Sciences  
Kolesnykova T. O., PhD of Social Communications

*EDITORIAL BOARD MEMBERS (UKRAINE):*

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

*FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:*

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

Journal was registered	by the State Registration Service of the Ministry of Justice of Ukraine. Certificate of Registration KB no.19609-9409PR from 29.12.2012 Edition is included in the list of scientific professional publications of Ukraine by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine 29.12.2014 г. no. 1528 (technical sciences). Journal is registered: in the International Catalogue of periodicals Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; research and metric systems Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, etc. Published according to the Academic Council decision of the University from 25.06.2018, Protocol no. 11
Publisher	Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (Dnipro) Certificate of Publisher ДК no. 1315 from 31.03.2003
Address of Founder	St. Lazaryana, 2, room 267, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.: +38 (056) 371-51-05; e-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua; journal site: <a href="http://stp.diit.edu.ua/">http://stp.diit.edu.ua/</a>

Edition is being published since 1936:

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

## НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

УДК 656.25 (477)

О. М. ОГАР<sup>1\*</sup>, О. В. РОЗСОХА<sup>2\*</sup>, Г. В. ШАПОВАЛ<sup>3\*</sup>, Ю. В. СМАЧИЛО<sup>4\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Залізничні станції та вузли», Український державний університет залізничного транспорту, площа Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61001, тел. +38 (057) 730 10 42, ел. пошта ogar.07.12@gmail.com, ORCID 0000-0003-1967-5828

<sup>2\*</sup>Каф. «Залізничні станції та вузли», Український державний університет залізничного транспорту, площа Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61001, тел. +38 (057) 730 10 42, ел. пошта alexroz2010@gmail.com, ORCID 0000-0001-6281-0226

<sup>3\*</sup>Каф. «Залізничні станції та вузли», Український державний університет залізничного транспорту, площа Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61001, тел. +38 (057) 730 10 42, ел. пошта ann.shapoval@ukr.net, ORCID 0000-0002-7884-6781

<sup>4\*</sup>Каф. «Залізничні станції та вузли», Український державний університет залізничного транспорту, площа Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61001, тел. +38 (057) 730 10 42, ел. пошта smachilo.julia@gmail.com, ORCID 0000-0003-1042-2170

### РОЗПОДІЛ ТРАНСПОРТНИХ ПОДІЙ НА ЗАЛІЗНИЦЯХ УКРАЇНИ ЗА КАТЕГОРІЯМИ ЗАЛЕЖНО ВІД ТЯЖКОСТІ НАСЛІДКІВ

**Мета.** Стаття передбачає розробку методики розподілення транспортних подій за критерієм середнього матеріального збитку і встановлення фінансових меж між наявними видами транспортних подій. **Методика.** У наш час на залізницях України транспортні події класифікують за тяжкістю наслідків і виражають у натуральних величинах. Наявна система класифікації поступається системі класифікації транспортних подій, яка діє на території країн Європейського Союзу (ЄС). Транспортні події в країнах ЄС класифікують як за типом, так і за критерієм матеріального збитку. Для розподілення транспортних подій на залізницях України за категоріями залежно від тяжкості наслідків використовують метод найближчого сусіда. Він ураховує середні збитки від транспортної події, його особливістю є можливість встановлення фінансових меж. **Результати.** Запропонований ефективний метод розподілення транспортних подій на залізницях України за категоріями залежно від тяжкості наслідків із використанням кластерного аналізу. Представлені результати розрахунків дозволяють розподілити транспортні події на три групи та встановити фінансові межі між ними. **Наукова новизна.** Удосконалено методику розподілення транспортних подій за категоріями залежно від матеріальних збитків від них. Відповідно до неї транспортні події поділені на три групи. Уперше були запропоновані фінансові межі між групами транспортних подій. Подальші дослідження пропонуємо спрямувати на підтвердження розмірів фінансових меж. **Практична значимість.** У результаті досліджень з'явилася можливість оцінити транспортні події не тільки за тяжкістю їх наслідків, а й за критерієм матеріального збитку. Цей підхід дає змогу також оцінити стан безпеки руху на окремих ділянках, станціях чи ділянках залізниць. На основі отриманих результатів можливий подальший розвиток системи класифікації транспортних подій, а також її інтегрування в європейську систему класифікації.

**Ключові слова:** класифікація транспортних подій; залізничний транспорт; матеріальні збитки

#### Вступ

З метою аналізу й оцінки рівня безпеки діяльності суб'єктів перевезень на залізницях України всі транспортні події підлягають класифікації залежно від ознак. Наявний підхід щодо класифікації транспортних подій базується на

тяжкості наслідків (наслідки виражені в натуральній величині, тобто в кількості загинувших або травмованих людей, пошкодженого рухомого складу, технічних засобів та ін.). Цей підхід Укрзалізниця застосовує для укладання щорічних звітів, які характеризують стан безпеки руху й подають інформацію про кількість

## НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

транспортних подій, що трапилися на підприємствах усіх залізниць.

Відповідно до наказу Міністерства інфраструктури України від 25 липня 2017 року № 235 «Про затвердження Положення про класифікацію транспортних подій на залізничному транспорті» [4], транспортні події класифікують як катастрофи (аварії із серйозними наслідками), аварії та інциденти.

Відповідно до вищезазначеного наказу, катастрофа (аварія із серйозними наслідками) – транспортна подія, що призвела до пожежі на рухомому складі залізничного транспорту, зіткнення рухомого складу з іншим рухомих складом, транспортними засобами, сходження рухомого складу на перегоні чи станції, під час поїзної або маневрової роботи, екіпірування тощо, унаслідок якої одна або більше осіб загинули, п'ять і більше осіб травмовано, та/або спричинила пошкодження рухомого складу, інфраструктури залізничного транспорту або завдала шкоди навколишньому природному середовищу, а також будь-які інші схожі аварії з очевидним впливом на регулювання безпеки на залізничному транспорті або управління безпекою.

Одиницею виміру, яка відрізняє катастрофу від аварії, є кількість загиблих і травмованих осіб, ступінь пошкодження транспортних засобів. Однак за розмірами збитків, які виражені в грошових одиницях, класифікувати транспортні події на залізницях України не видається можливим.

В основу системи класифікації транспортних подій на залізницях країн СНД покладений також принцип тяжкості наслідків, що виникли в результаті транспортної події. На залізницях Росії, відповідно до наказу Міністерства транспорту Російської Федерації від 18 грудня 2014 року № 344 «Про затвердження Положення про класифікацію, порядок розслідування транспортних та інших подій, які пов'язані з порушенням правил безпеки руху й експлуатації залізничного транспорту» в редакції від 29 липня 2016 року [5], транспортні події класифікують, як катастрофи, аварії і транспортні події, які виникли під час перевезення (транспортування) небезпечних вантажів. Як і на ук-

раїнських залізницях, представлені транспортні події характеризуються кількістю загиблих або травмованих осіб, ступенем пошкодження рухомого складу. На залізницях Казахстану діє класифікація транспортних подій за таким же принципом. Відповідно до наказу Міністра Республіки Казахстан від 26 березня 2015 року № 334 «Про затвердження Правил безпеки на залізничному транспорті» [6], транспортні події поділяють на катастрофи, аварії, транспортні події й інциденти. За критерієм матеріального збитку класифікувати транспортні події неможливо.

На залізницях країн Європейського Союзу (ЄС) транспортні події класифікують як за типом транспортних подій, так і за критерієм матеріального збитку. Наприклад, як зазначають звіти [15], протягом тривалого часу на залізницях Польщі вели подвійну документацію у сфері безпеки, яка класифікувала транспортні події в першому випадку відповідно до національних вимог (зіткнення, сходження та події на переїздах), а в другому – відповідно до європейських вимог, зазначених у директивах із безпеки руху.

Відповідно до Директиви 2004/49/ЄС [11] і Директиви 2009/149/ЄС [10] Європейського Парламенту, транспортні події класифікують за тяжкістю наслідків, які в свою чергу виражені у грошовому еквіваленті. Основними видами транспортних подій у них є значна аварія та серйозна аварія. Значна аварія характеризується загальними збитками понад 150 тис. євро, а серйозна аварія – понад 2 млн. євро. Подана класифікація просто й наочно розподіляє транспортні події, що робить її найбільш зручною у використанні.

Чинні директиви містять рекомендації щодо гармонізації залізничної системи, уводять загальні показники й критерії безпеки, а також методи її дотримання. Для досягнення цих показників країни-члени ЄС можуть використовувати індивідуальні інструменти, які є найбільш дієвими для них. Із метою оцінки досягнень загальних критеріїв безпеки держави-члени ЄС збирають інформацію про загальні показники безпеки за допомогою щорічних звітів підприємств залізничного транспорту з питань безпеки.

## НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

Проте процес оцінки ризиків транспортних подій на залізницях країн ЄС не встановлює конкретних критеріїв аналізу ризиків і дає можливість для подальших досліджень [7, 9, 12, 13, 14].

У роботі [1] автор класифікує транспортні події за критерієм матеріального збитку, використовуючи критерій розбиття. Однак під час встановлення фінансових меж він не враховує транспортні події з максимальними й мінімальними значеннями збитків.

Під час розподілу транспортних подій за категоріями можуть виникнути труднощі з оцінкою середніх матеріальних збитків від загибелі й травмування людей та завдання шкоди навколишньому природному середовищу.

Для оцінки буде доцільно перейняти досвід країн-членів ЄС. У разі загибелі чи травмування людей на залізницях ЄС використовують поняття «готовність платити» [10], яке передбачає визначення прямих і непрямих економічних витрат від події, яка трапилася з людиною. Держава-член ЄС оцінює вартість медичної та реабілітаційної допомоги, вартість юридичного суду, витрати на поліцейські, приватні розслідування, аварійні служби й адміністративні витрати страхування, а також виробничі втрати – цінність для суспільства товарів і послуг, які могли б бути вироблені людиною, яка постраждала від катастрофи або аварії.

Матеріальні збитки від завдання шкоди навколишньому природному середовищу – це витрати залізниці, оцінені на підставі її досвіду, на відновлення пошкодженої території до такого стану, в якому вона перебувала до транспортної події на залізниці.

У роботі [8] автор наголошує, що в разі загибелі людини потрібно враховувати не тільки очевидні економічні збитки (спад продуктивності, виплати родині), але й втрачену вартість самого життя, тобто вартість кількості років, які не дожила людина до віку середньої тривалості життя.

У праці [2] автор критикує підхід, відповідно до якого ціна життя дорівнює величині людського капіталу. Оскільки в такому випадку ціна життя одного мільярдера може дорівнювати ціні життя невеликого поселення.

У подальшому слід приділити увагу розробці оцінки середніх матеріальних збитків від загибелі й травмування людей та завдання шкоди навколишньому природному середовищу, оскільки ця проблема в статті не набула розгляду.

### Мета

Будь-яка транспортна подія пов'язана з фінансовими збитками на усунення її наслідків. Після аналізу наявних видів класифікації транспортних подій можна зробити висновок, що найбільш зручною у використанні є класифікація за критерієм матеріального збитку. Метою нашої статті є розробка методики розподілення транспортних подій за критерієм середнього матеріального збитку та встановлення фінансових меж між наявними видами транспортних подій.

### Методика

У наш час на залізницях України транспортні події класифікують за тяжкістю наслідків і які виражають у натуральних величинах. Наявна система класифікації поступається системі класифікації транспортних подій, яка діє на території країн Європейського Союзу (ЄС). Транспортні події в країнах ЄС класифікують як за типом, так і за критерієм матеріального збитку. Для розподілення транспортних подій на залізницях України за категоріями залежно від тяжкості наслідків використовується метод найближчого сусіда. Він ураховує середні збитки від транспортної події, його особливістю є можливість встановлення фінансових меж.

### Результати

Розподіл транспортних подій за критерієм матеріального збитку проводять на основі кластерного аналізу [3]. Нехай  $I_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) – впорядковані за величиною дані, а саме середні матеріальні збитки від  $i$ -ї транспортної події (рис. 1). При цьому  $I_i > I_j$ , оскільки  $i > j$ .

Вихідні дані наведено в табл. 1. Оскільки точні дані про середні збитки від транспортних подій відсутні, то величина збитків була вста-

## НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

новлена експертним шляхом. На підставі щорічних звітів Укрзалізниці. За розрахунковий період були взяті: 2007 рік (обраний через наяв-

ність аварій і катастроф), 2013 і 2014 роки (останні роки з наявними щорічними звітами).

Таблиця 1

Дані ПАТ «Укрзалізняця» за 2007, 2013 і 2014 рр. про транспортні події та збитки від них

Table 1

Data of PJSC "Ukrzaliznytsia" for 2007, 2013, 2014 about traffic accidents and losses from them

№ на графіку	Найменування транспортних подій	Середні збитки, тис. грн
1	Катастрофа	1 267,93
2	Аварія	566,23
3	Зіткнення пасажирських або вантажних поїздів з іншими поїздами чи рухомим складом, сходження рухомого складу в поїздах на перегонах і станціях, які не належать до аварій за своїми наслідками	381,49
4	Проїзд забороненого сигналу, граничного стовпчика або сигнального знака «Межа станції»	136,61
5	Вихід рухомого складу залізничного транспорту на маршрут приймання (відправлення) поїзда, перегін	87,70
6	Розвалювання вантажу під час руху з порушенням габариту	157,31
7	Падіння деталей рухомого складу пасажирського поїзда на колію	22,70
8	Саморозчеплення, розрив автозчепу або гвинтової стяжки між вагонами в пасажирському поїзді	44,01
9	Переведення стрілки або рухомого осердя хрестовини, що входить до поїзного маршруту під поїздом	35,63
10	Зіткнення чи сходження рухомого складу залізничного транспорту під час виконання маневрової роботи	455,26
11	Переведення стрілки під маневровим складом	64,83
12	Саморозчеплення, розрив автозчепу або гвинтової стяжки у вантажному поїзді та між локомотивом і першим вагоном пасажирського поїзда	17,22
13	Розріз стрілки (рухомого осердя хрестовини)	9,79
14	Злам рейки й елементів стрілочних переводів	195,88
15	Поява несправностей локомотива, моторвагонного рухомого складу або спеціального рухомого складу, вагонів, несправностей колії, пристроїв СЦБ та зв'язку, контактної мережі, електропостачання, які призвели до затримки поїзда на перегоні чи станції на 1 год. й більше понад графікового часу	306,12
16	Злам бокової ферми кузова вантажного вагона, колісної пари або її елементів, боковини візка рухомого складу, надресорної чи хребтової балок пасажирських і вантажних вагонів або тріщини балок візків пасажирських вагонів	77,14
17	Приймання й відправлення поїзда за неправильно підготовленим маршрутом	56,96

## НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

Продовження табл. 1  
Continuation of Table 1

№ на графіку	Найменування транспортних подій	Середні збитки, тис. грн.
18	Невидача попереджень на поїзди, коли необхідно зменшити швидкість або зупинитися та (або) не огороження сигналами небезпечного місця для руху поїздів під час виконання робіт	227,03
19	Порушення правил розміщення й кріплення вантажу, які не спричинили вихід вантажу за встановлені габарити навантаження, але призвели до затримки поїзда на 2 год. і більше	167,31
20	Неправильні дії працівників, що призвели до затримки поїзда на 1 год. й більше	208,71
21	Несвоєчасне закінчення робіт у «вікно», що призвели до затримки поїздів на 1 год. й більше	56,05
22	Перехід на інші засоби сигналізації і зв'язку для організації руху поїздів на 8 год. і більше через несправність технічних засобів	154,86
23	Несправність букси або інші технічні несправності вагонів, локомотивів, секцій дизель-поїздів та електросекцій чи неправильні дії причетних працівників, що призвели до відчеплення рухомого складу від поїзда на шляху його прямування	136,29
24	Наїзд на сторонні предмети, деталі верхньої будови колії, візки, ізолювальні зйомні вишки, гальмівні башмаки тощо	92,16
25	Перекриття дозвільного показання сигналу на заборонне, що викликало проїзд заборонного сигналу на станціях	183,11

Загальними ознаками залізничних транспортних подій, що виникли під час руху рухомого складу у наявній класифікації є: загибель або травмування людей; пошкодження рухомого складу й технічних засобів; порушення графіка руху поїздів; завдання шкоди навколишньому природному середовищу. Представлений у статті підхід до класифікації транспортних подій за критерієм матеріального збитку базується на середніх матеріальних збитках від пошкодження рухомого залізничного транспорту й технічних засобів, порушення графіка руху поїздів, які в свою чергу можна оцінити однозначно.

На рис. 1 зображений розподіл транспортних подій за матеріальними збитками. Нумерацією від 1 до 25 позначено номер транспортної події відповідно до табл. 1. Найбільші середні збитки були спричинені катастрофою (1267,93 тис. грн), й вони позначені одиницею на рис. 1. Найменші збитки в розмірі 9,79 тис. грн. були спричинені розрізом стрілки (рухомого осердя хрестовини), вони позначені на рисунку під номером 13.

Схема кластеризації за принципом найближчого сусіда може бути описана наступним чином. Розглянемо  $\{I_1, I_2, \dots, I_n\}$  як множину кластерів  $\{I_1\}, \{I_2\}, \dots, \{I_n\}$ . Виберемо два з них –  $I_i$  та  $I_j$ , які є найбільш близькими і об'єднаємо їх в один кластер. Нова множина кластерів буде складатися вже з  $n - 1$  кластерів і мати вигляд  $\{I_1\}, \{I_2\}, \dots, \{I_i, I_j\}, \dots, \{I_n\}$ . Повторюючи процес, отримаємо послідовну множину кластерів, які складаються із  $n - 2$ ,  $n - 3$  і т. д. кластерів. Наприкінці процедури кластеризації отримаємо потрібну кількість кластерів, які складаються із  $n$  об'єктів і збігаються з первинною множиною  $I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$ . У якості міри відстані приймемо звичайну евклідову відстань  $d_{ij}$ :

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2}, \quad (1)$$

де  $x_i$  та  $x_j$  – значення ознаки-го ( $j$ -го) об'єкта.

## НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

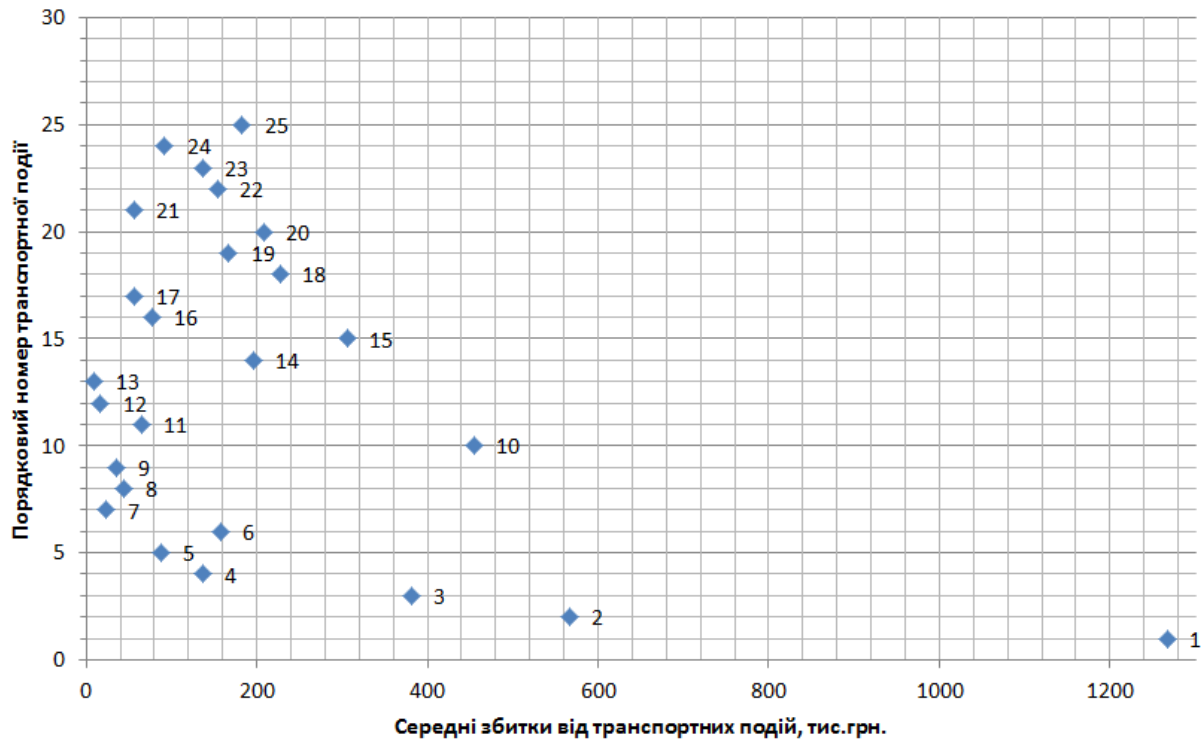


Рис.1. Розподіл видів транспортних подій за матеріальними збитками

Fig.1. Distribution of types of transport accidents by material losses

Розрахована матриця відстаней для об'єктів представлена в табл. 2.  
транспортних подій, розподілених за збитками,

Таблица 2

## Матриця відстаней, крок перший

Table 2

## Matrix of distances, step one

№ клас- стера	1	2	3	4	5	...	22	23	24	25
1	0	701,7	886,44	1131,3	1180,2	...	1113,1	1131,6	1175,7	1084,8
2	701,7	0	184,74	429,62	478,53	...	411,37	429,94	474,07	383,12
3	886,44	184,74	0	244,88	293,79	...	226,63	245,2	289,33	198,38
4	1131	429,6	244,9	0	48,91	...	18,25	0,32	44,45	46,5
5	1180	478,5	293,8	48,91	0	...	67,16	48,59	4,46	95,41
6	1111	408,9	224,2	20,7	69,61	...	2,45	21,02	65,15	25,8
7	1245,2	543,53	358,79	113,91	65	...	132,16	113,59	69,46	160,41
8	1223,9	522,22	337,48	92,6	43,69	...	110,85	92,28	48,15	139,1

## НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

Продовження табл. 2

Continuation of the Table 2

№ Кластера	1	2	3	4	5	...	22	23	24	25
9	1232,3	530,6	345,86	100,98	52,07	...	119,23	100,66	56,53	147,48
10	812,67	110,97	73,77	318,65	367,56	...	300,4	318,97	363,1	272,15
11	1203,1	501,4	316,66	71,78	22,87	...	90,03	71,46	27,33	118,28
12	1250,7	549,01	364,27	119,39	70,48	...	137,64	119,07	74,94	165,89
13	1258,1	556,44	371,7	126,82	77,91	...	145,07	126,5	82,37	173,32
14	1072,1	370,35	185,61	59,27	108,18	...	41,02	59,59	103,72	12,77
15	961,81	260,11	75,37	169,51	218,42	...	151,26	169,83	213,96	123,01
16	1190,8	489,09	304,35	59,47	10,56	...	77,72	59,15	15,02	105,97
17	1211	509,27	324,53	79,65	30,74	...	97,9	79,33	35,2	126,15
18	1040,9	339,2	154,46	90,42	139,33	...	72,17	90,74	134,87	43,92
19	1100,6	398,92	172,78	30,7	79,61	...	12,45	31,02	75,15	15,8
20	1059,2	357,52	172,78	72,1	121,01	...	53,85	72,42	116,55	25,6
21	1211,9	510,18	325,44	80,56	31,65	...	98,81	80,24	36,11	127,06
22	1113	411,4	226,6	18,25	67,16	...	0	18,57	62,7	28,25
23	1131,6	429,94	245,2	0,32	48,59	...	18,87	0	44,13	46,82
24	1175,7	474,07	289,33	44,45	4,46	...	62,7	44,13	0	90,95
25	1084,8	383,12	198,38	46,5	95,41	...	28,25	46,82	90,95	0

З табл. 2 видно, що найменша відстань  $d_{4,23}=0,32$  між об'єктами  $I_4$  та  $I_{23}$ , отже формуємо за допомогою  $I_4$  та  $I_{23}$  новий кластер –  $K_{4,23}=\{I_4, I_{23}\}$ . Розрахуємо нову  $(25-1)\times(25-1)$  матрицю відстаней, табл. 3. Рядки для цієї матриці можна взяти з попередньої, однак рядок, який об'єднує об'єкти  $I_4$  і  $I_{23}$  потрібно перерахувати заново. Із матриці відстаней (таб. 3) видно, що об'єкти  $I_{17}$  і  $I_{23}$  є найбільш близькими, тому їх об'єднують в один кластер –  $K_{17,21}=\{I_{17}, I_{21}\}$ . У результаті виконання останнього кроку кластеризації всі об'єкти будуть об'єднані в один кластер. Але оптимальною вважається кількість кластерів, яка дорів-

нює різниці кількості спостережень (у нашому випадку 25) і кількості кроків, після яких відстань об'єднання зростає стрибкоподібно (у нашому випадку – 22).

Графік об'єднання транспортних подій у кластери за критерієм матеріального збитку представлений на рис. 2.

Найкращим варіантом є розподілення транспортних подій за критерієм матеріального збитку на три кластери, а саме:  $K_1=\{I_1\}$ ,  $K_2=\{I_2\}$ ,  $K_{3-25}=\{I_{3-25}\}$ . Це підтверджується також практикою, яка склалася відносно розподілення транспортних подій за тяжкістю їх наслідків на катастрофи, аварії й інциденти.

Таблица 3

## Матриця відстаней, крок другий

Table 3

## Matrix of distances, step two

№ кла- стера	1	...	4, 23	...	16	17	...	21	...	25
1	0	...	1131,3	...	1190,8	1211	...	1211,9	...	1084,8
2	701,7	...	429,62	...	489,09	509,3	...	510,18	...	383,12
3	886,44	...	245,2	...	304,4	324,5	...	325,44	...	198,38
4	1131	...	0	...	59,15	79,33	...	80,24	...	46,5
5	1180	...	48,59	...	10,56	30,74	...	31,56	...	95,41
6	1111	...	20,7	...	80,17	100,4	...	101,26	...	25,8
7	1245,2	...	113,59	...	54,44	34,26	...	33,35	...	160,41
8	1223,9	...	92,28	...	33,13	12,95	...	12,04	...	139,1
9	1232,3	...	100,66	...	41,51	21,33	...	22,63	...	147,48
10	812,67	...	318,65	...	378,12	398,3	...	399,21	...	272,15
11	1203,1	...	71,46	...	13,31	7,87	...	8,78	...	118,28
12	1250,7	...	119,07	...	59,92	39,74	...	38,83	...	165,89
13	1258,1	...	126,5	...	67,35	47,17	...	46,26	...	173,32
14	1072,1	...	59,27	...	118,74	138,9	...	139,83	...	12,77
15	961,81	...	169,51	...	228,98	249,2	...	250,07	...	123,01
16	1190,8	...	59,15	...	0	20,18	...	21,09	...	105,97
17	1211	...	79,33	...	20,18	0	...	0,91	...	126,15
18	1040,9	...	90,42	...	149,89	170,07	...	170,98	...	43,92
19	1100,6	...	30,7	...	90,17	110,35	...	111,26	...	15,8
20	1059,2	...	72,1	...	131,57	151,75	...	152,66	...	25,6
21	1211,9	...	80,24	...	21,09	0,91	...	0	...	127,06
22	1113	...	18,25	...	77,72	97,9	...	98,81	...	28,25
24	1175,7	...	44,13	...	15,02	35,2	...	36,11	...	90,95
25	1084,8	...	46,5	...	105,97	126,15	...	126,06	...	0

## НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

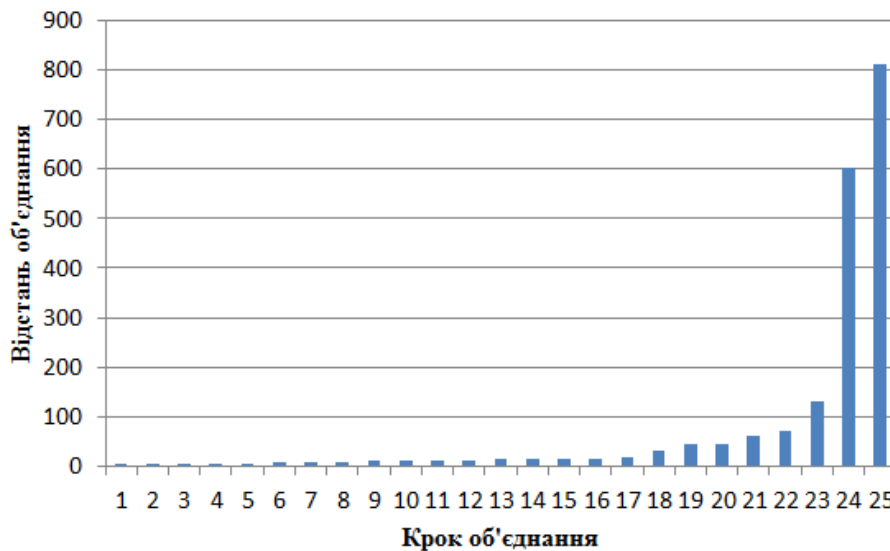


Рис. 2. Об'єднання транспортних подій у кластери за критерієм матеріального збитку

Fig. 2. Clustering of transport accidents according to criterion of material damage

За результатами кластеризації визначимо значення фінансових меж видів порушень безпеки руху між трьома групами (табл. 4).

Таблиця 4

**Значення фінансових меж під час розподілення транспортних подій на три кластери**

Table 4

**Value of financial limits in the distribution of transport accidents into three clusters**

№ кластера	Значення фінансової межі, тис. грн.
1	812,7
2	601,7

Усі можливі випадки порушення безпеки руху можна поділити на три групи. Пропонуємо встановлення фінансових границь у таких розмірах: перша група – події, матеріальні збитки від яких склали менше 500 тис. грн. У другій групі + розмір збитків від транспортних подій варіюється в проміжку від 500 тис. до 1 млн грн. Третя група – події, від яких матеріальні збитки перевищили суму в 1 млн грн.

Порівняно з наявною системою класифікації транспортних подій на залізницях України за-

пропонований підхід дає можливість оцінити транспортні події не тільки за тяжкістю їх наслідків, а й за критерієм матеріального збитку. Після оцінки розміру матеріальних збитків цей підхід дасть можливість однозначно віднести цю транспортну подію до однієї з трьох запропонованих груп.

**Наукова новизна та практична значимість**

У роботі вдосконалено методику розподілення транспортних подій за категоріями залежно від матеріальних збитків від них. Усі транспортні події поділено на три групи. Доцільність такого розподілення підтверджена наявною класифікацією транспортних подій на залізницях України, яка базується на тяжкості наслідків. На основі отриманих результатів можливий подальший розвиток системи класифікації транспортних подій, а також її інтегрування в європейську систему класифікації.

**Висновки**

Остаточним результатом будь-якої транспортної події є фінансові витрати на усунення збитків від неї. Найбільш перспективним є варіант класифікації залізничних транспортних

## НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

подій за критерієм їх середнього матеріального збитку. Цей підхід дає змогу оцінити стан безпеки руху на окремих ділянках, станціях чи дирекціях залізниці.

Після проведення кластеризації за принципом найближчого сусіда транспортні події розподілені на три кластери. Актуальність кластеризації транспортних подій підтверджується чинним наказом Міністерства інфраструктури України від 25 липня 2017 року № 235 «Про затвердження Положення про класифікацію транспортних подій на залізничному транспорті», за яким усі транспортні події поділяють також на три групи: катастрофи (аварії із серйозними наслідками), аварії й інциденти.

Розвиток системи класифікації транспортних подій відповідно до запропонованого в статті підходу базується на встановленні фінан-

сових меж. Подальші дослідження потрібно спрямувати на підтвердження їх розмірів.

Для розробки запропонованої класифікації автори використали обробки статистичні дані, отримані зі звітів про стан безпеки руху залізниць. Однак деякі звіти не містять достовірної інформації про відмови технічних пристроїв, зокрема про технічні відмови вагонних уповільнювачів. У звітах такі відмови майже не зазначають, а це суперечить основному принципу безпеки і свідчить про відсутність ідеальної безпечної системи. Тому деякі звіти можна поставити під сумнів.

Зважаючи на це запропонований метод класифікації транспортних подій можна використовувати тільки за наявності достовірної інформації про їх кількість і збитки від них.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вырков, С. А. Классификация железнодорожных транспортных происшествий по критерию материального ущерба / С. А. Вырков // Изв. Петербург. ун-та путей сообщения. – 2015. – Вып. 1. – С. 12–19.
2. Гуриев, С. М. Мифы экономики: заблуждение и стереотипы, которые распространяют СМИ и политики / С. М. Гуриев. – Москва : Юнайтед Пресс, 2010. – 120 с.
3. Дюран, Б. Кластерный анализ / Б. Дюран, П. Оделл. – Москва : Статистика, 1977. – 128 с.
4. Про затвердження Положення про класифікацію транспортних подій на залізничному транспорті [Електронний ресурс] : Наказ М-ва інфраструктури України від 03.07.2017 р. № 235. – Режим доступу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/z0904-17> – Назва з екрана. – Перевірено : 28.05.2018.
5. О внесении изменений в Положение о классификации, порядке расследования и учета транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта, утвержденное приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 18 декабря 2014 г. № 344 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://cdnimg.rg.ru/pril/130/47/94/43349.pdf> – Назва з екрана. – Перевірено : 28.05.2018.
6. О внесении изменений и дополнения в приказ исполняющего обязанности Министра по инвестициям и развитию Республики Казахстан от 26 марта 2015 года № 334 «Об утверждении Правил безопасности на железнодорожном транспорте» [Електронний ресурс] : Приказ Министра по инвестициям и развитию Республики Казахстан от 21 февраля 2017 года № 105. – Режим доступу: <http://adilet.zan.kz/rus/docs/V1700014981> – Назва з екрана. – Перевірено : 28.05.2018.
7. Розсоха, О. В. Аналіз і особливості існуючих наукових підходів щодо визначення рівня безпеки руху / О. В. Розсоха, Ю. В. Смачило // 36. наук. пр. Держ. економ.-технолог. ун-ту трансп. Серія: Транспортні системи і технології. – Київ, 2016. – Вип. 28. – С. 202–214.
8. Шмаков, Д. И. Оценка экономического ущерба в результате смертности населения от несчастных случаев, отравлений и травм / Д. И. Шмаков // Научные труды / Ин-т народнохозяйств. прогнозирования РАН. – Москва, 2003. – Вып. 1. – С. 377–385.
9. An extended system-theoretic hazard analysis method for the safety of high-speed railway train control systems / Jin Tao Liu, Tao Tang, Jie Bei Zhu, Lin Zhao // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2016. – Vol. 231. – Iss. 8. – P. 821–834. doi: 10.1177/0954409716664931
10. Commission Directive 2009/149/EC of 27 November 2009 [Електронний ресурс] // Official Journal of the European Union. – 2009. – Режим доступу: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:313:0065:0074:EN:PDF> – Назва з екрана. – Перевірено : 28.05.2018.

## НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

11. Directive 2004/49/EC of the European Parliament and of the council of 24 April 2004 [Електронний ресурс] // Official Journal of the European Union. – 2004. – P. 1–24. – Режим доступу: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:220:0016:0039:EN:PDF> – Назва з екрана. – Перевірено : 28.05.2018.
12. Leitner, B. A general model for railway systems risk assessment with the use of railway accident scenarios analysis / B. Leitner // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 187. – P. 150–159. doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.361
13. Risk Assessment of Railway Transportation Systems Using Timed Fault Trees / Zhaoguang Peng, Yu Lu, Alice Miller, Chris Johnson, Tingdi Zhao // Quality and Reliability Engineering International. – 2014. – Vol. 32. – Iss. 1. – P. 181–191. doi: 10.1002/qre.1738
14. Risk Evaluation of Railway Rolling Stock Failures Using FMECA Technique: A Case Study of Passenger Door System / Fateme Dinmohammadi, Babakalli Alkali, Mahmood Shafiee, Christophe Bérenguer, Ashraf Labib // Urban Rail Transit. – 2016. – Vol. 2. – Iss. 3-4. – P. 128–145. doi: 10.1007/s40864-016-0043-z
15. 2012 report on railway safety in Poland [Електронний ресурс] // Rail Transport Office. – 2013. – P. 1–111. – Режим доступу: <http://www.era.europa.eu/Document-Register/Documents/NSA%20Annual%20Report%202012%20Poland.pdf> – Назва з екрана. – Перевірено : 28.05.2018.

А. Н. ОГАР<sup>1\*</sup>, А. В. РОЗСОХА<sup>2\*</sup>, А. В. ШАПОВАЛ<sup>3\*</sup>, Ю. В. СМАЧИЛО<sup>4\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Железнодорожные станции и узлы», Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61001, тел. +38 (057) 730 10 42, эл. почта [ogar.07.12@gmail.com](mailto:ogar.07.12@gmail.com), ORCID 0000-0003-1967-5828

<sup>2\*</sup>Каф. «Железнодорожные станции и узлы», Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61001, тел. +38 (057) 730 10 42, эл. почта [alexroz2010@gmail.com](mailto:alexroz2010@gmail.com), ORCID 0000-0001-6281-0226

<sup>3\*</sup>Каф. «Железнодорожные станции и узлы», Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61001, тел. +38 (057) 730 10 42, эл. почта [ann.shapoval@ukr.net](mailto:ann.shapoval@ukr.net), ORCID 0000-0002-7884-6781

<sup>4\*</sup>Каф. «Железнодорожные станции и узлы», Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61001, тел. +38 (057) 730 10 42, эл. почта [smachilo.julia@gmail.com](mailto:smachilo.julia@gmail.com), ORCID 0000-0003-1042-2170

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ УКРАИНЫ ПО КАТЕГОРИЯМ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЯЖЕСТИ ПОСЛЕДСТВИЙ

**Цель.** Статья предусматривает разработку методики распределения транспортных происшествий по критерию среднего материального ущерба и установления финансовых границ между существующими видами транспортных происшествий. **Методика.** В наше время на железных дорогах Украины транспортные происшествия классифицируются по тяжести последствий и выражаются в натуральных величинах. Существующая система классификации уступает системе классификации транспортных происшествий, которая действует на территории стран Европейского Союза (ЕС). Транспортные происшествия в странах ЕС классифицируют как по типу, так и по критерию материального ущерба. Для распределения транспортных происшествий на железных дорогах Украины по категориям в зависимости от тяжести последствий используют метод ближайшего соседа. Он учитывает средние убытки от транспортного происшествия, его особенностью является возможность установки финансовых границ. **Результаты.** Предложен эффективный метод распределения транспортных происшествий на железных дорогах Украины по категориям в зависимости от тяжести последствий с использованием кластерного анализа. Представленные результаты расчетов позволяют распределить транспортные происшествия на три группы и установить финансовые границы между ними. **Научная новизна.** Усовершенствована методика распределения транспортных происшествий по категориям в зависимости от материального ущерба от них. Согласно ей транспортные происшествия разделены на три группы. Впервые были предложены финансовые границы между группами транспортных проис-

## НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

шествий. Дальнейшие исследования предлагаем направить в подтверждение размеров финансовых границ. **Практическая значимость.** В результате исследований появилась возможность оценить транспортные происшествия не только по тяжести их последствий, но и по критерию материального ущерба. Этот подход позволяет также оценить состояние безопасности движения на отдельных участках, станциях или дирекциях железной дороги. На основе полученных результатов возможно дальнейшее развитие системы классификации транспортных происшествий, а также ее интеграции в европейскую систему классификации.

**Ключевые слова:** классификация транспортных происшествий; железнодорожный транспорт; материальный ущерб

О. М. ОГАР<sup>1\*</sup>, О. В. РОЗСОХА<sup>2\*</sup>, Г. В. ШАПОВАЛ<sup>3\*</sup>, Ю. В. СМАЧИЛО<sup>4\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Railway Stations and Nodes», Ukrainian State University of Railway Transport, Feierbakh Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61001, tel. +38 (057) 730 10 42, e-mail ogar.07.12@gmail.com, ORCID 0000-0003-1967-5828

<sup>2\*</sup>Dep. «Railway Stations and Nodes», Ukrainian State University of Railway Transport, Feierbakh Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61001, tel. +38 (057) 730 10 42, e-mail alexroz2010@gmail.com, ORCID 0000-0001-6281-0226

<sup>3\*</sup>Dep. «Railway Stations and Nodes», Ukrainian State University of Railway Transport, Feierbakh Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61001, tel. +38 (057) 730 10 42, e-mail ann.shapoval@ukr.net, ORCID 0000-0002-7884-6781

<sup>4\*</sup>Dep. «Railway Stations and Nodes», Ukrainian State University of Railway Transport, Feierbakh Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61001, tel. +38 (057) 730 10 42, e-mail smachilo.julia@gmail.com, ORCID 0000-0003-1042-2170

## TRANSPORT ACCIDENTS DISTRIBUTION AT UKRAINIAN RAILWAYS ACCORDING TO CATEGORIES DEPENDING ON SEVERITY OF CONSEQUENCES

**Purpose.** The article aimed at developing a methodology for transport accidents distribution according to criterion of average material damage and establish financial limits between the existing types of transport accidents.

**Methodology.** Nowadays, at the Ukrainian railways, transport accidents are classified according to the severity of consequences which are expressed in physical quantities. The existing classification system is inferior to the classification system of transport accidents, which operates in the territory of the European Union (EU). Transport accidents in the EU countries are classified both by type and by criterion of material damage. To distribute transport accidents by categories depending on the severity of the consequences at the Ukrainian railways the method of the nearest neighbor is used. It takes into account average losses from transport accident, its feature is the possibility of establishing financial limits. **Findings.** The article proposes an efficient method for distributing transport accidents at the Ukrainian railways according to the categories depending on the severity of consequences using cluster analysis. The presented results of calculations allow us to distribute the transport accidents into three groups and establish the financial limits between them. **Originality.** It was improved the method of distribution of transport accidents by categories depending on material losses. According to it, transport accidents are divided into three groups. For the first time, financial limits were proposed between groups of transport events. We propose further research to confirm the size of financial limits. **Practical value.** As a result of research, it was possible to evaluate transport accidents not only by severity of their consequences, but also by the criterion of material damage. This approach also enables us to evaluate the state of traffic safety at certain sections, stations or railway directions. On the basis of obtained results, further development of classification system of transport accidents, as well as its integration into the European classification system, is possible.

**Keywords:** transport accident classification; railway transport; material damages

## REFERENCES

1. Vyrkov, S. A. (2015). Klassifikatsiya zheleznodorozhnykh transportnykh proissheshtviy po kriteriyu materialnogo ushcherba. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 1, 12-19. (in Russian)
2. Guriev, S. M. (2010). *Mify ekonomiki: zabluzhdenie i stereotipy, kotorye rasprostranyayut SMI i politiki*. Moscow: Yunayted Press. (in Russian)
3. Dyuran, B., & Odell, P. (1977). *Klasternyy analiz*. Moscow: Statistika. (in Russian)

## НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

4. Pro zatverdzhennia Polozhennia pro klasyfikatsiiu transportnykh podii na zaliznychnomu transporti. № 235. (2017). Retrieved from <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/z0904-17> (in Ukrainian)
5. O vnesenii izmeneniy v Polozhenie o klassifikatsii, poryadke rassledovaniya i ucheta transportnykh proissheshtviy i inyykh sobytiy, svyazannykh s narusheniem pravil bezopasnosti dvizheniya i ekspluatatsii zheleznodorozhnogo transporta, utverzhdennoe prikazom Ministerstva transporta Rossiyskoy. № 344. (2014). Retrieved from <https://cdnimg.rg.ru/pril/130/47/94/43349.pdf> (in Russian)
6. Ob utverzhdenii Pravil bezopasnosti na zheleznodorozhnom transporte. № 334. (2015). Retrieved from <http://adilet.zan.kz/rus/docs/V1700014981> (in Russian)
7. Rozsoha, O. V., & Smachilo, Y. V. (2016). Analysis and features of existing scientific approaches to determining the level of traffic safety. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho ekonomiko-tekhnolohichnoho universytetu transportu*, 28, 202-212. (in Ukrainian)
8. Shmakov, D. I. (2003). Otsenka ekonomicheskogo ushcherba v rezultate smertnosti naseleniya ot neschastnykh sluchaeve, otravleniy i travm. *Nauchnye trudy: Institut narodnokhozyaystvennogo prognozirovaniya RAN*, 1, 377-385. (in Russian)
9. Lui, J. T., Tang, T., Zhu, J. B., & Zhao, L. (2016) An extended system-theoretic hazard analysis method for the safety of high-speed railway train control systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 231(8), 821–834. doi: 10.1177/0954409716664931 (in English)
10. Commission Directive 2009/149/EC of 27 November 2009. (2009). *Official Journal of the European Union*, 313, 65-74. Retrieved from <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:313:0065:0074:EN:PDF> (in English)
11. Directive 2004/49/EC of the European Parliament and of the council of 24 April 2004. *Official Journal of the European Union*, 220, 16-39. Retrieved from <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:220:0016:0039:EN:PDF> (in English)
12. Leitner, B. (2017). A general model for railway systems risk assessment with the use of railway accident scenarios analysis. *Procedia Engineering*, 187, 150–159. doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.361 (in English)
13. Peng, Z., Lu, Y., Miller, A., Johnson, C., & Zhao, T. (2014). Risk Assessment of Railway Transportation Systems Using Timed Fault Trees. *Quality and Reliability Engineering International*, 32(1), 181–191. doi: 10.1002/qre.1738 (in English)
14. Dinmohammadi, F., Alkali, B., Shafiee, M., Berenguer, C., & Labib, A. (2016). Risk Evaluation of Railway Rolling Stock Failures Using FMECA Technique: A Case Study of Passenger Door System. *Urban Rail Transit*, 2(3-4), 128–145. doi: 10.1007/s40864-016-0043-z (in English)
15. 2012 report on railway safety in Poland. (2013). Warsaw: Rail Transport Office Publisher. Retrieved from <http://www.era.europa.eu/Document-Register/Documents/NSA%20Annual%20Report%202012%20Poland.pdf> (in English)

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Д. Н. Козаченком (Україна)

Надійшла до редколегії: 06.02.2018

Прийнята до друку: 22.05.2018

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

УДК 502.3:504.5

Н. Н. БЕЛЯЕВ<sup>1\*</sup>, И. В. КАЛАШНИКОВ<sup>2\*</sup>, И. В. КЛИМЕНКО<sup>3\*</sup>, В. А. КОЗАЧИНА<sup>4\*</sup>

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

<sup>2\*</sup>ГП «Проектно-изыскательный институт железнодорожного транспорта «Укрзалізничпроект», ул. Конарева, 7, Харьков, Украина, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, эл. почта uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

<sup>3\*</sup>Каф. «Высшая математика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1746-9118

<sup>4\*</sup>Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

### 3D ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО РИСКА ПРИ ТЕРАКТЕ

**Цель.** Работа предполагает разработку 3D численной модели для оценки территориального риска в случае теракта с использованием химического агента. **Методика.** Для описания процесса рассеивания в атмосфере химического агента, выброшенного в случае теракта, используется трехмерное уравнение массопереноса примеси в атмосферном воздухе. Уравнение учитывает поле скорости ветрового потока, атмосферную диффузию, интенсивность эмиссии химического агента, наличие зданий возле места выброса химически опасного вещества. Для численного интегрирования моделирующего уравнения используется конечно-разностный метод. Особенностью разработанной численной модели является возможность оценки территориального риска в случае теракта при различных метеоусловиях и наличии зданий. Для расчета поля скорости ветрового потока в условиях застройки применяется трехмерное уравнение для потенциала скорости. **Результаты.** Разработанная численная модель и пакет программ могут быть использованы для оценки территориального риска как в случае терактов с применением химических агентов, так и в случае экстремальных ситуаций на химически опасных объектах и транспорте. Построенная численная модель может быть реализована на компьютерах малой и средней мощности, что позволяет широко использовать ее для решения задач рассматриваемого класса, при разработке плана ликвидации аварийной ситуации. Представлены результаты вычислительного эксперимента, позволяющие оценить возможности предложенного метода оценки территориального риска в случае теракта с использованием химического агента. **Научная новизна.** Предложена эффективная численная модель для оценки территориального риска в случае теракта с применением химически опасного вещества. Метод может быть использован для оценки территориального риска в условиях городской застройки, что позволяет получать адекватные данные о возможных зонах поражения. Метод основан на численном интегрировании фундаментального уравнения массопереноса, выражающего закон сохранения массы в жидкой среде. **Практическая значимость.** Предложенный метод оценки территориального риска в случае теракта с применением химического агента может быть использован для расчета зон поражения возле административных зданий, центров и других социально значимых объектов.

**Ключевые слова:** территориальный риск; теракт; химическое загрязнение; численное моделирование; загрязнение воздушной среды

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

**Введение**

Теракты с применением химических (биологических) агентов представляют собой уже реальную угрозу для населения разных стран [1-4, 6, 7-9, 11]. В качестве агентов могут быть использованы как химически опасные вещества, применяемые в различных отраслях промышленности (хлор, аммиак и т. под.), так и специальные, разработанные для боевого применения. Если рассматривать теракт в селитебной зоне, то особенностью его является ограниченный по массе и по времени выброс агента, т. е. эмиссия – полунепрерывная. Это связано с тем, что незаметно поставить в селитебную зону большие емкости с химическим (биологическим) агентом достаточно сложно. Например, емкостью для опасного вещества может являться баллон для топлива, используемый на автозаправочных станциях, но заполненный поражающим агентом.

Если теракт имеет место на промышленном объекте или в транспорте, то выброс опасного вещества является более мощным и происходит значительно дольше по времени. В случае теракта, сопровождающегося эмиссией химического (биологического) агента, в атмосфере формируется зона загрязнения, интенсивность которой в различных точках области различна. В определенных местах и в определенные моменты времени значение концентрации агента будет выше некоторого порогового значения (например, смертельной концентрации). Эта поражающая концентрация будет зависеть в первую очередь от мощности выброса и от метеоусловий.

Актуальной проблемой является прогноз риска поражения людей в селитебной зоне при возможных терактах с применением химических (биологических) агентов. Такой прогноз может быть выполнен только методом математического моделирования.

**Цель**

Основной целью данной работы является разработка 3D численной модели для оценки территориального риска при террористической атаке, сопровождающейся эмиссией химического агента в условиях застройки.

В настоящее время в Украине для оценки размеров и интенсивности зон химического за-

ражения используют методику ОНД-86, методику прогноза последствий аварий на химически опасных объектах и транспорте, модель Гаусса. За рубежом оценку зон поражения проводят чаще всего по модели Гаусса [4, 10], методом CFD-моделирования [2, 3, 12]. Следует подчеркнуть, что применение CFD-моделирования дает возможность получать прогнозные данные с учетом такого важного фактора, как наличие зданий в зоне рассеивания опасного вещества. За рубежом CFD-модели основаны на применении уравнений Навье–Стокса совместно с определенной моделью турбулентности, что приводит к значительным затратам компьютерного времени, даже при реализации моделей на мощных зарубежных компьютерах. Расчет одного варианта задачи может длиться несколько суток, что неудобно при проведении серийных расчетов.

**Методика**

Создание 3D CFD-модели необходимо для расчета аэродинамики обтекания зданий и оценки территориального риска при теракте на урбанизированной территории.

При оценке территориального риска будем учитывать, что зона заражения различна для различных метеоситуаций  $P(W_i)$ . Под определенной метеоситуацией будем понимать конкретное значение скорости и направления ветра.

Вероятность реализации конкретной метеоситуации в регионе известна и определяется по зависимости [1]:

$$P(W_i) = N_{\Pi} / T, \quad (1)$$

где  $N_{\Pi}$  – число дней (часов), соответствующих определенной метеоситуации;  $T$  – период наблюдений.

Для оценки потенциального территориального риска необходимо оценить вероятность для человека, находящегося в каждой точке области возле атакуемого объекта, оказаться под действием шлейфа химически опасного вещества.

Вероятность попадания человека под действие шлейфа химически опасного вещества определяется следующим образом:

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

$$P(W)_{\Sigma} = \sum_{i=0}^n P(W_i), \quad (2)$$

где  $P(W)_{\Sigma}$  – суммарная вероятность всех рассматриваемых метеоситуаций, при которых человек попадает в зону воздействия источника эмиссии и получает токсичное заражение.

Расчет зоны заражения для каждого (вероятного) метеоусловия выполняется на базе трехмерного уравнения массопереноса [2, 3, 5, 8]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s)C}{\partial z} + \sigma C = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \\ + \sum Q_i(t) \delta(x - x_i(t)) \delta(y - y_i(t)) \delta(z - z_i), \quad (3) \end{aligned}$$

где  $C$  – концентрация химического (биологического) агента в атмосферном воздухе;  $\sigma$  – коэффициент, учитывающий распад агента;  $u, v, w$  – компоненты вектора скорости воздушного потока;  $w_s$  – скорость гравитационного оседания примеси;  $\mu = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$  – коэффициенты атмосферной турбулентной диффузии;  $Q$  – интенсивность выброса агента;  $\delta(x - x_i)(y - y_i)(z - z_i)$  – дельта-функция Дирака;  $x_i, y_i, z_i$  – координаты источника эмиссии агента;  $t$  – время.

Поскольку рассматривается теракт в селитебной зоне или в промышленной зоне вблизи зданий, то возникает необходимость расчета поля скорости ветрового потока (параметры  $u, v, w$ ). Для этого расчета при наличии зданий будем использовать модель потенциального течения:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0, \quad (4)$$

где  $P$  – потенциал скорости.

После определения поля потенциала скорости осуществляется расчет компонент вектора скорости воздушного потока:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}; \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}; \quad w = \frac{\partial P}{\partial z}.$$

Постановка краевых условий для моделирующих уравнений (3, 4) рассмотрена в [2, 3, 5].

Для численного интегрирования уравнения (4) используется метод Рундсона, а для численного интегрирования уравнения переноса примеси применяется неявная разностная схема расщепления [2, 5].

**Расчет территориального риска.** Таким образом, при прогнозировании химической атаки террориста необходимо для конкретной точки конкретной области (поля) выполнить расчеты по формуле (5). Для их выполнения предварительно необходимо рассчитать значение концентрации химического агента в точке расположения конкретного человека, для конкретной метеоситуации, и определить, насколько эта величина превосходит заданный пороговый уровень.

**Алгоритм решения.** Оценку территориального риска (прогноз последствий) при теракте и при вероятной метеорологической ситуации  $PW$  будем осуществлять в такой последовательности [3]:

1) на *первом* этапе решения задачи формируется блок данных относительно инициирующего события (возможное место эмиссии химически опасного вещества, интенсивность, режим эмиссии, вид химического агента);

2) на *втором* этапе формируется блок данных относительно вероятных метеоситуаций  $PW_i$ , характерных для области, где находится атакуемый объект;

3) на *третьем* этапе рассчитывается уровень химического заражения для вероятных метеоситуаций (на этом этапе проводится численное интегрирование уравнений (1) и (3) для конкретной метеоситуации);

4) на *четвертом* этапе определяются зоны, где концентрация превышает пороговое значение (например, смертельную концентрацию) при конкретной метеоситуации;

5) на *пятом* этапе осуществляется построение поля риска для рассматриваемого объекта.

Данный алгоритм оценки риска реализован в разработанном коде «RISK–3D Q».

## Результаты

Разработанный код был использован для решения следующей модельной задачи. Рассматривается сценарий атаки, когда возле двух

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

зданий происходит эмиссия хлора в двух местах. Полагается, что на момент атаки возможны такие значения скорости ветра: 3 м/с и 6 м/с.

На рис. 1 показаны изолинии концентрации хлора для момента времени 110 с, при скорости ветра 6 м/с (уровень  $z = 2$  м). Из данного рисунка видно, что при эмиссии химически опасного вещества формируется зона заражения, которая охватывает оба здания и создает угрозу для людей, находящихся на любой стороне зданий.

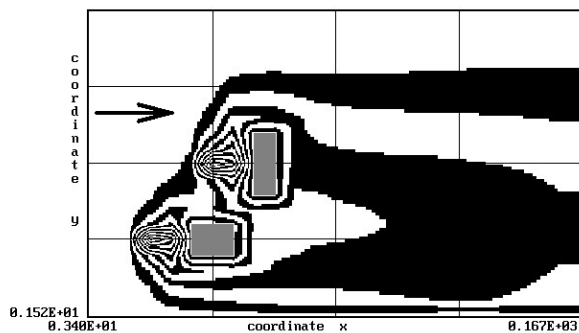


Рис. 1. Зона химического заражения при атаке террориста

Fig. 1. Zone of chemical contamination after the chemical attack of a terrorist

Это особенно хорошо видно из рис. 2, где представлена матрица территориального риска в районе химической атаки (момент времени 110 с) при вероятных метеоситуациях. Вероятность заражения людей возле здания показана в процентах. Принимается, что заражение наступает, если концентрация хлора в расчетной точке превышает  $3 \text{ мг/м}^3$ .

Как видно из рис. 2, зона заражения (риск до 99 %) формируется не только возле зданий, но и за ними. То есть для рассматриваемого сценария здания не выполняют защитную функцию барьера.

Отметим, что время расчета составляет порядка 10 сек.

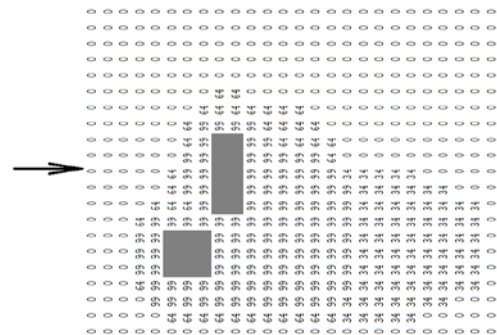


Рис. 2. Матрица территориального риска (уровень 3 м) при химической атаке террориста

Fig. 2. Matrix of territorial risk (level  $z=2\text{m}$ ) after the chemical attack of a terrorist

### Научная новизна и практическая значимость

Разработана 3D численная модель, позволяющая оценить величину территориального риска в случае теракта с применением химического агента в условиях застройки (селитебная зона или промышленная площадка).

Особенностью построенной модели является использование стандартной исходной информации, быстрота в получении прогнозных данных и удобство для анализа получаемых результатов.

### Выводы

В работе представлена 3D-модель для оценки территориального риска при атаке террориста с применением химически опасного вещества и рассеиванием химического агента в условиях застройки. В основу расчета риска положено численное моделирование рассеивания опасного вещества в условиях застройки с последующей оценкой размеров зон поражения для каждой вероятной метеоситуации.

Дальнейшее совершенствование выбранного научного направления следует проводить в области создания 3D-модели для расчета территориального риска на базе уравнений, описывающих вязкое движение воздушного потока.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алымов, В. Т. Техногенный риск. Анализ и оценка : учеб. пособие для вузов / В. Т. Алымов, Н. П. Тарасова. – Москва : Академкнига, 2004. – 118 с.
2. Беляев, Н. Н. Защита зданий от проникновения в них опасных веществ : монография / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, Н. В. Росточило. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. – 136 с.

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

3. Оценка техногенного риска при эмиссии опасных веществ на железнодорожном транспорте / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гулько, П. С. Кириченко, Л. Я. Мунтян. – Кривой Рог : Р. А. Козлов, 2017. – 127 с.
4. Стоецкий, В. Ф. Оценка риска при авариях техногенного характера / В. Ф. Стоецкий, В. И. Голинько, Л. В. Дранишников // Наук. вісн. НГУ. – 2014. – № 3. – С. 117–124.
5. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – Киев : Наук. думка, 1997. – 368 с.
6. Barret, A. M. Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness : Degree of Doctor of Philosophy / Anthony Michael Barret ; Carnegie Mellon University. – Pittsburg, Pennsylvania, 2009. – 123 p.
7. Berlov, O. V. Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo / O. V. Berlov // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 1 (61). – С. 48–54. doi: 10.15802/stp2016/60953
8. Biliaiev, M. M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography / M. M. Biliaiev, M. M. Kharytonov // NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security. – Dordrecht, 2012. – P. 87–91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8\_15
9. Cefic Guidance on safety Risk Assessment for Chemical Transport Operations J Verlinden [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://www.era.europa.eu/Document-Register/Documents/Cefic%20guidance%20on%20risk%20assessment.pdf> – Загл. с экрана. – Проверено : 29.01.2018.
10. Effect of barriers on the status of atmospheric pollution by mathematical modeling / Zahra Naserzadeh, Farideh Atabi, Faramarz Moattar, Naser Moharram Nejad // Bioscience Biotechnology Research Communication. – 2017. – Vol. 10 (1). – P. 192–204.
11. Protective Action Criteria. A Review of Their Derivation, Use, Advantages and Limitations [Електронний ресурс] / Environmental Public Health Science Unit, Health Protection Branch, Public Health and Compliance Division, Alberta Health. – Edmonton, Alberta, 2017. – Режим доступа: <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> – Загл. с экрана. – Проверено : 14.06.2018.
12. The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes / Ondrej Zavila, Pavel Dobes, Jakub Dlabka, Jan Bitta // Bezpecnostni vyzkum. The Science for Population Protection. – 2015. – № 2. – P. 1–9.

М. М. БІЛЯЄВ<sup>1\*</sup>, І. В. КАЛАШНІКОВ<sup>2\*</sup>, І. В. КЛИМЕНКО<sup>3\*</sup>, В. А. КОЗАЧИНА<sup>4\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта [water.supply.treatment@gmail.com](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</sup>Держ. підприємство «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту України «Укрзалізничпроект», вул. Конарева, 7, Харків, Україна, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, ел. пошта [uzp38@ukr.net](mailto:uzp38@ukr.net), ORCID 0000-0002-2814-380X

<sup>3\*</sup>Каф. «Вища математика», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта [water.supply.treatment@gmail.com](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCID 0000-0002-1746-9118

<sup>4\*</sup>Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта [v.kozachyna@gmail.com](mailto:v.kozachyna@gmail.com), ORCID 0000-0002-6894-5532

## 3D ЧИСЕЛЬНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕРИТОРІАЛЬНОГО РИЗИКУ ПРИ ТЕРАКТІ

**Мета.** Робота передбачає розробку 3D чисельної моделі для оцінки територіального ризику в разі терористичного нападу з використанням хімічного агента. **Методика.** Для опису процесу розсіювання в атмосфері хімічного агента, викинутого у випадку теракту, використовується рівняння масопереносу домішки в атмосферному повітрі. Рівняння враховує швидкість вітрового потоку, атмосферну дифузію, інтенсивність емісії хімічного агента, наявність будівель біля місця викиду хімічно небезпечної речовини. Для чисельного інтегрування моделюючого рівняння використовується кінцево-різницеви метод. Особливістю розробленої чисельної моделі є можливість оцінки територіального ризику в разі теракту при різних метеоумовах та наявності будівель. Для розрахунку поля швидкості вітрового потоку в умовах забудови використовується тривимірне рівняння для потенціалу швидкості. **Результати.** Розроблена спеціалізована чисельна модель та

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

пакет програм можуть бути використані для оцінки територіального ризику як у випадку терактів із застосуванням хімічних агентів, так і в разі екстремальних ситуацій на хімічно небезпечних об'єктах і транспорті. Метод може бути реалізований на комп'ютерах малої та середньої потужності, що дозволяє широко використовувати його для вирішення задач даного класу. Представлені результати обчислювального експерименту, що дозволяють оцінити можливості запропонованого методу оцінки територіального ризику в разі терористичного нападу з використанням хімічного агента. **Наукова новизна.** Запропоновано ефективний метод оцінки територіального ризику в разі теракту зі застосуванням хімічно небезпечної речовини. Метод може бути використаний для оцінки територіального ризику в умовах міської забудови, що дозволяє отримувати адекватні дані про можливі зони ураження. Метод заснований на чисельному інтегруванні фундаментального рівняння масопереносу, що виражає закон збереження маси в рідкому середовищі. **Практична значимість.** Запропонований метод оцінки територіального ризику в разі терористичного нападу зі застосуванням хімічного агента може бути використаний для розрахунку зон ураження біля адміністративних будівель, центрів та інших соціально значущих об'єктів.

**Ключові слова:** територіальний ризик; теракт; хімічне забруднення; чисельне моделювання; забруднення повітряного середовища

M. M. BILIAIEV<sup>1\*</sup>, I. V. KALASHNIKOV<sup>2\*</sup>, I. V. KLYMENKO<sup>3\*</sup>, V. A. KOZACHYNA<sup>4\*</sup>

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

<sup>2\*</sup>State Enterprise «Design and Exploration Institute of Railway Transport of Ukraine «Ukrzaliznichproekt», Konarev St., 7, Kharkiv, 61052, tel. +38 (057) 724 41 25, e-mail uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

<sup>3\*</sup>Dep. «Higher Mathematics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1746-9118

<sup>4\*</sup>Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

### 3D NUMERICAL MODEL FOR TERRITORIAL RISK ASSESMENT AFTER TERRORIST ACT

**Purpose.** The paper deals with the development of 3D numerical model for a territorial risk assessment in a case of a terrorist attack with usage of a chemical agent. **Methodology.** To describe the process of chemical agent dispersion in the atmosphere, emitted in a case of a terrorist attack, authors used three-dimensional equation of mass transfer of an admixture in the atmospheric air. The equation takes into account a velocity of the wind flow, atmospheric diffusion, an intensity of chemical agent emission, a buildings presence near a place of a chemically hazardous substance release. For numerical integration of the modeling equation, a finite difference method is used. A feature of the developed numerical model is possibility of a territorial risk assessment in a case of a terrorist attack under different weather conditions and buildings presence. For calculation of wind flow velocity field in a case of building presence 3D equation for potential of velocity is used. **Findings.** The specialized numerical model and software package can be used for a territorial risk assessment, both in a case of terrorist attacks with usage of chemical agents and in a case of extreme situations at chemically hazardous facilities and transport. The method can be implemented on small and medium-powered computers, which allows it to be widely used for solving this class of problems, when developing an emergency response plan. The results of a computational experiment are presented that allow estimating possibilities of the proposed method for assessing a territorial risk in a case of a terrorist attack with usage of chemical agent. **Originality.** The effective method of a territorial risk assessment in a case of a terrorist attack with usage of a chemically hazardous substance is proposed. The method can be used to assess a territorial risk in an urban environment, which allows obtaining adequate data about possible affected areas. The method is based on numerical integration of the fundamental mass transfer equation, which expresses the law of conservation of mass in a liquid medium. **Practical value.** The proposed method for a territorial risk assessment in a case of a terrorist attack with usage of a chemical agent can be used to calculate the affected areas near administrative buildings, centers and other socially significant facilities.

**Keywords:** territorial risk; terrorist act; chemical pollution; numerical modelling; air pollution

## REFERENCES

1. Alymov, V. T., & Tarasova, N. P. (2004). *Tekhnogennyy risk. Analiz i otsenka: Uchebnoye posobie dlya vuzov*. Moscow: Akademkniga. (in Russian).
2. Belyaev, N. N., Gunko, Y. Y., & Rostochilo, N. V. (2014). *Zashchita zdaniy ot proniknoveniya v nikh opasnykh veshchestv: Monografiya*. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (in Russian).
3. Belyaev, N. N., Gunko, Y. Y., Kirichenko, P. S., & Muntyan, L. Y. (2017). *Otsenka tekhnogenogo riska pri emissii opasnykh veshchestv na zheleznodorozhnom transporte*. Krivoi Rog: Kozlov R. A. (in Russian).
4. Stoetsky, V. F., Golinko, V. I., & Dranishnikov, L. V. (2014). Risk assessment in man-caused accidents. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 3, 117-124. (in Russian).
5. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., Belyaev, N. N. (1997). *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kiev: Naukova dumka. (in Russian).
6. Barret, A. M. (2009). *Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness*. (Dissertation of Doctor of Philosophy). Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, USA. (in English)
7. Berlov, O. V. (2016). Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo. *Science and Transport Progress*, 1(61), 48-54. doi: 10.15802/stp2016/60953 (in English)
8. Biliaiev, M. M., & Kharytonov, M. M. (2012). Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security*. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8\_15 (in English)
9. *Cefic Guidance on safety Risk Assessment for Chemical Transport Operations J Verlinden*. (n.d.). Retrived from <http://www.era.europa.eu/DocumentRegister/Documents/Cefic%20guidance%20on%20risk%20assessment.pdf> (in English)
10. Zahra Naserzadeh, Farideh Atabi, Faramarz Moattar, & Naser Moharram Nejad. (2017). Effect of barriers on the status of atmospheric pollution by mathematical modeling. *Bioscience Biotechnology Research Communication*, 10(1), 192-204. (in English)
11. Government of Alberta. Protective Action Criteria: A Review of Their Derivation, Use, Advantages and Limitations. Environmental Public Health Science Unit, Health Protection Branch, Public Health and Compliance Division, Alberta Health. Edmonton, Alberta. Retrived from <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> (in English)
12. Ondrej Zavila, Pavel Dobes, Jakub Dlabka, & Jan Bitta. (2015). The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes. *Bezpecnostni vyzkum. The Science for Population Protection*, 2, 1-9. (in English)

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

Поступила в редколлегию: 12.02.2018

Принята к печати: 30.05.18

## УДК 656. 225

Ю. В. БУЦ<sup>1</sup>, О. В. КРАЙНЮК<sup>2</sup>, Д. С. КОЗОДОЙ<sup>3\*</sup>, В. В. БАРБАШИН<sup>4</sup><sup>1</sup>Каф. «Природоохоронні технології, екологія та безпека життєдіяльності», Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, пр. Науки, 9А, Харків, Україна, 61166, тел. +38 (050) 683 08 99, ел. пошта butsyura@ukr.net, ORCID 0000-0003-0450-2617<sup>2</sup>Каф. «Метрологія та безпека життєдіяльності», Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Я. Мудрого, 25, Харків, Україна, 61000, тел. +38 (050) 404 26 73, ел. пошта alenauvarova@ukr.net, ORCID 0000-0001-9524-040X<sup>3\*</sup>Центр спеціального навчання працівників суб'єктів перевезення небезпечних вантажів, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейербаха, 7, Харків, Україна, 61000, тел. +38 (066) 519 47 31, ел. пошта dmitry\_1980@ukr.net, ORCID 0000-0003-3615-1815<sup>4</sup>Каф. «Охорона праці та безпека життєдіяльності», Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (099) 786 73 15, ел. пошта barbachyn@ukr.net, ORCID 0000-0003-3262-8305**ОЦІНКА НАДЗВИЧАЙНИХ ПОДІЙ ПІД ЧАС ПЕРЕВЕЗЕННЯ  
НЕБЕЗПЕЧНИХ ВАНТАЖІВ У КОНТЕКСТІ ТЕХНОГЕННОГО  
НАВАНТАЖЕННЯ РЕГІОНІВ**

**Мета.** Основною метою статті є аналіз сучасного стану безпеки руху на залізничному транспорті під час перевезення небезпечних вантажів, а також оцінка надзвичайних подій і рівня безпеки на основі статистичного аналізу. **Методика.** Поставлена мета досягається за допомогою теоретичного узагальнення й аналізу сучасних знань та уявлень про прогнозування аварій з небезпечними вантажами. Для аналізу сучасного стану перевезення небезпечних вантажів залізничним транспортом використано геоінформаційні системи. **Результати.** Проаналізовано види інцидентів, що сталися на Укрзалізниці протягом останніх років. Виявлено головні причини виникнення аварійних ситуацій: технічна несправність вагонів, надзвичайно високий знос основних фондів, недоліки організаційної роботи під час перевезення вантажів, порушення правил безпеки вантажних робіт, втручання сторонніх осіб під час перевезення тощо. Однією з найголовніших причин небезпечних подій є надзвичайно високий знос основних фондів. Розроблено карту потенційних небезпек та аварійних ситуацій під час перевезення небезпечних вантажів із використанням геоінформаційних технологій. Наголошено на необхідності практичного вирішення проблем підвищення безпеки залізничних перевезень в умовах надзвичайних ситуацій. Безпеки перевезення небезпечних вантажів можна досягти за таких умов: дослідження ймовірності виникнення надзвичайних ситуацій; підвищення оперативності прийняття рішень щодо ліквідації наслідків аварій; розробка технології ліквідації наслідків аварійних ситуацій; впровадження системи супутникової навігації. **Наукова новизна.** У роботі подано наукове обґрунтування й розробку основ прогнозування надзвичайних ситуацій на об'єктах залізничного транспорту. Надано оцінку причинам виникнення подій із небезпечними вантажами. Складено карту України за кількістю подій та залежно від видів інцидентів на Укрзалізниці. **Практична значимість.** Використання запропонованого підходу дозволить визначити якість будь-якої системи прийняття рішень, особливо під час планування аварійно-рятувальних робіт, формування сил і засобів для локалізації та ліквідації аварійних ситуацій. Практична цінність роботи полягає в отриманні науково обґрунтованої й водночас прийнятної для працівників методики оцінки стану стабільності перевізного процесу на окремих ділянках залізниць, а також у розробці рекомендацій для ділянок із підвищеною аварійністю.

**Ключові слова:** перевезення небезпечних вантажів; залізничний транспорт; надзвичайні події; пожежа; геоінформаційні технології

**Вступ**

До основних факторів ризику на залізничному транспорті належить перевезення великої кількості, до 3 926 найменувань, небезпечних вантажів [2]. Вони є потенційним джерелом

виникнення надзвичайних ситуацій із великою кількістю потерпілих, значними матеріальними збитками, настанням несприятливих екологічних і санітарно-гігієнічних наслідків [1]. До небезпечних належать вантажі, які відповідають критеріям «Правил перевезення небезпеч-

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

них вантажів» [6], ДСТУ 4500-3:2008 «Вантажі небезпечні. Класифікація», ДСТУ 4500-5:2005 «Вантажі небезпечні. Маркування». Транспортна стратегія України на період до 2020 року [10] визначає одним зі своїх основних напрямків удосконалення й розвиток державної системи гарантування безпеки під час проведення операцій, пов'язаних із перевезенням небезпечних вантажів, розроблення відповідних нормативно-правових актів, створення реєстру небезпечних вантажів.

Розробку технології перевезень небезпечних вантажів досліджували вітчизняні науковці: Музикіна С. І. [4], Дубовіч І. А. [3], Родкевич О. Г. [8], Радкевич А. В. з колегами [7], зарубіжні вчені [12–14] та ін. Питання забезпечення ефективного функціонування транспортних систем розглядаються у багатьох наукових працях, але проблема контролю за безпечною доставкою вантажів на залізничному транспорті повністю не вирішена.

### Мета

Основна мета статті – проаналізувати сучасний стан безпеки руху на залізничному транспорті під час перевезення небезпечних вантажів, а також провести оцінку надзвичайних подій і рівня безпеки на основі статистичного аналізу.

### Методика

Поставлена мета досягається за допомогою теоретичного узагальнення й аналізу сучасних знань та уявлень про прогнозування аварій з небезпечними вантажами. Для аналізу сучасного стану перевезення небезпечних вантажів залізничним транспортом використано геоінформаційні системи.

### Результати

Кількість надзвичайних подій під час перевезення небезпечних вантажів безпосередньо залежить від обсягу перевезень вантажів залізницею, який у зв'язку з економічною й політичною ситуацією у 2013–2014 роках різко зменшився, проте у 2015 р. спостерігається його суттєве зростання (рис. 1). Серед вантажів, що перевозяться, велику частку складають і потенційно небезпечні (рис. 2). Оскільки близько 15 % від загального обсягу перевезень вантажів залізничним транспортом становлять небезпечні вантажі (вибухонебезпечні, пожежонебезпечні, хімічні та інші речовини), то потенційна небезпека від перевезень таких вантажів дуже висока [5].

Матеріальні збитки від транспортних подій за 2016 рік становлять 24 млн 649 тис. грн, з яких лише 559 тис. грн, або 2,3 %, відшкодовано. Із загальної кількості транспортних подій 408 випадків, або 74,2 %, пов'язані з впливом «людського» чинника [9].

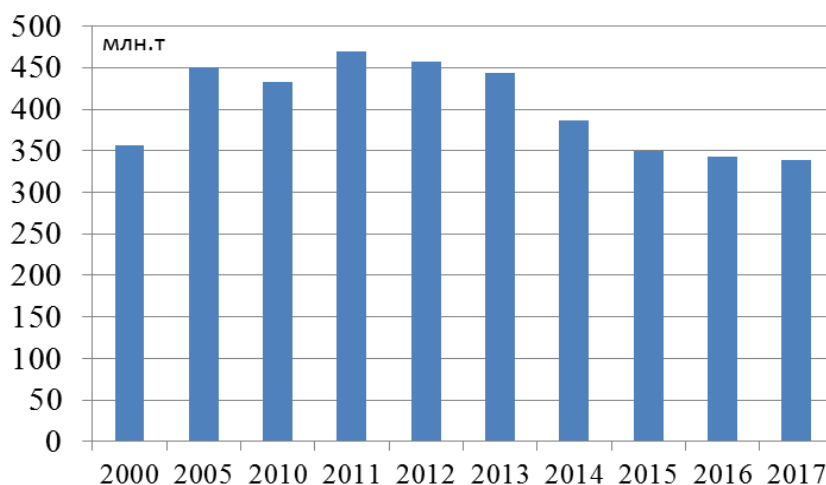


Рис. 1. Перевезення вантажів залізницею, млн т (за даними [9, 11])

Fig. 1. Transportation of goods by rail, million tons (according to [9, 11])

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

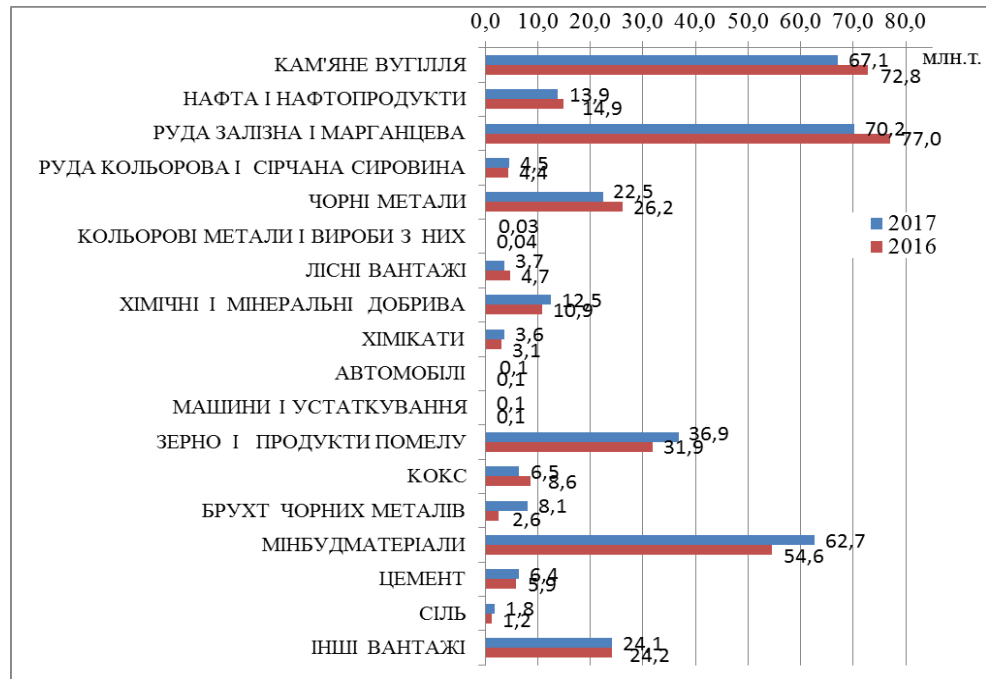


Рис. 2. Обсяги перевезень вантажів Укрзалізницею у 2016–2017 роках, млн т (складено за даними [10])

Fig. 2. Volumes of cargo transportation by Ukrzaliznytsia in 2016–2017 years, million tons (compiled according to [10])

Незважаючи на численні заходи щодо підвищення безпеки перевезень, проведений аналіз інцидентів із небезпечними вантажами виявив значні коливання показників кількості надзвичайних подій на різних залізницях.

Аналізуючи надзвичайні події на Укрзалізниці за 2016–2017 роки, слід відзначити, що у 2016 році найбільша їх кількість припала на регіональну філію «Донецька залізниця» (39 %). На Придніпровській залізниці відбулося 22 %, на Одеській – 17 %, на Південно-Західній та Львівській – по 11 % надзвичайних подій (рис. 3, 5). На Південній залізниці не зафіксовано жодного інциденту під час перевезення небезпечних вантажів.

У 2017 році спостерігається інша ситуація. На Одеській залізниці сталося 32 % небезпечних подій, на Придніпровській залізниці – 22 %, на Південно-Західній залізниці – 19 %, зменшилася кількість надзвичайних подій на Львівській залізниці – до 10 %, але зафіксовано небезпечні інциденти на Південній залізниці –

10 %. Зменшилася кількість небезпечних подій на Донецькій залізниці (7 %) (рис. 3, 5).

Особливу увагу слід приділити аналізу небезпечних подій на Придніпровській та Одеській залізницях, на яких як у 2016, так і в 2017 році відмічена чимала кількість подібних випадків.

За характером подій у 2016 році інциденти розподілилися наступним чином: найбільша кількість подій пов'язана зі сходженням вагонів або тепловоза з колії – 72 %, витікання вантажу (бензину або дизельного пального) склало 11 %, відчеплення вагонів, пожежа – по 6 %, витікання сірчаної кислоти – 5 % (рис. 4).

У 2017 році значно збільшилась кількість випадків витікання бензину й дизельного пального із вагонів-цистерн – до 17 %. Сходження вагонів склало 27 %, ДТП на переїздах – 38 %; зафіксовано випадки витікання сірчаної кислоти (3 %), серед інших подій – витікання бензолу й метанолу, що склали по 1 % (рис. 4).

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

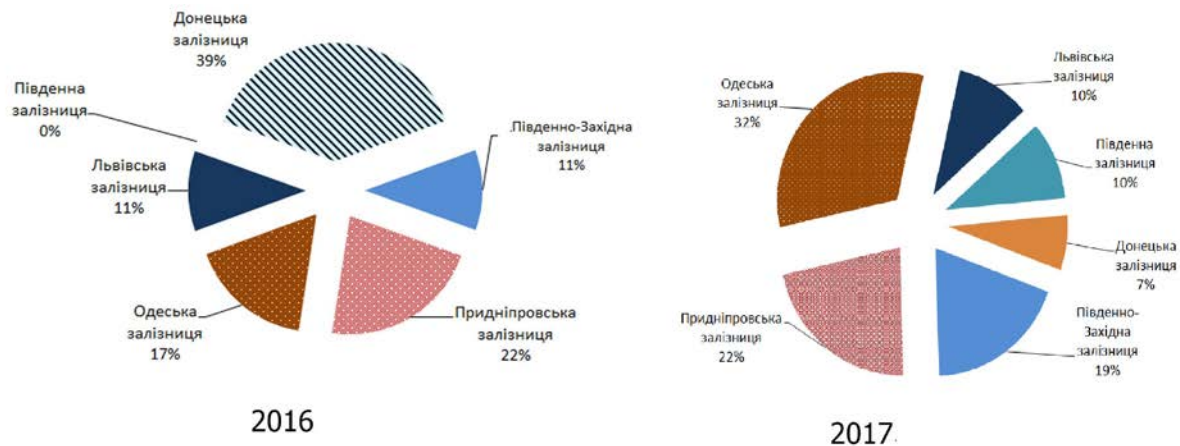


Рис. 3. Інциденти з небезпечними вантажами за місцем події, %

Fig. 3. Incidents with dangerous goods at the place of event, %

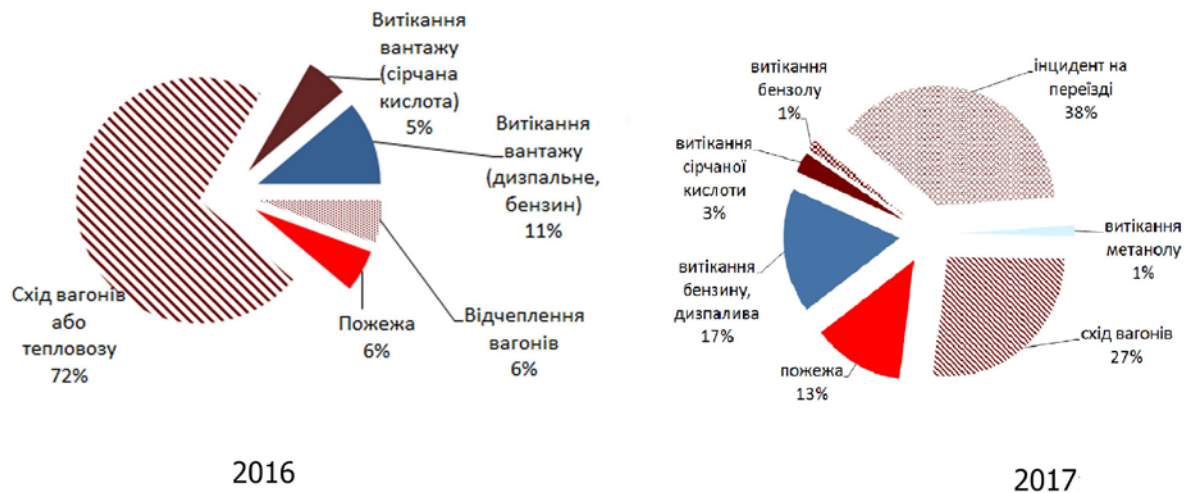


рис. 4. Надзвичайні події з участю небезпечних вантажів (за даними [9])

Fig. 4. Emergency events involving dangerous goods (according to [9])

Причинами виникнення аварійних ситуацій є різні фактори: технічна несправність вагонів; надзвичайно високий знос основних фондів, недоліки організаційної роботи під час перевезення вантажів, порушення правил безпеки вантажних робіт, втручання сторонніх осіб під час перевезення тощо.

Вважаємо, що однією з найголовніших причин небезпечних подій є надзвичайно високий знос основних фондів (рис. 6).

#### Наукова новизна та практична значимість

Зважаючи на вищесказане, можна запропонувати основні заходи для підвищення безпеки транспортування небезпечних вантажів:

- заміна застарілого рухомого складу і контейнерів на сучасні, що відповідають усім вимогам безпеки транспортування;
- підвищення рівня надійності технічних і технологічних засобів безпеки в цілому;
- поліпшення технології перевізного процесу небезпечних вантажів;
- повсюдне впровадження електронного документообігу та його постійне вдосконалення;
- підвищення кваліфікації працівників залізничної галузі;
- проведення роз'яснювальної та просвітницької роботи з населенням про дії при виникненні надзвичайних ситуацій.

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

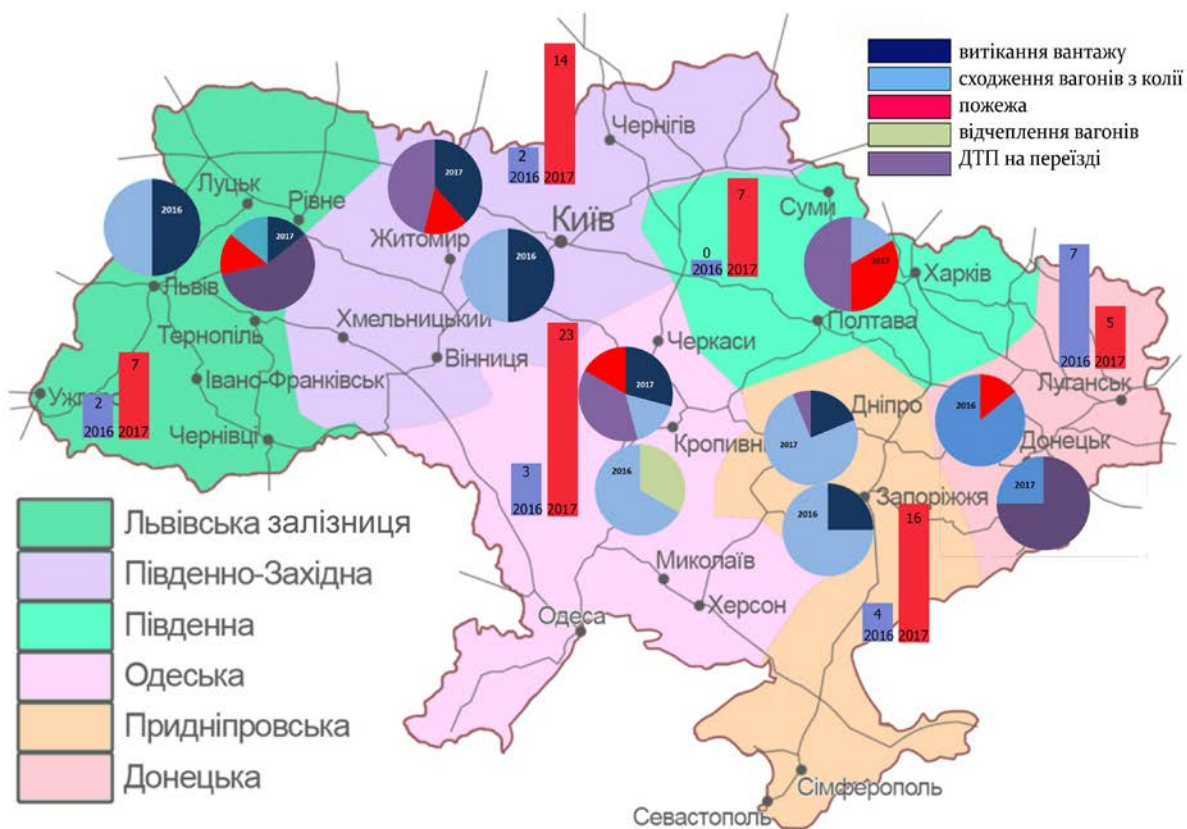


Рис. 5. Аналіз надзвичайних подій на Укрзалізниці протягом 2016 та 2017 років (стовпчастою діаграмою відмічена кількість подій під час перевезення небезпечних вантажів, круговою – події за видами інцидентів, %)

Fig. 5. Analysis of emergency events at Ukrzaliznytsia during 2016 and 2017 (stacked chart shows the number of events in the transportation of dangerous goods, circular – events by type of incidents, %)

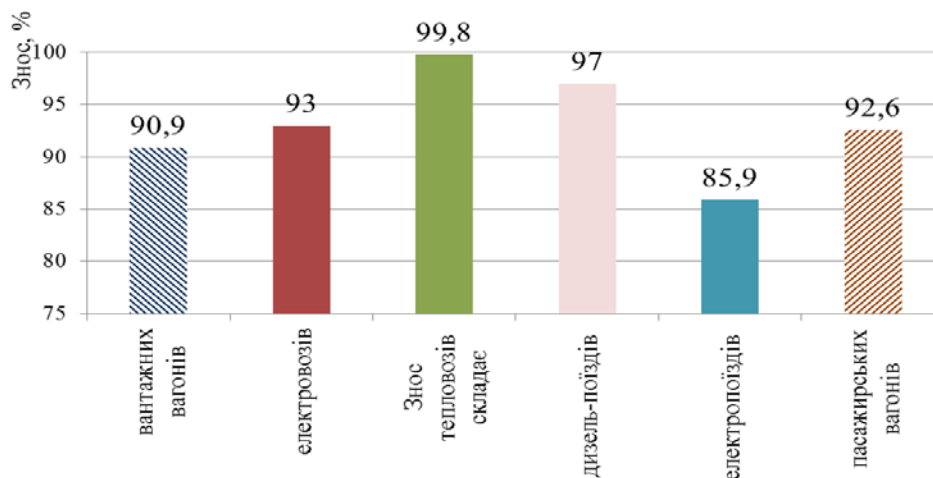


Рис. 6. Знос наявного парку (складено за даними [10])

Fig. 6. Depreciation of the existing park (compiled according to [10])

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Варто зазначити, що для значного поліпшення ситуації в транспортній сфері всіх цих заходів необхідно вживати комплексно й централізовано.

Безпеку перевезення небезпечних вантажів залізничним транспортом необхідно системно розвивати у наступних напрямках:

- дослідження факторів, що впливають на безпеку перевезень, тобто на ймовірність виявлення факту виникнення надзвичайних ситуацій (НС);
- підвищення оперативності й правильності прийняття рішень щодо ліквідації наслідків аварійної ситуації;
- розробка безпечної технології ліквідації наслідків аварійних ситуацій;
- впровадження системи моніторингу небезпечних вантажів;
- використання супутникової навігації.

## Висновки

На основі аналізу причин надзвичайних транспортних подій під час перевезення небезпечних вантажів можна зробити висновок, що значна частка таких подій відбувається через комерційні несправності й катастрофічний знос основних фондів. Але причинами виникнення надзвичайних подій на залізничному транспорті є також порушення вимог безпеки, які призводять до значної матеріальної шкоди. Тому питання вдосконалення саме технології перевезення небезпечних вантажів на різних ланках процесу транспортування на сьогодні є надзвичайно важливим. Якісне підвищення безпеки перевезень небезпечних вантажів, що обумовлено сучасними вимогами, можливе лише за умови вдосконалення усіх чинників перевізного процесу: організаційно-технічного, технологічного, інформаційного, кадрового та ін.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аналітичний огляд стану техногенної та природної безпеки в Україні за 2016 рік. – Київ : Державна служба надзвичайних ситуацій, 2017. – 228 с.
2. Дорожно-транспортні пригоди, аварії та інциденти на залізничному транспорті [Електронний ресурс] / Державна служба України з безпеки на транспорті. – Режим доступу: <http://dsbt.gov.ua/storinka/dorozhno-transportni-prygody-avariyi-ta-incydynty-na-zaliznychnomu-transporti> – Назва з екрана. – Перевірено : 13.06.2018.
3. Дубовіч, І. А. Сучасні еколого-економічні проблеми транспортування небезпечних вантажів Львівською залізницею / І. А. Дубовіч, М. В. Руда // Наук. вісн. НЛТУ України : зб. наук.-техн. пр. / Нац. лісо-техн. ун-т України. – Львів, 2012. – Вип. 22.9. – С. 66–71.
4. Музикіна, С. І. Аналіз безпеки руху під час перевезення небезпечних вантажів на залізничному транспорті / С. І. Музикіна // Вісн. Акад. митної служби України. Серія: «Технічні науки». – 2014. – № 1 (51). – С. 135–139.
5. Пояснювальна записка до консолідованого проекту фінансового плану ПАТ «Українська залізниця» на 2016 рік [Електронний ресурс] / М-во інфраструктури України. – Режим доступу: <https://mtu.gov.ua/news/26510.html> – Назва з екрана. – Перевірено : 13.06.2018.
6. Правила перевезення небезпечних вантажів [Електронний ресурс] : Наказ М-ва трансп. та зв'язку України від 25.11.2008 р. № 1430 [в ред. від 16.03.2018]. – Режим доступу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/z0180-09> – Назва з екрана. – Перевірено : 13.06.2018.
7. Радкевич, А. В. Дослідження необхідності створення аварійно-рятувальних підрозділів держспецтрансслужби для оперативного реагування на аварійні ситуації при перевезенні небезпечних вантажів залізничним транспортом / А. В. Радкевич, С. О. Яковлев, О. І. Шаптала // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. 26. – С. 134–136.
8. Радкевич, О. Г. Закономірності та використання факторів ефективності системи перевезення небезпечних вантажів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01 / Радкевич Оксана Григорівна ; Держ. екон.-технол. ун-т трансп. – Київ, 2013. – 25 с.
9. Статистичний щорічник України за 2015 рік / за ред. І. М. Жук. – Київ : Державна служба статистики України, 2016. – 575 с.
10. Статистичні дані про Українські залізниці [Електронний ресурс] / М-во інфраструктури України. – Режим доступу: <https://mtu.gov.ua/content/statistichni-dani-pro-ukrainski-zalznici.html> – Назва з екрана. – Перевірено : 13.06.2018.

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

11. Транспортна стратегія України на період до 2020 року [Електронний ресурс] : розпорядж. Каб. Міністрів України від 20.10.2010 р. № 2174-р. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2174-2010-%D1%80> – Назва з екрана. – Перевірено : 13.06.2018.
12. Borghetti, F. Road accessibility model to the rail network in emergency conditions / F. Borghetti, G. Malavasi // *Journal of Rail Transport Planning & Management*. – 2016. – Vol. 6. – Iss. 3. – P. 237–254. doi: 10.1016/j.jrtpm.2016.10.001
13. Conca, A. A Risk Assessment for Road Transportation of Dangerous Goods: A Routing Solution / A. Conca, C. Ridella, E. Saponi // *Transportation Research Procedia*. – 2016. – Vol. 14. – P. 2890–2899. doi: 10.1016/j.trpro.2016.05.407
14. Šolc, M. The Importance of Dangerous Goods / M. Šolc, M. Hovanec // *Naše more*. – 2015. – Vol. 62. – Iss. SI. – P. 181–186. doi: 10.17818/nm/2015/si17

Ю. В. БУЦ<sup>1</sup>, Е. В. КРАЙНЮК<sup>2</sup>, Д. С. КОЗОДОЙ<sup>3\*</sup>, В. В. БАРБАШИН<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Природоохранные технологии, экология и безопасность жизнедеятельности», Харьковский национальный экономический университет имени Семена Кузнецова, пр. Науки, 9А, Харьков, Украина, 61166, тел. +38 (050) 683 08 99, эл. почта butsyura@ukr.net, ORCID 0000-0003-0450-2617

<sup>2</sup>Каф. «Метрология и безопасность жизнедеятельности», Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, ул. Я. Мудрого, 25, Харьков, Украина, 61000, тел. +38 (050) 404 26 73, эл. почта alenauvarova@ukr.net, ORCID 0000-0001-9524-040X

<sup>3\*</sup>Центр специального обучения работников субъектов перевозки опасных грузов, Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61000, тел. +38 (066) 519 47 31, эл. почта dmitry\_1980@ukr.net, ORCID 0000-0003-3615-1815

<sup>4</sup>Каф. «Охрана труда и безопасность жизнедеятельности», Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, ул. Маршала Бажанова, 17, Харьков, Украина, 61002, тел. +38 (099) 786 73 15, эл. почта barbachyn@ukr.net, ORCID 0000-0003-3262-8305

## ОЦЕНКА ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СОБЫТИЙ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ ОПАСНЫХ ГРУЗОВ В КОНТЕКСТЕ ТЕХНОГЕННОЙ НАГРУЗКИ РЕГИОНОВ

**Цель.** Основной целью статьи является анализ современного состояния безопасности движения на железнодорожном транспорте при перевозке опасных грузов, а также оценка чрезвычайных событий и уровня безопасности на основе статистического анализа. **Методика.** Поставленная цель достигается с помощью теоретического обобщения и анализа современных знаний и представлений о прогнозировании аварий с опасными грузами. Для анализа современного состояния перевозки опасных грузов железнодорожным транспортом использованы геоинформационные системы. **Результаты.** Проанализированы виды инцидентов, произошедших на железной дороге в последние годы. Выявлены главные причины возникновения аварийных ситуаций: техническая неисправность вагонов, чрезвычайно высокий износ основных фондов, недостатки организационной работы при перевозке грузов, нарушение правил безопасности грузовых работ, вмешательство посторонних лиц во время перевозки и тому подобное. Одной из главных причин опасных событий является чрезвычайно высокий износ основных фондов. Разработана карта потенциальных опасностей и аварийных ситуаций при перевозке опасных грузов с использованием геоинформационных технологий. Отмечена необходимость практического решения проблем повышения безопасности железнодорожных перевозок в условиях чрезвычайных ситуаций. Безопасности перевозки опасных грузов можно достичь при следующих условиях: исследование вероятности возникновения чрезвычайных ситуаций; повышение оперативности принятия решений по ликвидации последствий аварий; разработка технологии ликвидации последствий аварийных ситуаций; внедрение системы спутниковой навигации. **Научная новизна.** В работе дано научное обоснование и разработку основ прогнозирования чрезвычайных ситуаций на объектах железнодорожного транспорта. Дана оценка причинам возникновения событий с опасными грузами. Составлена карта Украины по количеству событий и в зависимости от видов инцидентов на Укрзализныце. **Практическая значимость.** Использование предложенного подхода позволит определить качество любой системы принятия решений, особенно при планировании аварийно-спасательных работ, формировании сил и средств для локализации и ликвидации аварийных ситуаций. Практическая ценность работы заключается в получении научно обоснованной и одновременно приемлемой для работников методики оценки состояния

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

стабільності перевозочного процесу на окремих ділянках залізничних доріг, а також в розробці рекомендацій для ділянок з підвищеною аварійністю.

**Ключові слова:** перевезення небезпечних вантажів; залізничний транспорт; надзвичайні події; пожежі; геоінформаційні технології

Y. V. BUTS<sup>1</sup>, E. V. KRAYNYUK<sup>2</sup>, D. S. KOZODOY<sup>3\*</sup>, V. V. BARBASHIN<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Dep. «Environmental Technologies, Ecology and Life Safety», Semen Kuznets Kharkiv National University of Economics, Nauka Av., 9A, Kharkiv, Ukraine, 61166, tel. +38 (050) 683 08 99, e-mail butsyura@ukr.net, ORCID 0000-0003-0450-2617

<sup>2</sup>Dep. «Metrology and Life Safety», Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslav Mudryi St., 25, Kharkiv, Ukraine, 61000, tel. +38 (050) 404 26 73, e-mail alenauvarova@ukr.net, ORCID 0000-0001-9524-040X

<sup>3\*</sup>Center of Dangerous Goods Carriage Entities, Ukrainian State University of Railway Transport, Feierbakh Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61000, tel. +38 (066) 519 47 31, e-mail dmitry\_1980@ukr.net, ORCID 0000-0003-3615-1815

<sup>4</sup>Dep. «Labor Protection and Life Safety», O. M. Beketov National University of Urban Economy, Marshal Bazhanov St., 17, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (099) 786 73 15, e-mail barbachyn@ukr.net, ORCID 0000-0003-3262-8305

## EVALUATION OF EMERGENCY EVENTS AT THE TRANSPORTATION OF DANGEROUS GOODS IN THE CONTEXT OF THE TECHNOGENIC LOAD IN REGIONS

**Purpose.** The paper aimed at analysis of the current state of railway traffic safety at the transportation of dangerous goods, as well as the assessment of emergency events and the level of security based on statistical analysis.

**Methodology.** The objective is achieved through theoretical generalization and analysis of modern knowledge and ideas about the prediction of accidents with dangerous goods. Geo-information systems are used for the analysis of security systems for transportation of dangerous goods by rail. **Findings.** Authors analyzed the types of incidents that occurred on the railway in recent years. The main causes of emergencies are: technical malfunction of cars; extremely high depreciation of fixed assets, deficiency in organizational factors in the transportation of goods, violation of safety rules for cargo operations, interference of unauthorized persons during transportation and the suchlike. One of the main causes of dangerous events is the extremely high depreciation of fixed assets. A map of potential hazards and emergencies has been developed for the transportation of dangerous goods using geo-information technologies. The results of the research are aimed at practical solutions to the problems of improving the safety and stability of rail transport in emergency situations. The transportation safety of dangerous goods should be developed by: investigating the likelihood of emergency threat; increase the efficiency of decision-making for the elimination of the consequences of accidents; development of technology for liquidation of consequences of emergency situations; implementation of the satellite navigation system. **Originality.** The paper presents the scientific substantiation and development of the basis for forecasting emergencies at railway transport facilities. The reasons of occurrence of events with dangerous cargoes are estimated. The map of Ukraine is drawn up according to the number of events and depending on the types of incidents on the railway. **Practical value.** The use of the proposed approach will allow determining the quality of any decision-making system, especially when planning rescue operations, planning forces and facilities for the localization and elimination of emergency situations. The practical value of the work consists in obtaining a scientifically based and at the same time acceptable methodology for practical workers in assessing the stability of the transportation process on individual sections of the railways, as well as developing recommendations for road sections with increased accidents.

**Keywords:** transportation of dangerous goods; railway transport; emergency incidents; fire; geo-information technologies

### REFERENCES

1. *Analitichnyi ohliad stanu tekhnohennoi ta pryrodnoi bezpeky v Ukraini za 2016 rik.* (2017). Kyiv: Derzhavna sluzhba nadzvychainykh sytuatsii. (in Ukrainian)
2. *Dorozhno-transportni pryhody, avarii ta intsydenty na zaliznychnomu transporti.* (n.d.). In *Derzhavna sluzhba Ukrainy z bezpeky na transporti*. Retrieved from <http://dsbt.gov.ua/storinka/dorozhno-transportni-prygodny-avariyi-ta-incydenty-na-zaliznychnomu-transporti> (in Ukrainian)
3. Dubovych, I. A., & Ruda, M. V. (2012). Current ecological and economic problems of dangerous goods transportation by Lviv railway. *Scientific Bulletin of NFU of Ukraine*, 22(9), 66-71. (in Ukrainian)

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

4. Muzykina, S. I. (2014). Analiz bezpeky rukhu pid chas perevezennia nebezpechnykh vantazhiv na zaliznychnomu trans-porti. *Visnyk Akademii mytnoi sluzhby Ukrainy*, 51, 135-139. (in Ukrainian)
5. Poiasniuvalna zapyska do konsolidovanoho proektu finansovoho planu PAT «Ukrainska zaliznytsia» na 2016 rik. (2016). In *Ministerstvo infrastruktury Ukrainy*. Retrieved from <https://mtu.gov.ua/news/26510.html> (in Ukrainian)
6. Nakaz Misterstva transportu ta zviazku Ukrainy 2008, № 1430. Retrieved from <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/z0180-09> (in Ukrainian)
7. Radkevich, A. V., Yakovlev, S. O., & Shaptala, O. I. (2009). Doslidzhennia neobkhdnosti stvorennia avariino-riatuvalnykh pidrozdiliv derzhspetstrans-sluzhby dlia operatyvnogo reahuvannia na avariini sytuatsii pry perevezenni nebezpechnykh vantazhiv zaliz-nychnym transportom. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana*, 26, 134-136. (in Ukrainian)
8. Rodkevych, O. H. (2013). *Zakonomirnosti ta vykorystannia faktoriv efektyvnosti systemy perevezennia nebezpech-nykh vantazhiv*. (Avtoreferat dysertatsii kandydata ekonomichnykh nauk). State economic and technological university of transport, Kyiv. (in Ukrainian)
9. Zhuk, I. M. (Ed). (2016). *Statistical Yearbook. State Statistics Service of Ukraine*. Kyiv: Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy. (in Ukrainian)
10. Statystychni dani pro Ukrainski zaliznytsi. (n.d.). In *Ministerstvo infrastruktury Ukrainy*. Retrieved from <https://mtu.gov.ua/content/statystichni-dani-pro-ukrainski-zaliznici.html> (in Ukrainian)
11. Transportna stratehiia Ukrainy na period do 2020 roku. Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy 2010, № 2174-p. Retrieved from <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2174-2010-%D1%80> (in Ukrainian)
12. Borghetti, F., & Malavasib, G. (2016). Road accessibility model to the rail network in emergency conditions. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 6(3), 237-254. doi: 10.1016/j.jrtpm.2016.10.001 (in English)
13. Conca, A., Ridella, C., & Saponi, E. (2016). A Risk Assessment for Road Transportation of Dangerous Goods. *Routing Solution Transportation Research Procedia*, 14, 2890-2899. doi: 10.1016/j.trpro.2016.05.407 (in English)
14. Šolc, M., & Hovanec, M. (2015). The Importance of Dangerous Goods. *Naše more*, 62(SI), 181-186. doi: 10.17818/nm/2015/si17 (in English)

*Стаття рекомендована до публікації д.т.н., с.н.с. Ю. В. Зеленько (Україна)*

Надійшла до редколегії: 22.02.2018

Прийнята до друку: 30.05.2018

## УДК 628.1.

Л. Ф. ДОЛИНА<sup>1\*</sup>, О. П. САВИНА<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0001-6082-7091

<sup>2\*</sup>Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта savina.o.p@gmail.com, ORCID 0000-0001-7872-6416

## ОЧИСТКА ВОД ОТ ОСТАТКОВ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ПРЕПАРАТОВ

**Цель.** Основная цель статьи – проанализировать наличие в воде Украины и мира остаточных количеств лекарственных препаратов, а также на основании мирового и собственного опыта предложить методы очистки вод от лекарств. **Методика.** Исследования выполнены на основании анализа научных источников и отчетных данных о наличии лекарств в воде Украины, европейских стран, США (1999–2017 гг.). **Результаты.** Проанализированные источники свидетельствуют, что основной экологической угрозой мирового масштаба является наличие лекарств в питьевой воде. Очистные сооружения не приспособлены для обнаружения и разложения лекарственных средств. Во всем мире не предусмотрена борьба с данными веществами. Авторы представляют результаты комплексного рассмотрения вопросов, связанных с определением наличия лекарств в различных водах, их концентраций и наиболее опасных лекарственных препаратов-токсикантов. Медикаменты могут накапливаться не только в организме людей и животных, но и в морской и речной рыбе и т. под. Воздействие даже следовых количеств некоторых лекарств (наркотики, гормональные средства) может оказывать негативное влияние на здоровье более уязвимых слоев населения, особенно детей. Установлено, что главным виновником гормонального загрязнения воды является сельское хозяйство, а именно животноводство. **Научная новизна.** В работе обобщены имеющиеся и представлены новые методы и технологии очистки воды, такие как: электрохимический, мембранный, адсорбция на основе активированного угля, ультразвуковая обработка в присутствии катализаторов, обработка вод ферментами и персульфатами. Как второй путь снижения количества лекарств в воде предложено создание экологически чистых лекарств. **Практическая значимость.** Водные проблемы являются главными во всем мире и в Украине в том числе. Нужно предусмотреть дополнительное финансирование для решения проблемы очистки воды от лекарственных препаратов не по остаточному принципу, а по основному финансированию, учитывая то, что вода – это основа жизни на земле, и от качества воды зависит здоровье и жизнь человечества.

**Ключевые слова:** загрязнение вод лекарственными препаратами; основные лекарства-загрязнители; методы очистки вод от лекарств

## Введение

*Лекарственные средства* – это средства, которые состоят из фармакологически активных веществ и служат для профилактики, диагностики и лечения заболеваний. Лекарственные препараты, имея фармакологическую активность, обладают свойствами изменять функциональное состояние организма [15]. Как правило, прежде чем внести лекарственные препараты в медицинскую практику, их побочные эффекты на здоровье человека и животных тщательно изучаются. Тем не менее потенциальные экологические исследования фармацевтического производства и использования ле-

карственных средств лишь недавно стали темой научных интересов [19].

*Метаболиты* лекарственных препаратов – это полярные водорастворимые вещества, которые образуются вследствие физико- и биохимических процессов. В большинстве случаев они являются первоначальными соединениями. Как правило, метаболиты лекарственных препаратов (в дальнейшем будем называть лекарства) не являются токсичными по сравнению с их первоначальными соединениями. Тем не менее некоторые метаболиты могут оказаться более активными, чем исходные лекарства, введенные в организм [3].

Впервые загрязнения окружающей среды фармацевтическими препаратами были обна-

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

ружены в 1970-е гг. Лекарства были найдены в сточных водах очистительного сооружения «Big Blue River» в Канзасе (США) в 1976 г. [18, 21]. Лекарства с истекшим сроком хранения или препараты, использованные не полностью, могут быть обнаружены на свалках, поскольку утилизируют их вместе с химическими отходами. Но в большинстве случаев выводимые из организма с мочой и фекалиями человека лекарства попадают в сточные воды, а затем на очистные сооружения. Данные медикаменты сами по себе являются биологически активными элементами в организме человека. Лекарства могут быть устойчивыми во внешней среде, и они не всегда адсорбируются или разрушаются полностью в организме [18, 21]. В настоящее время нет очистных сооружений, которые могут удалять метаболиты лекарств или других нерегулируемых загрязнителей, таких как средства личной гигиены. Химические реакции метаболитов в водной экосистеме до сих пор полностью не изучены. Нужно учитывать, что лекарства первоначально разрабатывают с высокой биологической активностью, и, как правило, они имеют высокую устойчивость в окружающей среде. Поскольку во многих случаях они не поддаются биологическому разложению, даже низкая концентрация лекарств и их метаболитов может накапливаться в организме людей, животных и рыб [17].

Во всех странах на сегодняшний день идет интенсивное развитие фармацевтической продукции, и это увеличивает риск производства большого количества фальсифицированной, некачественной, просроченной продукции. Более того, могут возникать риски по несоблюдению или нарушению условий хранения, несоответствию оборудования большинства медицинских предприятий современным требованиям экологической безопасности. В отличие от других токсичных загрязнителей окружающей среды, таких как тяжелые металлы, пестициды и др., лекарства специализированы для индивидуального применения, и их попадание в окружающую среду не имеет географических, климатических и других ограничений. Существует большое количество путей, которыми лекарства поступают в поверхностные воды. Основными из них являются: сточные воды фарма-

цевтических заводов, городские очистные сооружения, больницы и свалки.

На сегодняшний день лучше всего изучен процесс поступления лекарств в окружающую среду через муниципальные очистные сооружения. Впервые специалисты Touro University (США) [15] установили, что не только туалет, но и ванна, и стиральная машинка служат источником загрязнения озер, рек и океанов за счет смывания в канализацию остаточных веществ лекарственных кремов, лосьонов, мазей и гелей. Так называемые активные фармацевтические ингредиенты попадают в водостоки и потенциально загрязняют воду и почву. К таким веществам относятся стероиды (например, кортизон и тестостерон), средства от акне и другие препараты. Также отмечено, что, в отличие от внутреннего применения, наружные лекарственные средства, смываемые с водой, содержат неметаболизируемые лекарства в своей полной форме [12].

Фармоиндустрия по обороту находится в первых рядах бизнеса [2], оборот мирового фармацевтического рынка составляет 850 900 млрд долларов в год, и с каждым годом вырастает на 3 %. [21]. Общее количество лекарственных средств и их комбинаций в мире уже превышает 200 тыс. [10]. За один год человечество принимает миллионы тонн различных лекарств. Большое количество лекарств население не использует, и оно попадает в мусорные контейнеры. Идет накопление лекарств, и это представляет угрозу. Нужно начинать думать о жизненном цикле лекарств так, как мы думаем о жизненном цикле машин или одежды.

Медицинские отходы значительно отличаются от остальных и требуют к себе особого внимания из-за постоянного наличия в их составе возбудителей различных инфекционных заболеваний, токсических, а нередко и радиоактивных веществ, что создает опасность для человека.

Неправильная утилизация лекарств приводит к появлению неуязвимых вирусов-мутантов [1]. Микрочастицы даже самых новых антибиотиков или противовирусных препаратов через некоторое время можно обнаружить в почве, воде и даже продуктах питания. Оттуда микродозы лекарств неизбежно попадают в наш организм и «тренируют» бактерии и вирусы. Пе-

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

чальный итог – появление неуязвимой супер-бактерии или вируса-мутанта, обладающих абсолютной устойчивостью к самым различным антибиотикам и противовирусным препаратам. В Бостонском центре адаптационной генетики установили, что концентрация антибиотиков в грунтовых водах в тысячи раз превышает тот минимальный уровень, с которого у бактерий начинает развиваться устойчивость к лекарствам. Сотрудники лаборатории немецкого города Висбадена [22] проверили грунтовые воды Германии на наличие 60 наиболее распространенных в Европе лекарств. Итог исследований ужасает – в каждой (!) пробе воды содержалось более 30 (!) из проверяемых лекарств в опасных для здоровья концентрациях. Среди них снотворные, сердечно-сосудистые, противозачаточные, противоэпилептические препараты. А когда химические вещества потребляются вместе, происходит усиленный эффект, который известен как синергизм. Помимо этого, исследователи не знают, какое влияние на организм оказывают комбинации фармацевтических препаратов.

Для анализа сточных или питьевых вод на идентификацию лекарств, присутствующих в очень низких концентрациях, используют дорогостоящие методы, такие как высокоэффективная газожидкостная хроматография и масс-спектрометрия. Стоимость определения некоторых лекарств в воде составляет несколько тысяч долларов. Здесь не обходится без влияния крупных фармацевтических фирм, поскольку скандал вынудил бы их начать целую инвестиционную кампанию по переводу всей индустрии с объемом продаж 150 млрд долларов на новые рельсы, разработке и внедрению экологически безопасных лекарств.

### Цель

Проблемы, связанные с качеством питьевой воды, волнуют миллионы людей в Украине и мире, независимо от регионов, в которых они проживают.

Сегодня идет интенсивное загрязнение Земли медицинскими препаратами. В ходе исследований последних лет было найдено большое количество медицинских и ветеринарных препаратов во многих экосистемах земного шара и даже в таких далеких местностях, как Аркти-

ка. На наш взгляд, если не принимать серьезных мер, то вред от лекарств может превзойти их пользу. Необходимо переходить на производство экологически чистых лекарств (экологически безопасных) и совершенствовать методы и технологию очистки вод.

Учитывая это, целью нашей статьи является анализ наличия в воде Украины и мира остаточного количества лекарственных препаратов, а также на основании мирового и собственного опыта разработка методов очистки вод от лекарств.

### Методика

Для получения полной информации о масштабах загрязнения воды лекарственными препаратами был проведен анализ научных источников и лабораторных отчетов как украинских, так и зарубежных изданий. Таким образом, теоретической базой исследований стали новейшие научные разработки (1999–2017 гг.), в которых отображено, какие именно лекарственные препараты и в каких дозах присутствуют в сточных водах, а также в питьевой воде, поставляемой населению.

### Результаты

Проведенный нами информационный поиск показал, что конец XX – начало XXI века можно смело назвать «временем новых лекарств»: более 90 % всех медикаментов, которые сегодня врачи назначают своим пациентам, появились в последние 30 лет. Современные фармакологические справочники содержат до 10 тыс. наименований медицинских препаратов. Уже не только в быту, но и в медицине широко применяются искусственно созданные вещества, не имеющие аналогов в природе. К концу XX века мировая фармацевтическая промышленность производила более 200 тыс. лекарств. Статистические данные свидетельствуют, что современное человечество за один год принимает миллионы тонн различных лекарств. В США, например, население принимает только аспирин 20–30 т в день, то есть более 10 млн кг в год. [20]. В ряде штатов США в водопроводной воде обнаружен след десятков лекарств, что приводит к появлению неизвестных болезней. Около трети лекарств, продавае-

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

мых населению в Вашингтоне, каждый год остаются неиспользованными, что составляет около 33 млн контейнеров. Лекарства, выброшенные в мусорный контейнер, являются химически активными. Они могут попасть в окружающую среду, также могут быть найдены детьми или домашними животными. Никто ранее не обращал особого внимания на тот факт, что принятые нами антибиотики, гормоны и другие активные лекарственные компоненты (АЛК), покинув наш организм с мочой и фекалиями, в дальнейшем попадают на станции очистки вод, оборудование которых не способно разложить эти стойкие соединения на безопасные составляющие.

Число смертельных случаев от побочных эффектов лекарств в США достигло 125 тыс. в год, причем эта причина смерти вышла на 4-е место после заболеваний сердца, онкологии и инсультов [4]. Более половины употребленных лекарств покидают организм в биологически активной форме. В 2008 году была обнародована по-настоящему шокирующая информация: в малых дозах те или иные лекарства (среди них антибиотики, аспирин, антидепрессанты и средства для снижения давления) содержатся в водопроводной воде практически во всех населенных пунктах США (<http://e-news.com.ua/print/366317.html>). И хотя содержание лекарств оказалось минимальным, ни один врач не может точно сказать, как повлияет на организм человека употребление такой воды в течение многих лет. Наркотики были обнаружены в питьевой воде 24 городов штатов от Южной Калифорнии до Северного Нью-Джерси. В США и Канаде вода вблизи всех крупных городов сильно загрязнена лекарствами.

В Берлине в водопроводной воде ученые обнаружили ортокислоту, которая используется при производстве лекарств, снижающих уровень холестерина. На очистных сооружениях Гётеборга (Швеция) обнаружено 14 препаратов в концентрациях, которые варьировали от наногаммов до миллиграммов на литр [10]. Широко применяемое противовоспалительное и болеутоляющее средство ибупрофен было обнаружено в наибольшей концентрации – 7 мг/дм<sup>3</sup>. Более 180 из 3 000 разрешенных активных веществ уже обнаружены в водах Германии [10], в том числе антибиотики, психотроп-

ные и противозачаточные средства, женские половые гормоны. Поверхностные воды Германии содержат около 2 мг/л женского полового гормона эстрогена.

В Великобритании в питьевой воде обнаружен бензоилэкгонин – вещество, находящееся в моче после употребления кокаина. Помимо бензоилэкгонины в воде также было обнаружено значительное количество кофеина, ибупрофена и противоэпилептического лекарства карбамазепина [18].

Фармацевтические заводы Индии хоронят большое количество опасных химических отходов. Шведские исследователи обнаружили в 2007 году в Хайдарабаде (Индия) очень высокие концентрации антибиотиков и других лекарств в очищенных сточных водах фармацевтических предприятий [16].

В израильской воде в прибрежном районе Беэр-Тувии обнаружены гормоны и антибиотики. Гормоны попали в воду из коровьих экскрементов. Эти животные получают гормональные препараты для улучшения качества молока.

Подземные питьевые источники в курортах Альп отравлены тридцатью видами наиболее распространенных лекарств [10].

В рамках проекта BASE проводится мониторинг рек Петербурга и Ленобласти на содержание в них лекарств и пластика. Пока экологов интересует наличие в воде двух препаратов – диклофенака и эстрадиола [17, 25]. Результаты настораживают: очистные сооружения практически не задерживают лекарства. Значительное содержание лекарств обнаружено в Ладожском озере.

В табл. 1 представлены некоторые обнаруженные в воде лекарственные вещества и их фармакологическое действие [6]. Лекарства действуют на фоне других ксенобиотиков (от греч. «чуждый» и «жизнь»), которые в свою очередь могут оказывать негативное воздействие на человека и гидробиоту, а также быть синергистами лекарств и их метаболитов.

Сейчас реализуется проект «Medical Waste» – «Экологическая утилизация опасных медицинских отходов в трансграничном регионе (Эстония–Латвия–Россия) [14].

Как видим из краткого обзора, лекарства в воде и почве присутствуют во всех странах Азии, Европы и Америки.

Таблица 1

## Концентрация лекарственных веществ в водоемах России

Table 1

## Concentration of medicines in the reservoirs of Russia

Лекарственное вещество	Фармакологическое действие	Концентрация, мг/дм <sup>3</sup>	Место обнаружения
N-бутил-бензолсульфамид	Противогрибковое, противоопухолевое (лечение рака простаты)	0,026	Река Москва
1,3,7-триметилксантин (кофеин)	Психостимулирующее, analeptическое	0,026 0,027*	Река Москва Иваньковское водохранилище
13-докозенамид	Ранозаживляющее	0,006 0,024 0,012	Река Москва Иваньковское водохранилище Истринское водохранилище
12-метатетрадекановая кислота	Противоопухолевое	0,038	Иваньковское водохранилище
Бутан-1,2,3,4-тетраол (эритиол)	Лечение острых неврологических расстройств, нейропротектор	0,0022 0,002	Иваньковское водохранилище Истринское водохранилище
Бета-ситостерол	Противовоспалительное, противовирусное, лечение расстройств простаты	0,005 0,234*	Угинское водохранилище Иваньковское водохранилище

Примечание \*. В случае пробы донных отложений, концентрация в мкг/г

*Загрязнение вод и почв лекарствами в Украине.* Выступая на FM-радио «Эра» 7 декабря 2017 года (18–00), исполняющая обязанности Министра охраны здоровья сказала, что в Украине используется 16 тыс. лекарств, из которых 76 % производится в Украине. Правительство Украины совместно с Государственным экспортным центром Министерства охраны здоровья работает над созданием прозрачного единого номенклатурного реестра всех лекарственных препаратов.

Исследование, проведенное Институтом химии воды НАН Украины ([http://www.vetom.com.ua/news/url/antibiotiki\\_v\\_vode](http://www.vetom.com.ua/news/url/antibiotiki_v_vode)) (2011 г.), показало, что питьевая вода, поставляемая украинцам, содержит множество фармацевтических препаратов, включая антибиотики, половые гормоны, успокоительные и

антидепрессанты, обезболивающие, а также многие другие, отпускаемые по рецепту врача. Концентрация этих лекарств в питьевой воде ничтожно мала, однако ученых беспокоят возможные последствия длительного употребления пусть и незначительных доз лекарств. Почти 70 % потребляемых лекарств выводится естественным путем и попадает в канализацию. Сточные воды, пройдя необходимую очистку, вновь попадают в реки, озера и почвы. Очистные сооружения в Украине не способны удалить из воды лекарства, а обеззараживание воды хлором усиливает токсичность некоторых содержащихся в ней лекарств. Ученые полагают, что по прошествии десятков лет негативный эффект от загрязненной таким образом воды проявится в полной мере.

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Биолог А. Шпаков [15] утверждает, что лекарства, тоннами поглощаемые в больших городах, попадают вместе со стоками в водные системы, накапливаются там и создают значительную опасность для здоровья. Длительное время было принято считать, что после использования лекарства полностью разрушаются. Теперь установлено, что более половины употребленных лекарств покидают организм в биологически активной форме, т. е. практически не теряют своих свойств. Они в большом количестве попадают в сточные воды, а оттуда в источники питьевой воды.

Авторы этой статьи обнаружили в водах реки Днепр и водопроводной воде множество лекарств [1, 2]. Наши очистные сооружения не приспособлены для определения и разложения лекарственных средств, отсутствуют нормативно-правовые документы, регламентирующие сброс в водные объекты органических микрозагрязнителей (ОМЗ). До настоящего времени в Украине проблема загрязнения природных вод ОМЗ не рассматривалась ни на официальном, ни на академическом уровнях.

Полученные данные мониторинга качества воды в различных странах мира показали, что она загрязнена лекарствами в той или иной степени, но особенно вода загрязнена вблизи всех крупных городов. Ситуация настолько плоха, что химические стоки фармацевтики ставят под угрозу будущее жизни на нашей планете. Следы лекарств приводят к появлению неизвестных болезней. Всемирная организация здравоохранения установила, что наше здоровье зависит: на 50 % – от образа жизни, 20 % – от наследственности, 23 % – от экологической обстановки и только 7 % – от здравоохранения, т. е. от медицины [4].

Ученые всех стран обнаружили в реках, озерах и глубоких водоносных пластах различные группы лекарств:

- антибиотики;
- противовоспалительные;
- стероидные гормоны;
- противозачаточные средства;
- сердечно-сосудистые;
- противоэпилептические;
- для снижения веса и борьбы с ожирением;
- высокотоксичные противоопухолевые препараты;

- продукты косметики и парфюмерии;
- антидепрессанты, психотропные, снотворные;
- контрастные вещества, используемые при рентгенодиагностике;
- противогрибковые средства.

В журнале «Токсикология и химия окружающей среды» микробиолог Андрес Хартман из Швейцарского федерального института технологии (Цюрих) сообщает, что многие антибиотики «на выходе» из организма почти не изменяются и, сохраняя свою убийственную силу, попадают в водоемы, из которых мы затем пьем воду, оказываются в мясе домашнего скота, в овощах и фруктах [15]. Постоянно сосуществуя в природе с микробами, антибиотики делают их невосприимчивыми к лекарствам, и потому совершенно неуязвимы для них. Авторы этой статьи предполагают, что антибиотики, попадая на сооружения биологической очистки (аэротенки, биофильтры и биореакторы), влияют на работу активного ила и биопленку, понижая их эффективность. Ученые разных стран мира предупреждают, что регулярно попадающие в воду лекарства меняют экологию водоемов, обуславливая у их обитателей глубокие изменения на генетическом уровне [13]. Следовательно, необходимо ускорить разработку и внедрение экологически безопасных лекарств и методов доочистки сточных вод от лекарств. Экологически чистые лекарства – это препараты, которые после оказания человеку необходимой помощи будут быстро разрушаться, превращаясь в биологически неактивные «осколки» еще до того момента, как покинут организм. В крайнем случае это должно происходить в очень короткие сроки после их попадания в природную среду.

Еще лет десять назад при лечении различных инфекционных заболеваний можно было использовать 15–20 антибиотиков. Сейчас реально эффективны 5–6, а по прогнозам ВОЗ, еще через лет 10–20 практически все существующие микроорганизмы приобретут устойчивость к антибиотикам. Современные бактерии начинают игнорировать лекарства уже через 2–3 года после их появления [2].

В Бостонском центре адаптационной генетики установили, что концентрация антибиотиков в грунтовых водах в тысячи раз превышает тот минимальный уровень, с которого у бакте-

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

рий начинает развиваться устойчивость к лекарствам [10].

В июне 2002 г. [10] Министерство окружающей среды (Берлин) обнаружило, что поверхностные воды Германии содержат около 2 мг/л женского полового гормона эстрогена. Этот гормон является основным компонентом противозачаточных таблеток. Они усваиваются организмом женщины только на 10–15 %, остальное попадает в канализацию. 2 мг/л женских гормонов в питьевой воде... Много это или мало? 0,5 мг/л этого вещества в воде через 6 месяцев вызывает у рыб мужского пола перерождение в женский и падение размножения на 90 %.

Исследователи Рурского университета Бохума установили прямую зависимость между эстрогенами в питьевой воде и тенденцией к понижению количества сперматозоидов у мужчин, снижению сексуального влечения, а также повышению заболеваний рака половых органов [10].

Установлено, что коммерческая бутилированная вода в Испании содержат более 50 фармакологически активных веществ, а также вызывающий привыкание никотин. Содержание никотина в воде варьировалось от 7 до 15 нг/л [9].

Национальным институтом общественного здоровья Чешской Республики были собраны образцы из 92 источников питьевой воды для исследований, в ходе которых было обнаружено высокое содержание ибупрофена, карбамазепина, напроксена и диклофенака. Концентрация варьировалась от 0,5 до 20,7 нг/л [11].

Исследователи из Нидерландов обнаружили в источниках воды 12 лекарств и 7 продуктов преобразования (метаболиты). Шведские исследователи между 2007 и 2009 годами протестировали четыре водоема в Монреале (Канада). Они обнаружили, наряду с гербицидами, значительное содержание кофеина и ряда лекарств: карбамазепин, напроксен, гемфиброзил, триметоприм, а также эстрон и эстрадиол [21].

Результаты проверок качества питьевой воды удивили даже опытных британских инспекторов – в жидкости были обнаружены следы кокаина, точнее бензоилэкгонины – вещества, находящегося в моче после употребления кокаина [14]. Кроме того, были обнаружены значи-

тельные количества кофеина, болеутоляющего ибупрофена и противоэпилептического лекарства – карбамазепина. Воздействие даже следовых количеств наркотических средств в воде может оказать негативное влияние на здоровье более уязвимых слоев населения, таких как дети. Единственный способ решить проблему заключается в инвестировании в лучшую очистку сточных вод от фармацевтических средств.

Вода в пластиковых бутылках опаснее водопроводной [6]. К такому выводу пришли, когда обнаружили в воде бисфенол А, который похож на женский гормон эстроген. У людей, которые употребляют воду и другие напитки из пластиковых бутылок, наличие гормонов приводит к развитию сердечно-сосудистых заболеваний и диабета, и даже к поражению печени.

Лекарства в системе водоснабжения могут являться причиной развития аутизма у генетически уязвимых людей. К такому выводу пришли эксперты из Университета штата Айдахо в Бойсе (США) [24]. Исследование показало, что достаточно даже очень низких уровней лекарств – антидепрессантов в воде, чтобы вызвать это расстройство. Психотропные лекарства широко используются в современной медицине. Не исключено, что при попадании в систему водоснабжения они становятся причиной нарушений в психическом развитии людей.

Согласно исследованиям Гетеборгского университета в Швеции, клотримазол (лекарство, которое применяется для лечения грибковых инфекций) загрязняет экосистему океана [21]. Для эксперимента были использованы сообщества естественных микроводорослей – перифитон. Их подвергали различным концентрациям клотримазола в течение 4 дней. В результате исследования было обнаружено, что клотримазол нарушает метаболизм водорослей, которые находятся в нижней части пищевой цепи океана. Дело в том, что одноклеточные микроводоросли являются фундаментальной основой пищи и попадание в них клотримазола может повлиять на всю экосистему океана.

Диклофенак – биологически активное вещество, входящее в состав ряда широко распространенных противовоспалительных и болеутоляющих средств [14]. Установлено, что диклофенак токсичен для рыб, он нарушает работу их почек. Этот же эффект наблюдается и у лю-

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

дей как одно из побочных действий при длительном приеме препарата. Специалисты предлагают полностью запретить его из-за увеличения (примерно на 40 %) риска инфарктов и других сердечно-сосудистых заболеваний.

### Научная новизна и практическая значимость

Лекарства в питьевой воде – это, по словам современного эколога Томаса Терне (2016 г.), страшная угроза мирового масштаба [3]. Для решения этой проблемы есть два пути: первый – это создание экологически чистых лекарств; второй – совершенствование действующих и создание новых эффективных методов и технологий для очистки вод от лекарств.

Методы очистки вод делятся на механические, химические, физико-химические, биологические и комбинированные. Применение того или иного метода в каждом конкретном случае определяется характером загрязнения, степенью вредности примесей, эффективностью очистки и другими показателями. Механическая очистка – это грубая очистка, которая заключается главным образом в очистке вод от взвешенных веществ, нерастворяющихся в воде. Многие лекарства – это растворимые в воде химические препараты, и для них применимы химические, физико-химические, некоторые биологические и комбинированные методы (рис. 1).

Химическую очистку применяют в тех случаях, когда выделение загрязнений, в том числе лекарств, возможно только в результате химической реакции между примесью (лекарством) и реагентом с образованием новых веществ, которые легко удалить из воды. Для такой очистки используют реакции окисления или восстановления, нейтрализации, перевод вредных примесей в безвредные, обезвреживание методом озонирования, хлорирования и др. Этот метод, наряду с физико-химическими и комбинированными, находит наиболее широкое применение в практике очистки вод от лекарственных препаратов.

Остановимся на традиционных биологических методах очистки сточных вод. Они имеют ряд преимуществ перед многими физико-химическими методами, поскольку экологически чище, не требуют сложного аппаратного

применения, имеют низкие эксплуатационные расходы. Наряду с бесспорными достоинствами традиционных методов, у них есть серьезные недостатки. Они непригодны для очистки стоков, с очень высоким химическим потреблением кислорода (ХПК), а также стоков, содержащих токсические или трудноразлагаемые соединения, к которым относятся многие лекарства. Анализ научных источников показал, что только в редких случаях для очистки сточных вод от лекарств были использованы мембранные биореакторы, метан-реакторы и биофильтры, на загрузку которых были иммобилизованы активные ферменты.

**Озонирование.** Окислительно-восстановительный потенциал озона выше, чем у кислорода и хлора, вследствие чего он обладает более высоким окислительным и бактерицидным действием [7]. Следует отметить, что обработка воды озоном или ультрафиолетовыми лучами практически полностью вытеснила хлорирование на станциях очистки воды во многих странах Западной Европы [21]. В Украине применение этих экологически эффективных технологий ограничено из-за высокой стоимости переоборудования и реконструкции водочистных станций, но это должно быть сделано. В последние годы появились новые процессы на основе новых окислительных технологий [10].

К озонированию относятся как процессы прямого окисления органических соединений или обеззараживания растворенным в воде озоном, так и окислительные процессы, протекающие при участии гидроксильных радикалов, образующихся в результате химических трансформаций солей. Именно последние процессы рассматривают в числе новых окислительных технологий. При этом если стандартный восстановительный потенциал озона равен 2,07 В, то у гидроксильных радикалов этот показатель достигает 2,8 В. Образование гидроксильных радикалов в результате трансформации озона в водной среде увеличивается в присутствии пероксида водорода, катализаторов, активированного угля, при совмещении озонирования с ультрафиолетовым облучением и ультразвуковой обработкой [10].

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

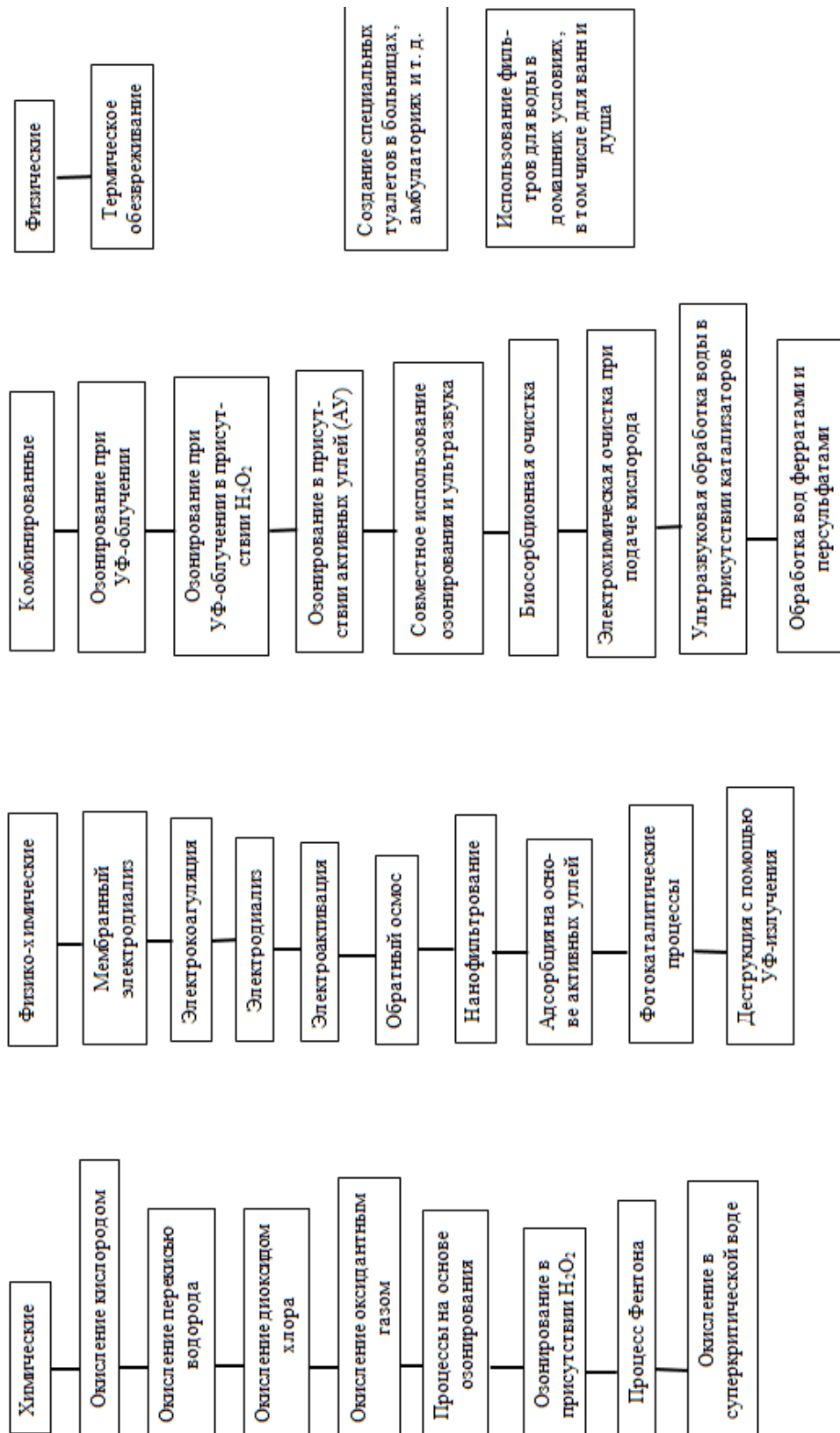


Рис. 1. Методы очистки вод от остатков лекарственных препаратов, разработанные в Днепропетровском национальном университете железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна

Fig. 1. Water cleaning techniques from residues of medical preparations, developed in Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

*Озонирование в присутствии пероксида водорода (процесс «Пероксон»).* Концентрацию озона и  $\text{H}_2\text{O}_2$  подбирают экспериментально в зависимости от типа загрязнений (лекарств) и их исходной концентрации. Процесс «Пероксон» получил достаточное распространение вследствие его простоты, при этом в целом ряде случаев вышел на уровень пилотных испытаний и промышленной реализации. Данный процесс может быть проведен в обычном реакторе для озонирования [8], требуется лишь установка дозатора пероксида водорода. Его применяют при очистке питьевой воды от хлорорганических веществ, алифатических соединений, спиртов, при удалении бактерий, вирусов, цист. Пероксид водорода обычно добавляют после проведения озонирования, причем более эффективным является ступенчатое дозирование.

*Озонирование при ультрафиолетовом облучении.* В данном процессе деградация загрязняющих веществ происходит в результате прямого фотолиза, прямого озонирования и взаимодействия с гидроксильными радикалами. Последние образуются при трансформации озона под воздействием УФ-облучения через промежуточное образование пероксида водорода.

Преимущества процесса [10] по отношению к традиционному озонированию выявлены в многочисленных исследованиях по деградации веществ с гормональной активностью, метилметакрилата, фталатов, фенантрена, нитробензола, фенольных соединений (фенолы, хлорофенолы, нитрофенолы, крезолы, ксиленолы, катехины). Во всех случаях достигается максимальная минерализация загрязняющих веществ, в том числе и лекарств.

*Озонирование при ультрафиолетовом облучении в присутствии пероксида водорода.* Это весьма эффективный метод деградации и минерализации веществ в сточных водах с высокой степенью загрязнения. Проведены исследования применения данного процесса для деградации фенола, бензойной кислоты, нитротолуола, резорцинола, мета-, орто- и паракрезоло, 2,3-, 2,5-, 2,6-диметилфенола, 5-метилрезорцина. Примеров полномасштабной реализации метода немного.

*Озонирование в присутствии катализаторов.* Используются гомогенные катализаторы в виде ионов металлов ( $\text{Mn (II)}$ ,  $\text{Fe (II)}$ ,  $\text{C}_5 \text{ (III)}$ ,  $\text{Ag (I)}$ ,  $\text{Cu (II)}$ ,  $\text{Co (II)}$ ,  $\text{CD (II)}$ ) и гетерогенные

катализаторы в виде различных нерастворимых форм ряда металлов (оксиды и др.). Недостатком процесса является присутствие в водной фазе после обработки ионов тяжелых металлов. Используется в промышленности для удаления хлорированных углеводов из подземных вод и фильтрата полигонов ТБО.

*Озонирование в присутствии активированного угля (процесс «Карбозон»).* Данный процесс является сравнительно новым, но весьма перспективным среди новых окислительных процессов. Результаты достижимы при pH выше 6. При очистке вод от красителей и ароматических сульфониевых соединений были получены хорошие результаты деградации.

*Совместное использование озонирования и ультразвука (процесс «Сонозон»).* Ультразвуковые волны в жидкой среде вызывают явления кавитации и микротурбулентности, способствующие деградации молекул озона и образованию гидроксильных радикалов. В присутствии ультразвука расход озона может сокращаться на 60–70 %. Были получены хорошие результаты при очистке вод от органических веществ, ароматических соединений, текстильных красителей, фенола, очистке сточных вод ликеро-водочных заводов. Однако метод является достаточно затратным, что препятствует его широкому применению.

*Процесс Фентона.* Этот процесс основан на использовании реагента Фентона, т. е. смеси соли  $\text{Fe}^{2+}$  (катализатора) и пероксида водорода (окислителя) [9, 10]. Процесс Фентона ускоряется при воздействии света, что повышает степень минерализации органических веществ и снижает эксплуатационные расходы.

Примеров проведения экспериментов различного масштаба по использованию процесса Фентона в схемах очистки воды чрезвычайно много.

Так, в процессе Фентона при расходе  $\text{Fe (II)}$  20 мг/л и молярном соотношении  $\text{H}_2\text{O}_2 / \text{Fe (II)}$  2,5 достигнута полная деструкция лекарств в сточных водах: ацетаминофена, атенолола, атразина, карбамазепина, метопролола, дилантина, диклофенака, пентоксифиллина, оксибензола, кофеина, флуоксетина, гемфиброзила, ибупрофена, йопромида, напроксена, пропранолола, сульфаметоксазола, бисфенола А и триметоприма. Снижение содержания об-

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

щего органического углерода в этом случае составляет 30 %. Полная деструкция и 95-процентная минерализация гербицида мезотриона достигнута при pH 3,5. Интересные результаты получены при отработке схемы доочистки (после биологической очистки в системе с активным илом) муниципальных сточных вод, сбрасываемых в Женевское озеро (Лозанна, Швейцария). Здесь на очистных сооружениях удалось добиться снижения содержания 32 органических микрозагрязнений (лекарства, ингибиторы коррозии, пестициды) на 97–98 % при использовании фотокаталитической системы Фентона с облучением ультрафиолетом (254 нм) практически в нейтральной среде. Кроме этого, ввиду содержания в сточных водах железа (1,5 мг/л), оказалось возможным исключить использование этого реагента.

При использовании процессов электро-Фентон и фотоэлектро-Фентон достигнута 94–98 % деструкции в воде наркотического препарата ацетаминофена и в сточных водах противомикробного препарата флуимуцила [5].

**Оксидантный газ.** В отличие от используемых в настоящее время в Украине систем, применяющих хлор, в системах ОХІ применяется уникальная технология получения оксидантного газа – оптимальной смеси окислительных газов (хлора, диоксида хлора, перекиси водорода, атомарного кислорода) [14]. Система работает по принципу электролитического разложения раствора поваренной соли (NaCl) с использованием ионоселективной мембранной технологии. Мембрана от Dupont high-tech является ключом к успеху всего процесса получения оксидантного газа. Система ОХІ – электролитическая установка мембранного типа, которая позволяет получать оксидантный газ локально, дозированно направлять его в воду и контролировать процесс обеззараживания и очистки воды автоматически.

Газогенерирующая установка по производству оксидантного газа ОХІ состоит из двух поливинилхлоридных отделений, анодного и катодного, соединенных между собой. Анодное отделение содержит титановый сетчатый электрод, а катодное отделение – сетчатый электрод из нержавеющей стали. Между двумя электродами установлена перфорированная мембрана, которая способна пропускать только позитивно заряженные ионы. Оксидантный газ

подается, по мере необходимости, напрямую в воду (без резервуара) для ее обработки. Он обладает эффективным действием в окислительных процессах при очистке вод.

**Очистка воды кислородом** – эффективный метод удаления вредных для здоровья человека химических соединений, в том числе лекарств. Кислород – самый доступный экологический окислитель. Он подается в напорную водопроводную магистраль при помощи аэрационного эжектора или компрессора для аэрации воды. Очистка воды кислородом может быть двух видов: безнапорная аэрация и напорная аэрация.

**Окисление диоксидом хлора ( $ClO_2$ )** Особенностью этого метода является то, что диоксид хлора отталкивает все электроны и никогда ни с чем не комбинируется. Он разрушается в процессе. Таким образом, это «чистая ликвидация»: и вещество, которое уничтожено, и диоксид хлора не оставляют никаких новых химических соединений после себя.

**Физико-химические и комбинированные методы.** Как указано выше, при озонировании воды использовались другие методы (УФ-облучение, ультразвук, активированный уголь и др.) для повышения эффективности и экономичности процессов. В результате применения комбинированных схем могут быть значительно снижены эксплуатационные расходы при высокой эффективности очистки воды по сравнению с индивидуальными методами. Полагаем, что по мере развития научно-исследовательских испытаний в данной области число промышленных установок, использующих комбинированные методы и схемы очистки сточных вод, будет расти.

**Адсорбция.** Один из наиболее эффективных методов глубокой очистки воды от растворенных веществ и лекарств. Преимуществом метода является возможность поглощения веществ многокомпонентных смесей, а также высокая степень очистки, особенно слабokonцентрированных сточных вод. В качестве сорбентов применяют различные искусственные и природные пористые материалы (активированный уголь, цеолиты, золу, торф и др.). Эффективность адсорбционной очистки достигает 80–95 %.

Исследованы кинетические закономерности адсорбции лекарств стрептоцида ( $C_6H_8N_2O_2S$ ), норсульфазола ( $C_9H_9N_3O_2S_2$ ), прокаина

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

( $C_{13}H_{20}N_2O_2$ ), кофеїна ( $C_8H_{10}N_4O_2$ ), левамизола ( $C_{11}H_{12}N_2S$ ) на активному углі різної пористої структури. В якості сорбентів використовували активний вугіль КАУ (косточковий), F400 (бітуминозний) і активний антрацит (АА). Концентрацію лікарств визначали на спектрофотометрі Shimadzu UV-2450 з точністю до  $0,2 \text{ мг/дм}^3$  по максимуму поглинання в УФ-області при довжині світла:  $258 \text{ нм}$  – для стрептоцида і норсульфазола,  $272 \text{ нм}$  – для кофеїна,  $289$  і  $212 \text{ нм}$  – відповідно для прокаїна і левамизола. Швидкість адсорбції лікарств зменшується в ряду стрептоцид–кофеїн–прокаїн–норсульфазол–левамизол і знижується з збільшенням частки мікропор в структурі сорбентів. Використання  $50 \%$  сорбційної ємності активного вугля досягається за  $10 \%$  часу, необхідного для встановлення адсорбційного рівноваги. Кінетика адсорбції деяких лікарств (ацетамінофену, карбамазепіну, диклофенаку, гемфіброзілу, ібупрофену, кетопрофену, сульфаметоксазолу, триметоприму) була вивчена на гранульованому мезопористому сорбенті SBA-15 (GMS), кофеїна і диклофенаку – на F400. Вивчена можливість застосування перспективного сорбента на основі скорлупи кокосового горіха PICASTITE.

Прокаїн – один з широко використовуваних місцевих анестетиків. При його гідролізі утворюється параамінобензойна кислота (ПАБК) і діетиламіноетанол. Для людського організму велика кількість ПАБК може викликати пошкодження печінки. Тому фактично повне його видалення з води є актуальною задачею [11].

При очищенні води від поверховно-активних речовин (ПАР), хлор- і нітропродуктів фенолів, барвників і фармацевтичних препаратів використовують біосорбційні методи. Немалу роль при цьому грають мікроорганізми, утворюючи біоплівку на поверхні активного вугля (АУ).

*Обробка ферратами і персульфатами.* Феррати є одними з найбільш сильних відомих окислювачів. В кислому середовищі окислювальний потенціал іонів  $FeO_4^{2-}$  ( $2,2 \text{ в}$ ) вище значення цього показника для озону ( $2,07 \text{ в}$ ). Під впливом ферратів здатні деградувати багато токсичних речовин, зокрема лікарств, до нетоксичних продуктів [10].

Феррати є достатньо дорогим реагентом, для їх отримання застосовують багатоступінчастий синтез. При доочищенні стічних вод від лікарств, засобів особистої гігієни були отримані хороші результати: ступінь очищення знаходилася в межах  $67\text{--}88 \%$ , а витрати ферратів склали  $2,5 \text{ мг/дм}^3$  в розрахунок на  $Fe$ . Іншим сильним реагентом з окислювальним потенціалом  $2,1$  є персульфати  $S_2O_8^{2-}$ .

*Електрохімічні процеси (електродіаліз, електрокоагуляція, внутрішній мікроелектроліз і др.).* Характеризуються незначительним впливом на навколишнє середовище, гнучкістю застосування, безпекою, більш високою рентабельністю. В останнє час виконано численні експерименти різного масштабу по очищенні анодним окисленням синтетичних розчинів і стічних вод від лікарств з використанням ДБАА, а також платинових і титанових (з покриттям з оксидів олова, рутенію і іридію) анодів [10]. ДБАА – це допирований бором алмазний анод. Електроди з цього матеріалу, наприклад, мають високу перенапругу виділення кисню і водню в водних електролітах. Дані електроди добре зарекомендували себе в нових областях застосування, таких як електрохімічне обеззараження води, видалення хімічних сполук з гормональною активністю, стійких органічних речовин (фенольних сполук, барвників ПАВ і др.). В Німеччині виконано випробування по очищенні промислових стічних вод з використанням анодів ДБАА.

### Висновки

Як бачимо з аналізу досліджень останніх років, багато екосистем земної кулі забруднені великою кількістю медичних і ветеринарних препаратів.

Випускаються фармацевтичною промисловістю лікарств засвоюються людським і тваринним організмом на  $10\text{--}20 \%$ , а решта йде в відходи. Крім цього, лікарств розробляються з високою біологічною активністю, вони мають високу стійкість в навколишньому середовищі.

Особливо забруднена вода лікарствами поблизу великих міст.

Дослідження показали, що постачана вода в Україні містить велику кількість фармацев-

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

тических препаратов, включая антибиотики, половые гормоны, успокоительные и противосудорожные препараты, обезболивающие, а также многие другие. Концентрация этих лекарств разная, но в целом невелика, однако ученые всерьез беспокоят возможные последствия длительного употребления пусть и незначительных доз лекарств с питьевой водой.

Наибольшая опасность от наличия лекарств в воде состоит в том, что все эти химические вещества потребляются вместе. Исследователи не знают, какое влияние на организм оказывают комбинации фармацевтических препаратов.

Из исследовательских методов очистки воды от лекарств наиболее перспективными являются: химические, некоторые физико-химические и комбинированные. Обработка воды новыми методами озонирования или УФ-лучами практически полностью вытеснила хлорирование на станциях очистки вод во многих странах. В Украине применение этих экологически эффективных технологий ограничено из-за высокой стоимости переоборудования и реконструкции водоочистных станций.

В последние годы появились новые процессы на основе окислительных технологий: процесс «Пероксон», озонирование при УФ-облучении, озонирование при УФ-облучении в присутствии пероксида водорода, процесс «Карбозон», процесс «Сонозон», окисление оксидантным газом, процесс Фентона, окисление в суперкритической воде, фотокаталитические процессы и др. Из физико-химических и комбинированных методов очистки вод от лекарств могут быть рекомендованы следующие:

- электрохимические (мембранный электролиз, электроактивация, электрохимическая очистка при подаче кислорода);
- адсорбция на основе активных углей;
- мембранные (нанопермембранная + обратный осмос и др.);
- ультразвуковая обработка в присутствии катализаторов;
- обработка вод ферментами и персульфатами.

Кроме того, для устранения загрязнения воды фармацевтическими препаратами необходимо переходить на производство экологически безопасных лекарств.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Андрющенко, Е. Лекарства травят питьевую воду [Электронный ресурс] / Е. Андрющенко // Днепр вечерний. – 2017. – 17 июл. – Режим доступа: <http://dv-gazeta.info/vechyorka/zdorovje/lekarstva-travyat-pitevuyu-vodu.html> – Загл. с экрана. – Проверено : 04.06.2018.
2. Бактерии обзавелись иммунитетом [Электронный ресурс] / Санкт-Петербургские Ведомости. – 2014. – 16 окт. – Режим доступа: [https://spbvedomosti.ru/news/obshchestvo/bakterii\\_obzavelis\\_immunitetom/](https://spbvedomosti.ru/news/obshchestvo/bakterii_obzavelis_immunitetom/) – Загл. с экрана. – Проверено : 04.06.2018.
3. Баренбойм, Г. М. Загрязнение природных вод лекарствами / Г. М. Баренбойм, М. А. Чиганова. – Москва : Наука, 2015. – 283 с.
4. Белоусов, Ю. Б. Клиническая фармакология и фармакотерапия / Ю. Б. Белоусов, В. С. Моисеев, В. К. Лепахин. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Универсум Паблишинг, 1997. – 531 с.
5. Биосорбция прокаина на биологически активном угле / Е. А. Корж, Н. А. Клименко, С. К. Смолин, Л. Р. Решетняк // Химия и технология воды. – 2016. – Т. 38, № 5. – С. 519–530.
6. Вода в бутылках опаснее водопроводной [Электронный ресурс] / підг. М. Доржиева. – Режим доступа: <https://www.epochtimes.ru/content/view/69576/7/> – Загл. с экрана. – Проверено : 04.06.2018.
7. Долина, Л. Ф. Новые методы и оборудования для обеззараживания сточных и природных вод : монография / Л. Ф. Долина. – Днепропетровск : Континент, 2003. – 218 с.
8. Долина, Л. Ф. Реакторы для очистки сточных вод : учеб. пособие / Л. Ф. Долина. – Днепропетровск : Стандарт, 2001. – 28 с.
9. Корж, Е. А. Кинетика адсорбции фармацевтических веществ из водных растворов на активных углях / Е. А. Корж, С. К. Смолин, Н. А. Клименко // Химия и технология воды. – 2016. – Т. 38, № 4. – С. 342–353.
10. Кофман, В. Я. Новые окислительные технологии очистки воды и сточных вод : обзор зарубежных изданий. Ч. 2 / В. Я. Кофман // Водоснабжение и санитарная техника. – 2013. – № 11. – С. 70–77.

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

11. Лекарства и лекарственная болезнь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.medn.ru/statyi/lechenie-solyu-skipidarom-kerosinom/lekarstva-i-lekarstvennaya-bolezn.html> – Загл. с экрана. – Проверено : 04.06.2018.
12. Лившиц, В. Лекарства как экологическая проблема [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://proza.ru/2013/02/27/1830> – Загл. с экрана. – Проверено : 19.06.2018.
13. Оценка биологической опасности органических ксенобиотиков в источниках водоснабжения / В. Н. Данилов-Данильян, В. В. Поройков, М. А. Чиганова [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. – 2013. – № 10. – С. 17–24.
14. Фармацевтические средства в питьевой воде [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/emerging/info\\_sheet\\_pharmaceuticals/ru/](http://www.who.int/water_sanitation_health/emerging/info_sheet_pharmaceuticals/ru/) – Загл. с экрана. – Проверено : 04.06.2018.
15. Шпаков, А. Антибиотики и стероиды отравляют сточные воды [Электронный ресурс] : Смерть из канализации / А. Шпаков // Коммерсант. – 1999. – 26 июн. – Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/220792> – Загл. с экрана. – Проверено : 04.06.2018.
16. Al-Khazrajy, O. S. A. Factors affecting the dissipation of pharmaceuticals in freshwater sediments / Omar S. A. Al-Khazrajy, Ed Bergström, Alistair B. A. Boxall // Environmental Toxicology and Chemistry. – 2017. – Vol. 37. – Iss. 3. – P. 829–838. doi: 10.1002/etc.4015
17. Boxall, A. B. A. The environmental side effects of medication / A. B. A. Boxall // EMBO reports. – 2004. – Vol. 5. – Iss. 12. – P. 1110–1116. doi: 10.1038/sj.embor.7400307
18. Domercq, P. Emission and fate modelling framework for engineered nanoparticles in urban aquatic systems at high spatial and temporal resolution / Prado Domercq, Antonia Praetorius, Alistair B. A. Boxall // Environmental Science: Nano. – 2018. – Vol. 5. – Iss. 2. – P. 533–543. doi: 10.1039/c7en00846e
19. Fent, K. Ecotoxicology of human pharmaceuticals / K. Fent, A. Weston, D. Caminada // Aquatic Toxicology. – 2005. – Vol. 76. – Iss. 2. – P. 122–159. doi: 10.1016/j.aquatox.2005.09.009
20. Human Pharmaceuticals: Assessing the impacts on aquatic ecosystems / Edited by R. Williams. – Pensacola : SETAC, 2005. – 392 p.
21. Occurrence and ecotoxicological assessment of pharmaceuticals: Is there a risk for the Mediterranean aquatic environment? / F. Desbiolles, L. Malleret, C. Tiliacos, P. Wong-Wah-Chung, I. Laffont-Schwob // Science of the Total Environment. – 2018. – Vol. 639. – P. 1334–1348. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.351
22. Probe: Pharmaceuticals in Drinking Water [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cbsnews.com/news/probe-pharmaceuticals-in-drinking-water/> – Загл. с экрана. – Проверено : 04.06.2018.
23. Sumpter, J. P. Pharmaceuticals in the Environment: Moving from a Problem to a Solution / J. P. Sumpter // Green and Sustainable Pharmacy / Editors K. Kummerer and M. Hempel. – Berlin : Springer-Verlag, 2010. – P. 11–22.
24. Waters reality in Ukraine worldwide / L. F. Dolina, P. B. Mashykhina, A. A. Karpo, A. A. Mishchenko // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 5 (71). – С. 7–18. doi: 10.15802/stp2017/113695

Л. Ф. ДОЛИНА<sup>1\*</sup>, О. П. САВИНА<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта [water.supply.treatment@gmail.com](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCID 0000-0001-6082-7091

<sup>2\*</sup>Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта [savina.o.p@gmail.com](mailto:savina.o.p@gmail.com), ORCID 0000-0001-7872-6416

## ОЧИЩЕННЯ ВОД ВІД ЗАЛИШКІВ ЛІКАРСЬКИХ ПРЕПАРАТІВ

**Мета.** Основна мета статті – проаналізувати наявність у воді України та світу залишкових кількостей лікарських препаратів, а також на підставі світового та власного досвіду запропонувати методи очищення вод від ліків. **Методика.** Дослідження виконані на підставі аналізу наукових джерел і звітних даних про наявність ліків у воді України, європейських країн, США (1999–2017 рр.). **Результати.** Проаналізовані джерела свідчать, що основною екологічною загрозою світового масштабу є наявність ліків у питній воді. Очисні споруди не пристосовані для виявлення і розкладання лікарських засобів. У всьому світі не передбачена боротьба з цими речовинами. Автори представляють результати комплексного розгляду питань, пов'язаних із

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

визначенням наявності ліків у різних водах, їх концентрацій та найбільш небезпечних лікарських препаратів-токсикантів. Медикаменти можуть накопичуватися не тільки в організмі людей і тварин, а й у морській та річковій рибі й т. под. Наявність навіть слідів деяких ліків (наркотики, гормональні засоби) може чинити негативний вплив на здоров'я найбільш уразливих верств населення, таких як діти. Встановлено, що головним винуватцем гормонального забруднення води є сільське господарство, а саме тваринництво. **Наукова новизна.** У роботі узагальнено наявні й подано нові ефективні методи й технології очищення води, такі як: електрохімічний, мембранний, адсорбція на основі активованого вугілля, ультразвукова обробка в присутності каталізаторів, обробка вод ферментами і персульфатами. Як другий шлях зниження кількості ліків у воді запропоновано створення екологічно чистих ліків. **Практична значимість.** Водні проблеми є головними в усьому світі й в Україні в тому числі. Потрібно передбачити додаткове фінансування для вирішення проблеми очищення води від лікарських препаратів не за залишковим принципом, а з огляду на те, що вода – це основа життя на землі, й від якості води залежить здоров'я та життя людства.

**Ключові слова:** забруднення вод лікарськими препаратами; основні ліки-забруднювачі; методи очищення вод від ліків

L. F. DOLINA<sup>1\*</sup>, O. P. SAVINA<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0001-6082-7091 <sup>2\*</sup>Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail savina.o.p@gmail.com, ORCID 0000-0001-7872-6416

## WATER CLEANING FROM RESIDUES OF MEDICINAL PREPARATIONS

**Purpose.** The paper aimed at analyzing the presence of residual quantities of medicinal preparations in the water of Ukraine and the world. Based on the world and own experience to propose methods for waters cleaning from medicines. **Methodology.** The research was carried out on the basis of analysis of scientific sources and reporting data on the availability of medicines in the water of Ukraine, European countries, the USA (1999-2017). **Findings.** Analyzed sources inform that the main environmental threat of a global scale is the presence of medicines in drinking water. The treatment facilities are not suitable for the detection and decomposition of medicinal preparations. The fight against these substances is not envisaged all over the world. The authors present the results of a comprehensive review of issues related to the determination of the medicines availability in various waters, their concentrations and the most dangerous medicinal preparations - toxicants. Medications can be accumulated not only in the body of humans and animals, but also in marine and river fish, etc. The impact of even trace amounts of certain medicines (drugs, hormones) can have a negative effect on the health of more vulnerable segments of population, such as children. It was found that the main culprit of hormonal water pollution is agriculture, namely animal husbandry. **Originality.** The paper summarizes available and presents new methods and technologies for water cleaning, such as: electrochemical, membrane, adsorption based on activated carbon, ultrasonic treatment in the presence of catalysts, treatment of water with enzymes and persulfates. As the second way to reduce the number of medicines in the water, it is proposed to produce environmentally friendly medicines. **Practical value.** Water problems are the main ones all over the world and in Ukraine as well. It is necessary to provide the additional financing to solve the problem of water cleaning from medicines not on a residual principle, but considering that water is the basis of life on the earth, and in general the health and life of mankind depends on the quality of water.

**Key words:** water pollution with medicinal preparations; basic medications-pollutants; methods of water cleaning from medicines

## REFERENCES

1. Andryushchenko, Y. (2017). Lekarstva travyat pityevuyu vodu. *Dnepr vecherniy*, 49(13211), 23. Retrived from <http://dv-gazeta.info/vechyorka/zdorovje/lekarstva-travyat-pitevuyu-vodu.htm> (in Russian)
2. Bakterii obzavelis immunitetom (2014). *Sankt-Peterburgskie Vedomosti*, October 16. Retrieved from: [https://spbvedomosti.ru/news/obshchestvo/bakterii\\_obzavelis\\_immunitetom/](https://spbvedomosti.ru/news/obshchestvo/bakterii_obzavelis_immunitetom/) (in Russian)

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

3. Barenboym, G. M., & Chiganova, M. A. (2015). *Zagryazneniye prirodnikh vod lekarstvami*. Moscow: Nauka. (in Russian)
4. Belousov, Y. B., Moiseev, V. S., & Lepakhin, V. K. (1997). *Klinicheskaya farmakologiya i farmakoterapiya*. Moscow: Universum Publishing. (in Russian)
5. Korzh, Y. A., Klimenko, N. A., Smolin, S. K., & Reshetnyak, L. R. (2016). Biosorbtsiya prokaina na biologicheskii aktivnom ugle. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 38(5), 519-530. (in Russian)
6. Voda v butylkakh opasnee vodoprovodnoy (n.d.). Retrived from <https://www.epochtimes.ru/content/view/69576/7/> (in Russian)
7. Dolina, L. F. (2003). *Novye metody i oborudovaniya dlya obezzarazhivaniya stochnykh i prirodnikh vod: monografiya*. Dnepropetrovsk: Kontinent. (in Russian)
8. Dolina, L. F. (2001) *Reaktory dlya ochistki stochnykh vod: uchebnoe posobie*. Dnepropetrovsk: Standart. (in Russian)
9. Korzh, Y. A., Smolin, S. K., & Klimenko, N. A. (2016). Kinetika adsorbtsii farmatsevticheskikh veshchestv iz vodnykh rastvorov na aktivnykh uglyakh. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 38( 4), 342-353. (in Russian)
10. Kofman, V. Y. (2013). New advanced oxidation technologies of water and wastewater treatment (part 2) (foreign publications review). *Water Supply and Sanitary Technique*, 11, 70-77. (in Russian)
11. Lekarstva i lekarstvennaya bolezni (n.d.). Retrived from <http://www.medn.ru/statyi/lechenie-solyu-skipidarom-kerosinom/lekarstva-i-lekarstvennaya-bolezni.html> (in Russian)
12. Livshits, V. (n.d.). *Lekarstva kak ekologicheskaya problema*. Retrived from <http://proza.ru/2013/02/27/1830> (in Russian)
13. Danilov-Danilyan, V. I., Poroykov, V. V., Chiganova, M. A., Kozlov, M. N., Filimonov, D. A., & Barenboym, G. M. (2013). Otsenka biologicheskoy opasnosti organicheskikh ksenobiotikov v istochnikakh vodosnabzheniya. *Water Supply and Sanitary Technique*, 10, 17-24. (in Russian)
14. Farmatsevticheskie sredstva v pitevoy vode. (n.d.). Retrived from [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/emerging/info\\_sheet\\_pharmaceuticals/ru/](http://www.who.int/water_sanitation_health/emerging/info_sheet_pharmaceuticals/ru/) (in Russian)
15. Shpakov, A. (1999). Antibiotiki i steroidy otravlyayut stochnye vody: Smert iz kanalizatsii. *Kommersant*, 110. Retrived from <https://www.kommersant.ru/doc/220792> (in Russian)
16. Al-Khazrajy, O. S. A., Bergström, E., & Boxall, A. B. A. (2017). Factors affecting the dissipation of pharmaceuticals in freshwater sediments. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 37(3), 829-838. doi: 10.1002/etc.4015 (in English)
17. Boxall, A. B. A. (2004). The environmental side effects of medication. *EMBO Reports*, 5(12), 1110-1116. doi: 10.1038/sj.embor.7400307 (in English)
18. Domercq, P., Praetorius, A., & Boxall, A. B. A. (2018). Emission and fate modelling framework for engineered nanoparticles in urban aquatic systems at high spatial and temporal resolution. *Environmental Science: Nano*, 5(2), 533-543. doi: 10.1039/c7en00846e (in English)
19. Fent, K., Weston, A., & Caminada, D. (2005). Ecotoxicology of human pharmaceuticals. *Aquatic Toxicology*, 76(2), 122-159. doi: 10.1016/j.aquatox.2005.09.009 (in English)
20. Williams, R. (Ed.). (2005). *Human Pharmaceuticals: Assessing the impacts on aquatic ecosystems*. Pensacola: SETAC.
21. Desbiolles, F., Malleret, L., Tiliacos, C., Wong-Wah-Chung, P., & Laffont-Schwob, I. (2018). Occurrence and ecotoxicological assessment of pharmaceuticals: Is there a risk for the Mediterranean aquatic environment? *Science of the Total Environment*, 639, 1334-1348. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.351 (in English)
22. Probe: Pharmaceuticals In Drinking Water (n.d.). Retrived from <https://www.cbsnews.com/news/probe-pharmaceuticals-in-drinking-water/> (in English)
23. Sumpter, J. P. (2010). Pharmaceuticals in the Environment: Moving from a Problem to a Solution. In Kummerer, K., & Hempel, M. (Eds.), *Green and Sustainable Pharmac* (pp.11-22). Berlin: Springer-Verlag. (in English)
24. Dolina, L. F., Mashykhina, P. B., Karpo, A. A., & Mishchenko, A. A. (2017). Waters reality in Ukraine worldwide. *Science and Transport Progress*, 5(71), 7-18. doi: 10.15802/stp2017/113695 (in English)

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Н. Н. Беляевым (Украина)

Поступила в редколлегию: 06.03.2018

Принята к печати: 07.06.2018

## УДК 533.27:519.63:504.054

Ю. А. СКОБ<sup>1\*</sup>, М. Л. УГРЮМОВ<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Информатика», Харьковский национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», ул. Чкалова, 17, Харьков, Украина, 61070, тел. +38 (057) 315 11 31, эл. почта yuriy.skob@gmail.com, ORCID 0000-0003-3224-1709

<sup>2\*</sup>Каф. «Информатика», Харьковский национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», ул. Чкалова, 17, Харьков, Украина, 61070, тел. 38 (057) 315 11 31, эл. почта m.ugryumov@khai.edu, ORCID 0000-0003-0902-2735

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ИСПАРЕНИЯ АВАРИЙНОГО ПРОЛИВА ТОКСИЧНОГО ВЕЩЕСТВА НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

**Цель.** Основной целью работы является расчет пространственных полей распределения условной вероятности летального поражения обслуживающего персонала железнодорожной станции, вызванного ингаляцией токсичного газа, который рассеивается в приземном слое атмосферы в условиях заданной ветровой обстановки, для численной оценки уровня безопасности техногенного объекта. **Методика.** Разработана трехмерная математическая модель процессов испарения токсичного химического вещества с поверхности пятна пролива в результате аварийного разрушения емкости хранения или транспортировки сжиженного газа и дальнейшего рассеивания газовой примеси в приземном слое атмосферы с учетом загромождения пространства зданиями. Также разработана вычислительная технология определения условной вероятности поражения человека токсичным газом на основе пробит-анализа степени воздействия поражающего фактора (ингаляционной токсодозы) на организм человека. Для автоматизации вычислительного процесса табличная зависимость «пробит-функция – вероятность поражения» заменена обобщенным кусочно-кубическим сплайном. **Результаты.** На основании разработанных моделей получены результаты расчетов пространственно-временных полей условной вероятности смертельного поражения персонала железнодорожной станции, который подвергся ингаляционному воздействию облака газообразного цианистого водорода. Определено, что наличие зданий на пути рассеивания токсичного облака увеличивает площадь концентрации и время прохождения облака по расчетной области, что, соответственно, увеличивает время экспозиции обслуживающего персонала вредному воздействию. **Научная новизна.** В разработанной математической модели учитываются: сжимаемость потока, сложный рельеф местности (загромождение расчетного пространства зданиями техногенного объекта), трехмерный характер процесса рассеяния газообразной примеси, наличие испарения с пятна пролива токсичного вещества с переменной интенсивностью в зависимости от ветровой обстановки, физических характеристик примеси и класса шероховатости приземного слоя атмосферы. Математическая модель позволяет получать пространственно-временные распределения опасного параметра – относительной массовой концентрации токсичного газа и поражающего фактора – ингаляционной токсодозы, которые необходимы для определения нестационарных трехмерных полей условной вероятности поражения обслуживающего персонала техногенного объекта на основе аппарата пробит-анализа. **Практическая значимость.** Разработанная вычислительная технология позволяет эксперту на этапе принятия решения осуществлять автоматизированный численный анализ и прогноз во времени и пространстве условной вероятности смертельного поражения обслуживающего персонала, который подвергается ингаляционному воздействию токсичного газа как составной части показателя безопасности техногенного объекта – индивидуального риска.

**Ключевые слова:** газовые смеси; численные методы; дифференциальные уравнения с частными производными; воздействие вредных веществ; загрязнение

### Введение

Технологические процессы предприятий авиационной промышленности включают использование, транспортировку и хранение

отравляющих химических веществ (ОХВ) в сжиженном состоянии [10]. Нарушение правил эксплуатации оборудования приводит к его отказам, которые сопровождаются выбросом в атмосферу ОХВ с образованием токсичных облаков [13]. Одним из наиболее опасных ви-

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

дов техногенної аварії являється руйнування ємкості зберігання або транспортування стисненого газу (СТ) з утворенням плями проливу [15] (рис. 1). Масова концентрація токсичного газообразного речовини в газоздушній суміші характеризує негативне відхилення від нормального хімічного складу повітря і наряду з експозицією являється небезпечним параметром для обслуговуючого персоналу, опинившись в межах зони техногенної аварії.

Експозиція обслуговуючого персоналу промислового об'єкта певними концентраціями ОХВ формує уражаючий фактор – інгаляційну токсодозу. Превышення порогових значень токсодози призводить до соціальних наслідків – отруєнню різної ступеня тяжкості і людським жертвам. Тому визначення ризику підприємства для такого роду аварії являється важливою і актуальною інженерно-практичною задачею.

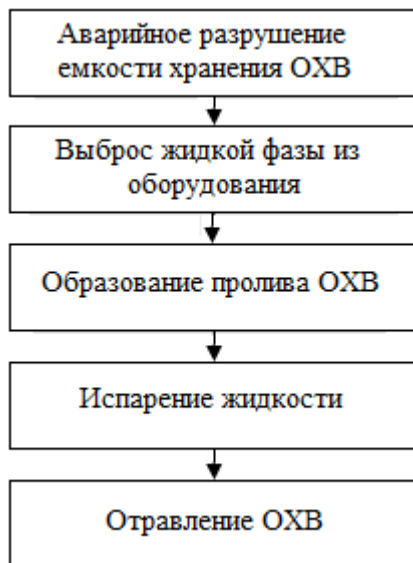


Рис. 1. Розвиток техногенної аварії

Fig. 1. Development of technogenic accident

Оцінка наслідків техногенної аварії включає в себе визначення ймовірності ураження обслуговуючого персоналу, який може бути підвладний впливу ОХВ, на основі математичного моделювання розповсюдження токсичної приміси в атмосфері [8].

Математичне моделювання фізичних процесів викисту і розповсюдження шкідливої приміси в приземному шарі атмосфери дозволяє

здійснити прогноз полів масової концентрації ОХВ, визначити інгаляційну токсодозу і ймовірність ураження обслуговуючого персоналу [5, 17, 18].

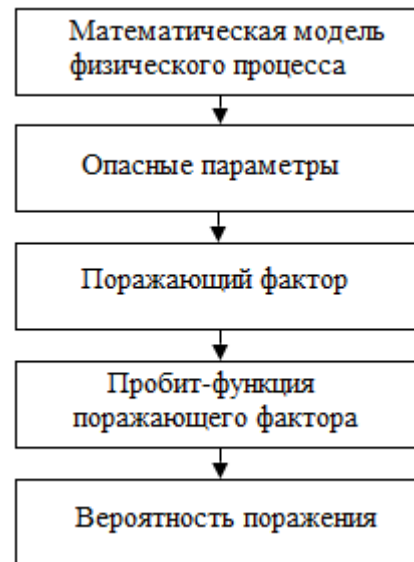


Рис. 2. Схема ймовірнісної оцінки наслідків аварії

Fig. 2. Scheme of probabilistic assessment of accident consequences

## Цель

Ураховуючи вищеизложенное, метою даної роботи являється розробка адекватної математичної моделі процесу випаровування токсичної приміси з поверхні плями проливу в результаті техногенної аварії, формування токсичного хмари і його подальшого розповсюдження в приземному шарі атмосфери для отримання просторово-часових полів уражаючого фактора інгаляційної токсодози і визначення полів ймовірності ураження людини на основі пробіт-аналізу.

*Аналіз публікацій.* Адекватне описання фізичних процесів змішування нереагуючих газів з повітрям і подальшого розповсюдження суміші при истечении струї в відкрите простір або закритий приміщення з примусовою (або природною) вентиляцією можливо тільки з використанням системи нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса для стисненого газу. Обмежені можливості сучасних комп'ютерів не дозволяють ефективно здійснювати пряме

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

численное решение этих уравнений. В настоящее время численное моделирование турбулентных течений осуществляют путем решения осредненных по Рейнольдсу-Фавру уравнений Навье-Стокса, дополненных моделью турбулентности [11]. Однако большинство моделей турбулентности не описывают с одинаковой степенью адекватности различные типы течений. Особенно это касается течений с интенсивными отрывами потока и/или большими градиентами давления температуры.

В работе [2] указано, что современные методики прогноза последствий аварий на химически опасных объектах и транспорте типа «Токси» [4, 6], «Аммиак», «SLAB» [9] реализуют модель Гаусса или аналитическое решение уравнения массопереноса и не учитывают застройку расчетного пространства зданиями. Применение численных кинематических моделей [19] для оценки территориального риска также ограничено случаями рассеивания ОХВ над ровной поверхностью. В некоторых работах учитывают сложный рельеф местности в процессе решения уравнения массопереноса конечноразностным методом [2, 9], но не берут во внимание либо трехмерный характер обтекания зданий [2], либо эффект сжимаемости течения, что не позволяет использовать эти математические модели для расчета последствий воздействия других поражающих факторов (взрывной ударной волны, теплового излучения), которые могут присутствовать одновременно при техногенных авариях на транспорте.

Кроме того, современные методики оценки загрязнения в основном базируются на детерминированном подходе [1], а при вероятностной оценке последствий поражения обслуживающего персонала на основе пробит-анализа используют зависимость вероятности от пробит-функции в табличном виде для экспертного анализа [4, 16, 18]. Это не позволяет применить данный подход автоматически в компьютерной системе для получения нестационарных полей поражающих факторов и вероятности поражения, поэтому требует усовершенствования вычислительной технологии.

В связи с этим существует необходимость построения новых математических моделей и расчетных схем для численного моделирования трехмерных течений многокомпонентных газовых смесей с учетом фактора загромождения

пространства постройками, эффектов сжимаемости и химического взаимодействия. Они позволяют определять полный набор опасных параметров потока для различных сценариев развития техногенной аварии, рассчитывать поражающие факторы (в том числе и токсодозу) и строить пространственно-временные поля условной вероятности поражения обслуживающего персонала, необходимые для оценки индивидуального риска.

## Методика

*Постановка задачи рассеивания ОХВ.* Рассмотрим формирование и движение газовой смеси на открытой промышленной площадке, на которой произошло аварийное разрушение емкости хранения сжиженного газа (рис. 3).

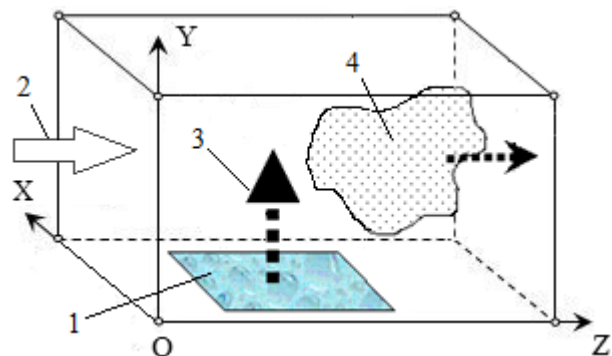


Рис. 3. Схема техногенной аварии:

1 – пятно пролива; 2 – поток воздуха;  
3 – примесь; 4 – газозвушное облако

Fig. 3. Scheme of technogenic accident:

1 – spillage spot; 2 – air flow; 3 – admixture;  
4 – air-gas cloud

Расчетная область представляет собой параллелепипед с прямолинейными образующими, расположенными в правой декартовой системе координат (X, Y, Z) с основанием в плоскости XOZ (ось Y ориентирована в направлении, противоположном действию сил тяжести Земли). Эту область разбиваем на пространственные ячейки, причем размеры граней подбираем в соответствии с характерным размером особенностей области (шероховатостью обтекаемой поверхности, размерностью обтекаемых объектов). Под влиянием окружающей среды СГ испаряется с пятна пролива и поступает в приземный слой атмосферы с суммарной интенсивностью  $G_{\Sigma}$ . Свежий воздух со скоростью ветра поступает через входную грань расчетной

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

области, перемешивается с примесью, образуя газоздушное облако с массовой концентрацией  $Q$ .

Для упрощения математической модели и ускорения компьютерных вычислений принимаем предположение, что физические процессы перехода выбрасываемого в приземный слой атмосферы вещества (вскипание) из жидкого состояния в газообразную фазу проходят мгновенно и в бесконечно-тонком по высоте слое. Это допущение несколько огрубляет расчеты, но в общем достаточно адекватно позволяет описать процесс попадания газовой примеси в воздух окружающего пространства.

Течение газовой смеси в расчетной области будем определять параметрами окружающей атмосферы, площадью пятна пролива, параметрами газовой примеси, поступающей в результате испарения в атмосферу. В какой-то момент времени испарение может прекратиться, и поступления примеси в область не будет.

*Основные уравнения математической модели.* Предполагаем, что основным фактором, влияющим на физические процессы смешения газовых примесей с воздухом и дальнейшее распространение смеси при испарении СГ в открытое пространство, является конвективный перенос массы, импульса и энергии. Поэтому достаточно использовать упрощенные уравнения Навье-Стокса, которые получены отбрасыванием вязких членов в уравнениях движения газовой смеси (эйлеров подход с источниковыми членами) [5].

Полная система уравнений, описывающая нестационарное трехмерное течение двухкомпонентной смеси газов в данной постановке имеет вид [5]:

$$\frac{\partial \vec{a}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{b}}{\partial x} + \frac{\partial \vec{c}}{\partial y} + \frac{\partial \vec{d}}{\partial z} = \rho \vec{f}, \quad (1)$$

где  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$ ,  $\vec{c}$ ,  $\vec{d}$ ,  $\vec{f}$  – вектор-столбцы вида:

$$\vec{a} = [\rho, \rho u, \rho v, \rho w, E]^T, \quad (2)$$

$$\vec{b} = [\rho u, P + \rho u^2, \rho uv, \rho uw, (E + P)u]^T, \quad (3)$$

$$\vec{c} = [\rho v, \rho vu, P + \rho v^2, \rho vw, (E + P)v]^T, \quad (4)$$

$$\vec{d} = [\rho w, \rho wu, \rho wv, P + \rho w^2, (E + P)w]^T, \quad (5)$$

$$\vec{f} = [0, 0, -g, 0, -gv]^T, \quad (6)$$

где  $T$  – время;  $u$ ,  $v$ ,  $w$  – составляющие вектора скорости  $\vec{q}$ ;  $P$ ,  $\rho$  – давление и плотность;  $E$  – полная энергия единицы объема газоздушной смеси:

$$E = \rho \left( e + \frac{1}{2} (u^2 + v^2 + w^2) \right), \quad (7)$$

где  $e$  – внутренняя энергия единицы массы газа; компоненты вектора;  $\vec{f}$  – суть проекции распределенных объемных источников;  $g$  – ускорение свободного падения.

Закон переноса компоненты смеси с учетом скорости диффузии имеет вид [12]:

$$\frac{\partial(\rho Q)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u Q)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v Q)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w Q)}{\partial z} = \rho Q, \quad (8)$$

где  $Q$  – относительная массовая плотность примеси (отношение плотности газообразного вещества примеси к плотности смеси),  $\rho Q$  – интенсивность изменения плотности примеси вследствие диффузии в соответствии с законом Фика  $\rho Q = \text{div}(\rho \Theta_D \text{grad} Q)$  (коэффициент диффузии  $\Theta_D$  определялся по методике, предложенной М. Е. Берляндом [18]).

Система уравнений (1–8) является незамкнутой. Дополним ее уравнениями, определяющими теплофизические свойства компоненты смеси. Для идеального политропного газа величина  $e$  связана с  $P$  и  $\rho$  смеси зави-

симостью:  $e = \frac{P}{(k-1)\rho}$ .

*Граничные условия.* На входе будем задавать граничные условия на поверхностях тех граней, которые примыкают к границам расчетной области и через которые в расчетную область поступает атмосферный воздух. Набегающий поток на входе определяется величинами:

– полной энтальпии:

$$I_{00} = \frac{k}{k-1} \frac{P}{\rho} + \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2}; \quad (9)$$

– функции энтропии:

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

$$S_0 = \frac{P}{\rho^k}; \quad (10)$$

- направлением вектора скорости потока (углами  $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ );
- относительной массовой плотностью примеси  $Q$ .

Параметры потока на входе определяются из равенств (9, 10) с учетом заданных  $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$  с привлечением соотношения для «левого» инварианта Римана [19]. На непроницаемых участках, ограничивающих расчетную область поверхностей, выполняются условия «непротекания»:  $q_{\vec{n}} = 0$ , где  $\vec{n}$  – вектор нормали к рассматриваемой границе. На поверхности испарения выставляется условие протекания примесного газа с заданной интенсивностью. Граничные условия на выходе будем задавать на поверхностях тех граней конечно-разностных ячеек, которые примыкают к границам расчетной области и через которые предполагается вытекание или втекание смеси. В выходных областях, кроме атмосферного давления  $P_A$ , задаваемого либо взятого из эксперимента, использовались соотношения для «правого» инварианта Римана [20].

*Начальные условия.* В начальный момент времени во всех «газообразных» ячейках расчетной области принимаются параметры окружающей среды. В ячейках с испарением или истечением газа задается закон изменения расхода примеси.

*Алгоритм численного решения.* Векторное уравнение (1) является следствием законов сохранения массы, импульса и энергии, которые могут быть представлены в интегральной форме для каждой расчетной ячейки:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V a dV + \oint_{\vec{\sigma}} \hat{A} d\vec{\sigma} = \iiint_V \rho f dV, \quad (11)$$

где  $V$  – объем элементарной расчетной ячейки;  $\vec{\sigma}$  – ограничивающая поверхность данной ячейки, которая имеет внешнюю нормаль  $\vec{n}$  ( $\vec{\sigma} = \sigma \vec{n}$ );  $\hat{A}$  – тензор плотности потока консервативных переменных  $a$ , столбцами которого являются векторы  $\vec{b}, \vec{c}, \vec{d}$  соответственно.

Закон переноса компоненты смеси (8) может быть также представлен в интегральной форме для каждой расчетной ячейки:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho Q dV + \oint_{\vec{\sigma}} \rho Q q d\vec{\sigma} = \iiint_V \rho Q dV. \quad (12)$$

*Метод расчета.* Компьютерное решение системы фундаментальных уравнений газовой динамики для смеси, дополненной законами сохранения массы примесей в интегральной форме, получено явным методом С. К. Годунова [19]. Для аппроксимации уравнений Эйлера применяется конечно-разностная схема первого порядка. Центральные разности второго порядка используются для диффузионных источников членов в уравнениях сохранения примесей. Простая интерполяция давления применяется в вертикальном направлении. Метод Годунова характеризуется робастным алгоритмом, устойчивым к большим возмущениям параметров потока (например, давления).

В основе метода расчета лежит идея использования для построения разностной схемы точных решений уравнений с кусочно-постоянными начальными данными. Для гиперболической системы такие решения распадаются на совокупности независимых и сравнительно просто рассчитываемых деталей – «распадов разрывов».

Уравнения (11, 12) допускают возникновение и существование поверхностей разрыва двух видов: ударных волн и тангенциальных разрывов. Функции, удовлетворяющие уравнениям (11, 12), можно рассматривать в качестве обобщенных решений уравнений газовой динамики. Использование интегральных законов сохранения массы, импульса, энергии и концентрации газообразной примеси в качестве исходных для построения разностных уравнений обеспечивает построение разрывных решений без выделения разрывов.

Совокупность газодинамических параметров во всех ячейках в момент времени  $t^n$  представляет собой известное решение на временном слое с индексом  $n$ . Параметры в момент времени  $t^{n+1} = t^n + \tau$  (на слое  $n+1$ ) рассчитывались посредством применения явных разностных аппроксимаций для соотношений в рамках интегро-интерполяционного метода

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

С. К. Годунова [20]. На первом этапе непрерывное распределение параметров заменяется кусочно-постоянными среднеинтегральными значениями в каждой расчетной ячейке. При этом границы ячейки представляют собой неустойчивые поверхности произвольного разрыва, которые распадаются на устойчивые волновые элементы: ударную волну, контактную поверхность и волну разрежения. Для каждого такого разрыва определяются потоки массы, импульса и энергии через грани газовых ячеек. Устойчивость конечноразностной схемы обеспечивается выбором величины шага по времени  $\tau$ .

**Моделирование испарения.** В результате дискретизации расчетной области поверхность пятна пролива СГ также разбивается на ряд конечноразностных ячеек у земли в плоскости XOZ (рис. 4).

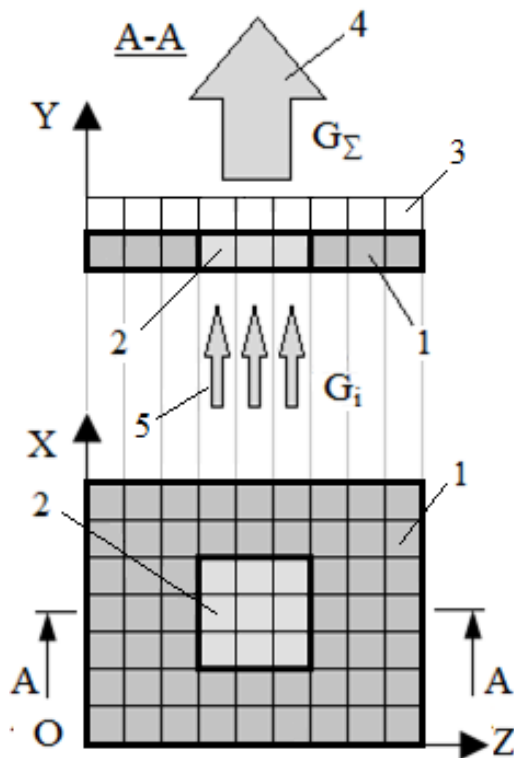


Рис. 4. Дискретизация пятна пролива:  
1 – земля; 2 – ячейки пятна пролива; 3 – ячейки атмосферы; 4 – суммарный расход газа через пятно пролива; 5 – расход газа через одну ячейку пятна пролива

Fig. 4. Discretization of spillage spot:  
1 – earth; 2 – spillage spot cells; 3 – atmosphere cells;  
4 – total gas flow through spillage stain;  
5 – gas flow through one cell of spillage spot

При равномерном разбиении в направлении осей OX и OZ площади граней «испаряющих» ячеек одинаковы. Сделав допущение о равномерности потока с пятна пролива, можно определить индивидуальный заданный расход газа для каждой из ячеек «испарения»  $G_i = G_{\Sigma}/k$ , где  $k$  – количество ячеек, примыкающих к пятну пролива сжиженного газа.

Допустим, имеется газовая среда, для которой термодинамические величины – давление  $P$ , плотность  $\rho$ , внутренняя энергия единицы массы  $\varepsilon$  – подчиняются уравнению состояния. Предположим, что в начальный момент времени  $t$  для левого полупространства  $X < 0$  среда характеризуется значениями параметров  $P_1$ ,  $\rho_1$ ,  $u_1$ , а для правого полупространства  $X > 0$  – значениями  $P_2$ ,  $\rho_2$ ,  $u_2$  (здесь  $u$  – компонента вектора скорости в направлении координаты  $X$ , а другие ее компоненты равны нулю) (рис. 5).

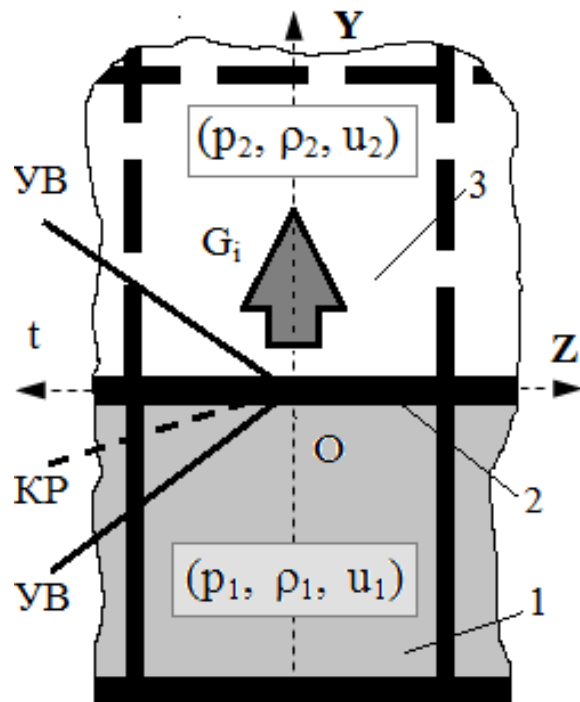


Рис. 5. Расчетная схема для определения расхода испарения газа:

1 – фиктивная вычислительная ячейка со стороны пятна пролива; 2 – граница «пролив–воздух»; 3 – воздушная расчетная ячейка

Fig. 5. Calculation model for determining the gas evaporation rate:

1 – fictitious computational cell from the side of spillage stain; 2 – spillage-air boundary; 3 – air calculated cell

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Если привести в соприкосновение две массы газа, сжатые до различных давлений ( $P_1$  – давление со стороны пятна пролива,  $P_2$  – давление со стороны атмосферы), и убрать перегородку между ними, то поверхность их соприкосновения будет поверхностью разрыва в начальном распределении давления. Начальный разрыв распадается на несколько разрывов, которые с течением времени будут отходить друг от друга. На контактном разрыве испытывает скачок плотность, а значит, и внутренняя энергия ( $R_1, E_1$  – для левой и  $R_2, E_2$  – для правой областей), а давление  $P$  и поперечная компонента скорости  $U$  непрерывны. В свою очередь, эти области отделены от невозмущенных областей с параметрами ( $P_1, \rho_1, u_1$ ) снизу («слева») и ( $P_2, \rho_2, u_2$ ) сверху («справа») или ударной волной УВ, или волной разрежения ВР.

Решая задачу распада разрыва на грани конечноразностной ячейки, примыкающей к вентиляционному проему, можно определить плотность  $R$  и скорость  $u$ , а значит, и индивидуальный расход газа  $G_i$  через рассматриваемую грань. Используя метод итераций, можно подобрать давление  $P_2$  таким образом, чтобы расчетный расход газа  $G_i$  отличался от заданного  $G_3$  наперед заданную малую величину  $\varepsilon$  (рис. 6). Тестирование такого итерационного алгоритма показало быструю сходимость процесса подбора давления «испарения» и незначительное увеличение общего времени нестационарного расчета движения газовой смеси в расчетной области. Так как информация о предыдущем шаге итерации по времени запоминается в специальной структуре данных, то итерационный процесс подбора противодействия в процессе общего расчета ускоряется.

*Интерполяция функции интенсивности испарения.* При моделировании испарения с пятна пролива интенсивность «выброса» примеси в газовой фазе в атмосферу обычно принимают постоянной  $G = \text{const}$  (рис. 7).

Если имеется суммарная масса  $m$  пролитого СГ и время  $t_1$  начала и  $t_2$  конца процесса испарения, тогда текущая интенсивность испарения может быть найдена из соотношения:

$$G = m / (t_2 - t_1) = \text{const}. \quad (13)$$

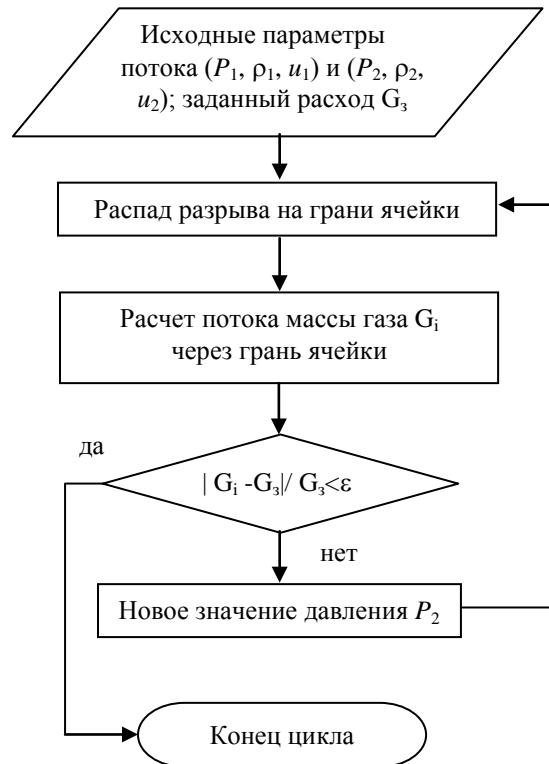


Рис. 6. Итерационный алгоритм подбора противодействия в текущий момент времени процесса испарения

Fig. 6. Iterative algorithm of selection of counterpressure at the current time of the evaporation process

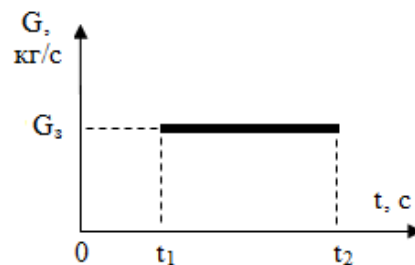


Рис. 7. Постоянный закон интенсивности испарения:

$t_1, t_2$  – время начала и конца процесса испарения;  
 $G_3$  – заданная интенсивность испарения

Fig. 7. Constant law of evaporation intensity:  
 $t_1, t_2$  – time of beginning and end of evaporation process;  
 $G_3$  – specified evaporation intensity

Иногда закон интенсивности испарения  $G_3 = f(t)$  (рис. 8) задан табличной функцией, которая получена либо из эксперимента, либо с помощью аналитической модели. В этом случае возникает проблема интерполирования таблично заданной функции. При выборе подходяще-

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

го метода інтерполювання следует учитывать возможный сложный характер функции и неравномерность расположения узлов интерполяции [14].

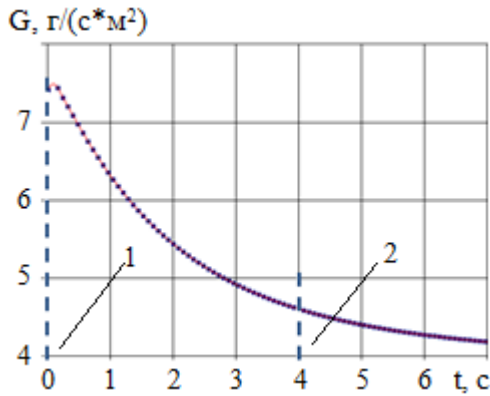


Рис. 8. Интерполирование интенсивности испарения кусочно-кубическим сплайном:  
1 – начало испарения; 2 – конец испарения

Fig. 8. Interpolation of the evaporation intensity by piecewise-cubic spline:

1 – evaporation beginning; 2 – evaporation end

Ю. К. Чернышев в работе [7] провел аналитический обзор наиболее известных методов интерполирования (метод конформных отображений, эрмитовы сплайны, сплайн Безье), рассмотрел их преимущества и недостатки и пришел к выводу, что наиболее подходящими являются кусочно-кубические эрмитовы сплайны, в основе которых лежит методика Х. Акимы построения нелинейных приближений первой производной в узлах интерполирования и ее обобщения [12]. Были введены дополнительные промежуточные узлы интерполяции и доказано, что данный прием устраняет колебания знака второй производной.

Площадь пролива  $F$  ( $\text{м}^2$ ) можно определить по следующей формуле:

$$F = \frac{M^{\text{ж}} - M^{\text{г}} - M_{\text{и}}^{\text{ж}}}{0,05\rho_{\text{ж}}} \quad (14)$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкого опасного вещества,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $M^{\text{ж}}$  – суммарная масса пролитого жидкого опасного вещества,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $M^{\text{г}}$  – масса опасного вещества, переходящая в газовую фазу в первичное облако при мгновенном вскипании перегретого опасного вещества,  $\text{кг}$ ;

$M_{\text{и}}^{\text{ж}}$  – масса опасного вещества, переходящая в аэрозоль в первичное облако,  $\text{кг}$ .

Скорость испарения с поверхности пролива и расход аммиака во вторичном облаке, образующемся на стадии испарения из пролива, определяем по формуле [3]:

$$q'' = F\sqrt{\mu}10^{-6}(5,38 + 4,1u_{\text{эфф}}^{\text{и}})P_{\text{н}}, \text{ кг/с}, \quad (15)$$

где  $\mu$  – молярная масса опасного вещества,  $\text{кг}/\text{моль}$ ;  $u_{\text{эфф}}^{\text{и}}$  – начальная эффективная скорость вторичного облака, образующегося на стадии испарения из пролива,  $\text{м/с}$ ;  $P_{\text{н}}$  – давление насыщенного пара опасного вещества при температуре воздуха,  $\text{мм рт. ст.}$ , которое можно определить по формуле:

$$P_{\text{н}} = 760 \exp\left(\Delta H_{\text{кип}} \mu \left(\frac{1}{T_{\text{кип}}} - \frac{1}{T_{\text{возд}}}\right) / R\right), \quad (16)$$

где  $T_{\text{возд}}$  – температура воздуха,  $\text{К}$ ;  $T_{\text{кип}}$  – температура кипения жидкого опасного вещества при давлении в окружающей среде  $P_0$  (при нормальных условиях принимается равным  $101\,325 \text{ Па}$ ),  $\text{К}$ ;  $\Delta H_{\text{кип}}$  – теплота испарения (кипения) жидкого опасного вещества,  $\text{Дж/кг}$ .

**Вероятностная оценка безопасности.** В результате моделирования рассеяния токсичной газовой примеси в атмосфере можно получить функции изменения во времени и пространстве массовой концентрации примеси  $Q$ . На основании этого определяется опасность воздействия ОХВ на обслуживающий персонал (рис. 2).

Рассмотрим вычислительную технологию определения вероятности поражения. Пусть интегральная степень воздействия  $t$  является случайной, удовлетворяющей нормальному закону распределения с математическим ожиданием равным 5 и дисперсией равной 1. В этом случае величина вероятности поражения  $P$  (измеряется в долях единицы) может быть оценена по следующей формуле:

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\text{Pr}} e^{-\frac{1}{2}(t-5)^2} dt. \quad (17)$$

С другой стороны, интегральную степень воздействия  $t$  можно оценить с помощью

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

уравнения регрессии вида  $t = a + b f(\bar{x})$ , где  $\bar{x} = \{x_k\}$  – количественные оценки поражающих факторов;  $a$ ,  $b$  – коэффициенты уравнения регрессии.

Задавая верхний предел интеграла (18) (пробит-функцию  $P_r = t|_x$ ), можно определить вероятность поражения. При воздействии отравляющего химического вещества (ОХВ) на персонал техногенного объекта основным поражающим фактором является ингаляционная токсодоза  $D$  – интеграл по времени концентрации ОХВ в воздухе:

$$D = \int_0^{\tau_s} Q^n d\tau, \quad (19)$$

где  $\tau_s$  – время экспозиции (время, за которое набирается ингаляционная токсодоза), с;  $Q$  – пространственно-временное значение массовой концентрации ОХВ, ppm;  $n$  – табличный коэффициент (например, для цианистого водорода  $n = 1$ ).

Пробит-функция для поражения человека вследствие воздействия ингаляции смертельной токсодозы отравляющего химического вещества в общем случае определяется по формуле:

$$P_r = A + B \cdot \ln(D), \quad (20)$$

где  $A$  и  $B$  – табличные полуэмпирические коэффициенты (например, для цианистого водорода  $A = -37,98$ ;  $B = -3,7$ ).

Обычно в инженерной практике получение вероятности поражения происходит визуально с использованием таблицы зависимости вероятности от пробит-функции поражающего фактора. Это неудобно и не позволяет использовать данный аппарат интегрированным в компьютерной системе для оценки техногенной безопасности. Поэтому для автоматизации процесса связь пробит-функции и вероятности смертельного поражения человека проинтерполируем кусочно-кубическим эрмитовым сплайном, обобщенным Ю. К. Чернышевым (рис. 9).

## Результаты

*Апробация математической модели.* Предложенный алгоритм и метод учета переменной интенсивности испарения сжиженного токсич-

ного газа с поверхности пятна пролива в процессе выброса газовой примеси в приземный слой атмосферы был реализован в виде подсистемы исследовательского программного комплекса «Fire». Комплекс позволяет производить трехмерный анализ рассеяния токсичных газообразных примесей во времени и пространстве в практически приемлемое время и делать прогноз рисков летального исхода вследствие воздействия испарений токсичного газа на организм человека (рис. 10, 11).

Тестирование разработанной информационной технологии и анализ эффективности алгоритма проводились на примере моделирования испарения 6925 кг сжиженного цианистого водорода (токсичного взрывоопасного вещества плотностью 689 кг/м<sup>3</sup>, молярной массой 0,027 кг/моль, температурой кипения 298,6 К, теплотой испарения 933 кДж/кг) с пятна пролива в форме окружности радиусом  $R$ , образовавшегося в результате разрушения цистерны в районе железнодорожной станции в черте населенного пункта с большими зданиями (коэффициент степенной зависимости для аппроксимации скорости в атмосферном слое над поверхностью земли  $k = 0,4$ ) (рис. 10).

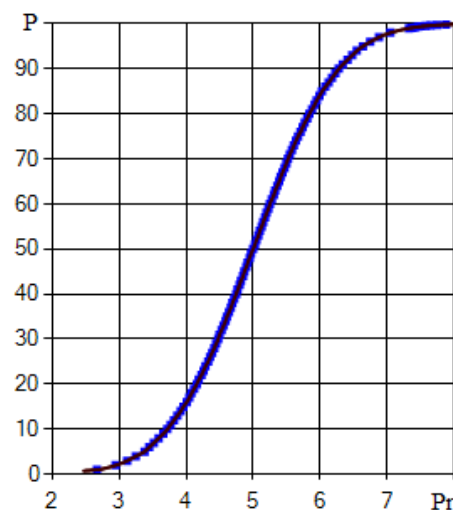


Рис. 9. Интерполирование зависимости вероятности  $P$  поражения от пробит-функции  $P_r$  поражающего фактора

Fig. 9. Interpolating the dependence of  $P$  lesion probability on the probit-function  $P_r$  of the adverse factor

Центр окружности пятна пролива располагался на расстоянии  $X_c = 16$  м,  $Z_c = 16$  м от начала координат в расчетной области с габ-

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

ритами  $Lx \times Ly \times Lz = 85 \times 10 \times 85$  м і варіантом по кількості ячеек вдоль координатних осей  $85 \times 10 \times 85$ .

На расстоянии  $Xa = 30$  м и  $Za = 28$  м от начала координат располагалось здание станции с габаритами  $Dx \times Dy \times Dz = 15 \times 5 \times 25$  м.

Ветер набегает со скоростью 3 м/с под углом  $45^\circ$  к оси OZ на высоте 0,5 м. В этом случае начальная эффективная скорость вторичного облака, образующегося на стадии испарения из пролива, составляла 1,19 м/с.

Если пренебречь массой газовой фракции  $M^g$  первичного облака, образовавшегося в результате аварийного разрушения емкости, и учесть, что температура кипения вещества выше температуры окружающей среды (масса опасного вещества, переходящая в аэрозоль в первичное облако  $M_{и}^ж = 0$ ), по формуле (14) можно определить площадь пятна пролива  $201 \text{ м}^2$  и соответствующий радиус пятна  $R = 8$  м. Тогда в соответствии с формулой (15) интенсивность испарения цианистого водорода с пятна пролива будет составлять  $0,00106 \text{ кг/с/м}^2$ .

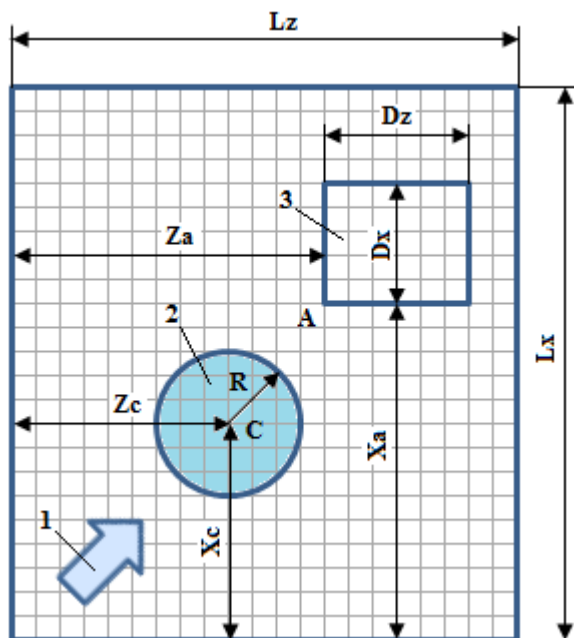


Рис. 10. Карта объектов у земли:  
1 – вектор скорости ветра; 2 – пятно пролива;  
3 – здание

Fig. 10. Map of objects near the ground:  
1 – vector of wind speed; 2 – spillage stain;  
3 – building

Считалось, что испарение начиналось с момента времени  $t_1 = 0$  с и принудительно прекращалось по истечению  $t_2 = 5$  с, например, с помощью заливки пятна пролива специальной пеной. Время окончания расчетов было принято таким, чтобы газоздушное токсичное облако покинуло пределы расчетной области.

Было выполнено два варианта расчета: 1-й – без учета наличия здания железнодорожной станции и 2-й – с учетом загромождения области расчета зданием (рис. 11, 12).

Анализ изменения полей массовой концентрации цианистого водорода проводился в плоскости XOZ в слое вычислительных ячеек у земли. На рис. 11, а представлена динамика распространения токсичного вещества без учета присутствия здания. Видно, что образовавшееся после испарения облако беспрепятственно покидает расчетную область, постепенно рассеиваясь.

Влияние загромождения расчетной области зданием существенно изменяет картину рассеивания отравляющего химического вещества (см. рис. 11, б). Токсичное облако меняет форму и размеры в соответствии с течением газовой смеси, которое вырабатывается в процессе обтекания здания. Наличие препятствия увеличивает не только максимальные значения массовой концентрации токсичного вещества, но и время прохождения облака по расчетной области, а значит и время экспозиции обслуживающего персонала вредному воздействию.

Нестационарные поля массовой концентрации цианистого водорода можно рассматривать как пространственно-временное распределение опасного параметра исследуемого физического процесса. Эти данные используются для расчета токсодозы как поражающего фактора, пробит-функции для цианистого водорода и, соответственно, условной вероятности летального исхода для человека при ингаляции данного токсичного вещества (рис. 12).

Используем для сравнения рассмотренных вариантов вычислительного эксперимента характерную площадь  $S_x$  расчетной области у земли, которую занимает зона с условной вероятностью летального исхода 50 % и выше.

В случае учета загромождения (рис. 12, б) характерная опасная зона составляла  $1290 \text{ м}^2$ , что существенно больше, чем в первом варианте расчета (рис. 12, а) –  $1001 \text{ м}^2$ .

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

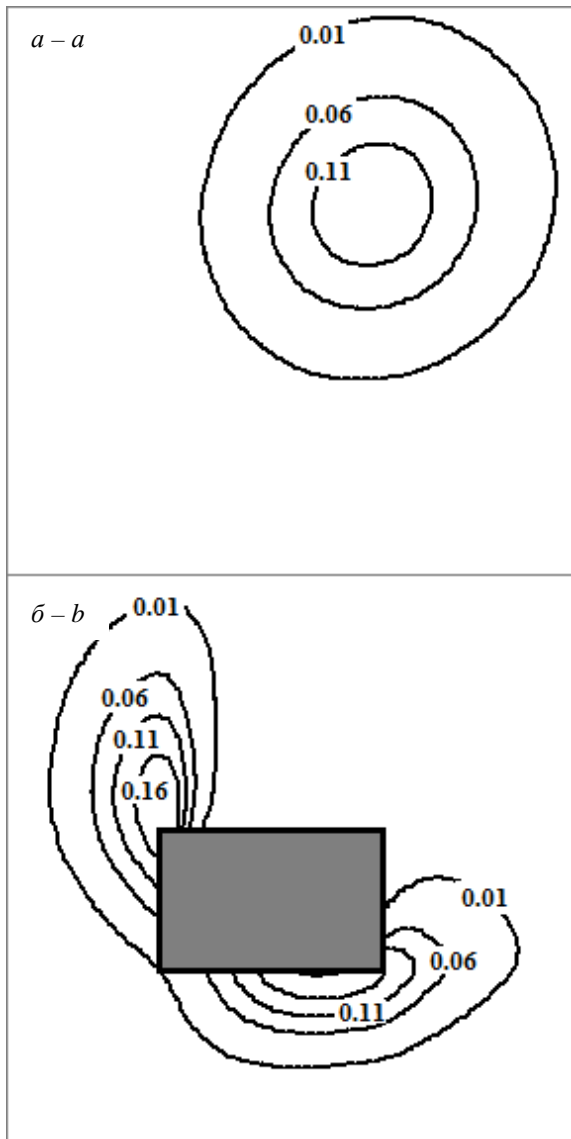


Рис. 11. Поля относительной массовой концентрации токсичной примеси в момент времени  $t = 20$  с после начала испарения:  
 $a$  – без здания;  $б$  – со зданием

Fig. 11. Fields of relative mass concentration of toxic content at the moment  $t = 20$  sec after the beginning of evaporation:  
 $a$  – without building;  $b$  – with building

Качественный и количественный анализ представленных полей условной вероятности летального исхода вследствие поражения человека ингаляционной токсодозой позволяет сделать вывод о существенном влиянии загромождения пространства зданием на расположение и форму опасной для обслуживающего персонала зоны, что обосновывает необходимость учета

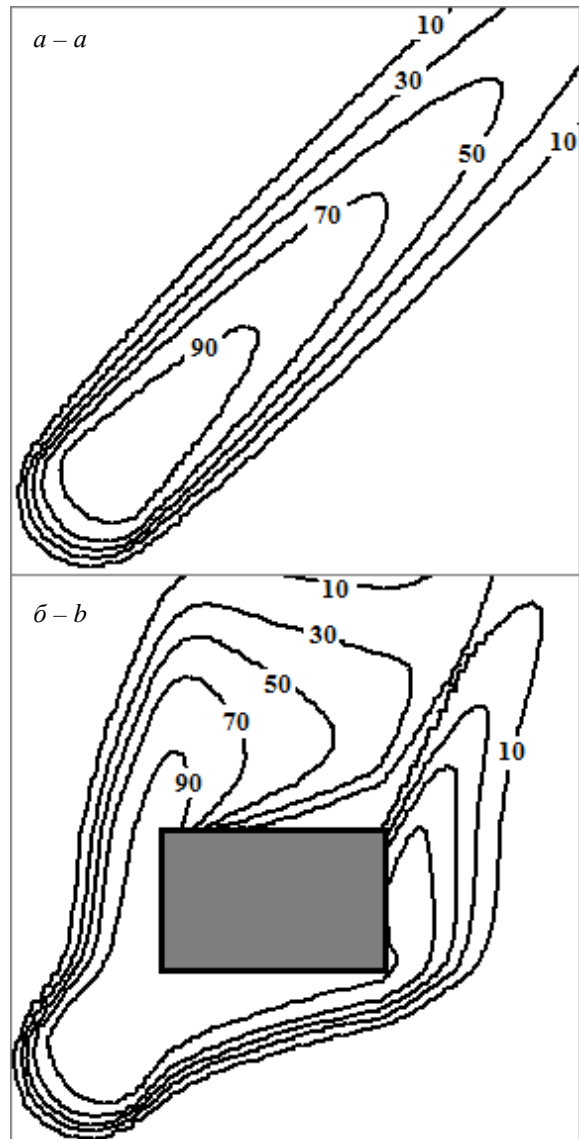


Рис. 12. Поле условной вероятности летального исхода человека у земли, %:  
 $a$  – без здания;  $б$  – со зданием

Fig. 12. The field of conditional probability of a person's death at the ground, %:  
 $a$  – without building;  $b$  – with building

данного фактора при анализе и прогнозе развития техногенной аварии рассмотренного типа на предприятиях с целью выработки рекомендаций по снижению рисков летального исхода.

### Научная новизна и практическая значимость

В математической модели учитываются: сжимаемость потока, сложный рельеф местности (загромождение пространства зданиями),

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

трехмерный характер процесса рассеяния, наличие испарения с пятна пролива токсичного вещества с переменной интенсивностью. Модель позволяет получать пространственно-временные распределения опасного параметра – относительной массовой концентрации токсичного газа и поражающего фактора – ингаляционной токсодозы, необходимые для автоматизированного определения нестационарных трехмерных полей вероятности поражения обслуживающего персонала на основе пробит-анализа.

**Выводы**

В работе представлен метод вероятностной оценки летального поражения обслуживающего персонала техногенного объекта, находящегося в зоне аварийного рассеяния облака токсичного химического вещества в условиях застройки. В основу метода положена трехмерная математическая модель процесса испарения с заданной интенсивностью сжиженного токсичного газа с пятна пролива, образовавшегося в результате разрушения емкости транспортировки или хранения, и его рассеяния в приземном слое атмосферы. Модель позволяет получать поля ингаляционной токсодозы и с помощью процедуры пробит-анализа численно оценивать условную вероятность поражения персонала, который подвергается воздействию токсичного газа как показателя безопасности техногенного объекта. Дальнейшее совершенствование данного метода лежит в области рассмотрения комбинации аварийных сценариев с различными поражающими факторами.

сичного химического вещества в условиях застройки. В основу метода положена трехмерная математическая модель процесса испарения с заданной интенсивностью сжиженного токсичного газа с пятна пролива, образовавшегося в результате разрушения емкости транспортировки или хранения, и его рассеяния в приземном слое атмосферы. Модель позволяет получать поля ингаляционной токсодозы и с помощью процедуры пробит-анализа численно оценивать условную вероятность поражения персонала, который подвергается воздействию токсичного газа как показателя безопасности техногенного объекта. Дальнейшее совершенствование данного метода лежит в области рассмотрения комбинации аварийных сценариев с различными поражающими факторами.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Беляев, Н. Н. Компьютерное моделирование загрязнения окружающей среды при разливе аммиака / Н. Н. Беляев, О. В. Коптилая // *Екологія і природокористування* : зб. наук. пр. – Дніпропетровськ, 2002. – Вип. 2. – С. 158–162.
2. Беляев, Н. Н. Расчет территориального риска при теракте: экспресс модель / Н. Н. Беляев, И. В. Калашников, В. А. Козачина // *Наука та прогрес транспорту*. – 2018. – № 1 (73). – С. 7–14. doi: 10.15802/stp2018/123474
3. Мацак, В. Г. Гигиеническое значение скорости испарения и давления пара токсических веществ, применяемых в производстве / В. Г. Мацак, Л. К. Хоцянов. – Москва : Медгиз, 1959. – 231 с.
4. РД-03-26-2007. Методические указания по оценке последствий аварийных выбросов опасных веществ. – Введ. 2008–01–25. – Москва : НТЦ Промышленная безопасность, 2008. – 122 с.
5. Скоб, Ю. А. Математическое моделирование струйного истечения газовой смеси с различной концентрацией примеси в атмосферу / Ю. А. Скоб // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2017. – № 4. – С. 83–92.
6. Стоецкий, В. Ф. Оценка риска при авариях техногенного характера / В. Ф. Стоецкий, В. И. Голинько, Л. В. Дранишников // *Наук. вісн. НГУ*. – 2014. – № 3. – С. 117–124.
7. Чернышев, Ю. К. Выпуклые векторные сплайны в применении к профилированию лопаток ГТД / Ю. К. Чернышев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2000. – № 21. – С. 16–18.
8. Assael, M. J. Fires, Explosions, and Toxic Gas Dispersions: Effects Calculation and Risk Analysis / Marc J. Assael, Konstantinos E. Kakosimos. – New York : CRC Press, 2010. – 349 p. doi: 10.1201/9781439826768
9. Biliaiev, M. M. Numerical simulation of toxic chemical dispersion after accident at railway / M. M. Biliaiev, L. Ya. Muntian // *Наука та прогрес транспорту*. – 2016. – № 2 (62). – С. 7–15. doi: 10.15802/stp2016/67279
10. Brauer, R. L. Safety and Health for Engineers / R. L. Brauer. – Hoboken : Wiley, 2016. – 608 p.
11. Computational Fluid Dynamics for Engineers / B. Andersson, R. Andersson, L. Hakansson [et al.]. – Cambridge : Cambridge University Press, 2012. – 212 p.
12. Engeln-Müllges, G. Numerik-Algorithmen: Verfahren, Beispiele, Anwendungen / G. Engeln-Müllges, K. Niederdröck, R. Wodicka. – Berlin : Xpert.press, 2010. – 756 p.
13. Hughes, P. Introduction to Health and Safety at Work: The Handbook for the NEBOSH National General Certificate / P. Hughes, E. Ferrett. – Kidlington, Oxford : Butterworth-Heinemann, 2011. – 608 p.
14. Knott, G. D. Interpolating Cubic Splines / G. D. Knott. – Boston : Birkhäuser, 2012. – 254 p.

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

15. Nolan, D. P. Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles: for Oil, Gas, Chemical and Related Facilities / Dennis P. Nolan. – Burlington : Gulf Professional Publishing, Elsevier, 2011. – 351 p.
16. Risk assessment methodology for onboard hydrogen storage / M. Dadashzadeh, S. Kashkarov, D. Makarov, V. Molkov // Intern. Journal of Hydrogen Energy. – 2018. – Vol. 43. – Iss. 12 – P. 6462–6475. doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.01.195
17. Simulation-based safety investigation of a hydrogen fueling station with an on-site hydrogen production system involving methylcyclohexane / Jo Nakayama, Hitoshi Misono, Junji Sakamoto, Naoya Kasai, Tadahihiro Shibutani, Atsumi Miyake // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – Vol. 42. – Iss. 15. – P. 10636–10644. doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.11.072
18. Skob, Y. A. Mathematical modeling of hydrogen explosion consequences at fueling station [Электронный ресурс] / Y. A. Skob, E. A. Granovskiy, M. L. Ugryumov // 7th Intern. Conference on Hydrogen Safety. – Hamburg (Germany), 2017. – P. 1–12. – Режим доступа: [https://www.hysafe.info/wp-content/uploads/2017\\_papers/159.pdf](https://www.hysafe.info/wp-content/uploads/2017_papers/159.pdf) – Загл. с экрана. – Проверено : 28.05.2018.
19. Tashvigh, A. A. Soft computing method for modeling and optimization of air and water gap membranedistillation – a genetic programming approach / Akbar Asadi Tashvigh, Bahram Nasernejad // Desalination and Water Treatment. – 2017. – Vol. 76. – P. 30–39. doi: 10.5004/dwt.2017.20696
20. Toro, E. F. Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics: A Practical Introduction / E. F. Toro. – Berlin : Springer, 2009. – 724 p.

Ю. О. СКОБ<sup>1\*</sup>, М. Л. УГРЮМОВ<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Інформатика», Харківський національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «ХАІ», вул. Чкалова, 17, Харків, Україна, 61070, тел. +38 (057) 315 11 31, ел. пошта [yuriy.skob@gmail.com](mailto:yuriy.skob@gmail.com), ORCID 0000-0003-3224-1709

<sup>2\*</sup>Каф. «Інформатика», Харківський національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «ХАІ», вул. Чкалова, 17, Харків, Україна, 61070, тел. +38 (057) 315 11 31, ел. пошта [m.ugryumov@khai.edu](mailto:m.ugryumov@khai.edu), ORCID 0000-0003-0902-2735

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАСЛІДКІВ ВИПАРОВУВАННЯ АВАРІЙНОГО ПРОЛИТТЯ ТОКСИЧНИХ РЕЧОВИН НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

**Мета.** Основною метою роботи є розрахунок просторових полів розподілу умовної ймовірності летального ураження обслуговуючого персоналу залізничної станції, викликаного інгаляцією токсичного газу, який розсіюється в приземному шарі атмосфери в умовах заданої вітрової обстановки, для чисельної оцінки рівня безпеки техногенного об'єкту. **Методика.** Розроблено тривимірну математичну модель процесів випаровування токсичної хімічної речовини з поверхні плями пролиття в результаті аварійного руйнування ємності зберігання або транспортування зрідженого газу і подальшого розсіювання газової домішки в приземному шарі атмосфери з урахуванням захарашення простору будівлями. Також розроблено обчислювальну технологію визначення умовної ймовірності ураження людини токсичним газом на основі пробіт-аналізу ступеня впливу вражаючого фактора (інгаляційної токсодози) на організм людини. Для автоматизації обчислювального процесу табличну залежність «пробіт-функція – ймовірність ураження» замінено узагальненим кусочно-кубічним сплайном. **Результати.** На основі розроблених моделей отримані результати розрахунків просторово-часових полів умовної ймовірності смертельного ураження персоналу залізничної станції, який піддався інгаляційному впливу хмари газоподібного ціаністого водню. Визначено, що наявність будівель на шляху розсіювання токсичної хмари збільшує площу концентрації та час проходження хмари по розрахунковій області, що, відповідно, збільшує час експозиції обслуговуючого персоналу шкідливому впливу. **Наукова новизна.** У розробленій математичній моделі враховуються: стисливість потоку, складний рельєф місцевості (захарашення розрахункового простору будівлями техногенного об'єкту), тривимірний характер процесу розсіювання газоподібної домішки, наявність випаровування з плями пролиття токсичної речовини зі змінною інтенсивністю в залежності від вітрової обстановки, фізичних характеристик домішки і класу шорсткості приземного шару атмосфери. Математична модель дозволяє отримувати просторово-часові розподіли небезпечного параметра – відносної масової концентрації токсичного газу і вражаючого фактора – інгаляційної токсодози, які необхідні для визначення нестационарних тривимірних полів умовної ймовірності ураження обслуговуючого персоналу техногенного об'єкту на основі апарату пробіт-аналізу.

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

**Практична значимість.** Розроблена обчислювальна технологія дозволяє експерту на етапі прийняття рішення здійснювати автоматизований чисельний аналіз і прогноз в часі та просторі умовної ймовірності смертельного ураження обслуговуючого персоналу, який піддається інгаляційному впливу токсичного газу як складової частини показника безпеки техногенного об'єкту – індивідуального ризику.

*Ключові слова:* газові суміші; чисельні методи; диференціальні рівняння зі частинними похідними; вплив шкідливих речовин; забруднення

Y. O. SKOB<sup>1\*</sup>, M. L. UGRYUMOV<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Informatics», Kharkiv National Aerospace University named after M. Zhukovsky «Kharkiv Aviation Institute», Chkalov St., 17, Kharkiv, Ukraine, 61070, tel. +38 (057) 315-11-31, e-mail yuriy.skob@gmail.com, ORCID 0000-0003-3224-1709

<sup>2\*</sup>Dep. «Informatics», Kharkiv National Aerospace University named after M. Zhukovsky «Kharkiv Aviation Institute», Chkalov St., 17, Kharkiv, Ukraine, 61070, tel. +38 (057) 315-11-31, e-mail m.ugryumov@khai.edu, ORCID 0000-0003-0902-2735

## MATHEMATICAL MODELING OF EVAPORATION CONSEQUENCES OF TOXIC SUBSTANCE EMERGENCY SPILLAGE AT RAILWAY TRANSPORT

**Purpose.** The main purpose of the article is calculation of spatial distribution fields of the conditional probability of lethal damage to the railway station personnel, caused by the inhalation of toxic gas, which is dissipated in the surface layer of the atmosphere under the conditions of a given wind situation, for a numerical assessment of the safety level of the technogenic object. **Methodology.** The authors developed a three-dimensional mathematical model of the evaporation processes of toxic chemical substance from the surface of the spillage stain as a result of emergency destruction of the storage or transportation capacity of liquefied gas and further dispersion of the gaseous admixture in the ground layer of the atmosphere, taking into account the cluttering of space by buildings. Also it was developed a calculation technology for determining the conditional probability of human injury by toxic gas on the basis of probit-analysis of the impact degree of damaging factor (inhalation toxodose) on human body. To automate the calculation process, the tabular dependence «probit-function-injury probability» is replaced by a generalized piecewise cubic spline. **Findings.** Based on the developed model we obtained the results of calculations of the space-time fields of the conditional probability of lethal injury to the railway station personnel who underwent inhalation exposure of a cloud of hydrogen cyanide gas. We also determined that the presence of buildings on the way of the toxic cloud dispersion increases the concentration area and the time of cloud passage along the calculated area, which, accordingly, increases the exposure time of station personnel to harmful impact. **Originality.** The developed mathematical model takes into account: the flow compressibility, the complex terrain (cluttering of the calculation space by the buildings of technogenic object), the three-dimensional nature of dispersion process of the gaseous admixture, the evaporation of a toxic substance with a variable intensity depending on the wind conditions, physical characteristics of admixture and the roughness grade of atmosphere surface layer. The mathematical model makes it possible to obtain spatio-time distributions of a dangerous parameter – the relative mass concentration of toxic gas and the damaging factor – inhalation toxodose, which are necessary to determine the nonstationary three-dimensional fields of the conditional probability of injury to the technogenic object personnel on the basis of the probit-analysis apparatus. **Practical value.** The developed calculation technology allows the expert at the decision-making stage to perform automated numerical analysis and forecast in time and space of the conditional probability of lethal injury to service personnel exposed to the inhalation effect of toxic gas as an integral part of the safety index of a technogenic object - individual risk.

*Key words:* gas mixtures; numerical methods; partial differential equations; exposure to harmful substances; pollution

## REFERENCES

1. Belyaev, N. N., & Koptilaya, O. V. (2002). Kompyuternoe modelirovanie zagryazneniya okruzhayushchey sredy pri razlive ammiaka. *Ekologiya i prirodokorystvannia*, 2, 158-162. (in Russian)
2. Biliaiev, M. M., Kalashnikov, I. V., & Kozachyna, V. A. (2018). Territorial Risk Assessment after Terrorist Act: Express Model. *Science and Transport Progress*, 1(73), 7-14. doi: 10.15802/stp2018/123474 (in Russian)
3. Matsak, V. G., & Khotsyanov, L. K. (1956). *Gigienicheskoe znachenie skorosti isparennya i davleniya para toksicheskikh veshchestv, primenyaemykh v proizvodstve*. Moscow: Medgiz. (in Russian)
4. RD-03-26-2007 *Metodicheskie ukazaniya po otsenke posledstviy avariynykh vybrosov opasnykh veshchestv*. (2008). Moscow: NTTs Promyshlennaya bezopasnost. (in Russian)
5. Skob, Y. A. (2017). Matematicheskoe modelirovanie struynogo istecheniya gazovozdushnoy smesi s razlichnoy kontsentratsiey primesi v atmosferu. *Aerospace Technic and Technology*, 4, 83-92. (in Russian)
6. Stoetsky, V. F., Golinko, V. I., & Dranishnikov, L. V. (2014). Risk assessment in man-caused accidents. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 3, 117-124. (in Russian)
7. Chernyshev, Y. K. (2000). Vypuklye vektornye splayny v primenenii k profilirovaniyu lopatok GTD. *Aerospace Technic and Technology*, 21, 16-18. (in Russian)
8. Assael, M. J., & Kakosimos, K. E. (2010). *Fires, Explosions, and Toxic Gas Dispersions: Effects Calculation and Risk Analysis*. New York: CRC Press Publisher. doi: 10.1201/9781439826768 (in English)
9. Biliaiev, M. M., & Muntian, L. Y. (2016). Numerical simulation of toxic chemical dispersion after accident at railway. *Science and Transport Progress*, 2(62), 7-15. doi: 10.15802/stp2016/67279 (in English)
10. Brauer, R. L. (2016). *Safety and Health for Engineers*. Hoboken: Wiley Publisher. (in English)
11. Andersson, B., Andersson, R., Hakansson, L., Mortensen, M., Sudiyo, R., & Frontmatter, B. W. (2012). *Computational Fluid Dynamics for Engineers*. Cambridge: Cambridge University Press Publisher. (in English)
12. Engeln-Müllges, G., Niederdrenk, K., & Wodicka, R. (2010). *Numerik-Algorithmen: Verfahren, Beispiele, Anwendungen*. Berlin: Xpert.press Publisher. (in Germany)
13. Hughes, P., & Ferrett, E. (2011). *Introduction to Health and Safety at Work: The Handbook for the NEBOSH National General Certificate*. Kidlington: Oxford, Butterworth-Heinemann. (in English)
14. Knott, G. D. (2012). *Interpolating Cubic Splines*. Boston: Birkhäuser Publisher. (in English)
15. Nolan, Dennis P. (2011). *Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles: for Oil, Gas, Chemical and Related Facilities*. Burlington: Gulf Professional Publishing, Elsevier. (in English)
16. Dadashzadeh, M., Kashkarov, S., Makarov, D., & Molkov, V. (2018). Risk assessment methodology for onboard hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(12), 6462-6475. doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.01.195 (in English)
17. Nakayama, J., Misono, H., Sakamoto, J., Kasai, N., Shibutani, T., & Miyake, A. (2017). Simulation-based safety investigation of a hydrogen fueling station with an on-site hydrogen production system involving methylcyclohexane. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(15), 10636-10644. doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.11.072 (in English)
18. Skob, Y. A., Granovskiy, E. A., & Ugryumov, M. L. (2017). Mathematical modeling of hydrogen explosion consequences at fueling station. *Proceedings of 7-th International Conference on Hydrogen Safety*, 1-12. Retrieved from [https://www.hysafe.info/wp-content/uploads/2017\\_papers/159.pdf](https://www.hysafe.info/wp-content/uploads/2017_papers/159.pdf) (in English)
19. Tashvigh, A. A., & Nasernejad, B. (2017) Soft computing method for modeling and optimization of air and-water gap membrane distillation – a genetic programming approach. *Desalination and Water Treatment*, 76, 30-39. doi: 10.5004/dwt.2017.20696 (in English)
20. Toro, E. F. (2009). *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics: A Practical Introduction*. Berlin: Springer Publisher. (in English)

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Н. Н. Беляевым (Украина)

Поступила в редколлегию: 06.03.2018

Принята к печати: 07.06.2018.

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

UDC 656.2:338.47

I. M. LOMTIEVA<sup>1\*</sup>, M. P. SNACHOV<sup>2</sup>, O. A. TOPORKOVA<sup>3</sup>, L. A. SHYLO<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Accounting and Taxation», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 226 95 66, e-mail irinalomteva72@gmail.com, ORCID 0000-0003-2838-3851

<sup>2</sup>Dep. «Accounting and Taxation», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (0562) 33 58 13, e-mail snachov49@gmail.com, ORCID 0000-0001-7908-0362

<sup>3</sup>Dep. «Accounting and Taxation», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (0562) 33 58 13, e-mail toporkova1975@gmail.com, ORCID 0000-0003-0956-3638

<sup>4</sup>Dep. «Accounting and Taxation», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (0562) 33 58 13, e-mail shilomail@yandex.ru, ORCID 0000-0003-3235-1377

### FORMATION PECULIARITIES OF FINANCIAL RESOURCES OF PJSC «UKRAINIAN RAILWAY»

**Purpose.** The need for technological modernization of the railway industry in Ukraine, creation of favorable conditions for investment and introduction of innovations in the industry require significant financial resources. The purpose of the article is investigation of possible sources of attracting financial resources necessary for development of Ukrainian railway transport, in particular, during further organizational arrangements and procedures for the railway industry corporatization to search for ways to optimize them. **Methodology.** During research the methods of comparison, scientific search, analysis and synthesis were used to study the existing sources of financing for corporations abroad and at Ukrainian enterprises. **Findings.** Analysis of the existing and search for more efficient sources of financial resources necessary for financing Ukrainian railway transport modernization in the process of the railway industry corporatization is carried out. The growth of the financial results share in the amount of internal own resources is achieved by taking measures to increase profits. A significant part of the economic activities financing can be provided by issuing corporate bonds with the presence of positive effect of the financial leverage. Accounting of the financial leverage effect is an efficient tool for optimizing the structure of the share capital and determining the expediency of loan resources. In the process of corporatization, PJSC «Ukrzaliznytsia» should create an efficient system of financial resources that fully takes into account the specifics of its activities, motivates to increase labor productivity with the ultimate purpose of ensuring the external competitiveness of the Ukrainian railway industry. **Originality.** Based on the study of scientific and methodological sources, as well as the analysis of sources for financing the economic activities of railway transport, the ways of their optimization are proposed. **Practical value.** Introduction of the proposed approaches will make it possible to justify the economic feasibility and proportionality of internal and external sources of the railway transport financing under the conditions of corporatization.

**Keywords:** railway transport reforming; railway corporatization; source of financing; corporate bonds; equity; loan capital; financial leverage effect

#### Introduction

Transition of Ukrainian railway to the joint-stock form of management and formation of PJSC «Ukrzaliznytsia» at the end of 2015 [10] foresees

the formation of final structure of PJSC «Ukrzaliznytsia» – a vertically-integrated holding company like German state railway Deutsche Bahn [13] at the third stage of their reforming (2017–2020). At the same time, one of the urgent tasks of

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

reforming the railway industry is the formation of favorable conditions for investing in order to attract and manage efficient financial resources.

The existing structure of railway transport management, the state of technical base of Ukrainian railways and the technological level of transportation organization do not meet the growing needs of society and world standards of transport services quality. The complexity of the situation is aggravated by the fact that at present PJSC «Ukrzaliznytsia» does not have a clear plan of actions to improve and renovate the state of fixed assets. The main obstacle in developing such plan is the lack of financial resources necessary for capital investment, therefore the key direction in solving this issue is the search for sources of funding for the railway investment activity. Due to the incomplete correspondence of the existing forms and methods of the Ukrainian railway industry financing to the requirements of the modern market environment, study of the formation issues of the financial resources for PJSC «Ukrzaliznytsia» is one of the most important directions.

In different periods of transition of Ukrainian economy to market relations, the problem of railway industry reforming, including its funding, the issue of investment development and financial support for railway transport, as well as the consequences of the reforming process were solved by many domestic and foreign scientists and specialists. In particular, they are I. M. Aksonov, H. Aleksandersson [14], Ye. I. Balaka, Yu. S. Barash, O. M. Hnennyi, V. P. Hudkova [1], A. O. Diehtiar [2], O. H. Deineka [3], V. L. Dykan, N. M. Kolesnykova, V. V. Kompaniets [4], M. V. Kondratiuk, Yu. F. Kulaiev, P. V. Kurenkov, M. V. Makarenko, V. V. Matvienko [5], Yu. L. Mokhova [6], V. Nikitinasa [15], I. P. Petrenko, L. O. Pozdniakova, O. M. Pshinko, Ye. M. Sych, V. V. Skalozub, N. S. Sokolovska, L. Tompson [16], Yu. M. Tsvietov, V. V. Chornyi, V. V. Shemaiev [13] and others.

However, despite a large number of studies, the search for reliable and efficient sources of financial resources for the railway industry in Ukraine needs further analysis and revision.

### Purpose

The main purpose of the research is to identify the main organizational and economic aspects of

the formation of financial resources of PJSC «Ukrzaliznytsia» and their management in the process of corporate transformation of the railway industry, as well as the development of measures to optimize the structure of financial resources and search of the most efficient corporate sources of financing.

### Methodology

The purpose is achieved by using the comparative, scientific search, synthesis and analysis methods. The research of financial resources formation of the PJSC «Ukrzaliznytsia» has been carried out on the basis of analysis of the existing funding sources of the corporations activity abroad and at the enterprises of Ukraine. Analysis of scientific works in the part of positive experience of railway transport reforming shows that the choice of the most efficient corporate funding sources foresees optimization of the financial resources structure taking into account the railway industry specifics.

### Findings

At the present stage, the efficient functioning of Ukrainian railway transport is complicated by the influence of a number of factors of the external and internal environment: the crisis state of the country's market economy, low level of liquidity and financial stability of the railway, substantial wear of its fixed assets, lack of significant investment resources, reduced transportation quality, expenditures excess of the industry over its income.

Some experts argue that introduction of a market paradigm in Ukraine has led to total degradation of the economy and railway transport. The years of «shock» reforms have led to a deep economic crisis: the volumes of transportations and revenues of railway transport have decreased. The wear of active part of fixed assets exceeds 90%, the profit-making industry has become unprofitable. Only for the period from 2010 to October 1, 2016 the number of employees decreased by 25% [4]. According to V. Balchun, former chairman of the board of PJSC «Ukrzaliznytsia» (stickler of market reforms), the system is on the brink of collapse. However, according to the reform project, the same V. Balchun planned to increase the labor productivity by 40% and reduce operating costs by 34.8% from 2017 to 2025 [11]. However, Ukraine has chosen the European way of economic devel-

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

opment. Therefore, the issue of further reforming the domestic railway transport of Ukraine is expedient and relevant one.

Experience of developed countries shows that corporatization and functional separation of railways is the most promising way of railway transport reforming and solving the problems of financing its future transformations. In the process of corporatization of Ukrainian railway transport, the state restricts its functions as a business entity, but, on the other hand, it strengthens its role as a regulator of market relations. In addition, the state retains responsibility for the transport process safety, provision of transport services in those sectors and segments of the railway activity, where the market relations are virtually absent or not yet sufficiently developed.

In general, the foreign experience of railway reforming does not clearly confirm that corporatization and functional separation of railways is the best form of railway transport management, but it clearly indicates that each model, like every form of ownership, has its advantages and disadvantages. This is due to the influence of many factors, for example, the difference in the stages of economic development of countries, orientation on the management of the industry, the need to attract investments, etc. Although one of the most important reasons for the infrastructure allocation is the strengthening of the railway transport positions in competition with other transport modes and, first of all, with road transport [20].

The world-wide practice in economically developed countries shows that these countries, unlike Ukraine, have approached to the railway reforming already with a stable economy, having sufficient financial resources for transformation in the organizational structure of railways and the renewal of their infrastructure. Thus, the reform model of German railway (which is an example for PJSC «Ukrzaliznytsia») provided creation of public joint-stock company «Deutsche Bahn AG» based on the state enterprises. The state had 100% of this company stock. Individual joint-stock companies were created to manage the railway infrastructure. The third stage of the German railway reforming was a partial privatization of the company «Deutsche Bahn AG». Some of the company's shares are to be sold to private investors, provided that the controlling interest is held by the «Deutsche Bahn AG». Thus, Germany has com-

plied with the EU legislation on the delimitation of the delivery of railway services from the railway infrastructure management [18]. However, already in the first year, the German state has invested in the railway infrastructure renovation more than 100 billion euros. At present, in the budget of Ukraine there are no such reserves.

Another way of financing PJSC «Ukrzaliznytsia» may be the experience of reforms in the railway industry in Sweden, in which the infrastructure and operation companies remained state-owned, but operate on a commercial basis. As a result of the reform, the quality of services in passenger and cargo transportations has been significantly improved, and the railway position in the transport market has been strengthened. In parallel, corporatization of passenger and cargo transportation management took place. In 2001, the corporatization of railway units took place. Since 2009, the market has been completely open for other railway operators [14]. However, this way of the railway industry reforming required significant financial investments from Sweden in updating its infrastructure.

Ukrainian railways corporatization and the separation of transportation services from railway infrastructure management can provide an opportunity to increase the efficiency of decision-making in corporate governance, accelerate the investment programs implementation, and facilitate the attraction of additional financial resources for the modernization of the infrastructure [7]. At the same time, the existing program of the Ukrainian railway industry reforming provides for a complex of measures to bring its financial system in line with the requirements of the international community in the basic issues of economic activity organization. First of all, it is the issues of transparent formation and distribution of its financial results and financial resources by the types of railway transport enterprises, optimization of revenues and expenses, creation of bases for improvement of financing conditions the railway development projects [8].

Art. 10 «Sources of Investment Financing» of the Law of Ukraine «On Investment Activity» [9] defines the following sources of financing of the economic activity of Ukrainian enterprises, including PJSC «Ukrzaliznytsia»:

– own financial resources of the investor (profit, depreciation, reimbursement of losses from

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

accidents, natural disasters, monetary accumulations and savings of citizens, legal entities, etc.);

- loan funds of the investor (bond loans, bank and public budget loans);

- attracted financial resources (funds received from the sale of shares, ownership and other contributions of citizens and legal entities);

- budgetary investment allocations;

- uncompensated receipts and charitable contributions, donations of organizations, enterprises and citizens».

Thus, all sources of investment resources of PJSC «Ukrzaliznytsia» can be divided into internal own funds and external funds.

The main internal own funds (internal sources of own financial resources) of PJSC traditionally include reinvested profits and amortization.

The main external (loan) funds (external sources of own financial resources) of the PJSC belong to the funds received by its owners due to the initial and additional issues and the use of the PJSC shares.

The most widespread loan funds of the investor (sources of loan financial resources) of the PJSC include bank and budget loans, corporate bond loans, financial leasing.

Receiving financial resources from various sources allows to increase the amount of investment in PJSC «Ukrzaliznytsia».

Experience of the developed countries shows that the basis of economic activity of any enterprise, including the railway transport enterprises, is its own financial resources. Since the basis of their formation is the financial results in the form of profit, in order to ensure the efficiency of economic activity, the rational formation and management of financial results is a topical task. In addition, dynamic development of the economy in general, as well as the railway corporatization by means of the railway corporatization increase the role of indicators of the economic activity results.

Managing corporate financial resources involves tight control of the own financial results. The research of the corporations activities shows that in many corporations the structure of internal own financial resources is not optimal: a significant proportion is amortization, and less significant is their own financial resources, which are formed by the corporation profits. Such situation is also

characteristic for the internal financial resources of the railway transport enterprises. Therefore, in order to increase the share of financial results of the railway in the total amount of the own internal financial resources, certain measures to increase net profit are required. For example, such measures include the use of preferential taxation mechanisms for the industry to be reformed, the provision of state guarantees for long-term bank loans, etc.

However, the railroad profitability at the moment is too low to ensure sufficient development only at the expense of its own financial resources. This is caused by the fact that not all directions of the railway activity are profitable. In the part of amortization, the possibilities are also limited. Therefore, in order to ensure the effective functioning of the amortization mechanism, it is expedient to use such a method of its calculation, which would ensure a fair distribution of the amount of deductions over the years, so that inflationary processes and other factors of cost increase do not create a deficit of financial resources.

In most European countries, the own funds of the railway industry (profits, amortization) are the predominant source of financing. For today, for objective reasons, PJSC «Ukrainian Railway» does not have sufficient own investment sources. It continues to be in the range between the upper level of the tariffs that the state indexes according to inflation rates and rising price pressures from suppliers and contractors, which is much higher than inflation. It continues to cover losses from passenger transportations from the financial result obtained by the company from freight transportations and other types of activities. It is also forced to direct a part of its own resources to the development of non-commercial objects of state importance, such as border crossing, approaches to ports, railway stations, etc [12].

Since the currently limited financial resources of PJSC «Ukrzaliznytsia» do not make it possible to renovate its fixed assets by purchasing or constructing new facilities in the required volumes, in some cases, the problem of their capital repairs become important. Attracting funds from external sources of own financial resources in the conditions of further railway transport reforming become urgent.

The main source of funding for the railway industry upon the condition of corporatization could be financing at the expense of external own

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

sources through the issue of shares, the benefits of which are: the perpetual attraction of these funds; lack of supporting for the issue of shares; absence of Issuer Covenants to repay the value of these shares, etc. In case of formation of PJSC, all 100 percent of whose shares are fixed in state ownership, corporatization can not be considered an efficient own external source of railway transport financing, primarily in terms of capital investment.

If PJSC «Ukrzaliznytsia» will be the main company in the holding with the functions of economic management, the controlling stake of PJSC may be left to the state, and the rest can be sold to the interested legal entities and individuals. At the same time, it is appropriate to build the system of internal economic management of the state PJSC on the principles of holding management.

Corporatization of the country railway industry could in the future solve many problems concerning upgrading and modernizing its infrastructure. However, the corporate form of economic management organization is quite efficient and provides for the possibility of accumulation of significant amounts of money only in cases of involving not only of the state funds, but also the funds of institutional investors and individuals. It should be noted that in countries with a market economy, households' funds are the main external financing sources of public joint stock companies. However, currently in Ukraine, the mechanism for attracting such investments in railway transport is unsolved.

The financial resources needed to finance the railway industry could be provided by institutional investors, including foreign investors. However, the policy of attracting such resources on the Ukrainian railway is absent, which is due to the lack of investors interest in the industry. At the railway, depending on its specificity, the long-term projects are mainly implemented, while it is the speed of the invested funds turnover is topical for investors. Quite high financial expenses of the railway are also unfavorable conditions, which, even in the presence of large amounts of income and operating profit, significantly reduce or bring to nothing the net profit of the railway.

One more temporary measure to increase the efficiency of the financial resources formation of the PJSC «Ukrzaliznytsia» may be activity in the system of public and private partnership. But the development of such relations involves the transfer

of the part of shares of PJSC to a private investor, who requires organization of an adequate control system from the state as the owner of a controlling stake.

It should also be noted that the formation of own financial resources of the railway transport from external sources can provide in PJSC «Ukrzaliznytsia» necessary additional financing for future transformations. However, this is the most expensive source of financial resources of a joint-stock company from all possible sources of corporate financing. That is why it is necessary to search for cheaper and at the same time efficient external sources of financing, for example, in the part of loan capital.

The loan capital is very important in the railway financing. At present, the credit rating of PJSC «Ukrzaliznytsia» is bank loans, eurobonds, financial leasing and corporate bonds. Thus, bank loans are the most significant. The experience of European countries shows that banks, as active investors, focus significant amounts of attracted financial resources. But the possibilities of the banking system of Ukraine are limited. On the other hand, in case of high interest rate for bank loans and low level of profitability of operating activities at PJSC «Ukrzaliznytsia», the use of bank loans is impractical.

A large railway joint-stock company, which is PJSC «Ukrzaliznytsia», as well as other large enterprises of corporate type, can provide a significant part of financing of its economic activity by forming of borrowed financial resources by issue of corporate bonds. They are the source of financial resources cheaper than stocks, and therefore it is promising. In addition, loan capital, if used efficiently, for example, due to the effect of the financial leverage, makes it possible to increase the return on equity of PJSC «Ukrzaliznytsia». That is why corporate bonds should become an important source of financial resources for the railway and increase the return on equity of PJSC «Ukrzaliznytsia».

For the PJSC «Ukrzaliznytsia», today the issue of bonds may be of interest not so much as a source of attraction of relatively cheap loan funds, but as the prospect of obtaining such a source in the future. It is possible that the first issue of bonds will not give the PJSC a telling economy in comparison with obtaining a bank loan. However, the issue of bonds will now make it

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

possible for the PJSC in future to actually attract more financial resources without bond, more cheaply than through banks [17].

Attraction of financial resources of PJSC «Ukrzaliznytsia» through the use of stock market instruments is the most promising direction of financing. The railway has already issued bonds to attract loan financial resources at lower interest rates than the interest rate for bank loans or the dividend rate for shares. However, the liquidity of the Ukrainian bond market remains rather low, inferior to the liquidity of the stock market, which reduces the acceptability of bonds as an investment instrument. But due to the high bond reliability, their issue for the railway industry can become a powerful source of investment to finance the renewal of its fixed assets.

Under conditions of insufficient budget financing of PJSC «Ukrzaliznytsia» as a state corporation and insignificant internal sources, a certain source may be the mixed funding with a focus on financial leasing. However, leasing cannot provide for the construction of new tracks, the electrification of operating railways, and solving of other problems of renovating the fixed assets of the PJSC infrastructure.

Within the framework of the traditional neoclassical economic model, the main conceptual purpose of management of the economic activity of a public joint stock company is the steady increase in the welfare of its owners (shareholders). A generalizing criterion for the efficiency of the taken financial decisions is the maximization test of the equity capital, that is, the market value of ordinary shares [19].

The stock market environment determines the rate of return of alternative investment options, which directly affects the value and structure of the capital of PJSC «Ukrzaliznytsia».

In general, the choice of specific sources of financing the PJSC «Ukrzaliznytsia» should be based on the purpose of using financial resources, the degree of riskiness of investments and many other factors. One of the main factors that should be taken into account is the value of capital from alternative sources of financing, which determines the capital structure of PJSC.

The capital structure of any enterprise, on the one hand, characterizes its financial stability and financial risk, and on the other hand – determines the degree of use of the financial leverage effect.

The calculation of the financial leverage effect is one of the efficient tools for optimizing the equity structure and determining the expediency of attracting loan capital [15].

The availability of loan capital of PJSC «Ukrzaliznytsia» allows ensuring profitability of own capital above the profitability of operational activity of the PJSC, which is adjusted for the value of the financial leverage effect taking into account the taxation of profits.

The effect of financial leverage is determined by the existing tax adjustor for a particular enterprise, the financial leverage differential (the difference between operating activity profitability and the average weighted interest rate on loan) and the coefficient of financial risk (ratio of loan capital to the enterprise equity). If the enterprise has a loan capital, exceeding the profitability of operating activities of the enterprise above the average weighted interest rate on the loan provides an increase in the return on equity. Conversely, if the profitability of the operating activity of an enterprise is less than the loan interest rate, the availability of loan capital reduces the return on equity. Therefore, the main condition for the efficient attraction of loan capital is the excess of operating profitability over the average weighted interest rate (the value of the loan capital attracted by the enterprise).

Thus, for PJSC «Ukrzaliznytsia» the main source of increase its financial results is the increase of stock returns, and a promising additional source – the use of loan resources in the form of corporate bonds of the railway with the positive effect of the financial leverage.

### Originality and practical value

Based on the analysis of normative, scientific and methodological sources on financing the economic activity of enterprises of corporate type, as well as based on the analysis of the existing and possible sources of financing the economic activity of Ukrainian railway transport we proposed the ways of their optimization.

The use of the proposed approaches to financing the PJSC «Ukrzaliznytsia» will make it possible to substantiate economic expediency and the most optimal proportions of internal and external sources of Ukrainian railway transport financing in the conditions of its further reforming.

### Conclusions

1. Lack of own funds of PJSC «Ukrzaliznytsia» and lack of budget financing, inability to attract non-state investments in the current economic system have led to dangerous increase in physical deterioration and moral aging of fixed assets, loss of suburban and freight transportations share. Therefore, introduction of the efficient elements of corporate financing in the economically justified model of Ukrainian railway reforming becomes an extremely important factor in the implementation of strategic tasks of the industry development.

2. The main condition for increasing the profitability of the economic activity of PJSC «Ukrzaliznytsia» is the efficient use of its financial resources. And the rational organization of financial resources management determines its place on the transportation market. In order to maintain and develop competitive positions transportation market in Ukraine and abroad, the PJSC management should ensure the development

of efficient system of organizational-economic, financial, methodological and information measures to improve the management of existing and future financial resources.

3. In order to increase the share of financial results in the total amount of internal own financial resources of the railway, certain measures are needed to increase net profit, for example, the use of preferential taxation mechanisms for the industry to be reformed, state guarantees for long-term bank loans, etc.

4. A railway public joint stock company can provide a significant part of financing of its own economic activity by forming a loan financial resource by issuing corporate bonds.

5. Increase in return on equity of PJSC «Ukrzaliznytsia» is possible due to the efficient use of loan capital, for example, due to the financial leverage effect, but only on the condition of its positive value, which requires gradual increase of the profitability of the railway operating activity.

### LIST OF REFERENCE LINKS

1. Гудкова, В. Структурно-функціональний аналіз державного регулювання розвитку залізничного транспорту / В. Гудкова, Ю. Тютюн // Зб. наук. пр. Держ. екон.-технол. ун-ту трансп. Серія: Економіка і управління. – Київ, 2015. – Вип. 33. – С. 70–77.
2. Дегтяр, А. О. Особливості формування стратегії розвитку залізничного транспорту України / А. О. Дегтяр // Сучасні проблеми державного управління в умовах системних змін. Серія: Державне управління : зб. наук. пр. Донец. держ. ун-ту управління. – Маріуполь, 2016. – Вип. 298, т. XVII. – С. 5–11.
3. Дейнека, О. Г. Проблеми реформування залізничного транспорту України / О. Г. Дейнека, М. С. Маковський // Зб. наук. пр. Укр. держ. акад. заліз. трансп. – Харків, 2015. – Вип. 158, т. 1. – С. 57–62.
4. Компаниец, В. В. Стратегия развития железнодорожного транспорта: анализ системных ошибок и их последствий (история и современность внедрения рыночной парадигмы) / В. В. Компаниец // Вісник економіки транспорту і промисловості. – 2017. – № 58. – С. 109–117.
5. Моделі функціонування залізничних перевезень. Огляд іноземного досвіду [Electronic resource] : Інформаційна довідка, підготовлена Європейським інформаційно-дослідницьким центром на запит народного депутата України / К. Пенюкова, Ю. Кривінчук, К. Прядко. – Available at: <http://euinfocenter.rada.gov.ua/uploads/documents/29219.pdf> – Title from the screen. – Accessed : 31.05.2018.
6. Матвієнко, В. В. Механізм державного управління розвитком залізничної галузі в Україні : дис. ... канд. наук з державного управління : 25.00.02 / Матвієнко Володимир Васильович ; Донец. держ. ун-т управління. – Маріуполь, 2017. – 256 с.
7. Мохова, Ю. Л. Стратегія розвитку державного регулювання залізничної галузі в Україні / Ю. Л. Мохова // Проблеми і перспективи економіки та управління. – 2016. – № 3 (7). – С. 90–95.
8. Основні аспекти стратегії розвитку ПАТ «Укрзалізниця» 2017–2021 роки [Electronic resource] : затв. правлінням ПАТ «Укрзалізниця» 26.04.2017 р. – Available at: [https://www.uz.gov.ua/files/file/Strategy\\_Presentation\\_fin1.pdf](https://www.uz.gov.ua/files/file/Strategy_Presentation_fin1.pdf) – Title from the screen. – Accessed : 31.05.2018.
9. Про інвестиційну діяльність [Electronic resource] : Закон України від 18.09.1991 р. № 1561-XII. – Available at: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/1560-12> – Title from the screen. – Accessed : 31.05.2018.

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

10. Про утворення публічного акціонерного товариства «Українська залізниця» [Electronic resource] : Постанова Кабінету Міністрів України від 25 червня 2014 р. № 200. – Київ, 2015. – Available at: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/200-2014-%D0%BF> – Title from the screen. – Accessed : 31.05.2018.
11. Секретный, «перспективный» план развития Укрзалізнички 2017–2025 от Бальчуна [Electronic resource]. – Available at: <http://blacklistuz.blogspot.com> – Title from the screen. – Accessed : 31.05.2018.
12. Статистичні дані про Українські залізниці [Electronic resource] : М-во інфраструктури України. – 2016. – Available at: <http://mtu.gov.ua/content/statistichni-dani-pro-ukrainski-zaliznici.html> – Title from the screen. – Accessed : 31.05.2018.
13. Шемаєв, В. В. Проблеми реформування залізничного транспорту на прикладі ПАТ «Українська залізниця» / В. В. Шемаєв // Стратегічні пріоритети. – 2016. – № 3 (40). – С. 263–268.
14. Alexandersson, G. Lessons learnt from railway deregulation and tendering in Sweden [Electronic resource] / Gunnar Alexandersson. – 2016. – Available at: <http://bit.ly/2s0G8CI> – Title from the screen. – Accessed : 31.05.2018.
15. Corporate Credit Risk Premia / A. Berndt, R. Douglas, D. Duffie, M. Ferguson // Review of Finance. – 2018. – Vol. 22. – Iss. 2. – P. 419–454. doi: 10.1093/rof/rfy002
16. Fitzova, H. European railway reforms and efficiency: Review of evidence in the literature / H. Fitzova // Review of economic perspectives. – 2017. – Vol. 17. – Iss. 2. – P. 103–120. doi: 10.1515/revecp-2017-0005
17. Hongbin, H. Investor sentiment, property nature and corporate investment efficiency: Based on the mediation mechanism in credit financing / Hongbin Huang, Guanghui Jin, Jingnan Chen // China Finance Review International. – 2016. – Vol. 6. – Iss. 1. – P. 56–76. doi: 10.1108/CFRI-09-2015-0123
18. Nikitinas, V. The Models of Management of Railway Companies in the European Union: Holding, the German Experience / Vilijus Nikitinas, Stasys Dailydka // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 134. – P. 80–84. doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.042
19. Seifzadeh, P. Corporate controls, geographic dispersion, and their effect on corporate financial performance in related diversified corporations / Pouya Seifzadeh // Journal of Strategy and Management. – 2017. – Vol. 10. – Iss. 1. – P. 102–117. doi: 10.1108/JSMA-10-2015-0079
20. Thompson, L. The benefits of separating rail infrastructure from operations [Electronic resource] / Louis S. Thompson // Viewpoint. – 1997. – December (135). – Available at: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/11562> – Title from the screen. – Accessed : 31.05.2018.

I. М. ЛОМТЄВА<sup>1\*</sup>, М. П. СНАЧОВ<sup>2</sup>, О. А. ТОПОРКОВА<sup>3</sup>, Л. А. ШИЛО<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Облік і оподаткування», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (096) 226 95 66, ел. пошта irinalomteva72@gmail.com, ORCID 0000-0003-2838-3851

<sup>2</sup>Каф. «Облік і оподаткування», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 69, ел. пошта snachov49@gmail.com, ORCID 0000-0001-7908-0362

<sup>3</sup>Каф. «Облік і оподаткування», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 69, ел. пошта toporkova1975@gmail.com, ORCID 0000-0003-0956-3638

<sup>4</sup>Каф. «Облік і оподаткування», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 69, ел. пошта shilomail@yandex.ru, ORCID 0000-0003-3235-1377

## ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ФІНАНСОВИХ РЕСУРСІВ ПАТ «УКРАЇНСЬКА ЗАЛІЗНИЦЯ»

**Мета.** Необхідність технологічної модернізації залізничної галузі України, створення сприятливих умов для інвестування та впровадження інновацій у галузі потребують значних фінансових ресурсів. Використання на залізничному транспорті ефективних методів фінансування набуває особливої актуальності в процесі реалізації стратегії розвитку галузі. Метою статті є дослідження можливих джерел залучення фінансових ресурсів, необхідних для розвитку залізничного транспорту в Україні, зокрема, під час проведення подальших організаційних заходів і процедур щодо акціонування залізничної галузі з метою пошуку шляхів їх оптимізації. **Методика.** У процесі дослідження використані методи порівняння, наукового пошуку, аналізу й синтезу для вивчення наявних джерел фінансування діяльності корпорацій за кордоном та на підприємств-

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

вах України. **Результати.** Проведено аналіз наявних і пошук більш ефективних джерел формування фінансових ресурсів, необхідних для фінансування модернізації залізничного транспорту в Україні в процесі акціонування залізничної галузі. Зростання частки фінансових результатів у сумі внутрішніх власних ресурсів досягається шляхом проведення заходів зі збільшення чистого прибутку. Значну частину фінансування господарської діяльності можна забезпечити за рахунок емісії корпоративних облігацій за умови наявності позитивного ефекту фінансового важеля. Урахування ефекту фінансового важеля є ефективним інструментом оптимізації структури акціонерного капіталу та визначення доцільності залучення позикових ресурсів. У процесі акціонування ПАТ «Українська залізниця» повинна створити ефективну систему фінансових ресурсів, яка б повною мірою враховувала особливості її діяльності, мотивувала до підвищення продуктивності праці з кінцевою метою – забезпечити зовнішню конкурентоспроможність залізничної галузі України. **Наукова новизна.** На основі вивчення наукових і методичних джерел та на базі аналізу джерел фінансування господарської діяльності залізничного транспорту запропоновані шляхи їх оптимізації. **Практична значимість.** Упровадження запропонованих підходів дозволить обґрунтувати економічну доцільність і пропорції внутрішніх та зовнішніх джерел фінансування залізничного транспорту в умовах корпоратизації.

*Ключові слова:* реформування залізничного транспорту; акціонування залізниці; джерело фінансування; корпоративні облігації; власний капітал; позиковий капітал; ефект фінансового важеля

И. Н. ЛОМТЕВА<sup>1\*</sup>, Н. П. СНАЧЕВ<sup>2</sup>, Е. А. ТОПОРКОВА<sup>3</sup>, Л. А. ШИЛО<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Учет и налогообложение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38(096) 226 95 66, эл. почта irinalomteva72@gmail.com, ORCID 0000-0003-2838-3851

<sup>2</sup>Каф. «Учет и налогообложение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 69, эл. почта snachov49@gmail.com, ORCID 0000-0001-7908-0362

<sup>3</sup>Каф. «Учет и налогообложение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 69, эл. почта toporkova1975@gmail.com, ORCID 0000-0003-0956-3638

<sup>4</sup>Каф. «Учет и налогообложение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 69, эл. почта shilomail@yandex.ru, ORCID 0000-0003-3235-1377

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ФИНАНСОВЫХ РЕСУРСОВ ПАО «УКРАИНСКАЯ ЖЕЛЕЗНАЯ ДОРОГА»

**Цель.** Необходимость технологичной модернизации железнодорожной отрасли Украины, создание благоприятных условий для инвестирования и внедрение инноваций в отрасли требуют значительных финансовых ресурсов. Цель статьи – исследование возможных источников привлечения финансовых ресурсов, необходимых для развития железнодорожного транспорта Украины, в частности, при проведении дальнейших организационных мероприятий и процедур акционирования железнодорожной отрасли с целью поиска путей их оптимизации. **Методика.** В процессе исследования использованы методы сравнения, научного поиска, анализа и синтеза для изучения существующих источников финансирования корпораций за рубежом и на предприятиях Украины. **Результаты.** Проведен анализ существующих и поиск более эффективных источников формирования финансовых ресурсов, необходимых для финансирования модернизации железнодорожного транспорта в Украине в процессе акционирования железнодорожной отрасли. Рост доли финансовых результатов в сумме внутренних собственных ресурсов достигается путем проведения мероприятий по увеличению прибыли. Значительную часть финансирования хозяйственной деятельности возможно обеспечить за счет эмиссии корпоративных облигаций при наличии положительного эффекта финансового рычага. Учет эффекта финансового рычага является эффективным инструментом оптимизации структуры акционерного капитала и определения целесообразности привлечения заемных ресурсов. В процессе акционирования ПАО «Украинская железная дорога» должна создать эффективную систему финансовых ресурсов, которая бы в полной мере учитывала особенности ее деятельности, мотивировала к повышению производительности труда с конечной целью – обеспечить внешнюю конкурентоспособность железнодорожной отрасли Украины. **Научная новизна.** На основании изучения научных и методических источников, а также анализа источников финансирования хозяйственной деятельности железнодорожного транспорта предложены пути их

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

оптимізації. **Практическая значимость.** Внедрение предложенных подходов позволит обосновать экономическую целесообразность и пропорциональность внутренних и внешних источников финансирования железнодорожного транспорта в условиях корпоратизации.

**Ключевые слова:** реформирование железнодорожного транспорта; акционирование железной дороги; источник финансирования; корпоративные облигации; собственный капитал; заемный капитал; эффект финансового рычага

## REFERENCES

1. Hudkova, V., & Tiutiun, Y. (2015). Strukturno-funktsionalnyi analiz derzhavnoho rehuliuвання rozvytku zaliznychnoho transportu. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho ekonomiko-tehnolohichnoho universytetu transportu. Seriya: Ekonomika i upravlinnia*, 33, 70-77. (in Ukrainian)
2. Diehtiar, A. O. (2016). Osoblyvosti formuvannya stratehii rozvytku zaliznychnoho transportu Ukrainy. *Zbirnyk naukovykh prats Donetskoho derzhavnoho universytetu upravlinnia. Seriya: "Derzhavne upravlinnia"*, 298 (XVII), 5-11. (in Ukrainian)
3. Deineka, O. H., & Makovskiy, M. S. (2015). Problems of reform of ukraine railway trasnport. *Collected scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 158(1), 57-62. (in Ukrainian)
4. Kompaniets, V. V. (2017). Strategy for railway transport development: analysis of system errors and their consequences (history and the present time of implementation of the market paradigm). *The bulletin of transport and industry*, 58, 109-117. (in Ukrainian)
5. Penkova, K., Kryvinchuk, Y., & Priadko, K. (n.d.) Modeli funktsionuvannya zaliznychnykh perevezhen. Ohliad inozemnoho dosvidu: Info-rmatsiina dovidka, pidgotovlena Yevropeiskym informatsiino-doslidnytskym tsentrom na zapyt narodnoho deputata Ukrainy. Retrived from: <http://eufocenter.rada.gov.ua/uploads/documents/29219.pdf> (in Ukrainian)
6. Matviienko, V. V. (2017). *Mekhanizm derzhavnoho upravlinnia rozvytkom zaliznychnoi haluzi v Ukraini* (dysertatsiia kandydata nauk z derzhavnoho upravlinnia). Donetskyy derzhavnyi universytet upravlinnia, Mariupol. (in Ukrainian)
7. Makhova, Y. L. (2016). Strategy of development of government regulation of railway industry in Ukraine. *Problems and prospects of economics and management*, 3(7), 90-95. (in Ukrainian)
8. Osnovni aspekty stratehii rozvytku PAT «Ukrzaliznytsia» 2017–2021 roky. (n.d.). Retrived from: [https://www.uz.gov.ua/files/file/Strategy\\_Presentation\\_fin1.pdf](https://www.uz.gov.ua/files/file/Strategy_Presentation_fin1.pdf). (in Ukrainian)
9. Pro Investytsiinu Diialnist: Zakon Ukrainy 1991, № 1561-XII. (1991). Retrived from: <http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=1560-12> (in Ukrainian)
10. Pro utvorennia publichnoho aktsionernoho tovarystva «Ukrainska zaliznytsia»: Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy 2014, № 200. (2015). Retrived from: <http://zakon4.rada.gov.ua /laws/show/200-2014-%D0%BF> (in Ukrainian)
11. Sekretnyy, «perspektivnyy» plan razvitiya Ukrzaliznytsi 2017–2025 ot Balchuna (2018, May 31). Retrived from: <http://blacklistuz.blogspot.com> (in Russian)
12. Statystychni dani pro Ukrainski zaliznytsi (2018, May 31). Retrived from: <http://mtu.gov.ua/content/statistichni-dani-pro-ukrainski-zaliznici.html> (in Ukrainian)
13. Shemayev, V. V. (2016). Problems of the railway transport reform: a case study of PJSC «ukrainian railway». *Stratehichni priorytety*, 3(40), 263-268. (in Ukrainian)
14. Alexandersson G. (2016). Lessons learnt from railway deregulation and tendering in Sweden. Retrived from: <http://bit.ly/2s0G8CI> (in English)
15. Berndt, A., Douglas, R., Duffie, D., & Ferguson, M. (2018). Corporate Credit Risk Premia. *Review of Finance*, 22(2), 419-454. doi: 10.1093/rof/rfy002 (in English)
16. Fitzova, H. (2017). European railway reforms and efficiency: Review of evidence in the literature *Review of economic perspectives*, 17(2), 103-120. doi: 10.1515/revecp-2017-0005 (in English)
17. Hongbin, H., Guanghui, J., & Jingnan, C. (2016). Investor sentiment, property nature and corporate investment efficiency: Based on the mediation mechanism in credit financing. *China Finance Review International*, 6(1), 56-76. doi: 10.1108/CFRI-09-2015-0123 (in English)
18. Nikitinas, V. & Dailydka, S. (2016). The Models of Management of Railway Companies in the European Union: Holding, the German Experience. *Procedia Engineering*, 134, 80-84. doi:10.1016/j.proeng.2016.01.042 (in English)

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

---

19. Seifzadeh, P. (2017). Corporate controls, geographic dispersion, and their effect on corporate financial performance in related diversified corporations. *Journal of Strategy and Management*, 10(1), 102-117. doi: 10.1108/JSMA-10-2015-0079 (in English)
20. Thompson, L. (1997). The benefits of separating rail infrastructure from operations. *Wievpoint*, December (135). Retrived from: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/11562> (in English)

*Prof. V. V. Bobyl, Dr.Sc.Oec. (Ukraine) recommended this article to be published*

Received: Feb. 28, 2018

Accepted: May 25, 2018

# ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

UDC 621.336

D. V. USTYMENKO<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

## PHYSICO-TECHNOLOGICAL ASPECTS OF WORK OF LUBRICANT FILMS IN THE TRIBOSYSTEM «OVERHEAD LINE – CURRENT COLLECTOR CONTACT STRIP»

**Purpose.** The article aimed at comprehensive analysis of the processes occurring in the lubricant films of the friction surfaces of the tribosystem «overhead line – current collector contact strip» (OLCCCS) and identification of the features of such systems. **Methodology.** The systematic analysis was used as the main methodology for studying the physico-technological aspects of work of the lubricant films in the tribosystem «overhead line – current collector contact strip». **Findings.** The theory of electro-friction interaction is now at such a stage that is characterized by a large amount of accumulated empirical data, hypotheses and models that cannot adequately represent phenomena in a sliding, high-current electrical contact. The sliding electrical contact of the tribosystem «overhead line – current collector contact strip» during the operation is affected by many factors, one of which is the processes in the lubricating layers of the friction pair. The work leads to a new level of understanding of the peculiarities of the processes occurring in the lubricating layers and their effect on the work of a sliding, high-current electrical contact, which can become the guarantee of significant increase in the efficiency of such systems and, as a consequence, substantially increase the reliability and safety of the work of the electric stock. **Originality.** It is proposed to consider the processes of electro-friction interaction of electrical contacts from the position of synergy using the theory of fractals as the core one for the quantitative description of self-organizing structures. **Practical value.** Taking into account the empirical experience of operation of the tribosystem «overhead line – current collector contact strip» in combination with theoretical knowledge allows us to propose three possible directions for solving tribological problems in high-current sliding electrical contacts. They are: 1) change in contact geometry and surface topography, for example, the use of regular macrorelief of contact surfaces; 2) development of conductive composites which are characterised with self-lubrication, for example the use of composite materials containing solid conductive lubricants; 3) development of effective lubricants for electric high-current sliding contacts, which may require some complication of the component design.

**Keywords:** contact pair; current collection; overhead line; wear rate; limit friction; contact transient resistance; current collector contact strip

### Introduction

The «current collector – overhead line» system has an important task of transmitting energy from the power grid to the vehicle board. Consequently, a reliable electrical contact between the current collector and the overhead line is directly related to the reliability of operation and the safety of train movement. During operation, the overhead line and the contact strip of the current collector are

exposed to multiple sliding friction, heating, erosion, etc., which makes the evolution of the contact quite complicated. An important role in the sliding contact operation is played by the antifriction lubrication.

### Purpose

The main purpose of the work is a comprehensive analysis of the processes in the lubricant films of the friction surfaces of the tribosystem «over-

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

head line – current collector contact strip» (OLCCCS) and the identification of features of such systems.

Studies aimed at determining the peculiarities of the processes occurring in the lubricating layers of the friction surfaces of the tribosystem of OLCCCS should be considered relevant in scientific and practical terms, since taking into account these features can provide a significant increase in the efficiency of tribosystems of this class [3, 4, 14, 15].

### Methodology

To achieve the purpose set forth in the work, it is envisaged to study the physico-technological aspects of the work of the lubricating layers in the tribosystem «overhead line – current collector contact strip». The system method is used as the main methodology.

### Findings

The theory of friction and wear of surface layers under conditions of boundary lubrication was studied in the works by Kostetsky B. I. [7], Bauden F. P. and D. Tabor [5], Kragelskiy I. V. [8] Ahmatov O. S. [2], Chichinadze A. V. [13].

It is known that the work of sliding contacts is closely related to friction and wear. Therefore, it is necessary to consider not only the electrical properties of the sliding contacts, but also the phenomenon of friction and wear. In the general case, if the two purified surfaces are brought into contact at the interatomic distance, then the same gravity forces as in the volume of the material act between them. Several types of forces can be distinguished:

- ionic bond occurs between anions and cations that are held by electrostatic forces;
- covalent (homopolar) bond between neutral atoms is accomplished by overlapping their electron fields, which leads to the emergence of a strong bond;
- metallic bond is characteristic of all metals and is due to the presence of electrons, which move freely between the ion lattice sites;
- Van der Walsh bond can occur between any atoms or molecules due to dipole-dipole interaction.

Each atom in the material volume interacts with its closest neighbours by means of the above forces. The specific energy associated with this interaction is called cohesive energy and it plays an important role in the processes of friction and wear. Atoms on

the surface have fewer neighbours, respectively, they do not have bonds outside the body (Fig. 1) [10]. For this reason, the surface of the solid has some impractical energy, which determines the surface's ability to form adhesive compounds.

The presence of surface energy causes the interaction of the surface with the environment (including with lubricants), which is called adsorption and leads to the formation of boundary layers. As a result of adsorption on the surface there are always elements of adjacent phases.

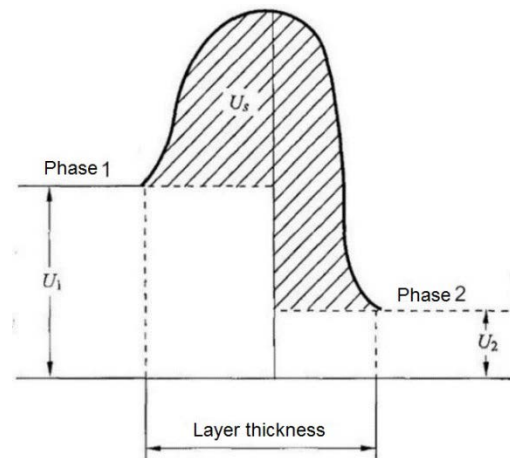


Fig. 1. Energy of boundary layer  $U_s$  when contacting two phases 1 and 2, having the surface energy  $U_1$  and  $U_2$  (by Kashchev)

Physical adsorption is characterised with Van der Walsh interaction of adsorbate with the body surface. The polymolecular adsorption layers formed on the surface are relatively easily removed.

In the process of chemical adsorption, the energy of interaction is quite large, and on the surface there is usually formed a monolayer that is difficult to remove.

Thus, the adsorption activity of surfaces leads to the fact that they form a thin boundary layer, which differs in structure and properties from the surface (transition) layer of a solid. The physical state of matter of such a boundary layer may be different and depends both on the parameters of the state (temperature, pressure, etc.) and on the nature of the interaction with the solid phase.

Adhesion of the rubbing surfaces in many respects determines the patterns of friction and wear. Surface layers undergo various changes during friction; these changes can be both inverse and irreversible.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

ble, causing wear, seizure and other phenomena.

The primary source of these processes, and in some cases the main reason, is the stress-deformed and the thermal state of frictional contact.

Friction in the conditions of boundary lubrication is accompanied by the formation between the working surfaces of a thin layer of lubricant, which acquires the properties of the «third body» (according to Kragelskyi I. V. [5, 8]).

According to DSTU 2823-94, the term «boundary friction» is to be understood as «lubrication in which conditions of friction and wear of surfaces moving in relation to one another are determined by their properties, as well as by the properties of the lubricant, which differ from the bulk viscosity of the lubricant material».

The term «lubricating layers» of lubricants still has no unambiguous interpretation within the limits of DSTU, but in generalized form it is interpreted as follows: the lubricating layers of lubricants on solid lyophilic surfaces are «quasicrystalline molecular layers with a multimolecular epitropo-liquid-crystalline structure» [1].

The lubricant in the boundary layer is anisotropic, so the molecular layers in the tangential direction slip one relative to the other. In the normal direction to the surface of friction the bearing capacity of the boundary layer is high and the deformation of its compression is within the limits of elasticity.

Friction with a semifluid lubricant occurs in the case of simultaneous action of liquid and boundary lubrication. The normal load is balanced by the compression resistance of the lubricant film in contact spots and the forces of hydrodynamic pressure in the layers of lubrication. The share of the reaction of boundary or liquid lubricant depends on the load, the speed of the mutual slip of the surfaces,

the state of the surfaces, as well as the amount and viscosity of the lubricant. The hydrodynamic effect of the lubricant is manifested when it enters the macrogeometric gap between the friction surfaces.

To date, a wide range of models of tribological systems (friction without transmission of electric current) has been considered in detail, and a system of indicators of contact interaction, as well as methods for their determination, has been developed. The geometric characteristics of surfaces are introduced: macro-deviation, wavelength, roughness, submicroroughness; characteristics of contact areas – visible, contour, actual; types of contacts – elastic, elastic-plastic, plastic, etc. [13].

One of the contact elements (overhead line) is made of metal in the friction pair of OLCCCS, the main material of the second contact element (current collector contact strip) is solid-lubricating electrically conductive compositions of four basic types: metal graphite, graphite, carbon graphite and electro-graphite. Such compositions are characterised with the formation of friction of transferred films on a metal counterbody.

Experimental studies have shown that the thickness, composition and structure of the transferred films are interrelated with the external parameters of the sliding contact (load, speed), composition of the composite, counterbody and the environment [11]. At the same time, the film determines the mechanism of passing the current, and, respectively, the electrical characteristics of the contact, the nature and intensity of heat dissipation. The film thickness and the degree of coating of the metal counterbody inequality are, from this point of view, the most important factors of its effect, as illustrated in Fig. 2.

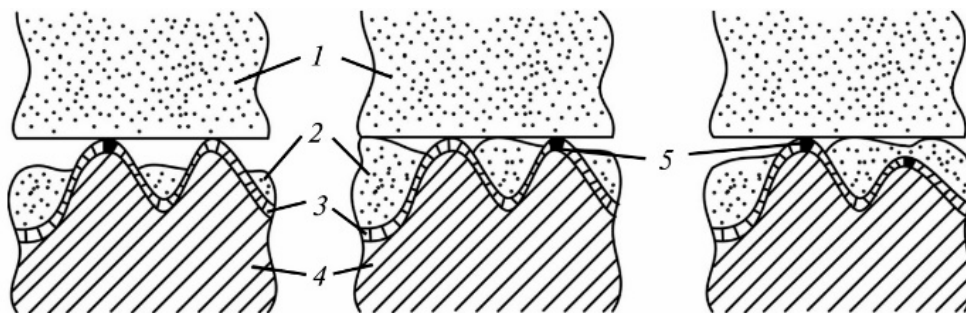


Fig. 2. Models of transition layer on the metal surface oxidized when working in pairs with self-lubricating contact material:

1 – self-lubricating contact material; 2 – transferred material; 3 – film of oxides; 4 – metal; 5 – areas with tunnel-conductive or destroyed oxide film

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

The electric current can be considered as an additional external parameter of the tribosystem, which affects all characteristics of the sliding contact. This effect in many cases is so significant that the concept of «lubricating action» of electric current (reduction of frictional force with increased current density) and «electrical» wear (excessive wear of elements of a sliding contact in comparison with so-called mechanical wear in the absence of current) are specially introduced.

In carbon graphite and electro-graphite overlays, the increase in the current density, which passes through the contact, as a result of heat dissipation, reduces the strength of the surface layer and its shift resistance that results in the effect similar to the lubricant introduction into the contact. This effect is reversed.

For graphite brushes having a relatively high (up to 25% by weight) content of non-carbonated (polymeric) binder, the «lubrication effect» above a certain critical current density is irreversible and is expressed rather sharply, since heat dissipation causes the destruction of the binding material and composition.

When applying metal-graphite materials with high metal content (weight percent – up to 90%), the effect of current density on the friction coefficient is practically non-existent and only with high current density (more than 20 A/cm<sup>2</sup>) the friction coefficient increases slightly. In such materials, the amount of transferred material on the counterbody is insignificant, and the frictional behaviour of such compositions is close to the behaviour of metals.

It is difficult to predict the intensity of contact wear by the current density magnitude due to the variety of current factors and the complex nature of their interconnection. The main factors of wear in the absence of electric sparking and arc formation are as follows: oxidation of the metal element of friction pair; growth of adhesion due to the dissociation of films of water or organic matter under the action of current; oxidation of the composite element of friction pair and weakening of its strength; emergence of shock-thermal stresses in a dynamic contact due to the uneven distribution of the current density in it [9, 11, 12]. All factors can act simultaneously and their main root cause is the heat release on the transient contact resistance. In the case of sparking or arc formation, the listed

factors are added with electroerosion and emissions of contact material in the arc discharge, which increase the intensity of wear.

In the contact, the total surface of the section is divided into many individual spots. In this connection, when the energy flow passes through such a surface there is the additional resistance introduced by the violation of the homogeneity of the flow lines – the constriction resistance. It is added, in general, with resistance of the films of the following varieties: adhesive films, passive films, tarnish films (oxide, sulfide), water films, films from wear products [6].

Each component of the heterogeneity of the contact zone corresponds to the component of the total constriction resistance [6]. Holm proposed to take into account the two components, corresponding to the constriction to the group of spots and constriction within the boundaries of this group. For bodies with the same specific resistance  $\rho$ , which have one group of round, uniformly distributed spots, the following expression is obtained:

$$R_c = R_1 + R_2 = \rho \cdot \left( \frac{1}{2na} + \frac{1}{2a_k} \right), \quad (1)$$

where  $n$  – total number of contact spots;  $a$  – spot radius;  $a_k$  – radius of circle encompassing the contact spots;  $R_1, R_2$  – components of resistance, which correspond to the constriction of spots and their groups.

Greenwood [16] clarified the second term of expression (1):

$$R_c = R_1 + R_2 = \rho \cdot \left( \frac{1}{2na} + \frac{16}{3\pi^2 a_k} \right), \quad (2)$$

and it is shown that its value is practically the same for any placement of contact spots in the general group.

The Greenwood formula has also been expanded by members that take into account the asymmetry of the distribution of groups of spots on each other, as well as the distribution of groups on the nominal area [18].

In the process of current collecting, the overhead line and the contact element are heated, with the importance of the relationship between the energy of the losses ( $A_l$ ) and the heat dissipation ( $A_{hd}$ ) that is released into the environment. With

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

a certain limit value  $\Delta A = A_l - A_{hd}$ , the preconditions are created, which leads to plastic deformation of the contact surfaces with subsequent melting.

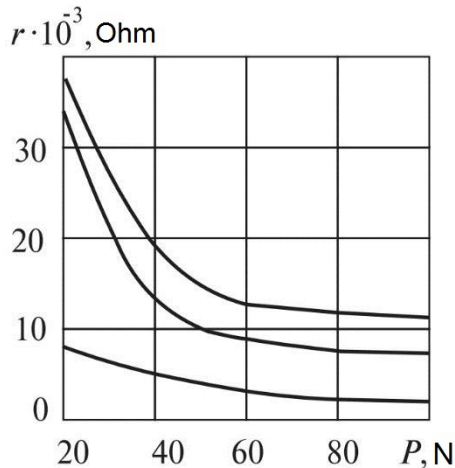


Fig. 3. Dependence of transient resistance on the pressing force for different materials

One of the main indicators of the quality of electrical contact is the drop in voltage  $\Delta U$  on it:

$$\Delta U = I \cdot r, \quad (3)$$

where  $I$  – current through contacts,  $r$  – transient resistance of the contact pair.

Of course, the value of the transient resistance of the contact pair of OLCCCS is affected by the contact press; the change of the contact pressure even within the permissible limits is accompanied by a change in the transient resistance, illustrating the dependence on Fig. 3 [11].

Increasing the transient resistance of the contact pair, for one reason or another, leads to growth of  $\Delta A$ .

An increase in the actual contact area in the friction pair helps to reduce the transient resistance  $r$ . Thus, using contact resistance and topography relationship data, we can give recommendations for constructing contacts, for example, the use of a regular macrorelief of contact surfaces.

From the standpoint of materials, several methods are used to improve the reliability of sliding contacts and their life extension. Common to them is the use of contact materials with a thin transition layer, for example the use of composite materials containing solid electrically conductive lubricants. The problem of developing lubricants for sliding

contacts with relatively high speeds is currently not resolved.

The theory of electro-friction interaction is now at such a stage that is characterized by a large amount of accumulated empirical data, hypotheses and models that cannot adequately represent phenomena being studied. To date, the theory of self-organized systems – synergetics and the theory of fractals – self-similar evolutionary structures are rapidly developing, which are not described within the framework of Euclidean geometry.

Synergetics studies the processes of self-organization, stability and decay of structures of different nature, which are formed in open systems, an ordered state associated with the coordinated behaviour of subsystems. This leads to the formation of organized structures as a result of the exchange of energy and matter with the environment, when the equilibrium between production and reduction of entropy is established. The theory of fractals is the basis for the quantitative description of self-organizing structures [17, 19].

### Originality and practical value

So far there is no single point of view concerning the problem of the mechanism of transmission of electric current through a sliding contact.

The qualitative development of the theory of electrical contacts can give consideration to the processes of electro-friction interaction from the position of synergy and the theory of fractals. Since the sliding electric contact is an open system, and in the transition layer, the evolutionary processes of the origin and collapse of conductor clusters take place.

In the technological aspect, three main directions of solving tribological problems in electrical contacts can be distinguished: change in contact geometry and surface topography; development of conductive composites for which self-lubrication is characteristic; development of effective lubricants for electrical contacts.

### Conclusions

The work leads to a new level of understanding of the peculiarities of the processes occurring in the lubricating layers and their influence on the work of the moving electrical contact.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Consideration of the processes of electrofrictional interaction of sliding contacts from the position of synergetics, where the theory of fractals is the basis for the quantitative description of struc-

tures, will contribute to the qualitative development of the theory of electrical contacts, which in practical terms can ensure the significant performance enhancement of such systems.

## LIST OF REFERENCE LINKS

1. Алтоиз, Б. А. Структурированные приповерхностные слои нормальных алканов / Б. А. Алтоиз, С. В. Кириян // Инженерно-физ. журн. – 2010. – Т. 83, № 3. – С. 608–613.
2. Ахматов, А. С. Молекулярная физика граничного трения / А. С. Ахматов. – Москва : Физ-матгиз, 1963. – 472 с.
3. Большаков, Ю. Л. Дослідження властивостей струмознімальних елементів та їх впливу на ефективність роботи трибосистеми «контактний провід – вугільна вставка» / Ю. Л. Большаков, А. В. Антонов // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 6 (60). – С. 35–44. doi: 10.15802/stp2015/57006
4. Большаков, Ю. Л. Підвищення ресурсу вугільних струмознімальних вставок струмоприймачів швидкісного електрорухомого складу в умовах експлуатації / Ю. Л. Большаков, А. В. Антонов // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 4 (58). – С. 57–70. doi: 10.15802/stp2015/49205
5. Боуден, Ф. П. Трение и смазка твердых тел / Ф. П. Боуден, Д. Тейбор. – Москва : Машиностроение, 1968. – 543 с.
6. Кончиц, В. В. Триботехника электрических контактов / В. В. Кончиц, В. В. Мешков, В. В. Мышкин ; под ред. В. А. Белого. – Минск : Наука и техника, 1986. – 256 с.
7. Костецкий, Б. И. Износостойкость деталей машин / Б. И. Костецкий. – Киев : Машгиз, 1950. – 168 с.
8. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – Москва : Машиностроение, 1977. – 526 с.
9. Методология комплексной оценки эксплуатационных качеств накладок токоприемников электроподвижного состава / В. Л. Горобец, Н. А. Бабяк, А. Ярмач, А. М. Бондарев // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2015. – № 1 (218). – С. 297–302.
10. Мышкин, Н. К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец. – Москва : Физматлит, 2007. – 368 с.
11. Сидоров, О. А. Исследование и прогнозирование износа контактных пар систем токосъема с жестким токопроводом : монография / О. А. Сидоров, С. А. Ступаков. – Москва : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2012. – 174 с.
12. Сидоров, О. А. К вопросу о прогнозировании износа элементов контактных пар устройств токосъема электроподвижного состава / О. А. Сидоров, В. М. Филиппов // Междунар. журн. приклад. и фундамент. исследований. – 2015. – № 12-8. – С. 1393–1397.
13. Справочник по триботехнике : в 3 т. / под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. – Москва : Машиностроение, 1989. – Т. 1: Теоретические основы. – 400 с.
14. Устименко, Д. В. Сучасний стан проблеми струмознімання на електрифікованих залізницях / Д. В. Устименко // Електрифікація транспорту. – 2016. – № 12. – С. 71–75.
15. Evolution of the electrical contact of dynamic pantograph–catenary system / Guangning Wu, Wenfu Wei, Guoqiang Gao, Jie Wu, Yue Zhou // Journal of Modern Transportation. – 2016. – Vol. 24. – Iss. 2. – P. 132–138. doi: 10.1007/s40534-016-0099-1
16. Greenwood, J. A. Constriction resistance and the real area of contact / J. A. Greenwood // British Journal of Applied Physics. – 1966. – Vol. 17. – Iss. 12. – P. 1621–1631. doi: 10.1088/0508-3443/17/12/310
17. Janahmadov, A. K. Synergetics and Fractals in Tribology / Ahad Kh Janahmadov, Maksim Y Javadov. – Cham : Springer, 2016. – 381 p. doi: 10.1007/978-3-319-28189-6
18. Jeng, D. R. Thermal Contact Resistance in Vacuum / D. R. Jeng // Journal of Heat Transfer. – 1967. – Vol. 89. – Iss. 3. – P. 275–276. doi: 10.1115/1.3614382
19. The Synergetic Effects of Surface Texturing and MoDDP Additive Applied to Ball-on-Disk Friction Subject to Both Flooded and Starved Lubrication Conditions / Linqing Bai, Yonggang Meng, Zulfiqar Ahmad Khan, Varian Zhang // Tribology Letters. – 2017. – Vol. 65. – Iss. 4. – P. 115–127. doi: 10.1007/s11249-017-0949-y

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Д. В. УСТИМЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

## ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ РОБОТИ ЗМАЩУВАЛЬНИХ ШАРІВ У ТРИБОСИСТЕМІ «КОНТАКТНИЙ ПРОВІД – КОНТАКТНА ВСТАВКА СТРУМОПРИЙМАЧА»

**Мета.** Головною метою роботи є всебічний аналіз процесів, що відбуваються в змащувальних шарах поверхонь тертя трибосистеми «контактний провід – контактна вставка струмоприймача» (КПКВС) та виявлення особливостей, характерних для систем цього класу. **Методика.** Для вивчення фізико-технологічних аспектів роботи змащувальних шарів у трибосистемі «контактний провід – контактна вставка струмоприймача» в якості основної методології застосовується системний аналіз. **Результати.** Теорія електрофрикційної взаємодії зараз перебуває на такому етапі, який характеризується великою кількістю нагромаджених емпіричних даних, гіпотез і моделей, котрі не можуть адекватно представити явища в ковзному сильнотривалому електричному контакті. Ковзний електричний контакт трибосистеми «контактний провід – контактна вставка струмоприймача» під час експлуатації піддається впливу багатьох факторів, одним із яких є процеси в змащувальних шарах пари тертя. Розуміння особливостей процесів, що протікають в змащувальних шарах, та їх впливу на роботу ковзного сильнотривалого електричного контакту може стати запорукою забезпечення суттєвого підвищення працездатності таких систем і, як наслідок, суттєво підвищити надійність і безпеку роботи електрорухомого складу. **Наукова новизна.** Пропонується розглядати процеси електрофрикційної взаємодії електричних контактів з позиції синергетики, застосовуючи теорію фракталів в якості базової для кількісного опису структур, що самоорганізуються. **Практична значимість.** Урахування емпіричного досвіду експлуатації трибосистеми «контактний провід – контактна вставка струмоприймача» в поєднанні з теоретичними знаннями дозволяє запропонувати три можливих напрямки вирішення трибологічних проблем у сильнотривалих ковзних електричних контактах. А саме: 1) зміну геометрії контакту й топографії поверхонь, наприклад, використання регулярного макрорельєфу поверхонь контакту; 2) розробку електропровідних композитів, для яких характерне самозмащування, наприклад, використання композиційних матеріалів, що містять тверді електропровідні мастила; 3) розробку ефективних мастил для електричних сильнотривалих ковзних контактів, що може потребувати деякого ускладнення конструкції вузла.

**Ключові слова:** контактна пара; струмознімання; контактний провід; інтенсивність зношування; граничне тертя; перехідний опір контакту; контактна вставка струмоприймача

Д. В. УСТИМЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Электротехника и электромеханика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, эл. почта ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

## ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАБОТЫ СМАЗОЧНЫХ СЛОЕВ В ТРИБОСИСТЕМЕ «КОНТАКТНЫЙ ПРОВОД – КОНТАКТНАЯ ВСТАВКА ТОКОПРИЕМНИКА»

**Цель.** Главной целью работы является всесторонний анализ процессов, происходящих в смазочных слоях поверхностей трения трибосистемы «контактный провод – контактная вставка токоприемника» (КПКВТ) и выявление особенностей, характерных для систем этого класса. **Методика.** При изучении физико-технологических аспектов работы смазочных слоев трибосистемы «контактный провод – контактная вставка токоприемника» в качестве основной методологии применяется системный анализ. **Результаты.** Теория электрофрикционного взаимодействия сейчас находится на этапе, характеризуемом большим количеством накопленных эмпирических данных, гипотез и моделей, которые не могут адекватно представить явления в скользящем сильноточном электрическом контакте. Скользящий электрический контакт трибосистемы

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

«контактный провод – контактная вставка токоприемника» в процессе эксплуатации подвергается воздействию многих факторов, одним из которых являются процессы в смазочных слоях пары трения. Понимание особенностей процессов, протекающих в смазочных слоях и их влияния на работу скользящего сильноточного электрического контакта, может стать залогом обеспечения существенного повышения работоспособности таких систем и, как следствие, существенно повысить надежность и безопасность работы электроподвижного состава. **Научная новизна.** Предлагается рассматривать процессы электрофрикционного взаимодействия электрических контактов с позиции синергетики, применяя теорию фракталов в качестве базовой для количественного описания самоорганизующихся структур. **Практическая значимость.** Учет эмпирического опыта эксплуатации трибосистемы «контактный провод – контактная вставка токоприемника» в сочетании с теоретическими знаниями позволяет предложить три возможных направления решения трибологических проблем в сильноточных скользящих электрических контактах. А именно: 1) изменение геометрии контакта и топографии поверхностей, например, использование регулярного макрорельефа поверхностей контакта; 2) разработка электропроводящих композитов для которых характерно самосмазывание, например, использование композиционных материалов, содержащих твердые электропроводящие смазки; 3) разработка эффективных смазок для электрических сильноточных скользящих контактов, что может потребовать некоторого усложнения конструкции узла.

**Ключевые слова:** контактная пара; токосъем; контактный провод; интенсивность износа; предельное трение; переходное сопротивление контакта; контактная вставка токоприемника

## REFERENCES

1. Altoiz, B. A., & Kiriyani, S. V. (2010). Strukturirovannye priпоverkhnostnye sloi normalnykh alkanov. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* 83(3), 608-613. (in Russian)
2. Akhmatov, A. S. (1963). *Molekulyarnaya fizika granichnogo treniya*. Moscow: Fizmatgiz. (in Russian)
3. Bolshakov, Y. L., & Antonov, A. V. (2015). Investigation of properties of current collector elements and their effect on the performance of tribosystem «contact wire–current collector element». *Science and Transport Progress*, 6(60), 35-44. doi: 10.15802/stp2015/57006 (in Ukrainian)
4. Bolshakov, Y. L., & Antonov, A. V. (2015). Increase the resource of current collector elements of the electrified high-speed transport in operating conditions. *Science and Transport Progress*, 4(58), 57-70. doi: 10.15802/stp2015/49205 (in Ukrainian)
5. Bouden F. P., & Teybor, D. (1968). *The friction and lubrication of solids*. Moscow: Mashinostroenie. (in Russian)
6. Konchits, V. V., Meshkov, V. V., & Myshkin, V. V. (1986) *Tribotekhnika elektricheskikh kontaktov*. Minsk: Nauka i tekhnika. (in Russian)
7. Kostetskiy, B. I. (1950). *Iznosostoykost detaley mashin*. Kiev: Mashgiz. (in Russian)
8. Kragelskiy, I. V., Dobychin, M. N., & Kombalov, V. S. (1977). *Osnovy raschetov na trenie i iznos*. Moscow: Mashinostroenie. (in Russian)
9. Horobets, V. L., Babyak, N. A., Yarmak, A. I., & Bondarev, A. M. (2015). Methodology of complex estimation of operating qualities of electric loco current collectors. *Visnik of the Volodymyr Dahl east ukrainian national university*, 1(218), 297-302. (in Russian)
10. Myshkin, N. K., & Petrokovets, M. I. (2007). *Trenie, smazka, iznos. Fizicheskie osnovy i tekhnicheskie prilozheniya tribologii*. Moscow: Fizmatlit. (in Russian)
11. Sidorov, O. A., & Stupakov, S. A. (2012). *Issledovanie i prognozirovanie iznosa kontaknykh par sistem tokosema s zhestkim tokoprovodom: monografiya*. Moscow: FGBOU «Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte». (in Russian)
12. Sidorov, O. A., & Philippov, V. M. (2015). The issue of forecasting elements wear contact pairs devices electric rolling current collection. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 12(8), 1393-1397. (in Russian)
13. Teoreticheskie osnovy. (1989). In M. Khebdy, & A. V. Chichinadze (Eds.), *Spravochnik po tribotekhnike: v 3 tomakh*. (p. 400). Moscow: Mashinostroenie. (in Russian)
14. Ustyenko, D. V. (2016). Current state of the problem on current collection of electrified railways. *Electrification of transport*, 12, 71-75. (in Ukrainian)
15. Guangning Wu, Wenfu Wei, Guoqiang Gao, Jie Wu, & Yue Zhou (2016). Evolution of the electrical contact of dynamic pantograph–catenary system. *Journal of Modern Transportation*, 24(2), 132-138. doi: 10.1007/s40534-016-0099-1 (in English)

---

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

---

16. Greenwood, J. A. (1966). Constriction resistance and the real area of contact. *British Journal of Applied Physics*, 17(12), 1621-1631. doi: 10.1088/0508-3443/17/12/310 (in English)
17. Janahmadov, A. K., & Javadov, M. Y. (2016). *Synergetics and fractals in tribology*. Springer. doi: 10.1007/978-3-319-28189-6 (in English)
18. Jeng, D. R. & Heat, J. (1967). Thermal Contact Resistance in Vacuum. *Transfer*, 89(3), 275. doi: 10.1115/1.3614382 (in English)
19. Linqing Bai, Yonggang Meng, Zulfiqar Ahmad Khan, & Varian Zhang (2017). The Synergetic Effects of Surface Texturing and MoDDP Additive Applied to Ball-on-Disk Friction Subject to Both Flooded and Starved Lubrication Conditions. *Tribol Lett*, 65(4), 115-127. doi: 10.1007/s11249-017-0949-y (in English)

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

Received: Feb. 14, 2018

Accepted: May 24, 2018

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

UDC 625.141-047.37

S. FISCHER<sup>1\*</sup>, A. NEMETH<sup>2\*</sup>, D. HARRACH<sup>3\*</sup>, E. JUHASZ<sup>4\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Transport Infrastructure», Szechenyi Istvan University, Egyetem Sq., 1, Gyor, Hungary, 9026, tel. + 36 (96) 613 544, e-mail fischersz@sze.hu, ORCID 0000-0001-7298-9960

<sup>2\*</sup>Dep. «Transport Infrastructure», Szechenyi Istvan University, Egyetem Sq., 1, Gyor, Hungary, 9026, tel. + 36 (96) 613 544, e-mail nemeth.attila@sze.hu, ORCID 0000-0002-3477-6902

<sup>3\*</sup>Dep. «Structural and Geotechnical Engineering», Szechenyi Istvan University, Egyetem Sq., 1, Gyor, Hungary, 9026, tel. + 36 (96) 613 541, e-mail harrach.daniel@sze.hu, ORCID 0000-0003-4819-8506

<sup>4\*</sup>Dep. «Transport Infrastructure», Szechenyi Istvan University, Egyetem Sq., 1, Gyor, Hungary, 9026, tel. + 36 (96) 613 544, e-mail era\_juhasz@hotmail.com, ORCID 0000-0002-5544-3146

### SPECIFIC ASSESSMENT METHOD OF RAILWAY BALLAST PARTICLE DEGRADATION BASED ON UNIQUE LABORATORY TEST

**Purpose.** There are specific, standardized laboratory test methods to assess railway ballast particle degradation; they are the Los Angeles (EN 1097-2) and the Micro-Deval abrasion (EN 1097-1) tests. These testing methods can't take into consideration the real railway stress-strain circumstances of ballast materials, and they particles. In this paper the authors represent a specific laboratory fatigue breakage test of railway ballast materials. With this kind of testing method, the deterioration process of railway ballast particles can be assessed more realistic and precisely.

**Methodology.** A special layer structure is built-up with elastic sublayer system and 30 cm thick ballast samples (from two different type andesite base rocks) that is loaded by dynamic, pulsating forces. Particle size distribution functions have to be recorded before and after a more million cycle fatigue test, but intermediate measurements are also executed. The measured data should be processed, and different parameters have to be calculated that are offered by international literature and researches. The test doesn't consider the particle breakage due to hand-made and machine-made tamping, but it can simulate particle degradation due to more years' railway traffic in laboratory circumstances.

**Findings.** There is a development after the R&D work made and published in 2014; in 2017 and 2018 years the ballast particle deterioration process is given according to more intermediate fatigue cycles with individual measurements, that show more precise «picture» about the full particle degradation, i.e. breakage process. The authors give more precise correlation functions between the calculated parameters and load cycles during fatigue. **Originality.** The paper summed up the results of a specific developed laboratory test method for assessment of the breakage process of railway ballast particles according to two different railway ballast materials from andesite base rocks. **Practical value.** The results help with the calculation of approximate time interval of required ballast screening (cleaning) work in the future. This research is supported by the ÚNKP-17-4 New National Excellence Program of Ministry of Human Capacities.

**Keywords:** railway ballast material; particle degradation & breakage; specific laboratory test method; dynamic fatigue test

#### Purpose

In the EU's 2014-2020 Finance Programme Hungarian railway construction and rehabilitation projects can be financed by more than thousand billion Hungarian Forints, from which quantity of money important railway projects can be executed. The important part of these projects is the ballast that is the most component of superstructure. In

nowadays practice it is obvious aspect that required quality ballast [3, 5, 13-22] is achievable in requested quantity.

In the followings the authors point to those criteria because of that the future view is more shaded, and which are prescribed that special rock physics tests (Los Angeles and Micro-Deval abrasion tests) are highly suggested with more real loading conditions than the standardised tests considering available stone-rock qualities' limits.

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

The grains' original – base rock-dependent – abrasion properties can be hardly modified by technology methods, these are mostly depending on «aggregate asset» and rocks' mechanical characteristics. In professional events more and more presentations are made about the fact that environmental, nature-reservational, heritage-protective, etc. regulations hitting the stone-mining industry aggravated year by year generally mean such restrictions [13, 14] on the access of the natural wealth that might lead to problems in base material supply and increasing quality hazard on the medium term.

The authors think it a base problem that the ability for railway ballast material is internationally required the Los Angeles abrasion and Micro-Deval abrasion tests [15, 16] in the product standard [17]. These laboratory tests are not able to simulate the real evolved stresses of railway ballast (it should be mentioned that in case of e.g. asphalt and concrete road pavements' «stone skeleton» [1, 10, 11] these laboratory tests are not the optimal solution, either). For the objective judgement of conformability special laboratory breakage test has to be used that consider the more real operation circumstances and stresses.

After the international literature review, the authors represent the own, unique solution for a special laboratory test procedure (method) that is able to simulate the stresses more realistic. The results are comparable to the conventional, standardised abrasion (degradation) tests [15, 16], the degradation qualifying parameters used internationally [8, 9, 12], as well as required cycle of ballast cleaning work [2, 12].

### Methodology

In 2014 an R&D was made with the finance support of Colas Északkő Ltd.; the public information were published in [6, 7]. Below these results are shortly detailed:

- there is no strong correlation between any degradation parameters and their change, as well as the measured and calculated rock mechanic parameters. This result wasn't unexpected because of the base assembly of laboratory tests (rotating steel drum filled with ballast particles with or without steel balls vs. a «box» filled with ballast, pulsated by dynamic cyclic force),

- in the article [4] the particle degradation due to tamping technology was examined in the labora-

tory, the authors of this paper weren't able to verify neither physical nor mathematical correlation between the Los Angeles abrasion value of the samples and the particles shape parameters,

- the time interval values of ballast cleaning-screening work were determined according to earlier experience data of MÁV (Hungarian Railways) and international literature [2, 12].

The authors have supplementary plans compared to the research executed in 2014: more accurate measurement of the variation of ballast grains' degradation as a function of pulsating cycles (or elapsed time during the fatigue test) with the manner detailed below:

- testing of minimum two types of ballast samples with different rock mechanic properties (ballast samples from Colas Északkő Ltd.),

- ballast sample #1:  $LA_{RB}=19\%$ ,  $M_{DE}RB=17\%$ ,

- ballast sample #2:  $LA_{RB}=16\%$ ,  $M_{DE}RB=4\%$ ,

- fatigue tests connected to railway ballast material samples, definition of PSD (particle size distribution) before and after fatigue tests with the following load cycles: 0.1 million; 0.2 million; 0.5 million; 1 million and 1.5 million; 3 million and 5 million (the authors modified the initial plan and they will execute measurements with maximum 5 million cycles, but in this way they don't have the opportunity to make measurements with 3 separate measures),

- separate ballast sample should be for each fatigue test, i.e. the test series will be like the following:

- ballast sample should be cleaned and washed (the particles more than 22.4 mm are needed for the tests),

- PSD should be determined (BP – before pulsating test),

- 0.1 million loading cycles should be utilized,

- PSD should be determined (AP – after pulsating test),

- the ballast sample has to be thrown away,

- another (new) ballast sample should be cleaned and washed (the grains more than 22.4 mm are needed for tests),

- PSD should be measured (BP – before pulsating test),

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

- 0.2 million loading cycles should be used,
  - PSD should be determined (AP – after pulsating test),
  - the ballast sample has to be thrown away,
  - etc. until 5 million loading cycles.
- $F_V$  [12], BBI [9] parameters have to be determined,
- grain quantity  $d < 22.4$  mm,  $d < 0.5$  mm,  $d < 0.063$  mm, the ratio  $d_{60}/d_{10}$ , moreover  $M$  and  $\lambda$  [8] parameters should be defined,
- the goal is to effort determine mathematical-physical trends and correlation between characteristics (see above point) and loading cycles of fatigue test.

The noticed measurements are also performed using of fresh railway ballast samples from andesite base rocks, as these measurements were executed in the research in 2014. The dynamic fatigue test series were able to be begun in March, 2018, the full results is able to be published in June, 2018.

## Findings

In this paper the authors are able to sentence the results until 3 million loading cycles, because the measurements with fatigue tests are done as follows:

- ballast sample No. 1: 0.1 million; 0.2 million; 0.5 million, 1.5 million and 3 million;
- ballast sample No. 2: 0.1 million; 0.2 million; 0.5 million, 1 million and 3 million.

Fig. 1–8 represent the calculated parameters as a function of number of loading cycles (all the particle size distribution functions are not published because of the limited content only the calculated parameters that can be calculated from that).

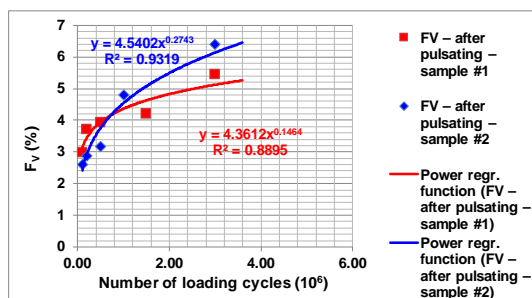


Fig. 1. Function of parameter  $F_V$  (%) as a function of number of loading cycles related to both ballast samples

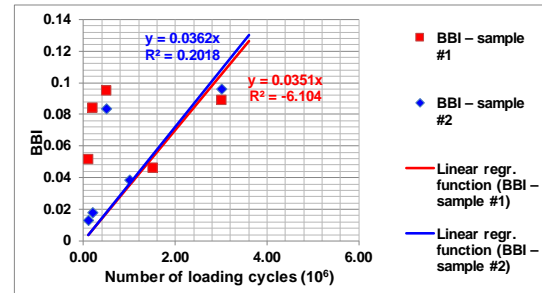


Fig. 2. Function of parameter BBI as a function of number of loading cycles related to both ballast samples

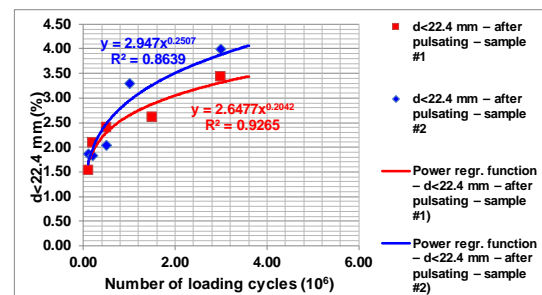


Fig. 3. Function of parameter  $d < 22.4$  mm (%) as a function of number of loading cycles related to both ballast samples

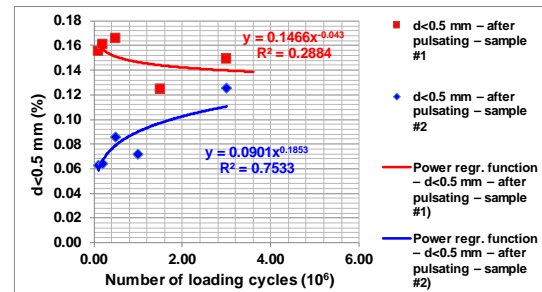


Fig. 4. Function of parameter  $d < 0.5$  mm (%) as a function of number of loading cycles related to both ballast samples

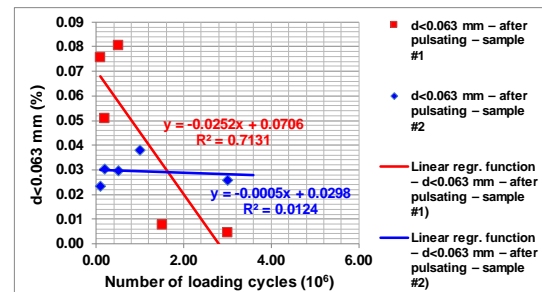


Fig. 5. Function of parameter  $d < 0.063$  mm (%) as a function of number of loading cycles related to both ballast samples

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

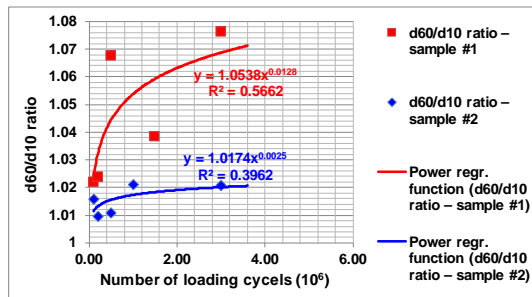


Fig. 6. Function of parameter  $d_{60}/d_{10}$  ratio as a function of number of loading cycles related to both ballast samples

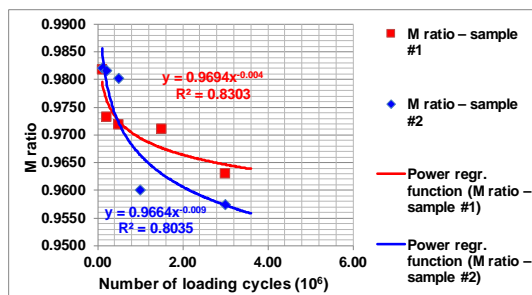


Fig. 7. Function of parameter M ratio as a function of number of loading cycles related to both ballast samples

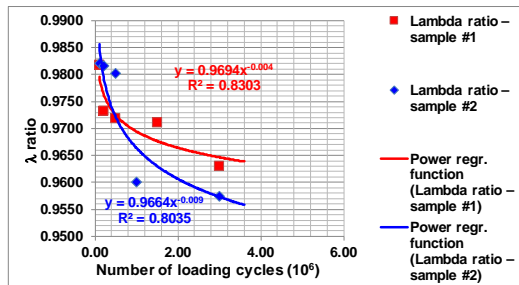


Fig. 8. Function of parameter  $\lambda$  ratio as a function of number of loading cycles related to both ballast samples

### Originality and practical value

According to the Fig. 1-8 the following results can be determined, that are not the final results of the research, and they consider the maximum 3-million-fatigue cycles (not the 5 million):

- there are significant correlation ( $R^2 > 0.8$ ) related to four calculated parameters from the eight (as a function of number of loading cycles), the regression functions are power regression function:

- $F_v$ , i.e. the parameter that can forecast the necessity of ballast bed screening, this parameter is recommended by the South African Railways [12],

- $d < 22.4$  mm (in mass percent) related to after pulsating,

- M and  $\lambda$  parameters [8] that are recommended by researchers from the BME (Budapest University of Technology and Economics) (now the authors used the M and  $\lambda$  ratios: the ratio of numbers after pulsating and before pulsating, respectively).

- The regressions are not significant (neither with linear, nor with power regression functions) related to the other four calculated parameters,

- in detailed analysis (considering only the significant correlations) the authors can highlight the fact, that «speed» of the breakage (the tangent of the functions) is higher related to ballast sample #2 than ballast sample #1, that is very interesting because both the  $LA_{RB}$  and  $M_{DERB}$  parameters are better (lower) for ballast sample #2,

- to be able to sentence final results the missing measurements are needed (i.e. the measurements until dynamic fatigue with 5 million loading cycles).

### Conclusions

This article introduces a research's results (but not the final results) supported by ÚNKP-17-4 New National Excellence Program of Ministry of Human Capacities. The accurate topic in the ÚNKP project is the «Innovative breakage test method of railway ballast material». In the authors' earlier paper the up-to-date international research achievements were resulted related to conventional (standardized) and non-conventional (non-standardized), additionally separate laboratory breakage and abrasion test methods and DEM simulations of ballast materials. The research plan was introduced and detailed for 2017 and 2018 years, it can be scored as the enhancement of the earlier research. The authors sentenced the results of the laboratory tests in the consideration of the maximal 3 million fatigue cycles for the two different andesite railway ballast samples. The developed method seems to be adequate for evaluating of the degradation process of railway ballast material according to railway.

### Acknowledgements

This paper is supported by the ÚNKP-17-4 New National Excellence Program of Ministry of Human Capacities.

## LIST OF REFERENCE LINKS

1. Ambrus, K. Útépítési zúzottkövek és zúzottkavicsok aszfaltkeverékek gyártásához, felületi bevonatok készítéséhez [Electronic resource] / K. Ambrus, I. Pallós. – 2012. – Available at: <http://docplayer.hu/9502775-Utepitesi-zuzottkovek-es-zuzottkavicsok-aszfaltkeverek-gyartasahoz-feluleti-bevonatok-kesziteséhez.html> – Title from the screen. – Accessed : 11.06.2018.
2. Arangie, P. B. D. The influence of ballast fouling on the resilient behaviour of the ballast pavement layer // Proc. of 6th Intern. Heavy Haul Railway Conf. (Cape Town, 1997, April 6–10). – Cape Town, 1997. – P. 241–256.
3. Claisse, P. Rail ballast: conclusions from a historical perspective / P. Claisse, C. Calla // Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport. – 2006. – Vol. 159. – Iss. 2. – P. 69–74. doi: 10.1680/tran.2006.159.2.69
4. Douglas, S. C. Ballast Quality and Breakdown during Tamping / S. Caleb Douglas // 2013 Joint Rail Conference: Conf. Paper (Knoxville, Tennessee, USA, April 15–18, 2013). – 2013. doi: 10.1115/JRC2013-2553
5. DB. «TL DBS 918 061: Technische Lieferbedingungen Gleisschotter» (TL DBS 918 061: Technical delivery conditions Railway ballast). – Berlin, 2006/08.
6. Fischer, Sz. A vasúti zúzottkövek aprózódásvizsgálata egyedi laboratóriumi módszerrel / Sz. Fischer // Sínek Világa. – 2015. – Vol. 57, No. 3. – P. 12–19.
7. Fischer, Sz. Breakage Test of Railway Ballast Materials with New Laboratory Method / Szabolcs Fischer // Periodica Polytechnica Civil Engineering. – 2017. – Vol. 61, No. 4. – P. 794–802. doi: 10.3311/PPci.8549
8. Gálos, M. Ágyazati kőanyagok: A kutatás eredményei. 2. rész. / M. Gálos, L. Kárpáti, D. Szekeres // Sínek Világa. – 2011. – Vol. 55, No. 1. – P. 6–13.
9. Indraratna, B. Advanced rail geotechnology – Ballasted track / Buddhima Indraratna, Wadud Salim, Cholachat Rujikiatkamjorn. – London : CRC Press, 2011. – 432 p.
10. Kausay, T. Adalékanyagok közetfizikai tulajdonságai. Út- és hídépítési műszaki előírások és alkalmazási tapasztalataik [Electronic resource] / T. Kausay. – Budapest, 2011. – Available at: <http://www.betonopus.hu/szakmernoki/kozut-2-adalekanyag-kozetfizika.pdf> – Title from the screen. – Accessed : 11.06.2018.
11. Kausay, T. Zúzott betonadalékanyagok közetfizikai tulajdonságai a szabályozásban / T. Kausay // Mérnökgeológia Közetmechanika 2008. – Budapest, 2008. – P. 259–270.
12. Lichtberger, B. Track compendium: Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics / B. Lichtberger. – Hamburg : Eurailpress Tetzlaff-Hestra GmbH & Co, 2005. – 634 p.
13. MÁV. «A 102345/1995 PHMSZ előírás 3. számú módosítása» (Modification 3 in MÁV 102345/1995 PHMSZ. Railway substructure and ballast quality acceptance regulations instruction). – Budapest, 2008. – 5 p.
14. MÁV. «A 102345/1995 PHMSZ előírás 4. számú módosítása». (Modification 4 in MÁV 102345/1995 PHMSZ. Railway substructure and ballast quality acceptance regulations instruction). – Budapest, 2010. – 14 p.
15. MSZ EN 1097-1:2012. «Kőanyaghalmozatok mechanikai és fizikai tulajdonságainak vizsgálata. 1. rész: A kopásállóság vizsgálata (mikro-Deval)». (Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Determination of the resistance to wear (micro-Deval)). – Budapest, 2012. – 35 p.
16. MSZ EN 1097-2:2010. «Kőanyaghalmozatok mechanikai és fizikai tulajdonságainak vizsgálata. 2. rész: Az aprózódással szembeni ellenállás meghatározása». (Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Methods for the determination of resistance to fragmentation). – Budapest, 2010. – 35 p.
17. MSZ EN 13450:2003. «Kőanyaghalmozatok vasúti ágyazathoz». (Aggregates for railway ballast). – Budapest, 2003. – 33 p.
18. MSZ EN 1367-2: Kőanyaghalmozatok termikus tulajdonságainak és időjárás-állóságának vizsgálati módszerei. 2. rész: Magnézium-szulfátos eljárás. – Budapest, 2010. – 16 p.
19. MSZ EN 933-3: Kőanyaghalmozatok geometriai tulajdonságainak vizsgálata. 3. rész: A szemalak meghatározása. Lemezességi szám. – Budapest, 2012. – 12 p.
20. Paiva, C. E. L. Study of Railway Ballast Fouling by Abrasion-Originated Particles / Cassio E. L. de Paiva, Mauro L. Pereira, Lia L. Pimentel // Railway Engineering – 2017 : Proc. of the 14th Intern. Conf. (Edinburgh, Scotland, UK, 21st–22nd June 2017). – Edinburgh, 2017.

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

21. Sadeghi, J. M. Developing Track Ballast Characteristic Guideline In Order To Evaluate Its Performanc / J. M. Sadeghi, J. Ali Zakeri, M. Emad Motieyan Najar // International Journal of Railway. – 2016. – Vol. 9. – Iss. 2. – P. 27–35. doi: 10.7782/IJR.2016.9.2.027
22. Track ballast in Austria: Parts 1, 2, 3 [Electronic resource]. – P. 1–11. – Available at: [https://www.plassertheurer.com/fileadmin/user\\_upload/Mediathek/Publikationen/ri\\_12888990.pdf](https://www.plassertheurer.com/fileadmin/user_upload/Mediathek/Publikationen/ri_12888990.pdf). – Title from the screen. – Accessed : 14.05.2018

С. ФІШЕР<sup>1\*</sup>, А. НЕМЕС<sup>2\*</sup>, Д. ХАРРАЧ<sup>3\*</sup>, Е. ЮХАС<sup>4\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Інфраструктура транспорту», Університет Іштвана Сечені, пл. Університетська, 1, Д'єр, Угорщина, 9026, тел. + 36 (96) 613 544, ел. пошта fischersz@sze.hu, ORCID 0000-0001-7298-9960

<sup>2\*</sup>Каф. «Інфраструктура транспорту», Університет Іштвана Сечені, пл. Університетська, 1, Д'єр, Угорщина, 9026, тел. + 36 (96) 613 544, ел. пошта nemeth.attila@sze.hu, ORCID 0000-0002-3477-6902

<sup>3\*</sup>Каф. «Будівельне проектування та інженерна геологія», Університет Іштвана Сечені, пл. Університетська, 1, Д'єр, Угорщина, 9026, тел. + 36 (96) 613 541, ел. пошта harrach.daniel@sze.hu, ORCID 0000-0003-4819-8506

<sup>4\*</sup>Каф. «Інфраструктура транспорту», Університет Іштвана Сечені, пл. Університетська, 1, Д'єр, Угорщина, 9026, тел. + 36 (96) 613 544, ел. пошта era\_juhasz@hotmail.com, ORCID 0000-0002-5544-3146

## СПЕЦІАЛЬНИЙ МЕТОД ОЦІНКИ РУЙНУВАННЯ ЧАСТОК ЗАЛІЗНИЧНОГО БАЛАСТУ НА ОСНОВІ УНІКАЛЬНОГО ЛАБОРАТОРНОГО ВИПРОБУВАННЯ

**Мета.** Існують спеціальні стандартизовані методи лабораторних випробувань для оцінки руйнування частинок залізничного баластного шару – це випробування на стирання Лос-Анджелес (EN 1097-2) і Мікро-Деваль (EN 1097-1). Ці методи випробувань не враховують реальні умови напруженої деформації залізничних баластних матеріалів. Основною метою роботи є спеціальне лабораторне випробування на утомне руйнування залізничних баластних матеріалів. Такий метод випробування дозволяє більш реалістично і точно оцінити процес зносу часток матеріалу залізничного баластного шару. **Методика.** Спеціальну шарувату структуру, укріплену пружним нижнім шаром і баластними зразками товщиною 30 см (із двох різних порід андезитового щебеню), навантажують динамічними, пульсуючими силами. Слід записати функції розподілу розмірів часток до і після проведення більше ніж мільйона тестів на циклічну втому, а також виконати проміжні вимірювання. Потрібно опрацювати виміряні дані й розрахувати різні параметри, запропоновані в міжнародних наукових дослідженнях. Випробування не враховує руйнування часток внаслідок механічного чи ручного підбивання баласту, але дозволяє в лабораторних умовах імітувати руйнування часток від багаторічної дії залізничного руху. **Результати.** Після науково-дослідних і дослідно-конструкторських розробок руйнування баластного шару в 2014 році було опубліковано наукове дослідження. В 2017–2018 роках дослідження процесу руйнування часток баласту були представлені з урахуванням більш складних циклів навантаження, які мали індивідуальне оцінювання. Це дає більш точне уявлення про повне пошкодження часток баластного матеріалу, тобто про процес руйнування. Автори подають уточнені кореляційні функції між розрахунковими параметрами й циклами навантаження під час випробувань на втому. **Наукова новизна.** У цій роботі підсумовані результати розробленого лабораторного методу випробувань для оцінки процесу руйнування часток баластного матеріалу залізничного полотна із двох різних порід андезитового щебеню. **Практична значимість.** У подальшому результати можуть бути використані для обчислення приблизного часового інтервалу, необхідного для виконання робіт із очищення баласту. Це дослідження виконане відповідно до національної програми вдосконалення ÚNKP-17-4 Міністерства можливостей людини.

**Ключові слова:** залізничний баластний матеріал; пошкодження й руйнування часток; спеціальний метод лабораторних досліджень; випробування на динамічну втому

С. ФИШЕР<sup>1\*</sup>, А. НЕМЕС<sup>2\*</sup>, Д. ХАРРАЧ<sup>3\*</sup>, Е. ЮХАС<sup>4\*</sup><sup>1\*</sup>Каф. «Инфраструктура транспорта», Университет Иштвана Сечени, пл. Университетская, 1, Дьер, Венгрия, 9026, тел. +36 (96) 613 544, эл. почта fischersz@sze.hu, ORCID 0000-0001-7298-9960<sup>2\*</sup>Каф. «Инфраструктура транспорта», Университет Иштвана Сечени, пл. Университетская, 1, Дьер, Венгрия, 9026, тел. + 36 (96) 613 544, эл. почта nemeth.attila@sze.hu, ORCID 0000-0002-3477-6902<sup>3\*</sup>Каф. «Строительное проектирование и инженерная геология», Университет Иштвана Сечени, пл. Университетская, 1, Дьер, Венгрия, 9026, тел. +36 (96) 613 541, эл. почта harrach.daniel@sze.hu, ORCID 0000-0003-4819-8506<sup>4\*</sup>Каф. «Инфраструктура транспорта», Университет Иштвана Сечени, пл. Университетская, 1, Дьер, Венгрия, 9026, тел. +36 (96) 613 544, эл. почта ega\_juhasz@hotmail.com, ORCID 0000-0002-5544-3146

## СПЕЦИАЛЬНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ РАЗРУШЕНИЯ ЧАСТИЦ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО БАЛЛАСТА НА ОСНОВЕ УНИКАЛЬНОГО ЛАБОРАТОРНОГО ИСПЫТАНИЯ

**Цель.** Существуют специальные стандартизированные методы лабораторных испытаний для оценки разрушения частиц железнодорожного балластного слоя – это испытания на истирание Лос-Анджелес (EN 1097-2) и Микро-Деваль (EN 1097-1). Данные методы испытаний не учитывают реальные условия напряженной деформации железнодорожных балластных материалов. В работе представлено специальное лабораторное испытание на усталостное разрушение железнодорожных балластных материалов. Такой метод испытания позволяет более реалистично и точно оценить процесс износа частиц материала железнодорожного балластного слоя. **Методика.** Специальная слоистая структура, укрепленная упругим нижним слоем и балластными образцами толщиной 30 см (из двух разных пород андезитового щебня), нагружается динамическими, пульсирующими силами. Следует записать функции распределения размера частиц до и после проведения более чем миллиона испытаний на циклическую усталость, а также выполнить промежуточные измерения. Необходимо обработать измеряемые данные и рассчитать различные параметры, предложенные в международных научных исследованиях. Испытание не учитывает разрушение частиц в результате механической или ручной подбивки балласта, но позволяет в лабораторных условиях имитировать разрушение частиц от многолетнего действия железнодорожного движения. **Результаты.** После научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок разрушения балластного слоя в 2014 году было опубликовано научное исследование. В 2017–2018 годах исследования процесса разрушения частиц балласта были представлены с учетом более сложных циклов нагрузки и имели индивидуальное оценивание. Это дает более точное представление о полном повреждении частиц балластного материала, т. е. о процессе разрушения. Авторами представлены уточненные корреляционные функции между расчётными параметрами и циклами нагрузки во время испытания на усталость. **Научная новизна.** В данной работе подытожены результаты конкретного разработанного лабораторного метода испытаний для оценки процесса разрушения частиц балластного материала железнодорожного полотна из двух различных пород андезитового щебня. **Практическая значимость.** В дальнейшем результаты могут быть использованы для вычисления приблизительного временного интервала, необходимого для выполнения работы по очистке балласта. Данное исследование выполнено в соответствии с национальной программой совершенствования ÚNKP-17-4 Министерства возможностей человека.

**Ключевые слова:** железнодорожный балластный материал; повреждение и разрушение частиц; специальный метод лабораторных исследований; испытание на динамическую усталость

### REFERENCES

1. Ambrus, K., & Pallós, I. (2012). *Útépítési zúzottkövek és zúzottkavicsok aszfaltkeverékek gyártásához, felületi bevonatok készítéséhez*. Retrieved from <http://docplayer.hu/9502775-Utepitesei-zuzottkovek-es-zuzottkavicsok-aszfaltkeverek-gyartasahoz-feluleti-bevonatok-kesziteséhez.html> (in Hungarian)
2. Arangie, P. B. D. (1997). The influence of ballast fouling on the resilient behaviour of the ballast pavement layer. *Proceedings of 6th International Heavy Haul Railway Conference (Cape Town, April 6-10)*, 241-256. (in English)
3. Claisse, P., & Calla, C. (2006). Rail ballast: conclusions from a historical perspective. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport*, 159(2), 69-74. doi: 10.1680/tran.2006.159.2.69 (in English)

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

4. Douglas, S. C. (2013). Ballast Quality and Breakdown during Transport. *2013 Joint Rail Conference: Conference Paper (Knoxville, Tennessee, USA, April 15-18)*. doi: 10.1115/JRC2013-2553 (in English)
5. TL DBS 918 061: Technische Lieferbedingungen Gleisschotter. TL DBS 918 061: Technical delivery conditions Railway ballast. (2006). Berlin, 2006/08. (in German)
6. Fischer, S. (2015). A vasúti zúzottkövek aprózódásvizsgálata egyedi laboratóriumi módszerrel. *Sínek Világa*, 57(3), 12-19. (in Hungarian)
7. Fischer, S. (2017). Breakage Test of Railway Ballast Materials with New Laboratory Method. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 61(4), 794-802. doi: 10.3311/PPci.8549 (in English)
8. Gálos, M., Kárpáti, L., & Szekeres, D. (2011). Ágyazati kőanyagok: A kutatás eredményei. 2. rész. *Sínek Világa*, 55(1), 6-13. (in Hungarian).
9. Indraratna, B., Salim, W., & Rujikiatkamjorn, C. (2011). *Advanced rail geotechnology – Ballasted track*. London: CRC Press. (in English)
10. Kausay, T. (2011). *Adalékanyagok közetfizikai tulajdonságai. Út- és hidépítési műszaki előírások és alkalmazási tapasztalataik*. Budapest. Retrived from <http://www.betonopus.hu/szakmernoki/kozut-2-adalekanyag-kozetfizika.pdf> (in Hungarian)
11. Kausay, T. (2008). Zúzott betonadalékanyagok közetfizikai tulajdonságai a szabályozásban. *Mérnökgeológia Közetmechanika*, 259-270. (in Hungarian)
12. Lichtberger, B. (2005). *Track compendium: Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics*. Hamburg: Eurailpress Tetzlaff-Hestra GmbH & Co. (in English)
13. A 102345/1995 PHMSZ előírás 3. számú módosítása (Modification 3 in MÁV 102345/1995 PHMSZ. 'Railway substructure and ballast quality acceptance regulations instruction'), MÁV (2008). (in Hungarian)
14. A 102345/1995 PHMSZ előírás 4. számú módosítása. (Modification 4 in MÁV 102345/1995 PHMSZ. 'Railway substructure and ballast quality acceptance regulations instruction'), MÁV (2010). (in Hungarian)
15. Kőanyaghalmozok mechanikai és fizikai tulajdonságainak vizsgálata. 1. rész: A kopásállóság vizsgálata (mikro-Deval). (Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Determination of the resistance to wear (micro-Deval), MSZ EN 1097-1:2012 (2012). (in Hungarian)
16. Kőanyaghalmozok mechanikai és fizikai tulajdonságainak vizsgálata. 2. rész: Az aprózódással szembeni ellenállás meghatározása. (Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Methods for the determination of resistance to fragmentation), MSZ EN 1097-2:2010 (2010). (in Hungarian)
17. Kőanyaghalmozok vasúti ágyazathoz. (Aggregates for railway ballast). MSZ EN 13450:2003 (2003). (in Hungarian)
18. Kőanyaghalmozok termikus tulajdonságainak és időjárás-állóságának vizsgálati módszerei. 2. rész: Magnézium-szulfátos eljárás. MSZ EN 1367-2 (2010). (in Hungarian)
19. Kőanyaghalmozok geometriai tulajdonságainak vizsgálata. 3. rész: A szemalak meghatározása. Lemezességi szám. MSZ EN 933-3 (2012). (in Hungarian)
20. Paiva, C. E. L., Pereira, M. L., & Pimentel, L. L. (2017). Study Of Railway Ballast Fouling By Abrasion Originated Particles. *Railway Engineering: Proc. of the 14th Intern. Conf. (Edinburgh, Scotland, UK, 21st-22nd June 2017)*. (in English)
21. Sadeghi, J. M., Zakeri, J. Ali, & Najar, M. E. M. (2016). Developing Track Ballast Characteristic Guideline In Order To Evaluate Its Performanc. *International Journal of Railway*, 9(2), 27-35. doi: 10.7782/IJR.2016.9.2.027 (in English)
22. Track ballast in Austria: Parts 1, 2, 3, 1-11. Retrived from [https://www.plassertheurer.com/fileadmin/user\\_upload/Mediathek/Publikationen/ri\\_12888990.pdf](https://www.plassertheurer.com/fileadmin/user_upload/Mediathek/Publikationen/ri_12888990.pdf) (in English)

*Ass. Prof. D. M. Kurhan, Dr. Sc. (Tech.) (Ukraine) recommended this article to be published*

Received: Feb. 23, 2018

Accessed: May 30, 2018

# МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

UDC 621.791.14

S. O. PLITCHENKO<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Applied Mechanics and Materials Science», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 56, e-mail [plit4enko@ukr.net](mailto:plit4enko@ukr.net), ORCID 0000-0002-0613-2544.

## PROCEDURE FOR DETERMINING PROCESS CHARACTERISTICS OF FRICTION STIR WELDING

**Purpose.** The study is aimed at improving the procedure for determining the optimum radius of the shoulder of a special tool for friction stir welding (FSW) of aluminum alloys and its change depending on the variations of base metal thickness. **Methodology.** The friction stir welding process was carried out on specially designed equipment. The material for the studies were 1.85 mm thick plates made of aluminum alloy AMg3 with a chemical content of alloying elements within the range of the brand composition. The temperature in the welding zone and the pressure from the tool on the edges of the welded joint were determined using a specially designed research stand. The pressing force of the tool to the base metal during welding was measured with a dynamometer type DC-0.1 with the indicator head. **Findings.** During the research, the degree of metal heating and the quality of the welded joint formation were determined at various ratios of the rotation frequency of the working tool and the normal pressure to the joining edges. The research allowed determining the influence of FSW process parameters on the temperature of metal heating in the action zone of the working tool shoulder. **Originality.** The experimental studies allowed to determine the effect of the working tool rotation speed and the magnitude of its pressure on the welded metal during welding on the temperature in the weld zone. Increasing the tool rotation frequency allows to reduce pressure of the working tool during welding, which results in more efficient and high-quality welding process. It has been established that it is possible to obtain better welded joints at a temperature of about  $0.7 T_m$  and to determine the optimal temperature range in the welding zone. **Practical value.** The study resulted in determination of the conditions for achieving the permanent softening effect during friction stir welding and the optimum temperatures in the welding zone for the tested alloy. The main technological parameters of the working tool are calculated and their influence on the generation of thermal energy in the welding zone is determined. The thermal analysis of the welding process resulted in development of the procedure for determining the technological parameters of the working tool and its rotation frequency depending on the weld metal thickness.

**Keywords:** friction stir welding; thermal energy; working tool; welding modes; aluminium alloys; optimum temperature

### Introduction

One of the directions of the progressive development of rail transport is the introduction of new metal materials for the manufacture of various structures. The main advantages include small specific gravity, strength, corrosion resistance, ease of recycling, etc.

Aluminium alloys are constantly improved, as well as their mechanical and physical properties,

with the simultaneous development of innovative methods of their processing.

When making the structures of intricate shapes, welding is accompanied by certain difficulties. The aluminium alloys ability to weld is complicated by the formation of refractory foils, high thermal conductivity and castability, the tendency to form hot cracks, cavities and others.

Almost all of these disadvantages can be eliminated or significantly reduced when using welding without metal melting. Such methods are types of

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

welding by pressure (Fig. 1), with the localization of heat dissipation in near-surface layers of the edges caused by transformation of mechanical energy (frictional forces) into the heat one.

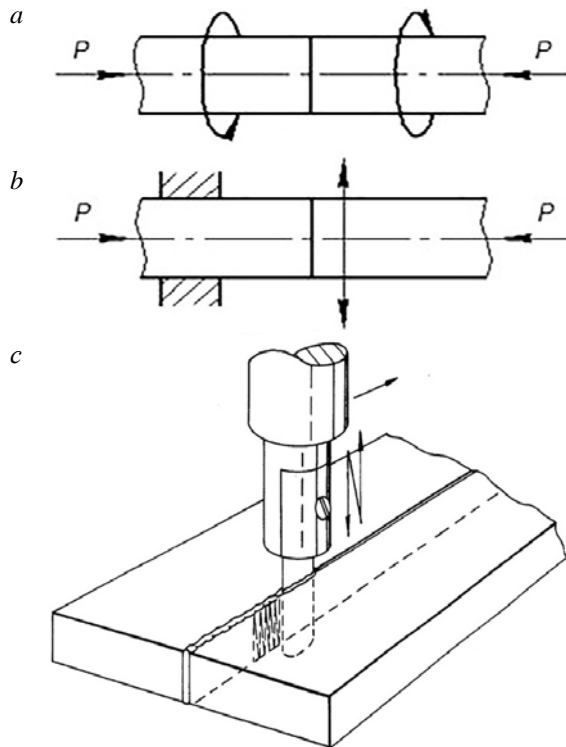


Fig. 1. Friction welding process schemes:  
a – traditional; b – vibro friction; c – of sheet workpieces  
using a blade;  $P$  – pressing force

Similarly, during the friction stir welding (FSW) [10], the heat source is the friction forces that arise between the surfaces of the welded edges and the working part of the special tool [5, 12–17].

The FSW process parameters include:

- Rotation frequency of the welding tool around its own axis;
- Speed of welding (speed of movement of the welding tool along the welding edges);
- Angle of the tool relative to the welded surface normal;
- Force of pressing the tool to the edges;
- Geometrical dimensions and shape of the working part of the welding tool.

The above characteristics have a different effect on the welding process and the quality of the weld joint [7, 13]. At the same time, the high sensitivity of FSW process to changes in process parameters makes it difficult to support stable welding conditions. For example, the rotation frequency of the

tool and the speed of its movement along the edges allow for a wide range of changes in conditions of metal heating and connection. Another matter when it refers to geometric dimensions and tool shape. The intricate form of the elements of the tool significantly complicates its use when changing the range of products under the conditions of friction stir welding (Fig.2, a).

Each of the tool parts provides not only the transformation of mechanical energy into heat, but also its specific distribution along the intersection of the weld seam [17]. The action of the shoulder brings up to 90% of the total energy [12], the remainder is due to the pin. The above correlation indicates the main impact of the shoulder on the stability of FSW process.

In some cases, the working surfaces of the tool may have grooves, flutes, spirals [11], etc., which allows a high level of destruction of the oxide foil of aluminium alloy surfaces and increase in degree of diffusion between the weld metal, which in turn improves the mechanical properties of the joint [1, 12, 14, 15].

The working tool pin is intended for the distribution of thermal energy over the thickness of the welded joint, the crushing of the oxide foils of the ends of the welding surfaces and their activation, ensuring diffusion during welding.

The shape of the working tool pin can vary considerably depending on its diameter, the tool inclination angle during welding, the thickness of the base metal and its chemical composition, which in turn will affect the quality of the welded joint. Similarly to the surface, the shoulder pin may have a groove that helps control the flow of plasticized metal and direct it to the sealing of certain segments of the seam, which reduces the likelihood of the lack of root fusion.

Compared to the technologies of partial or full melting, the use of friction stir welding can significantly reduce the degree of overheating of the metal in the zone of thermal impact and, accordingly, the resulting deformation of the welded joint and the product as a whole [1, 2, 7].

### Purpose

Improvement of the procedure for determining the optimum radius of the shoulder of a special tool depending on the variations of base metal thickness.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

**Material and methodology  
of the research**

The FSW process (Fig. 2, *a*) was carried out on a specially designed laboratory equipment using a variety of welding modes [2, 6, 12, 17].

The welding tool (fig. 2, *b*) was made of P9 grade high-speed steel, which retains its mechanical properties to the melting temperatures of aluminium-based alloys. The tool was used after a special heat treatment hardening.

For the purpose of high-quality metal filling, the axis of the working tool is located at an angle of  $1...3^\circ$  relative to the normal to the metal surface. Normal effort was chosen under the conditions of immersing the tool into the billet to a depth of up to 10% of the weld edge thickness. The shoulder had a diameter of 12 mm and 1.72 mm long cone-shaped pin with a diameter of 3.4 mm.

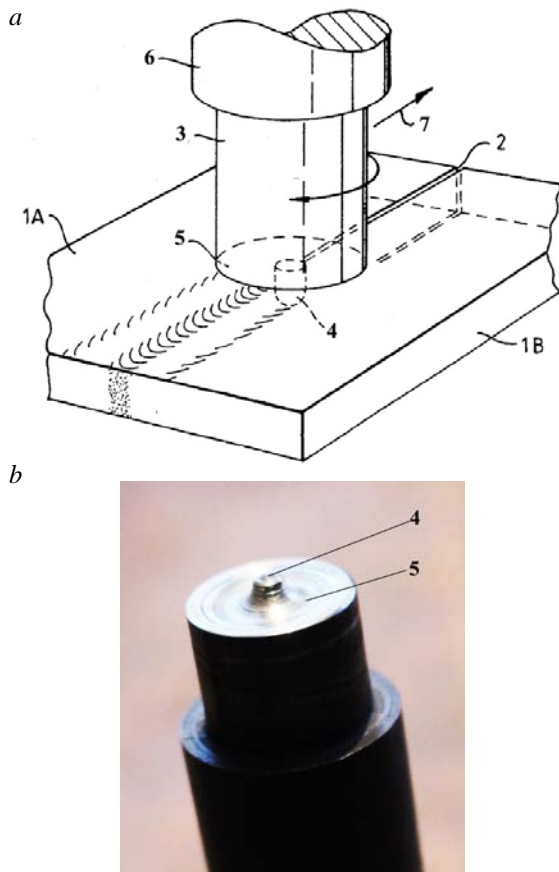


Fig. 2. FSW process of two workpieces (*a*) and working tool (*b*):

1A, 1B – workpieces; 2 – stick; 3 – working tool; 4 – pin;  
5 – shoulder; 6 – source of rotation (engine);  
7 – direction of welding

The speed of the tool rotation was changed in the range of  $800...1600 \text{ min}^{-1}$ , with the force of pressing on plates not higher than 1.4 kN. The speed of tool movement along the seam was maintained constant – 50 mm/min.

Materials for researches were 1.85 mm thick plates of AMG3 alloy with the content of alloying elements within the brand composition.

The temperature and pressure from the tool in the welding zone were controlled in a specially designed stand mounted on a vertical cutting bench. The force of working tool pressing to the edges was measured by a dynamometer of type DS-0.1.

The metal heating temperature was measured by thermocouples of chromel-aluminium type with an arrangement at different distances from the axis of the weld seam.

**Findings**

In different ratios, the working tool rotation speed and its pressing to the connecting edges changed the degree of metal heating.

Fig. 3 shows the research results of the influence of the FSW process parameters on the metal heating temperature under the shoulder of the working tool.

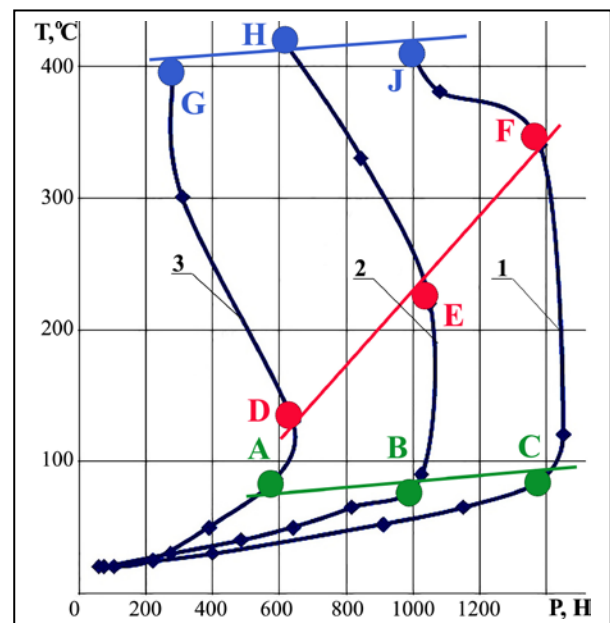


Fig. 3 – Experimental curves of dependence of the alloy edge heating temperature under the shoulder on the speed of rotation  $\omega$  and the pressing force  $P$  of the working tool ( $V_w = \text{const}$ ):

1 –  $\omega = 800 \text{ rpm}$ ; 2 –  $\omega = 1250 \text{ rpm}$ ; 3 –  $\omega = 1600 \text{ rpm}$

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

The analysis of the type of the ratio  $T = f(P)$  resulted in determination of the optimal temperature of the heating of the metal edges. First, a qualitatively different form of dependence corresponded to a change in the structural transformations in the metal edges. Regardless of the rotation speed of the tool and its pressing force, the minimum temperature was in the relatively narrow range of 70...85°C (Fig. 3, points A, B, C). Taking into account possible uncontrolled deviations with the support of stable conditions of the welding process, to simplify the analysis of the thermal balance, the average temperature value of 76...78°C was adopted, which corresponded to the moment of change in the ratio type.

Estimation of the initial recrystallization temperature ( $T_R$ ) for single-phase metallic materials ( $T_R = 0.4 \cdot T_M$ , where  $T_M$  is the metal melting point) showed a sufficiently qualitative coincidence with the values of 76...78°C.

A detailed analysis of the shape of the curves  $T = f(P)$  (Fig. 3), taking into account the existing qualitative changes in structural transformations under hot compression, suggests that from the moment of formation of the horizontal section (A – D; B – E; C – F) to a sharp reduction of the pressing force (point D, E, F), the processes of internal alloy reorganization are due to the development of dynamic polygonization and recrystallization.

On this basis, the moment of formation of the horizontal section should be considered as a limit on the minimum temperature of the FSW process, and a sharp decrease  $T$  – as the maximum acceptable value.

The shape of the curves and the qualitative change points in the ratio  $T = f(P)$  indicate the dependence of conditions for the achievement of the metal superplastic state on the FSW process parameters. Indeed, if the initial plasticization temperature remains practically independent of the ratio of  $\omega$  and  $P$ , then the achievement of the superplastic state ( $P$  decrease area) is more or less determined by the value  $\omega$ .

Sufficiently complex character of the simultaneous influence of several technological parameters of the FSW process on plastic properties demanded to estimate the required energy ( $Q$ ) for heating the metal to a temperature of  $0.7T_M$ . The

value  $Q$  was determined by the ratio of type [9], taking into account the experimental conditions:

$$Q = R \cdot T \cdot (m \cdot \ln P - \ln \omega), \quad (1)$$

where  $\omega$  – tool rotation frequency;  $P$  – pressing force of the working tool,  $T$  – temperature (K),  $R$  – power characteristic,  $m$  – exponent.

The calculation of  $Q$  was carried out according to experimental data (Fig. 3) for the alloy plates under steady state conditions:  $\omega = 13.3 \text{ sec}^{-1}$  (800  $\text{min}^{-1}$ ),  $P = 1 \text{ kN}$ ;  $\omega = 20.8 \text{ sec}^{-1}$  (1250  $\text{min}^{-1}$ ),  $P = 0.59 \text{ kN}$  and  $\omega = 26.7 \text{ sec}^{-1}$  (1600  $\text{min}^{-1}$ ),  $P = 0.275 \text{ kN}$ . The temperature in the edge zone was  $0.7 T_M$ . The result of the  $Q$  estimate depending on  $\omega$  for points J, H, G is shown in Fig. 4

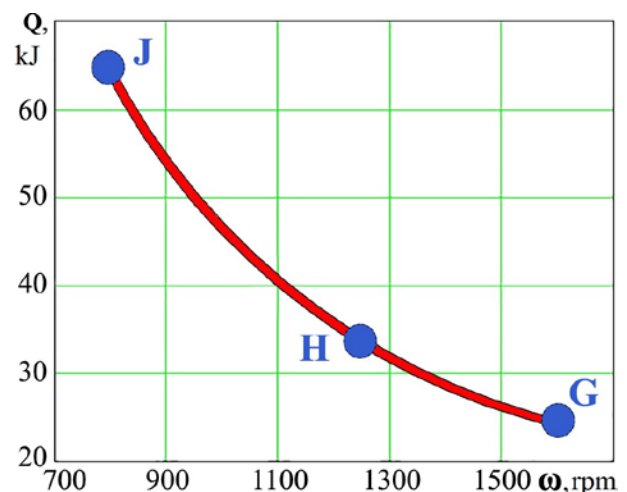


Fig. 4 –  $Q$  dependence on the simultaneous influence of  $\omega$  and  $P$  (points J, H, G) under conditions of temperature reach of  $0.7 T_M$

The given dependence (Fig. 4) shows a rather complex simultaneous impact on  $Q$  from  $P$  and  $\omega$ . On this basis, it is a definite interest to evaluate the impact of any one characteristic. The result of the calculation of  $Q$  depending on  $\omega$  with  $P = \text{const}$  (0.275 kN) is shown in Fig. 5.

The analysis of the results shows that in the case of constant pressing force, the double change of  $\omega$  leads to  $Q$  change at the range of 10...12%, which corresponds to the average value of  $Q$  (Fig. 4, point G).

The result of  $\omega$  impact on  $Q$ , in comparison with the pressing force, has a definite confirmation. The fact is that the change interval of  $\omega$  is

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

2 times against the change of  $P$  more than 3.6 times. Thus, the experiment plan showed a different effect of the FSW technological parameters on the processes of heating the connecting edges.

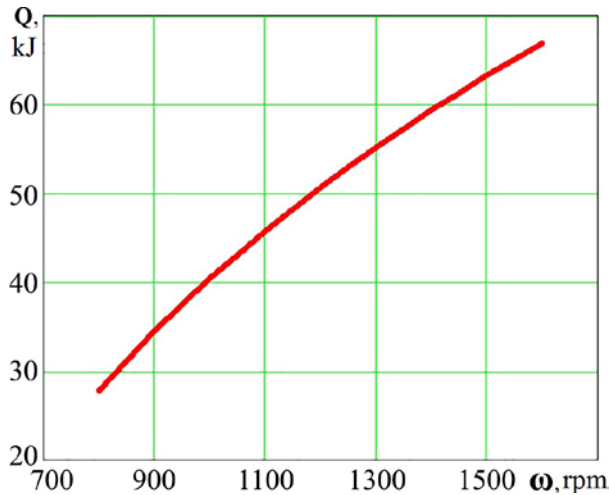


Fig. 5 Change of  $Q$  depending on  $\omega$  with  $P=0.275\text{ kN}$

The combined analysis of the  $Q$  calculated values (Figs 4, 5) indicates the need to determine the optimal energy for friction stir welding and possible dependence on the geometric dimensions of the working tool. Taking into account the contribution of the shoulder to the energy balance of the FSW, an attempt was made to estimate the optimal diameter of the work tool shoulder for different thicknesses of the connecting edges. To this end, the relationship between the thermal balance of the friction welding process and the main technological parameters [3] was used:

$$N = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \mu \cdot p \cdot \omega \cdot R_t^3, \quad (2)$$

where  $N$  – energy characteristic;  $\mu$  – friction coefficient;  $p$  – specific normal tool pressure;  $\omega$  – angular speed of rotation;  $R_t$  – radius of the tool shoulder.

Given that the relation (2) includes unchanged values, the expression should be simplified:

$$A = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \mu \cdot p, \quad (3)$$

where  $A$  – constant coefficient.

Then the expression (2) will look like:

$$N = A \cdot \omega \cdot R_t^3, \quad (4)$$

From the relation (4),  $R_t$  is equal to:

$$R_t = \sqrt[3]{\frac{N}{A \cdot \omega}}, \quad (5)$$

The calculation results for  $R_t$  according to (5) using the experimental data [8] and the random values of  $Q$  for the studied change intervals  $P$  and  $\omega$  are shown in Fig. 6.

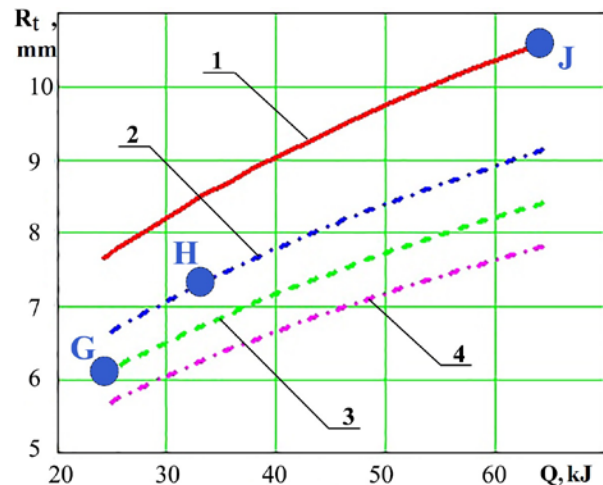


Fig. 6 – Diagram of selecting the working tool shoulder radius  $R_t$  for  $P=0.275\text{ kN}$ , depending on  $\omega$ :

1 – 800; 2 – 1250; 3 – 1600; 4 – 2000  $\text{min}^{-1}$

● – Experimental data  $Q$  from Fig. 4

The analysis of the results (Fig. 6) shows the existence of a correlation between the energy  $Q$  in the welding zone and the size of the working tool shoulder radius  $R_t$ . At higher speeds of the tool rotation (Fig. 6, curves 3 and 4), the same values of  $Q$  are achieved with decreasing  $R_t$ .

In the process of welding, holding the tool at an angle of  $1...3^\circ$  relative to the normal to the blank provides the necessary conditions for filling of the weld bath with the metal. The expected unevenness of temperature distribution along the plane of the contact spot (shoulder) occurs only in the initial stages until reaching the optimal welding conditions. After this, completely homogeneous conditions for the heat energy release process are achieved.

When designing a working tool, it should be borne in mind that excessive increase in the shoulder diameter will increase the load on the equipment and undesirably increase the width of the weld, as well as using high frequency rotation of the tool can lead to overheating of the weld con-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

nection, which negatively affects its mechanical properties.

In addition to the influence of these factors, the choice of welding mode depends on the chemical and phase composition of the alloy, the morphology and location in the matrix of the particles of the second phase. Of particular importance is the thickness of the metal edges.

In order to take into account the influence of the welded metal thickness and its thermal properties on the achievement of optimal conditions, it is proposed to use the similarity criterion [4]:

$$\psi = \frac{N}{\lambda \cdot T \cdot \delta}, \quad (6)$$

where  $N$  – characteristic, similar to  $Q$  from (2);  $\lambda$  – thermal conductivity;  $\delta$  – thickness of the metal edges;  $T$  – temperature in the welding zone, K.

By relation (6), for a particular alloy, under unchanged conditions  $\lambda$  and  $T$  (optimal heating temperature of edges in FSW), the value  $\psi$  varies in a very small range of values, which is confirmed by the data [4] and experimentally in the work. Given that the thickness of the welded metal can vary in a wide range, the calculations of  $R_t$  are limited in thicknesses from 1 to 10 mm, which are the most common in the industry.

The value of the energy  $Q$  for any thickness of the base metal is estimated by the following expression:

$$Q = \psi_{sim} \cdot \lambda \cdot T \cdot \delta, \quad (7)$$

The relation (7) taking into account (8)

$$B = \psi_{sim} \cdot \lambda \cdot T, \quad (8)$$

where  $B$  is constant, takes the form:

$$Q = B \cdot \delta, \quad (9)$$

Taking into account (1), the same level of  $Q$  can be achieved by different combinations of  $\omega$  and  $P$ . Then, for (9),  $Q$  is in fact the mean for the range of changes of  $\omega$  and  $P$ , that has a definite confirmation. So, for the thickness  $\delta = 1.85$  mm, the received energy value by the ratio (9) and the average value  $Q$  under the three modes (40 kJ) have a qualitative coincidence (Fig. 7).

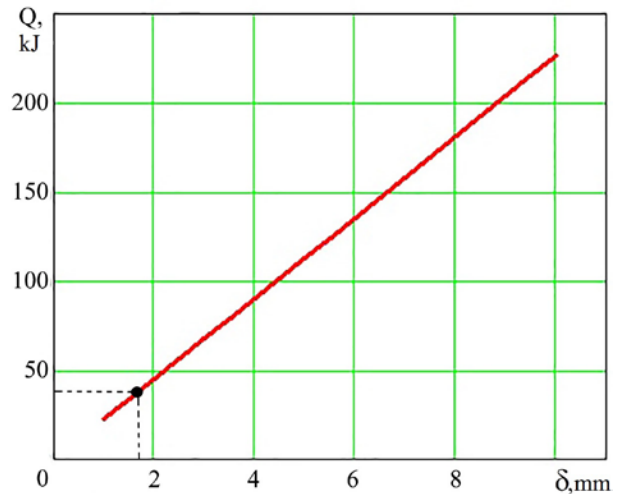


Fig. 7 – Dependence of the required amount of energy  $Q$  by (9) for the established process of welding on the metal thickness  $\delta$

The given dependence allows us to determine the optimal conditions for friction stir welding for plates of different thicknesses. For example, for  $\delta = 3$  mm the required amount of heat energy should be of about 70 kJ. Further, for this energy value, for a particular equipment with a specified power, we determine the optimal rotational speed of the tool and the corresponding radius of the shoulder.

Determination of the value  $R_t$ , subject to the simultaneous consideration of the tool pressing force, the rotation speed and the metal thickness, is proposed by the ratio:

$$R_t = \sqrt[3]{\frac{B \cdot \delta}{A \cdot \omega}}, \quad (10)$$

The calculation results for (10) are given for the thicknesses  $1 < \delta < 10$  mm in Fig. 8

The constructed diagram for (10) corresponds to the conditions of constant pressing force (0.275 kN), although the optimal  $Q$  level for welding (FSW) is determined by the combination of  $\omega$  and  $P$ .

The verification of the dependence (Fig. 8) was carried out experimentally. So, under the constant pressure conditions (0.275 kN) for welding the 3 mm thick edges with  $\omega = 1250 \text{ min}^{-1}$ , the tool radius should be 9...10 mm, and for the frequency of  $1600 \text{ min}^{-1}$  – approximately 8...9 mm.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

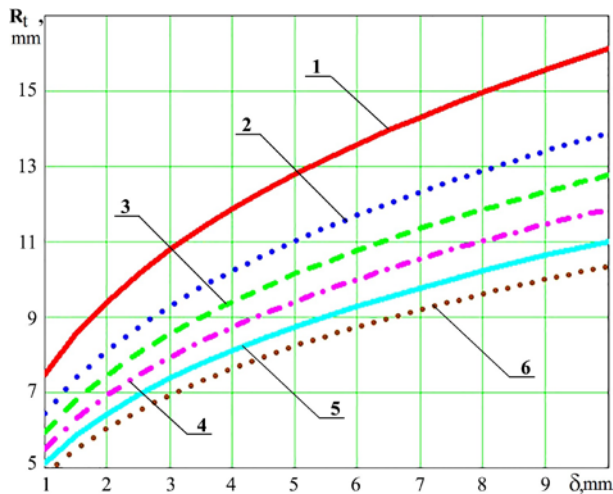


Fig. 8 – Diagram of determining the optimal working tool shoulder radius  $R_t$  to achieve the established welding process at:

$P = 0.275 \text{ kN}$ ,  $V_{sim} = \text{const}$ ;  
 1 – 800; 2 – 1250; 3 – 1600;  
 4 – 2000; 5 – 2500; 6 – 3000  $\text{min}^{-1}$

Under conditions when the justified necessity of finding the optimal welding mode is based on changing the working tool pressing force, the calculation of  $R_t$  is carried out according to another diagram, for a specific value of  $P$ .

Thus, according to the estimates, it is possible to improve the process of finding the optimum welding conditions for the friction stir welding.

### Originality and practical value

The research determined the effect of the working tool rotation speed and the magnitude of its pressure on the welded edges on the temperature in the weld zone. The increase of  $\omega$  allows reducing the pressure of the working tool during welding. The conditions for the achievement of the superconducting state of the metal in the welding zone and the optimal temperature range have been determined.

### Conclusions

1. It has been established that it is possible to obtain welded joints at a temperature of about  $0.7 T_m$  during the friction stir welding.
2. At different ratios of the working tool rotation speed and pressing to the connecting edges, the conditions for achieving the effect of constant softening of the alloy have been determined.
3. The main technological parameters of the working tool have been calculated and their influence on the generation of thermal energy in the welding zone has been determined.
4. The thermal analysis of the welding process resulted in development of the procedure for determining the technological parameters of the working tool depending on the weld metal thickness.

### LIST OF REFERENCE LINKS

1. Вакуленко, І. О. Використання технології зварювання тертям з перемішуванням алюмінієвого сплаву / І. О. Вакуленко, С. О. Плітченко, Ю. Л. Наєждін // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 41. – С. 230–233.
2. Вакуленко, І. О. Про структурні перетворення при зварюванні тертям з перемішуванням алюмінієвого сплаву / І. О. Вакуленко, О. А. Міт'яєв, С. О. Плітченко // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2014. – № 1. – С. 8–10.
3. Вилль, В. И. Сварка металлов трением / В. И. Вилль. – Ленинград : Машиностроение, 1970. – 178 с.
4. Ерохин, А. А. Основы сварки плавлением. Физико-химические закономерности / А. А. Ерохин. – Москва : Машиностроение, 1973. – 448 с.
5. Моделирование тепловых процессов при фрикционной сварке / Э. Л. Макаров, С. А. Королев, М. М. Штрикман, Н. М. Кашук // Сварка и диагностика. – 2010. – № 3. – С. 21–25.
6. Пат. 75698 Україна, МПК В 23 К 1/00. Спосіб зварювання тертям з перемішуванням сплавів на основі алюмінію / Вакуленко І. О., Плітченко С. О., Наєждін Ю. Л. ; заявник та патентовласник Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – № U201206529 ; заявл. 29.05.12 ; опубл. 10.12.12, Бюл. № 23. – 4 с.
7. Покляцкий, А. Г. Некоторые преимущества стыковых соединений тонколистовых деформируемых алюминиевых сплавов АМг5М и АМг6М, полученных сваркой трением с перемешиванием, по сравнению с ТИГ / А. Г. Покляцкий, И. Н. Клочков, С. И. Мотрунич // Автоматическая сварка. – 2015. – № 7. – С. 18–23.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

8. Determination activation energy of friction stir welding / I. O. Vakulenko, S. O. Plitchenko // *Welding and Related Technologies : Proc. of 9th Intern. Conf. of Young Scientists (23–26 May 2017, Kyiv, Ukraine)*. – Kyiv, 2017. – P. 54–58.
9. Hayes, R. W. On the mechanism of delayed discontinuous plastic flow in an age-hardened nickel alloy / R. W. Hayes, W. C. Hayes // *Acta Metallurgica*. – 1982. – Vol. 30. – Iss. 7. – P. 1295–1301. doi: 10.1016/0001-6160(82)90148-1
10. Int. Pat. Application № PCT/GB 92/02203; GB Pat. Application № 9125978.8. Friction Stir Butt Welding / Thomas W. M., Nicholas E. D., Needham J. C. et al. – Publ. 1991.
11. Int. Pat. Application № 10/140,797; US Pat. № 6,669,075 B2. Tapered Friction Stir Welding Tool / Colligan K. – Publ. 30.12.2003.
12. Investigation of stationary shoulder friction stir welding of aluminum alloy 7075-T651 / Dongxiao Li, Xinqi Yang, Lei Cui, Fangzhou He, Xu Zhang // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2015. – Vol. 222. – P. 391–398. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.03.036
13. Friction stir welding and processing / Editors Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney. – Ohio : ASM International, 2007. – 360 p.
14. Modeling heat transfer during friction stir welding using a meshless particle method / Yihua Xiao, Haifei Zhan, Yuantong Gu, Qinghua Li // *Intern. Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2017. – Vol. 104. – P. 288–300. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.047
15. Numerical modeling for the effect of pin profiles on thermal and material flow characteristics in friction stir welding / Hao Su, Chuan Song Wu, Marcel Bachmann, Michael Rethmeier // *Materials & Design*. – 2015. – Vol. 77. – P. 114–125. doi: 10.1016/j.matdes.2015.04.012
16. Shneider, J. A. Temperature distribution and resulting metal flow / J. A. Shneider // *Friction Stir Welding and Processing*. – Ohio : ASM International, 2007. – P. 37–49.
17. Thermo-Mechanical Modeling of Friction-Stir Welding Tool Used in Aluminum Alloys Joints / J. F. Villegas, J. V. Dominguez, G. V. Ochoa, J. Unfried-Silgado // *Contemporary Engineering Sciences*. – 2017. – Vol. 10. – Iss. 34. – P. 1659–1667. doi: 10.12988/ces.2017.711156

С. О. ПЛІТЧЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Прикладна механіка та матеріалознавство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. пошта [plitchenko@ukr.net](mailto:plitchenko@ukr.net), ORCID 0000-0002-0613-2544

## МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ ЗВАРЮВАННЯ ТЕРТЯМ ІЗ ПЕРЕМІШУВАННЯМ

**Мета.** Дослідження передбачає удосконалення методики визначення оптимальної величини радіуса заплічка спеціального інструмента під час зварювання тертям із перемішуванням (ЗТП) сплавів на основі алюмінію та його зміну залежно від зміни товщини основного металу. **Методика.** Процес зварювання тертям із перемішуванням виконаний на спеціально розробленому обладнанні. Матеріалом для досліджень були пластини товщиною 1,85 мм зі сплаву алюмінію АМг3 з хімічним вмістом легувальних елементів у межах марочного складу. Температуру в зоні зварювання та тиск від інструмента на кромки зварного з'єднання визначали за допомогою спеціально розробленого дослідного стенда. Силу притискання робочого інструмента до основного металу під час зварювання вимірювали за допомогою динамометра типу ДС-0,1 з індикаторною голівкою. **Результати.** У процесі досліджень за різних співвідношень частоти обертання робочого інструмента та нормального притискання до з'єднуваних кромок визначений ступінь розігріву металу, а також якість формування зварного з'єднання. З'ясований вплив технологічних параметрів процесу ЗТП на температуру розігріву металу в зоні дії заплічка робочого інструмента. **Наукова новизна.** З експериментальних досліджень було визначено, що температура в зоні зварювання залежить від швидкості обертання робочого інструмента та величини його тиску на зварюваний метал. Збільшення частоти обертання інструмента дозволяє зменшувати його тиск, що дає змогу більш ефективно та якісно проводити процес зварювання. Встановлена можливість отримувати більш якісні зварні з'єднання за температури, яка приблизно дорівнює  $0,7T_{пл}$ , визначений оптимальний діапазон температур у зоні зварювання. **Практична значимість.** Визначені умови досягнення ефекту постійного пом'якшення під час зварювання

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

тертям із перемішуванням та оптимальні температури в зоні зварювання для досліджуваного сплаву. Здійснений розрахунок основних технологічних параметрів робочого інструмента та визначений їх вплив на генерування теплової енергії в зоні зварювання. На основі теплового аналізу процесу зварювання розроблена методика визначення технологічних параметрів робочого інструмента та частоти його обертання залежно від товщини зварюваного металу.

**Ключові слова:** зварювання тертям із перемішуванням; тепла енергія; робочий інструмент; режими зварювання; сплави на основі алюмінію; оптимальна температура

С. А. ПЛИТЧЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Прикладная механика и материаловедение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, эл. почта plit4enko@ukr.net, ORCID 0000-0002-0613-2544

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

**Цель.** Исследование предусматривает усовершенствование методики определения оптимальной величины радиуса заплечика специального инструмента при сварке трением с перемешиванием (СТП) сплавов на основе алюминия и его изменение в зависимости от изменения толщины основного металла.

**Методика.** Процесс сварки трением с перемешиванием выполнялся на специально разработанном оборудовании. Материалом для исследований были пластины толщиной 1,85 мм из сплава алюминия АМгЗ с химическим содержанием легирующих элементов в пределах марочного состава. Сварочный инструмент изготавливался с использованием быстрорежущей стали марки Р9 и подвергался специальной термообработке. Температуру в зоне сварки и давление от инструмента на кромки сварного соединения определяли с помощью специально разработанного исследовательского стенда. Сила прижима рабочего инструмента к основному металлу при сварке измерялась с помощью динамометра типа ДС-0,1 с индикаторной головкой.

**Результаты.** В процессе исследований при различных соотношениях частоты вращения рабочего инструмента и нормального прижима к соединительным кромкам определили степень разогрева металла, а также качество формирования сварного соединения. Определили влияние технологических параметров процесса СТП на температуру разогрева металла в зоне действия заплечика рабочего инструмента. **Научная новизна.** Из экспериментальных исследований было определено, что температура в зоне сварки зависит от скорости вращения рабочего инструмента и величины его давления на свариваемый металл. Увеличение частоты вращения инструмента позволяет уменьшать его давление, что дает возможность более эффективно и качественно проводить процесс сварки. Установлена возможность получать более качественные сварные соединения при температуре, примерно равной  $0,7 T_{пл}$ , определен оптимальный диапазон температур в зоне сварки. **Практическая значимость.** Определены условия достижения эффекта постоянного смягчения при сварке трением с перемешиванием и оптимальные температуры в зоне сварки для исследуемого сплава. Осуществлен расчет основных технологических параметров рабочего инструмента и определено их влияние на генерирование тепловой энергии в зоне сварки. На основе теплового анализа процесса сварки разработана методика определения технологических параметров рабочего инструмента и частоты его вращения в зависимости от толщины свариваемого металла.

**Ключевые слова:** сварка трением с перемешиванием; тепловая энергия; рабочий инструмент; режимы сварки; сплавы на основе алюминия; оптимальная температура

## REFERENCES

1. Vakulenko, I. O., Plitchenko, S. O., & Nadezdin, Y. L. (2012). Use of technology of friction stir welding for aluminum alloys. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana*, 41, 230-233. (in Ukrainian)
2. Vakulenko, I. O., Mitiaiev, O. A., & Plitchenko, S. O. (2014). Pro strukturni peretvorennia pry zvariuvanni tertiam z peremishuvanniam aliuminiivoho splavu. *Novi materialy i tekhnologii v metalurhii ta mashynobuduvanni*, 1, 8-10. (in Ukrainian)

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

3. Vyll, V. Y. (1970). *Svarka metallov trenyem*. Leningrad: Mashinostroyeniye. (in Russian)
4. Yerokhin, A. A. (1973). *Osnovy svarki plavleniem. Fiziko-khimicheskie zakonomernosti*. Moscow: Mashinostroyeniye. (in Russian)
5. Makarov, E. L., Korolev, S. A., Shtrikman, M. M., Kashchuk, N. M. (2010). Modelirovanie teplovykh protsessov pri friktsionnoy svarke. *Svarka i diagnostika*, 3, 21-25. (in Russian)
6. Vakulenko, I. O., Plitchenko, S. O., & Nadezhdin, Y. L. (2012). *UA Patent No. 75698*. Kyiv: Ukrainskyi instytut intelektualnoi vlasnosti (Ukrpatent). (in Ukrainian)
7. Poklyatskiy, A. G., Klochkov, I. N., & Motrunich, S. I. (2015). Nekotorye preimushchestva stykovykh soedineniy tonkolistovykh deformiruemyykh alyuminiyevykh splavov AMg5M i AMg6M, poluchennykh svarkoy treniem s peremeshivaniem, po sravneniyu s TIG. *Avtomaticheskaya svarka*, 7, 18-23. (in Russian)
8. Vakulenko, I. O., Plitchenko, S. O. (2017). Determination activation energy of friction stir welding. *Proceedings of the 9th International Conference Young Scientists Welding and related Technologies, May 23-26, 2017*, 54-58. (in English)
9. Hayes, R. W., & Hayes, W. C. (1982). On the mechanism of delayed discontinuous plastic flow in an age-hardened nickel alloy. *Acta Metallurgica*, 30 (7), 1295-1301. doi: 10.1016/0001-6160(82)90148-1 (in English)
10. Thomas, W.M., Nicholas, E.D., Needham, J.C. & et al. (1991). *GB Patent No. 9125978.8* (Int. Pat. Application № PCT/GB 92/02203). (in English)
11. Colligan, K. (2003). *US Patent No. 6,669,075 B2* (Int. Pat. Application № 10/140,797). (in English)
12. Li, D., Yang, X., Cui, L., He, F., & Zhang, X. (2015). Investigation of stationary shoulder friction stir welding of aluminum alloy 7075-T651. *Journal of Materials Processing Technology*, 222, 391–398. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.03.036 (in English)
13. Mishra, R. S., & Mahoney, M. W. (Eds.) (2007). *Friction stir welding and processing*. Ohio: ASM International. (in English)
14. Xiao, Y., Zhan, H., Gu, Y., & Li, Q. (2017). Modeling heat transfer during friction stir welding using a meshless particle method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 104, 288-300. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.047 (in English)
15. Su, H., Wu Song, C., Bachmann, M., & Rethmeier, M. (2015). Numerical modeling for the effect of pin profiles on thermal and material flow characteristics in friction stir welding. *Materials & Design*, 77, 114-125. doi: 10.1016/j.dt.2015.05.001 (in English)
16. Shneider, J. A. (2007). Temperature distribution and resulting metal flow. In J. A. Shneider (Ed.), *Friction stir welding and processing*, (37-49). Ohio: ASM International. (in English)
17. Villegas, J. F., Dominguez, J. V., Ochoa, G. V., & Unfried-Silgado, J. (2017). Thermo-Mechanical Modeling of Friction-Stir Welding Tool Used in Aluminum Alloys Joints. *Contemporary Engineering Sciences*, 10 (34), 1659-1667. doi: 10.12988/ces.2017.711156 (in English)

*Prof. I. O. Vakulenko, D. Sc. (Tech.) (Ukraine) recommended this article to be published*

Received: March 21, 2018

Accepted: April 22, 2018

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

УДК 004.41/.42

В. Я. НЕЧАЙ<sup>1\*</sup>, Д. О. ВОЛОШИН<sup>2\*</sup>, О. І. НЕЖУМІРА<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (099) 904 29 64, ел. пошта vnecchay@i.ua, ORCID 0000-0001-5358-4335

<sup>2\*</sup>Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (093) 311 37 22, ел. пошта dmtro.voloshyn@gmail.com, ORCID 0000-0003-1250-3206

<sup>3\*</sup>Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 572 48 18, ел. пошта nezhumira.ok@gmail.com, ORCID 0000-0002-3905-2591

### ДОСЛІДЖЕННЯ ГРАНИЧНИХ ЧАСОВИХ ПОКАЗНИКІВ ПРОГРАМНИХ СЕРЕДОВИЩ ОПЕРАЦІЙНИХ СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

**Мета.** Більш ніж двадцятирічний термін дослідження оцінки найгіршого часу виконання програм (Worst Case Execution Time, WCET) призвів до розробки багатьох методів. До цього часу немає остаточних висновків щодо застосування того чи іншого методу. Тому метою нашої роботи є визначення можливості використання гібридного методу для оцінки WCET у системах реального часу. **Методика.** З'ясування оцінки WCET для гібридного методу полягає в тому, щоб провести синтаксичний аналіз вхідного коду мовою програмування C++ та, побудувавши граф потоку керування, отримати час виконання його базових блоків. Знайшовши найдовший шлях графа, оцінити час виконання цього шляху й отримати оцінку WCET. Для пошуку найдовшого за часом виконання шляху був обраний зворотний алгоритм Дейкстри. Після чого було виконане порівняння граничних часових оцінок, отриманих статичним і гібридним методами, а також аналіз розбіжності цих результатів. **Результати.** Визначення найгіршого часу виконання програм найбільш важливе для задач «жорсткого реального часу». Недооцінка цього показника може призвести до катастрофічних наслідків. А переоцінка – до суттєвої перевитрати ресурсів. Тому була проведена оцінка WCET за допомогою статичного й динамічного методів, яка дає змогу визначити, що результати, отримані двома методами, непогано корелюються. Для розглянутого класу задач час виконання WCET може бути визначений за допомогою гібридного методу. Додавання додаткового часу в розмірі 15–20 % до результатів, отриманих гібридним методом, дозволяє отримати безпечну оцінку WCET у системах реального часу. **Наукова новизна.** Гібридний метод існує вже певний час, але надійність його використання ще не була достатньо вивчена. Дане дослідження робить крок у визначенні практичної застосованості гібридного методу для часової оцінки задач реального часу. **Практична значимість.** Результати дослідження дозволяють дійти висновків, що гібридний метод може бути використаний для отримання оцінки WCET у задачах «жорсткого реального часу». А деякий невідомий на даний момент вплив середовища операційної системи реального часу (ОС РЧ) може бути врахований додаванням додаткового часу.

**Ключові слова:** граничний час виконання програм; WCET; операційні системи реального часу; задачі реального часу; гібридний метод; статичний метод; динамічний метод

#### Вступ

Останнім часом із поширенням автоматизації керування фізичними процесами все більше

уваги приділяється операційним системам реального часу. Такі системи можуть керувати пристроями як зовні, так і бути вбудованими. При цьому всі розв'язувані задачі можна поді-

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

лити на три категорії: задачі не критичні до часу їх розв'язання, задачі м'якого реального часу (коли перевищення часу розв'язання небажане, але припустиме) і задачі жорсткого реального часу (коли перевищення часу розв'язання може призвести до катастрофічних наслідків). Тому оцінка граничних часових характеристик WCET під час розробки програм реального часу є обов'язковою процедурою [6].

WCET є однією з цілей процесу верифікації сертифікованого авіаційного програмного забезпечення кваліфікаційних вимог DO-178B/C, які використовують у всьому світі. Розв'язання цієї задачі дуже складне, а іноді й неможливе. Здійснені спроби призвели до появи методів оцінки WCET. До всіх методів ставлять дві вимоги: оцінка WCET не може бути меншою за відведений час, а її суттєве перевищення може призвести до збільшення затрат на розробку програмного забезпечення [5].

Усі методи оцінки WCET поділяють на ста-

тичні й динамічні. Час виконання програм можна знайти з використанням моделей обчислювальних середовищ (статичні методи) або за допомогою вимірів, які проводять під час виконання програм (динамічні). Недосконалість цих підходів призвела до появи гібридних методів, що поєднують у собі елементи двох попередніх. Пошук методів оцінки WCET триває понад двадцять років. У роботі [2] наведені результати огляду наявних методів, які відображені на рис. 1.

Традиційним методом оцінки часових характеристик є динамічний метод (статистичний аналіз результатів багатьох випробувань роботи програми за різних вхідних даних). Цей метод не завжди гарантує отримання граничних оцінок часу, оскільки всі можливі комбінації вхідних даних можуть бути невідомі [9]. Також він є досить затратним у разі спроби забезпечення достатнього покриття коду.



Рис. 1. Методи визначення WCET  
Fig. 1. Methods for determining WCET

Статичний метод дозволяє оцінити найгірший час виконання за допомогою аналізу вихідного коду програми й оцінки всіх шляхів її виконання. За ним можна оцінити часові характеристики без виконання самої програми, але йому потрібні для цього комплексні абстрактні моделі апаратних і програмних засобів. Недоліки методу наступні:

- неадекватні моделі можуть давати небезпечні оцінки WCET;
- моделі не враховують усіх властивостей сучасних процесорів;
- ускладнена переносимість цих інструментів у різні середовища [2].

Гібридний метод поєднує переваги динамічного й статичного методів і дозволяє отримати

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

наближену часову оцінку без використання складних абстрактних моделей.

Специфіка гібридного методу оцінки граничних часових характеристик полягає у застосуванні таких технік: динамічні техніки використовують для визначення часу виконання окремих сегментів, з яких складається програма, а техніки статичного аналізу – для пошуку найдовшого шляху виконання, враховуючи оцінки окремих сегментів шляху, які були отримані динамічними техніками [8]. Головною перевагою гібридного методу над динамічним є те, що гібридний метод дозволяє отримати найдовший шлях виконання програми, а динамічний не дає такої гарантії. Перевага ж гібридного методу над статичним полягає у відсутності потреби використовувати абстрактні моделі, що дозволяє не прив'язуватися до конкретної апаратно-програмної конфігурації.

Основною проблемою під час використання гібридного методу є нестатична природа програмного середовища операційної системи, в якій виконується програма [11]. Оскільки гібридний метод застосовує динамічні техніки для визначення часу виконання окремих сегментів, він не може гарантувати, що на момент виконання замірів стан системи був найгірший з усіх можливих [3]. Однак на практиці, для отримання безпечної граничної оцінки, вплив цих динамічних характеристик середовища може бути нівельований додаванням до отриманого часу виконання додаткового часу погіршеності.

### Мета

На підставі порівняльного аналізу результатів гібридного і статичного методів на тестовій вибірці програм у конкретній операційній системі на заданому апаратному забезпеченні визначити можливість застосування гібридного методу в середовищі операційних систем реального часу (ОС РЧ) для оцінки WCET.

Об'єктом даного дослідження є гібридний метод, який використовують для оцінки граничного часу виконання програм, орієнтованих на операційні системи реального часу.

Предметом дослідження є часові показники виконання програм, отримані в середовищі ОС РЧ різними засобами.

### Методика

Отримання часової оцінки передбачає розробку власного програмного продукту. Базовий алгоритм роботи такої програми має наступні кроки:

- провести парсинг вихідного C++ коду;
- побудувати граф потоку керування;
- отримати час виконання базових блоків графа потоку керування;
- присвоїти час виконання блоків як вагу дуг у графі;
- знайти найдовший шлях графа, використовуючи відомі алгоритми;
- оцінити час виконання цього шляху й отримати оцінку WCET.

### Результати

Дослідження рівня впливу програмного середовища операційних систем реального часу і застосованості гібридного методу для оцінки граничного часу виконання програм зводиться до порівняння розбіжності результатів оцінки WCET статичним і гібридним методами на тестовій вибірці програм.

Статичний метод використовують для отримання безпечної оцінки WCET, яка враховує вплив апаратно-програмного забезпечення і відображає реальний максимально можливий час виконання програми. Для отримання оцінки статичним методом використовують інструмент aiT від компанії AbsInt [12]. Оскільки статичний метод потребує наявності абстрактної моделі апаратного забезпечення, в якості тестового стенда була обрана конфігурація з процесором, який є в списку змодельованих, а саме ARM7.

Парсинг вихідного коду C++ належить до задач текстової обробки інформації. Одним із найбільш гнучких і зручних засобів обробки й розпізнавання текстової інформації є регулярні вирази, але для синтаксичного аналізу програмного коду їх можливостей недостатньо. Для таких задач, як розпізнавання програмного коду, використовують парсер-генератори [10]. Тому для реалізації розпізнавання вихідного коду C++ була обрана бібліотека Boost.Xpressive, яка поєднує гнучкість і зручність регулярних виразів і потужність парсер-генераторів, що дозволить побудувати зручну і негроміздку граматику для розпізнавання коду C++.

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

Пошук найдовшого шляху за допомогою статичного методу може бути виконаний за алгоритмом, вказаним у [1].

Побудова графа потоку керування відбувається після розпізнавання коду з використанням розпізнаних токенів (елементів мови) і контексту переходів для визначення базових блоків як вершин та їх подальшого зв'язку між собою дугами (рис. 2).

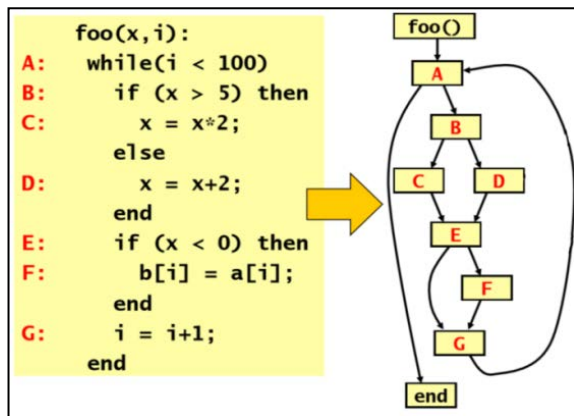


Рис. 2. Побудова графа потоку керування

Fig. 2. Constructing a control flow graph

Задача оцінки часу виконання базових блоків графа потоку керування в гібридному методі може бути вирішена за допомогою замірів часу на старті і в кінці цього блока або через визначення кількості процесорних тактів, які необхідні для виконання цього блока [8].

Під час реалізації гібридного методу надана перевага другому способу, оскільки він є більш гнучким і краще підходить для врахування погрешності часової оцінки (рис. 3).

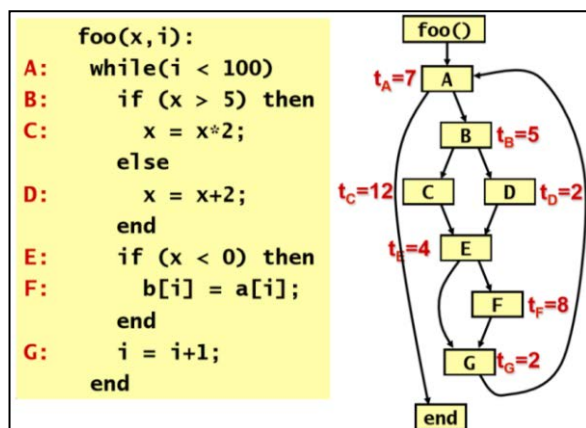


Рис. 3. CFG з розрахованими оцінками

Fig. 3. CFG with calculated estimates

Отриманий граф потоку керування (CFG) і часові оцінки базових блоків дозволяють знайти найдовший за часом шлях виконання [4]. Для цього можна використати будь-який зворотний алгоритм пошуку найкоротшого шляху у зв'язаному орієнтованому графі. Для вирішення задачі був обраний зворотний алгоритм Дейкстри (рис. 4).

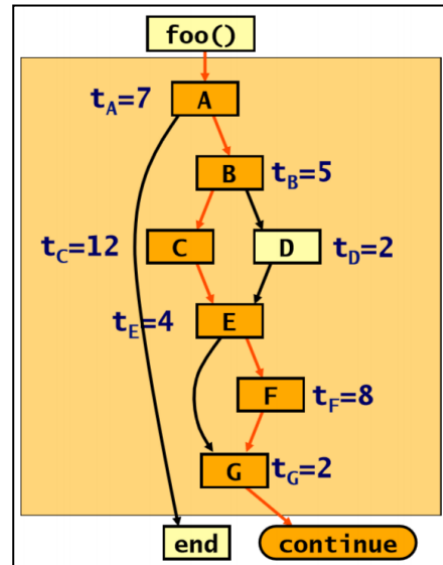


Рис. 4. Пошук найдовшого шляху в CFG

Fig. 4. Searching for the longest way in CFG

Після знаходження найдовшого шляху, можна оцінити граничний час виконання програми. Для цього визначають вхідні параметри, які сприяють проходженню найдовшого шляху в графі, а потім проводять багаторазові заміри часу виконання цього шляху на цільовому обладнанні. З усіх замірів вибирають найбільший, до нього додають додатковий час, й отриманий сумарний час буде відображати розраховану гібридним методом оцінку WCET для заданої програми.

Дані для дослідження будуть являти собою набір розрахованих статичним і гібридним методами WCET оцінок для тестової вибірки програм. Тестові програми та умови, в яких їх будуть виконувати, підібрані так, щоб максимально виділити різницю між теоретичним і фактичним граничним часом на вибірці програм за різними сценаріями виконання. Проаналізувавши рівень відхилення вимірюваного часу від теоретичного та визначивши кореляцію між ними, можна зробити висновок щодо застосованості

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

гібридного методу для часової оцінки й ефективності використання додаткового часу погрішності для покриття впливу програмного середовища ОС РЧ на час виконання програм.

Отримані статичним і гібридним методами оцінки WCET для тестованих програм [7] наведені в табл. 1.

Порівняльний аналіз теоретичного й фактичного часу виконання програм дозволив оцінити рівень впливу програмного середовища операційних систем реального часу на час виконання програм. За результатами можна побачити, що рівень розбіжності часових оцінок у статичному й гібридному методах майже не

залежить від складності тестової програми й загального часу її виконання. Для розглянутих прикладів програм рівень розбіжності не перевищує 15 %. Тому вплив програмного середовища ОС РЧ, хоч і має динамічну природу, може бути приблизно нівельований додатковим часом у розмірі 15–20 % від отриманої гібридним методом оцінки. Для деяких програм такий показник виявиться доволі песимістичним і призведе до зайвого резервування ресурсів, але це є виправданою платою за безпечну часову оцінку в разі неможливості використання статичних методів.

Таблиця 1

## Оцінки WCET, отримані статичним і гібридним методами

Table 1

## WCET estimates obtained by static and hybrid methods

Тестова програма	Кількість вузлів	WCET <sub>static</sub>	WCET <sub>hybrid</sub>	Розбіжність
Constant Loop-1	3	221	194	+12 %
Constant Loop-2	3	88	79	+10 %
Branches-1	4	41	39	+3 %
Branches-2	6	51	48	+4 %
ContextLoop-1	5	686	634	+7 %
ContextLoop-2	5	695	640	+8 %
CntSumMat	8	26 572	23 118	+13 %
MatMult	7	523 599	466 003	+11 %

## Наукова новизна та практична значимість

Необхідність використання абстрактних моделей і наявна велика різноманітність апаратних засобів та операційних систем реального часу інколи роблять майже неможливим використання статичних методів для оцінки найгіршого часу виконання програм. Тому на практиці для оцінки використовують менш точні динамічні методи з замірами часу. В якості альтернативи статичному методу був розроблений гібридний метод оцінки, але його застосування для оцінки критичних до часу виконання систем недостатньо визначена.

Наукова й практична значимість цього дослідження полягає в тому, що його результати дозволяють отримати узагальнене уявлення щодо ступеня впливу програмного середовища

операційних систем на час виконання програм і дають відповідь щодо можливості та надійності використання гібридного методу з додаванням додаткового часу для отримання безпечної оцінки найгіршого часу виконання програм для ОС РЧ.

## Висновки

Проведене дослідження дало рекомендації щодо застосування гібридного методу часової оцінки WCET. Було визначено, що вплив програмного середовища ОС РЧ, хоч і має динамічну природу, може бути компенсований додатковим часом погрішності в розмірі 15–20 % від оцінки, отриманої гібридним методом. Таким чином, гібридний метод із додаванням додаткового часу дозволяє отримати безпечну оцінку WCET, і його можна застосовувати для часової верифікації задач реального часу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Балашов, В. В. Встроенные информационно-управляющие системы реального времени. Лекция 3: Оценка наихудшего времени выполнения программ (WCET) [Электронный ресурс] / В. В. Балашов ; каф. АСВК, Лаборатория Вычислительных Комплексов, МГУ им. В. М. Ломоносова. – Режим доступа: [http://lvk.cs.msu.su/~sveta/Балашов\\_3\\_Оценка\\_WCET.pdf](http://lvk.cs.msu.su/~sveta/Балашов_3_Оценка_WCET.pdf). – Назва з екрана. – Перевірено : 31.05.2018.
2. Козырев, В. П. Методы оценки времени выполнения в системах реального времени / В. П. Козырев // Программирование. – 2016. – Т. 42, № 1. – С. 39–50.
3. Betts, A. Hybrid Measurement-Based WCET Analysis using Instrumentation Point Graphs : PhD. Thesis / A. Betts ; University of York. – Heslington, 2010. – 208 p.
4. Corti, M. Approximation of Worst-Case Execution Time for Preemptive Multitasking Systems / Matteo Corti, Roberto Brega, Thomas Gross // Languages, Compilers, and Tools for Embedded Systems. – Berlin, 2001. – P. 178–198. doi: 10.1007/3-540-45245-1\_12
5. Damschen, M. Extending the WCET Problem to Optimize for Runtime-Reconfigurable Processors / Marvin Damschen, Lars Bauer, Jörg Henkel // ACM Transactions on Architecture and Code Optimization. – 2016. – Vol. 13. – Iss. 4. – P. 1–24. doi: 10.1145/3014059
6. Damschen, M. Timing Analysis of Tasks on Runtime Reconfigurable Processors / Marvin Damschen, Lars Bauer, Jörg Henkel // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. – 2017. – Vol. 25. – Iss. 1. – P. 294–307. doi: 10.1109/TVLSI.2016.2572304
7. Fellger, W. Comparison of WCET Tools / W. Fellger, S. Gepperth, F. Krause ; Institute of Software Technology University of Stuttgart. – Stuttgart, 2011. – 45 p.
8. Lokuciejewski, P. Worst-Case Execution Time Aware Compilation Techniques for Real-Time Systems / P. Lokuciejewski, P. Marwedel. – Dordrecht : Springer, 2011. – 262 p. doi: 10.1007/978-90-481-9929-7
9. Puschner, P. Testing the results of static worst-case execution-time analysis / P. Puschner, R. Nossal // Real-Time Systems Symposium : Proc. of the 19<sup>th</sup> Conf. (Washington, December 02–04, 1998). – Washington, 1999. – P. 134–143. doi: 10.1109/real.1998.739738
10. Sewell, T. High-assurance timing analysis for a high-assurance real-time operating system / T. Sewell, F. Kam, G. Heiser // Real-Time Systems. – 2017. – Vol. 53. – Iss. 5. – P. 812–853. doi: 10.1007/s11241-017-9286-3
11. Stappert, F. Complete worst-case execution time analysis of straight-line hard real-time programs / F. Stappert, P. Altenbernd // Journal of Systems Architecture. – 2000. – Vol. 46. – Iss. 4. – P. 339–355. doi: 10.1016/S1383-7621(99)00010-7
12. Wilhelm, R. The worst-case execution time problem – overview of methods and survey of tools / R. Wilhelm, J. Engblom, A. Ermedahl // Transaction on Embedded Computing Systems. – 2008. – Vol. 7. – Iss. 3. P. 1–53. doi: 10.1145/1347375.1347389

В. Я. НЕЧАЙ<sup>1\*</sup>, Д. А. ВОЛОШИН<sup>2\*</sup>, А. И. НЕЖУМИРА<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Компьютерные информационные технологии», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (099) 904 29 64, эл. почта [vnetchay@i.ua](mailto:vnetchay@i.ua), ORCID 0000-0001-5358-4335

<sup>2\*</sup>Каф. «Компьютерные информационные технологии», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (093) 311 37 22, эл. почта [dmro.voloshyn@gmail.com](mailto:dmro.voloshyn@gmail.com), ORCID 0000-0003-1250-3206

<sup>3\*</sup>Каф. «Компьютерные информационные технологии», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (066) 572 48 18, эл. почта [nezhumira.ok@gmail.com](mailto:nezhumira.ok@gmail.com), ORCID 0000-0002-3905-2591

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ВРЕМЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОГРАММНЫХ СРЕД ОПЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

**Цель.** Более чем двадцатилетний срок исследования оценки наихудшего времени выполнения программ (Worst Case Execution Time, WCET) привел к разработке многих методов. До сих пор нет окончательных выводов относительно применения того или иного метода. Поэтому целью нашей работы является определение возможности использования гибридного метода для оценки WCET в системах реального времени.

doi: 10.15802/stp2018/

© В. Я. Нечай, Д. О. Волошин, О. І. Нежуміра, 2018

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

**Методика.** Выяснение оценки WCET для гибридного метода заключается в том, чтобы провести синтаксический анализ на языке программирования C++ и, построив граф потока управления, получить время выполнения его базовых блоков. Найдя самый длинный путь графа, оценить время выполнения этого пути и получить оценку WCET. Для поиска самого длинного по времени выполнения пути был выбран обратный алгоритм Дейкстры. После чего было выполнено сравнение предельных временных оценок, полученных статическим и гибридным методами, а также анализ расхождения этих результатов. **Результаты.** Определение худшего времени выполнения программ наиболее важно для задач «жесткого реального времени». Недооценка этого показателя может привести к катастрофическим последствиям. А переоценка – к существенному перерасходу ресурсов. Поэтому была проведена оценка WCET с помощью статического и динамического методов, которая дала возможность определить, что результаты, полученные двумя методами, неплохо коррелируют. Для рассматриваемого класса задач время выполнения WCET может быть определено с помощью гибридного метода. Добавление дополнительного времени в размере 15–20 % к результатам, полученным гибридным методом, позволяет получить безопасную оценку WCET в системах реального времени. **Научная новизна.** Гибридный метод существует уже некоторое время, но надежность его использования еще не была достаточно изучена. Данное исследование делает шаг в определении практической применимости гибридного метода для временной оценки задач реального времени. **Практическая значимость.** Результаты исследования позволяют сделать выводы, что гибридный метод может быть использован для получения WCET в задачах «жесткого реального времени». А некоторое неизвестное на данный момент влияние среды операционных систем реального времени (ОС РВ) может быть учтено добавлением дополнительного времени.

*Ключевые слова:* предельное время выполнения программ; WCET; операционные системы реального времени; задачи реального времени; гибридный метод; статический метод; динамический метод

V. Y. NECHAY<sup>1</sup>\*, D. O. VOLOSHYN<sup>2</sup>\*, O. I. NEZHUMIRA<sup>3</sup>\*

<sup>1</sup>\*Dep. «Computer Information Technologies», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (099) 904 29 64, e-mail vnechay@i.ua, ORCID 0000-0001-5358-4335

<sup>2</sup>\*Dep. «Computer Information Technologies», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (093) 311 37 22, e-mail dmtro.voloshyn@gmail.com, ORCID 0000-0003-1250-3206

<sup>3</sup>\*Dep. «Computer Information Technologies», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 572 48 18, e-mail nezhumira.ok@gmail.com, ORCID 0000-0002-3905-2591

## RESEARCH OF LIMIT TIME INDICES OF SOFTWARE ENVIRONMENTS OF REAL TIME OPERATING SYSTEMS

**Purpose.** More than 20 years of the Worst Case Execution Time (WCET) studies have led to the development of many methods for its evaluation. So far, there are no definitive conclusions about usage of these methods. Therefore, the purpose of this paper is to determine the possibility of using a hybrid method for estimating WCET in real-time systems. **Methodology.** The approach for evaluating WCET for a hybrid method is to parse the input code in the C++ programming language and, after constructing the control flow graph, get the execution time of its base blocks. After finding the longest way of the graph, to estimate the time of execution of this way and get the WCET evaluation. To find the longest-running way, the reverse Dijkstra algorithm was chosen. After that, there was made a comparison of the limiting time estimations that were obtained by static and hybrid methods, as well as an analysis of the discrepancy between these results. **Findings.** Determining the worst execution time of programs is most important for «hard real-time» tasks. Underestimation of this indicator can lead to catastrophic consequences. An overestimation – to a significant overexpenditure of resources. Therefore, WCET was evaluated using static and dynamic methods. It was determined that the results obtained by the two methods correlate well. For the class of tasks that are under consideration, WCET execution time can be determined using a hybrid method. Adding an extra time of 15–20 % to the results, obtained by the hybrid method, allows getting a foolproof estimate of WCET in real-time systems. **Originality.** The hybrid method has been existing for some time, but the reliability of its use has not been sufficiently studied yet. The given study makes a step in determining the practical applicability of the hybrid method for time estimation of real-time tasks. **Practical value.** The results of this research allow us to conclude that a hybrid

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

method could be used for obtaining WCET in "hard real-time" tasks. Furthermore, some unknown at this moment influence of the OS RT environment can be taken into account by adding extra time.

**Keywords:** worst case execution time; WCET; real-time operating systems; real-time tasks; hybrid method; static method; dynamic method

## REFERENCES

1. Balashov, V. V. (undated). *Vstroennyye informatsionno-upravlyayushchie sistemy realnogo vremeni. Lektsiya 3: Otsenka naikhudshego vremeni vypolneniya programm (WCET)*. Retrieved from [http://lvk.cs.msu.su/~sveta/Балашов\\_3\\_Оценка\\_WCET.pdf](http://lvk.cs.msu.su/~sveta/Балашов_3_Оценка_WCET.pdf) (in Russian)
2. Kozyrev, V. P. (2016). Estimation of the execution time in real-time systems. *Programming*, 42(1), 39-50. (in Russian)
3. Betts, A. (2010). *Hybrid Measurement-Based WCET Analysis using Instrumentation Point Graphs*. PhD thesis. University of York, Heslington. (in English)
4. Corti, M., Brega, R., & Gross, T. (2001). Approximation of Worst-Case Execution Time for Preemptive Multi-tasking Systems. In *Languages, Compilers, and Tools for Embedded Systems. Lecture Notes in Computer Science* (pp. 178-198). Berlin. doi: 10.1007/3-540-45245-1\_12 (in English)
5. Damschen, M., Bauer, L., & Henkel, J. (2016). Extending the WCET Problem to Optimize for Runtime-Reconfigurable Processors. *ACM Transactions on Architecture and Code Optimization*, 13(4), 1-24. doi: 10.1145/3014059 (in English)
6. Damschen, M., Bauer, L., & Henkel, J. (2017). Timing Analysis of Tasks on Runtime Reconfigurable Processors. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 25(1), 294-307. doi: 10.1109/TVLSI.2016.2572304 (in English)
7. Fellger, W., Gepperth, S., & Krause, F. (2011). *Comparison of WCET Tools: Fachstudie Nr. 142*. Stuttgart: Institute of Software Technology University of Stuttgart. (in English)
8. Lokuciejewski, P., & Marwedel, P. (2011). *Worst-Case Execution Time Aware Compilation Techniques for Real-Time Systems*. New York: Springer (in English)
9. Puschner, P., & Nossal, R. (1998). Testing the results of static worst-case execution-time analysis. *Proceedings of the IEEE Real-Time Systems Symposium, December 02-04*, 134-143 (in English)
10. Sewell, T., Kam, F., & Heiser, G. (2017). High-assurance timing analysis for a high-assurance real-time operating system. *Real-Time Systems*, 53(5), 812-853. doi: 10.1007/s11241-017-9286-3 (in English)
11. Stappert, F., & Altenbernd, P. (2000). Complete worst-case execution time analysis of straight-line hard real-time programs. *Journal of Systems Architecture*, 46(4), 335-339. doi: 10.1016/S1383-7621(99)00010-7 (in English)
12. Wilhelm, R., Engblom, J., & Ermedahl, A. (2008). The worst-case execution time problem – overview of methods and survey of tools. *Transaction on Embedded Computing Systems*, 7(3), 1-53. doi: 10.1145/1347375.1347389 (in English)

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. І. Шинкаренком (Україна)

Надійшла до редколегії: 22.02.2018

Прийнята до друку: 30.05.2018

## УДК 004.421.2:519.17

В. В. СКАЛОЗУБ<sup>1\*</sup>, Л. А. ПАНИК<sup>2\*</sup>

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

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

## РЕАЛИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ, КОНКУРЕНТНЫХ И НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ ПЛАНИРОВАНИЯ МНОГОПРОДУКТОВЫХ ПОТОКОВ В ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЯХ

**Цель.** Главной целью статьи является разработка новой унифицированной процедуры планирования нечетких многопродуктовых и динамических, а также конкурентных потоков в транспортных сетях и сетевых информационных системах. Процедура основана на использовании параллельных синхронных алгоритмов расчета неоднородных максимальных потоков. **Методика.** В работе предложена классификация математических моделей задач по планированию потоков в транспортных сетях. Исследованы возможности использования унифицированной процедуры и параллельного синхронного алгоритма расчета максимальных неоднородных потоков для реализации задач планирования многопродуктовых, нечетких, динамических и конкурентных потоков. **Результаты.** Эффективность и универсальность предложенных методов планирования неоднородных потоков установлена путем сравнения полученных в статье результатов расчетов с известными в литературе. Разработана унифицированная процедура и параллельный синхронный алгоритм для планирования нечетких многопродуктовых, динамических и конкурентных потоков в транспортных сетях, а также реализованы задачи оптимального распределения этих потоков в транспортных сетях. **Научная новизна.** В статье разработана новая унифицированная процедура планирования нечетких многопродуктовых, динамических и конкурентных потоков в транспортных сетях информационных систем, использующая параллельные синхронные алгоритмы расчетов максимальных потоков. Процедура позволяет вычислить локальные экстремумы моделей оптимального распределения потоков. **Практическая значимость.** Практическая ценность полученных результатов определяется унифицированными возможностями и эффективностью процедуры и параллельного синхронного алгоритма, предназначенного для расчета максимальных многопродуктовых потоков в транспортных сетях. Разработанная процедура обеспечивает возможность решения задач анализа и планирования многопродуктовых потоков в сетях для динамических, нечетких и конкурентных моделей распределения транспортных и информационных потоков.

**Ключевые слова:** транспортные сети; модели планирования; максимальные неоднородные потоки; нечеткие и динамические потоки; конкурентные информационные потоки; параллельные алгоритмы

### Введение

В различных современных сферах деятельности (транспортные, энергетические и сетевые информационные структуры и т. д. [6, 8, 12]) чрезвычайно широко распространенными являются задачи анализа и оптимального планирования и управления потоками в сетях [2, 3, 14] или задачи, приведенные к ним. Отметим, что на практике во многих случаях потоки в транспортных и других сетях являются неоднородными, динамическими (существенный срок передачи, изменение параметров сети по периодам суток [2, 7, 11]), с неопределенными

параметрами (пропускная способность ребер сети, действительные условия передачи потоков [2, 13]). Неоднородные потоки в сетях могут содержать объекты с различными свойствами по функциональному назначению, требованиям к процессу транспортировки, сервисам и др. [3, 4]. Развитие сетевых технологий также требует совершенствования методов управления потоками.

В связи с необходимостью передачи и обработки все возрастающих объемов информации важное значение приобретают вопросы организации и оптимизации функционирования сетевых информационных систем (СИС) [2, 11].

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

В СИС присутствует неопределенность, вызванная рядом факторов: невозможностью точных измерений значений информационных потоков (ИП); влияние внешней среды на параметры элементов структуры СИС; при оценках функционирования СИС неизвестны требования пользователей к передаче ИП [4]. При изменяющихся требованиях к процессу передачи ИП внутри СИС, а также конфликтах между ИП, снижается эффективность функционирования СИС. Поиск эффективных распределений ИП в СИС (с учетом требований множества клиентов, динамических параметров потоков, неопределенности пропускных способностей элементов СИС, объемов передаваемых информационных потоков и др.) является актуальной задачей управления СИС. В [2] разработана процедурная модель распределения ИП в СИС на основе совместного использования вполне полиномиальной аппроксимационной схемы (FPTAS) [8] и генетического алгоритма. Модель обеспечивает решение задачи определения максимального конкурентного потока путем разрешения конфликтов между потоками. В [2, 11] исследованы оптимизационные задачи о потоках в нечетких сетях применительно к транспортным и энергетическим структурам.

Задачи нахождения максимального потока и потока минимальной стоимости в транспортных сетях (ТС) широко освещались [6, 10, 14]. При учете факторов неопределенности (пропускные способности, стоимости перевозок и др.) возникают менее исследованные потоковые задачи в нечетких условиях [7, 11, 14]. При учете затрат времени, а не мгновенного прохождения потока по дугам сети, получают «стационарно-динамические» модели задач [2, 11], а при изменениях параметров ТС во времени получают динамические модели задач о потоках. В [7] исследована задача расчета потока минимальной стоимости в нечеткой динамической ТС, которая решается на основе предложенного авторами алгоритма и процедуры «растяжения вершин графа во времени». В динамической ТС требовалось переместить определенное число единиц потока с минимальными затратами так, чтобы последний элемент вошел в сток в момент времени не позднее заданного.

**Цель**

Развитие методов и средств анализа свойств элементов потоков, а также создание современных информационно-коммуникационных технологий и систем дают возможность для все более полного учета требований отдельных категорий объектов транспортных потоков, а также параметров их взаимодействия.

Целью статьи является разработка новой унифицированной процедуры планирования нечетких многопродуктовых и динамических, а также конкурентных потоков в транспортных сетях и сетевых информационных системах. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: разработать классификацию моделей взаимодействия транспортных потоков; разработать унифицированный параллельный синхронный алгоритм расчета максимального потока в транспортных сетях; реализовать нечеткие динамические модели планирования многопродуктовых потоков в транспортных сетях; разработать конкурентные модели планирования многопродуктовых потоков.

**Методика**

Анализ публикаций позволил классифицировать математические модели взаимодействия транспортных потоков.

В табл. 1 приведена классификация математических моделей задач о потоках в транспортных сетях с учетом числа «серверов» и «клиентов» (отдельных потоков или продуктов).

Другими характеристиками моделей (табл. 1) являются свойства их параметров (детерминированные, стохастические, интервальные, нечеткие, неоднородно-неопределенные [3, 4]), временные характеристики (статические, стационарно-динамические, динамические).

Учет специфических категорий требований или свойств объектов транспортных потоков существенно влияет на содержание и сложность соответствующих моделей и методов их анализа и планирования [3, 6, 12]. В табл. 2 представлены данные, характеризующие возрастающую сложность математических моделей детерминированных потоковых задач в ТС. Классы моделей можно развивать, учитывая динамические свойства ТС, различные виды условий неопределенности параметров ТС и данных.

Таблица 1

**Классификация моделей взаимодействия транспортных потоков**

Table 1

**Classification of models of transport flows interaction**

Свойства Тип взаимодействия	Инфраструктура (сервисы)	Клиенты (потоки)	Примеры моделей
$T_1$	1	1	Однопродуктовые потоки
$T_2$	1	n	Многопродуктовые потоки
$T_3$	m	1	Конкуренция за потоки
$T_4$	m	n	Кооперация (поездка с пересадками)

Представленная классификация задач анализа транспортных потоков исходит из свойств математических моделей и алгоритмов реализации. Все последующие классы включают требования предыдущих, дополняя их специальными условиями, указанными в табл. 2. В исследованиях [10, 12, 14] описан широкий круг алгоритмов анализа и планирования пото-

ков в транспортных и других сетях, среди них также указаны алгоритмы расчета максимальных потоков. Эти исследования в большинстве рассматривают однородные потоки. В то же время отмечается, что задачи совершенствования и развития методов анализа и планирования неоднородных потоков в ТС становятся все более актуальными.

Таблица 2

**Классы математических моделей задач анализа транспортных потоков**

Table 2

**Classes of mathematical models of traffic flow analysis tasks**

Класс модели	Название	Условия потоков	Свойства	Модель
K1	Однопродуктовые	$u_{ij} \leq d_{ij}$	Неразрывность потока	Минимальный разрез
K2	Многопродуктовые	$\sum_k u_{ij}^k \leq d_{ij}$	Множество сетей для потока	Минимальное разделяющее множество
K3	Компромиссные многопродуктовые	$u_{ij}^k \leq d_{ij}^k$ $d_{ij}^k = f_k(u_{ij}^k)$	Сепарабельность ограничений потоков	Компромисс потоков на дугах
K4	Структурные требования к потокам продуктов	$d_{ij} = f(u_{ij}^k)$ $d_{ij}^k = f(\overline{u_{ij}})$	Несепарабельность связей в потоках	$\prod_k u_{ij}^k = 0$

Среди задач анализа и планирования потоков в ТС выделяется задача по определению максимальных потоков в качестве основы при формировании и анализе ТС, результаты которой широко применяются на практике [1, 6, 10, 14].

В связи с всесторонним развитием сетевых технологий, созданием и функционированием интеллектуальных транспортных систем (ИТС) [3] формируются новые задачи оптимального планирования неоднородных транспортных потоков (многопродуктовые, многокритериаль-

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

ные, с учетом индивидуальных потребностей элементов-носителей потоков и др.) [3, 4], которые все больше учитывают требования отдельных участников потоков. Решение таких задач базируется на определении наборов количественных и качественных оценок свойств сетей. Реализация многопродуктовых, компромиссных, динамических и др. моделей планирования потоков в ТС [1, 5, 6] использует расчеты максимальных потоков, потоков минимальной стоимости, анализ разделяющих множеств ребер ТС и т. д. [1, 2], что требует применения отдельных численных методов и алгоритмов. В работе [5] предложен новый унифицированный параллельный синхронный алгоритм анализа и планирования потоков (ПСАП) в ТС, пригодный для реализации различных классов моделей потоков. Этот алгоритм применен для расчета максимальных одно- и многопродуктовых потоков. В предлагаемой статье ПСАП применяется для исследования нечетких динамических и конкурентных моделей планирования многопродуктовых потоков в ТС.

Задача расчета максимального потока (МП) в ТС является достаточно затратной, также существуют определенные структуры сетей, для которых известные алгоритмы имеют слабую сходимость [1, 10]. Отметим, что в настоящее время существует более двадцати алгоритмов для расчета максимальных потоков в сетях, среди которых наиболее распространены алгоритмы Форда–Фалкерсона, Эдмондса–Карпа, Диница [1]. При анализе многопродуктовых (неоднородных) потоков сложности построения и реализации алгоритмов оценки параметров максимальных потоков существенно возрастают [2, 6, 8].

Формально ТС – это ориентированный граф  $G = (V, E)$ , в котором каждое ребро  $(u, v)$  имеет положительную пропускную способность  $c(u, v) > 0$  и поток  $f(u, v)$  [1, 6]. Выделяют две вершины (исток  $s$  и сток  $t$ ) такие, что любая другая вершина сети лежит на пути из вершины  $s$  к вершине  $t$ . Обозначим через

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

транспортную сеть (далее сеть), в которой  $c(u, v)$  – пропускная способность;  $f(u, v)$  – по-

ток через ребро  $(u, v)$ ;  $V$  – множество узлов,  $E$  – множество ребер.

Параллельный синхронный алгоритм анализа параметров максимальных потоков в сетях (ПСАП), подобно алгоритму Эдмондса–Карпа (А–ЭК) [1], использует стратегию поиска в ширину при одновременном определении возможных путей потоков через сеть с известными на определенном шаге расчета пропускными способностями дуг (ребер) остаточной сети (ОС). ОС формируется итерациями, как сеть, пропускные способности ребер которой модифицируются на основе величин определенных и увеличивающих потоков [1, 6]. В А–ЭК на каждой итерации в построенном дереве возможных путей выбирается кратчайший по числу ребер путь, по которому пропускается дополнительный увеличивающий поток. В отличие от А–ЭД и других подобных алгоритмов, в предлагаемом ПСАП за счет синхронизации процессов формирования узлов дерева в них также одновременно выполняется анализ возможных значений дополнительных, увеличивающих потоков, которые могут распространяться по следующим ребрам ОС. При этом возникает возможность параллельно (на одной итерации) выполнять анализ нескольких увеличивающих потоков через ОС.

В работе принято, что узловые процедуры могут выполняться, если к ним по схеме сети (1) поступили все входящие потоки. Для управления процессами синхронизации узловых процедур вводится шаговый параметр поступления потоков ( $t$ ). Значение параметра указывает «длину в шагах ( $t$ )» пути от истока до соответствующего узла в ОС. Узлам транспортной сети назначают состояния в зависимости от этапов расчета потоков. Сначала все узлы имеют состояние «Ожидает». Если на этапе  $t$  к узлу поступил некоторый входной поток, узел переходит в состояние «Активный», а при поступлении всех входных потоков становится «Готов». При этом параллельно выполняется вызов всех выходных узлов, передавая им рассчитанные параметры возможных потоков по соответствующим путям. После передачи потоков сам узел переходит в состояние «Выполнено», а число активных узлов в сети  $N_a(t)$  уменьшается на единицу. Система синхрониза-

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

ции контролирует число активных узлов на шаге ( $t$ ). По параметру  $N_a(t) > 0$  также выполняется контроль возможного блокирования процессов формирования маршрутов через ОС. Блокировка синхронизированных потоков возникает, если в ТС нет ни одного узла, к которому на шаге ( $t$ ) поступили все входящие потоки, то есть в состоянии «Готов». В таком случае предусмотрена передача синхронизирующего потока «нулевого» объема. Выбор узла для разблокировки синхронизированных потоков определяется по следующим признакам: минимальное количество отсутствующих входных потоков, при равенстве – минимальность номера шага активизации процедуры ( $t$ ), при равенстве этих параметров – меньшее количество выходных узлов. Возникновение отмеченных процессов блокировки может быть при анализе многопродуктовых потоков. В дальнейших процедурах синхронизирующий поток учитывается в алгоритме, как и все остальные.

В статье [5] разработаны параллельные синхронные алгоритмы, а также приведены примеры расчета максимальных однопродуктовых и многопродуктовых потоков (МПСАП) в ТС. Алгоритмы расчета многопродуктовых потоков часто формируют решения путем поочередного расчета общего потока через ТС [6]. Пример компромиссного потока двух продуктов (рис. 1) показывает дополнительные возможности применения ПСАП, который выполняет одновременный анализ потоков всех продуктов. За счет этого можно применять различные модели компромиссного анализа потоков продуктов на ребрах ТС. На рис. 1 приведена схема сети для пропуска двух продуктов с заданными величинами пропускных способностей дуг.

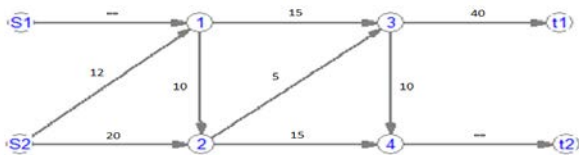


Рис. 1. Схема сети для расчета максимального и компромиссного потоков двух продуктов

Fig. 1. Network diagram for calculating the maximum and trade-off flows of two products

При применении классических алгоритмов [1, 6] получают различные структуры максимальных потоков продуктов  $S1$  и  $S2$  в зависимости от очередности их распределения. Например, максимальный поток продуктов  $P1$  ( $S1$ ) и  $P2$  ( $S2$ ) при расчете от  $S1$  является следующим:

$P1$ :

$$\{[V(S1, u1) = 20]; [V(u1, u3) = 15]; [V(u1, u2) = 5]; [V(u2, u3) = 5]; [V(u3, t1)] = 20]\};$$

$P2$ :

$$\{[V(S2, u1) = 5]; [V(u1, u2) = 5]; [V(S2, u2) = 10]; [V(u2, u4) = 15]; [V(u4, t2) = 15]\}.$$

При расчете от  $S2$ , максимальный двухпродуктовый поток следующий:

$P1$ :

$$\{[V(S1, u1) = 10]; [V(u1, u3) = 10]; [V(u3, t1) = 10]\};$$

$P2$ :

$$\{[V(S2, u1) = 5]; [V(S2, u2) = 20]; [V(u1, u3) = 5]; [V(u2, u4) = 15]; [V(u2, u3) = 5]; [V(u3, u4) = 10]; [V(u4, t2) = 25]\}.$$

В обоих вариантах максимальный поток через ТС равен 35, но имеет существенно различную структуру. Такие варианты могут быть не приемлемыми в условиях конкуренции потоков продуктов  $P1$  ( $S1$ ) и  $P2$  ( $S2$ ). Поэтому даже для двух продуктов применения известных алгоритмов в условиях модели компромисса как равноценности дает существенно разные, многозначные, решения. Алгоритм МПСАП позволяет одновременно формировать решения для всех продуктов отдельно, а при анализе компромиссного множества ребер  $\{(u1, u3); (u1, u2); (u2, u3)\}$  применять нужные модели выбора решений. Реализацию компромиссных потоков представлено в следующих разделах.

## Результаты

Рассмотрим применение МПСАП к нечеткой многопродуктовой модели планирования потоков в ТС (рис. 1).

Таблица 3

## Нечеткие пропускные способности дуг

Table 3

## Fuzzy carrying capacities of the arcs

Нечеткие пропускные способности по дугам графа $\tilde{y}_{ij}$ , ед.									
$(S_1, x_1)$	$(x_1, x_3)$	$(S_2, x_1)$	$(S_2, x_2)$	$(x_1, x_2)$	$(x_2, x_3)$	$(x_2, x_4)$	$(x_3, x_4)$	$(x_3, t_1)$	$(x_4, t_2)$
$\infty$	(15,1,2)	(12,2,2)	(20,3,3)	(10,2,2)	(5,1,1)	(15,1,1)	(10,2,2)	(40,4,5)	$\infty$

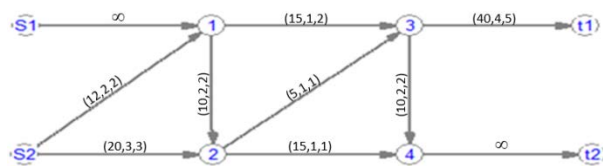


Рис. 2. Схема сети для расчета максимального нечеткого и компромиссного потоков двух продуктов

Fig. 2. Network diagram for calculating the maximum fuzzy and trade-off flows of two products

Максимальный поток продукта  $P1$  ( $S1$ ) для нечетких пропускных способностей представлен на рис. 3. Таким образом, максимальный нечеткий поток для продукта  $P1$  равен (20,2,3).

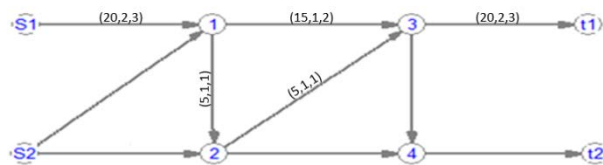


Рис. 3. Схема сети для расчета нечеткого максимального потока для первого продукта

Fig. 3. Network diagram for calculating fuzzy maximum flow for the first product

Максимальный поток продукта  $P2$  ( $S2$ ) для нечетких пропускных способностей представлен на рис. 4.

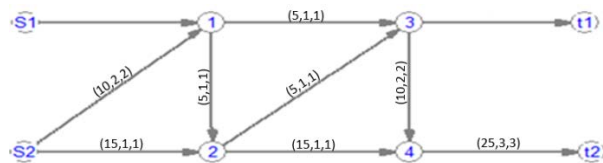


Рис. 4. Схема сети для расчета нечеткого максимального потока для второго продукта

Fig. 4. Network diagram for calculating fuzzy maximum flow for the second product

При этом максимальный нечеткий поток для продукта  $P2$  равен (25,3,3), что соответствует результатам расчетов [11].

Задачи нахождения максимального потока и потока минимальной стоимости в транспортных сетях могут содержать параметры (пропускные способности, стоимости перевозок и др.), значения которых известны не точно в силу различных видов неопределенности [2, 9, 11]. Для анализа таких потоков могут быть использованы модели ТС в нечетких условиях [7]. При учете времени прохождения потока по дугам, а также возможности изменения параметров ТС во времени получают математические модели потоковых задач в динамических ТС при нечетких условиях (ДТСНУ) [2, 11]. В разделе рассмотрено применение алгоритма ПСАП для нахождения максимального потока минимальной стоимости в нечеткой динамической транспортной сети. А именно: требуется пропустить  $\tilde{v}(p)$  единиц потока с минимальными затратами в динамической транспортной сети так, чтобы последняя единица потока вошла в сток в момент времени не позднее заданного  $p$ .

Математическая постановка задачи ДТСНУ, следуя [11], имеет вид:

$$\text{Minimize} \sum_{\theta=0}^p \sum_{(x_i, x_j) \in \tilde{A}} \tilde{c}_{ij} \times \tilde{\xi}_{ij}(\theta), \quad (2)$$

$$\sum_{\theta=0}^p \sum_{x_j \in X} [\tilde{\xi}_{sj}(\theta) - \tilde{\xi}_{js}(\theta - \tau_{js}(\theta))] - \tilde{v}(p) = \tilde{0}, \quad (3)$$

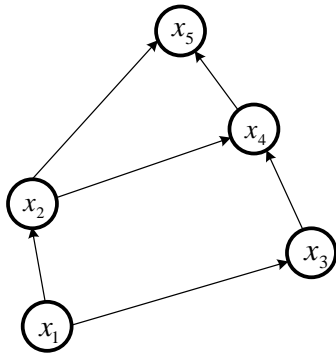
## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

$$\sum_{x_j \in X} [\tilde{\xi}_{ij}(\theta) - \tilde{\xi}_{ji}(\theta - \tau_{ji}(\theta))] = \tilde{0}, \quad x_i \neq s, t; \quad \theta \in T, \quad (4)$$

$$\sum_{\theta=0}^p \sum_{x_j \in X} [\tilde{\xi}_{ij}(\theta) - \tilde{\xi}_{ji}(\theta - \tau_{ji}(\theta))] + \tilde{v}(p) = \tilde{0}, \quad (5)$$

$$0 \leq \tilde{\xi}_{ij}(\theta) \leq \tilde{u}_{ij}(\theta), \quad \forall (x_i, x_j) \in \tilde{A}, \theta \in T. \quad (6)$$

Согласно (2), требуется найти минимальный маршрут перевозки максимального количества единиц потока в ТС за заданное число моментов времени  $p$ , что равно потоку, выходящему из источника  $\sum_{\theta=0}^p \tilde{\xi}_{sj}(\theta)$  (3). Уравнения (5) обеспечивают непрерывность потока: максимальное число единиц потока  $\tilde{p}$  за  $p$  периодов равно потоку, входящему в сток за  $p$  периодов времени  $\sum_{\theta=0}^p \tilde{\xi}_{jt}(\theta - \tau_{jt})$ ; поток  $\sum_{\theta=0}^p \tilde{\xi}_{js}(\theta - \tau_{js})$ , входящий в источник за  $p$  периодов, равен потоку, покидающему сток  $\sum_{\theta=0}^p \tilde{\xi}_{ij}(\theta)$ .

Рис. 5. Исходный динамический граф  $\tilde{G}$ Fig. 5. Initial dynamic graph  $\tilde{G}$ 

Уравнения (4) обеспечивают условия непрерывности потока для каждого узла  $x_i$  и каждого момента времени  $\theta$ , кроме источника и стока. Неравенства (5) ограничивают потоки пропускными способностями дуг ТС.

Алгоритм решения задачи (2–6) [11] основан на переходе к «растянутому во времени» на  $p$  интервалов нечеткому статическому графу

$\tilde{G}_p = (X_p, \tilde{A}_p)$ . Переход выполняется путем создания отдельной копии каждой вершины  $x_i \in X$  в каждый рассматриваемый момент времени  $\theta \in T$ . Подробная процедура формирования эквивалентной статической модели задачи ДТСНУ, а также пример расчета оптимальных параметров исходной ТС приведены в [7, 11]. Рассмотрим реализацию этой задачи на основе алгоритма ПСАП [5]. На рис. 5 показана часть железнодорожной сети, далее представленная в форме нечеткой ТС. Здесь вершина  $x_1$  – это источник, вершина  $x_5$  – сток. Нечеткие пропускные способности и стоимости, а также параметры времени прохождения потока по дугам, зависящие от момента отправления потока, представлены в виде таблиц 4, 5 и 6. Необходимо найти минимальную стоимость перевозки максимального числа единиц потока  $\tilde{v}(p)$ . Правила оперирования с нечеткими треугольными числами представлены в [2].

На рис. 6 показана остаточная сеть после нахождения потока согласно (2–6). В отличие от [11], максимальный поток минимальной стоимости (рис. 6) на основе ПСАП получен за одну итерацию. Отбрасывая искусственные вершины и дуги с потоком, соединяющие их с другими вершинами, получаем максимальный поток (33,5,4) единиц минимальной стоимости (3525,1184,1072) условных единиц. Переходя к динамическому графу  $\tilde{G}$  от «растянутого во времени» статического графа  $\tilde{G}_p$ , получаем, что максимальный поток (33,5,4) за 3 интервала времени равен потоку, выходящему из пар «вершина–время»  $(x_1, 0)$  и  $(x_1, 1)$  и входящему в пару «вершина–время»  $(x_5, 3)$ . Таким образом, получаем нечеткий динамический поток в (33,5,4) единиц с путем  $x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_5$ , который отправляется в момент времени  $\theta=1$  и прибывает в сток в момент времени  $\theta=3$ , а также путем  $x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_4 \rightarrow x_5$ , который отправляется в момент времени  $\theta=0$  и прибывает в сток в момент  $\theta=3$ .

Таблица 4

**Нечеткие, зависящие от момента отправления потока, пропускные способности ТС**

Table 4

**Fuzzy, depending on the moment of flow departure, network capacity of the TN**

Момент времени $\theta$	Нечеткие пропускные способности по дугам графа $\tilde{y}_{ij}$ , ед.					
	$(x_1, x_2)$	$(x_1, x_3)$	$(x_2, x_4)$	$(x_2, x_5)$	$(x_3, x_4)$	$(x_4, x_5)$
0	(12, 1, 2)	(18, 3, 3)	(25, 4, 5)	(30, 5, 6)	(25, 4, 5)	(30, 5, 6)
1	(21, 4, 2)	(15, 3, 2)	(21, 4, 2)	(25, 4, 5)	(25, 4, 5)	(25, 4, 5)
2	(8, 1, 1)	(18, 3, 3)	(25, 4, 5)	(26, 1, 2)	(20, 3, 4)	(31, 4, 5)
3	(10, 1.5, 2)	(18, 3, 3)	(18, 3, 3)	(30, 5, 6)	(20, 3, 4)	(25, 4, 5)

Таблица 5

**Нечеткие, зависящие от момента отправления потока, стоимости**

Table 5

**Fuzzy values, depending on the moment of flow departure**

Момент времени $\theta$	Нечеткие стоимости по дугам графа $\tilde{c}_{ij}$ , условные ед.					
	$(x_1, x_2)$	$(x_1, x_3)$	$(x_2, x_4)$	$(x_2, x_5)$	$(x_3, x_4)$	$(x_4, x_5)$
0	(40, 8, 8)	(50, 9, 8)	(60, 10, 9)	(70, 10, 10)	(50, 9, 8)	(80, 15, 15)
1	(30, 7, 6)	(30, 7, 6)	(40, 8, 8)	(55, 9, 9)	(35, 7, 7)	(25, 5, 5)
2	(60, 10, 9)	(40, 8, 8)	(50, 9, 8)	(75, 11, 12)	(50, 9, 8)	(30, 7, 6)
3	(30, 7, 6)	(70, 10, 10)	(60, 10, 9)	(60, 10, 9)	(50, 9, 8)	(60, 10, 9)

Таблица 6

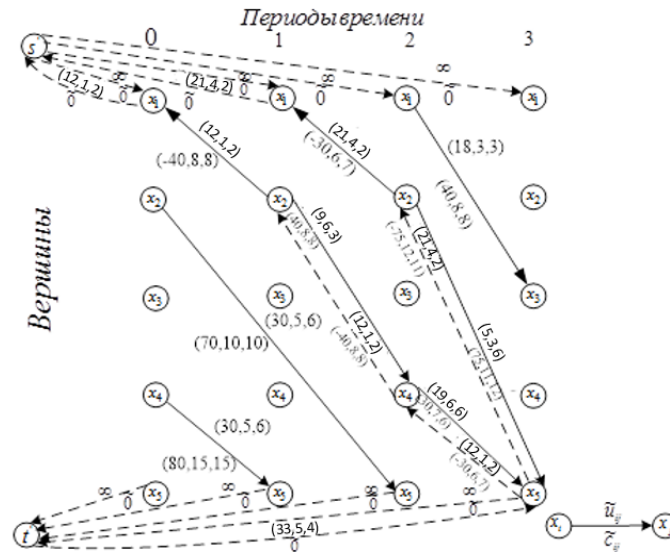
**Параметры времен прохождения потока по дугам ТС**

Table 6

**Times parameters of the flow passing along the transport networks arcs**

Момент времени $\theta$	Время прохождения потока по дугам графа $\tau_{ij}$ , ед. времени					
	$(x_1, x_2)$	$(x_1, x_3)$	$(x_2, x_4)$	$(x_2, x_5)$	$(x_3, x_4)$	$(x_4, x_5)$
0	1	4	4	2	5	1
1	1	3	1	4	4	4
2	3	1	3	1	3	1
3	2	1	3	2	3	1

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

Рис. 6. Остаточная сеть  $\tilde{G}_p^\mu$  после нахождения потокаFig. 6. Residual network  $\tilde{G}_p^\mu$  after flow finding

Приведенный выше алгоритм ПСАП является пригодным и для исследования компромиссных (детерминированных и нечетких) моделей планирования многопродуктовых потоков. В разделе приводится процедура и результаты планирования потоков трех продуктов (для сети на рис. 1, источник продукта 3 – S2, а сток – t1) на основе принципа компромисса:

$$F_C(V) = \max_V (\theta = \min_k (V_k / D_k)) = \theta_C, \quad (7)$$

где  $V_k$  – величина компромиссного потока  $k$ -ого продукта, а  $D_k$  – его максимальный поток в сети (рис. 1). Укажем, что в ТС может быть несколько максимальных потоков, функция (7) является недифференцированной, имеет несколько локальных экстремумов. Поэтому в общем случае на основе ПСАП и приведенных ниже процедур находится локальный экстремум (7) для ТС на рис. 1.

Реализация модели планирования (7) класса КЗ (табл. 2) на основе ПСАП выполняется по следующим процедурам (П).

П1. На основе ПСАП параллельными вычислениями независимо рассчитывают максимальные потоки каждого из продуктов  $D_k$ . При этом также определяют деревья потоков каждого продукта  $Tr_k$ , ветви которых помечают величинами соответствующих потоков  $(V_k(i, j))$ .

П2. Расчет максимального многопродуктового потока  $V_\Sigma(D_k)$  по сети путем наложения деревьев величин потоков  $(V_k(i, j))$ . При этом дугам потока  $V_\Sigma(D_k)$  присваивают величины потоков  $(V_\Sigma(i, j) = \max_k \{V_k(i, j)\})$ . В деревьях  $Tr_k$ , на которых не был реализован максимум  $V_\Sigma(i, j)$ , потоки продуктов уменьшаются на значения  $V_k(i, j)$ , корректируя на эту величину оценки  $D'_k = D_k - V_k(i, j)$ . В результате выполнения процедуры наложения величины  $D'_k$  равны компромиссным оценкам потоков продуктов «к», а их сумма – общему максимальному потоку  $V_\Sigma(D'_k)$ .

П3. Максимальное значение (7) рассчитывают согласно  $\theta_C = V_\Sigma(D'_k) / \sum_k D_k$ . Далее решают задачу разделения суммарного потока  $V_\Sigma(D'_k)$  в соответствии с  $\theta_C$  и набором  $\{D_k\}$ :

$$\forall(k): V_k^C / D_k = \theta_C; \sum V_k^C = V_\Sigma(D'_k). \quad (8)$$

П4. На основе сопоставления деревьев потоков  $Tr_k$  выделяют множество дуг  $R_{(p,q)} = (\{(i_p, j_q)\}; p, q \in A)$  транспортной сети, на которых требуется разделить конкурирующие потоки продуктов. Здесь знак  $A$  соответ-

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

ствует множеству дуг транспортной сети.

П5. На основе решения системы линейных уравнений для дуг  $R_{(p,q)}$  разделяющего множества (РМ) выполняют расчет величин компромиссных потоков продуктов «к» по дугам транспортной сети. При этом структура системы уравнений детализирует (8), а также учиты-

вает ограничения пропускных способностей дуг  $\{(i_p, j_q)\}$  и имеет вид:

$$\forall(k): \sum_{(p,q)} V_{(p,q)}^k / D'_k = \theta_c;$$

$$\forall(p,q) \in R_{(p,q)}: \sum_{(k)} V_{(p,q)}^k = w_{(p,q)}. \quad (9)$$

Таблица 7

## Планирование компромиссных многопродуктовых потоков

Table 7

## Planning trade-off multi-product flows

Сеть	W(i,j)	P1	P2	P3	Pc(1)	Pc(2)	P2(2)	P3(2)	P3–K4	Pc–K4
Ws1,1	50	20	0	0	10	10	0	0	0	9,2668
W1,3	15	15	10	12	15	15	0	8,5	12	13
W1,2	5	5	0	0	5	3,5	0	0	0	5
W2,3	5	5	0	5	5	5	1,5	0	4	5
W2,4	7	0	7	0	7	7	7	0	0	7
W34	10	0	10	0	1,5	1,5	1,5	0	0	0,8666
Ws2,1	12	0	10	12	10	8,5	0	8,5	12	8,7332
Ws2,2	20	0	7	5	7	8,5	8,5	0	4	7
W3,r1	50	20	0	17	18,5	18,5	0	8,5	16	17,1334
W4,r2	50	0	17	0	8,5	8,5	8,5	0	0	7,8666
Vmax		20	17	17	27	27	8,5	8,5	16	25
					0,5	0,5				0,4627

В уравнениях (9) параметры  $w_{(p,q)}$  равны пропускным способностям соответствующих дуг.

Реализация процедур П1–П5 завершает компромиссное планирование многопродуктовых потоков на основе ПСАП. Приведем примеры планирования потоков согласно модели (7) для транспортной сети на рис. 1.

В табл. 7 приведены результаты планирования согласно (6) потоков трех продуктов для сети на рис. 1. Здесь в столбце «Сеть» указаны дуги, в столбце  $W(i, j)$  их пропускные способности, а в строках величины потоков. В строке  $V_{\max}$  указаны максимальные потоки продуктов  $P1, P2, P3$ , а также компромиссные значения (столбцы  $Pc(1), Pc(2), Pc-K4$ ), а под ними даны значения показателей компромисса (7). Решения  $P3-K4$  и  $Pc-K4$  соответствуют моделям типа  $K4$ , (табл. 2), остальные модели соответствуют классу  $K3$ , допускающему независимый расчет каждого из потоков продуктов. Столбцы  $Pc(1)$  и  $Pc(2)$  показывают возможность существования несколь-

ких компромиссных решений (7). Столбцы  $P2(2)$  и  $P3(2)$  содержат величины компромиссных потоков продуктов типа два ( $P2$ ) и три ( $P3$ ), которые имеют существенные отличия от отдельных максимальных потоков  $P2, P3$ . Отметим, что значение (7) соответствует уравнениям (8).

Решения для моделей класса  $K4$  получены при задании условных пропускных способностей дуг, зависящих от значений величин различных потоков. Это свойство модели не позволяет выполнять расчет максимальных потоков каждого из «к» продуктов независимо от других, а требует применения ПСАП ко всей совокупности одновременно. Как указано в таблице, наличие нескольких потоков уменьшило пропускную способность дуги  $W(1,3)$  и привело к уменьшению общего потока до 25.

Рассмотрим вопросы планирования ИП на основе алгоритма ПСАП в СИС, используя постановку [2]. В этой работе решается задача передачи ИП известных величин между наборами

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

абонентских пар (исток–сток). Требуется распределить ресурс пропускной способности СИС таким образом, чтобы в максимально возможной степени удовлетворить требованиям всех абонентских пар в передаче ИП (как продуктов), при условии удовлетворения ограничениям пропускной способности. Задача распределения и перераспределения ИП в СИС обычно сводится к решению задачи о максимальном потоке в сети. Многопродуктовые потоковые задачи могут быть решены за полиномиальное время методами линейного программирования.

сти элементов структуры СИС требования пользователей не могут быть удовлетворены в полной мере.

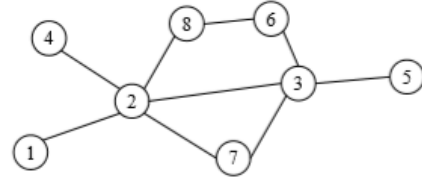


Рис. 7. Структура сети передачи сообщений

Fig. 7. Structure of the messaging network

При недостаточности пропускной способно-

Таблица 8

## Характеристики ребер графа сети передачи данных

Table 8

## Characteristics of graph edges of the data transmission network

$r_i(u_i, v_i)$	$c_i$	$r_i(u_i, v_i)$	$c_i$	$p_i(s_i, t_i)$	$d_i$
$r1(1,2)$	200	$r10(2,1)$	190	$p1(1,5)$	150
$r2(2,3)$	220	$r11(3,2)$	280	$p2(1,6)$	100
$r3(2,4)$	250	$r12(4,2)$	290	$p3(7,2)$	50
$r4(2,7)$	200	$r13(7,2)$	210	$p4(8,3)$	100
$r5(2,8)$	250	$r14(8,2)$	270	$p5(5,1)$	110
$r6(3,5)$	260	$r15(5,3)$	290	$p6(2,4)$	70
$r7(3,6)$	300	$r16(6,3)$	210	$p7(5,1)$	140
$r8(3,7)$	210	$r17(7,3)$	200	$p8(2,7)$	100
$r9(6,8)$	230	$r18(8,6)$	240		

Таблица 9

## Результаты планирования компромиссных путей и величин потоков

Table 9

## The results of planning trade-off ways and flow values

$p_i(s_i, t_i)$	$w_i$	$z_i$	$z_i / d_i$ (%)
$p1(1,5)$	1-2-6	120	80,00 %
$p2(1,6)$	1-4-17-7	80	80,00 %
$p3(7,2)$	17-7-9-14	50	100,00 %
$p4(8,3)$	18-16	100,00	100,00 %
$p5(5,1)$	15-11-10	83,6	76,00 %
$p6(2,4)$	3	70	100,00 %

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

$p7(5,1)$	15-7-9-14-10	106,4	76,00 %
$p8(2,7)$	5-18-16-8	100	100,00 %

Поэтому рассчитывают распределение потоков в СИС, которое не дискриминирует абонентские пары и наилучшим образом использует все имеющиеся ресурсы сети – суперконкурентный мультипоток. Для решения задачи в [2] разработан специализированный генетический алгоритм, а результаты получены за счет осреднения многократных расчетов. На рис. 8 приведена сеть передачи сообщений, граф которой имеет 8 вершин и 9 ребер, которым соответствуют 18 дуг. Начало  $u_i$  и конец  $v_i$  каждой дуги  $r_i$ , а также их пропускные способности  $c_i$  указаны в табл. 8.

Через сеть (рис. 7) необходимо пропустить многопродуктовый поток, в наибольшей степени выполняющий запросы 8-ми продуктов  $p_i$ , источники  $s_i$ , стоки  $t_i$  и требования  $d_i$  которых приведены в табл. 8.

Полученный компромиссный поток с помощью алгоритма МПСАП в рамках процедур П1–П5 представлен в табл. 9, где  $w_i$  – путь для пары узлов, между которыми передаются сообщения. В примере наименьшая величина критерия (7), соотношение поток/запрос  $z_i/d_i$ , имеют пары № 5 и № 7 ( $z_i/d_i = 76,00\%$ ). Результаты планирования распределения ИП основе МПСАП (табл. 9) полностью совпадают с работой [2], что подтверждает достоверность и эффективность предлагаемых методов расчета многопродуктовых потоков.

#### Научная новизна и практическая значимость

В работе на основе анализа известных постановок задач о потоках в транспортных сетях предложены два вида классификаций математических моделей таких задач: на основе учета числа «серверов» и «клиентов» (отдельных потоков или продуктов); исходя из структурных свойств математических моделей и алгоритмов реализации. В классификации все последующие классы моделей включают требования

предыдущих, дополняя их специальными условиями. Указано, что другими характеристиками предложенных классов моделей являются свойства их параметров (детерминированные, стохастические, интервальные, нечеткие), а также временные характеристики (статические, стационарно-динамические, динамические и др.).

В данной статье впервые разработанный нами параллельный синхронный алгоритм был использован для реализации нечетких моделей планирования многопродуктовых потоков в транспортных сетях. Также на основе ПСАП были реализованы нечеткие динамические модели планирования многопродуктовых потоков. При этом за счет процедур распараллеливания был получен вычислительный эффект по сравнению с известными результатами.

В статье разработана новая процедура планирования конкурентных потоков в сетях информационных систем, использующая параллельные синхронные алгоритмы расчетов максимальных потоков. Применение процедуры планирования позволяет вычислить локальные экстремумы модели распределения потоков. Это объясняется тем, что функция распределения конкурентных потоков является недифференцируемой, кроме того возможно существование нескольких максимальных потоков в транспортных сетях.

Практическая ценность результатов работы определяется унифицированными возможностями ПСАП для эффективной реализации задач анализа и планирования многопродуктовых потоков в сетях на основе динамических, нечетких и конкурентных моделей распределения транспортных и информационных потоков.

#### Выводы

В статье исследованы вопросы анализа и планирования многопродуктовых потоков в сетях на основе динамических, нечетких и компромиссных моделей транспортных потоков. Для расчета оптимальных потоков указанных категорий разработана унифицированная процедура на основе параллельных синхронных алгоритмов расчетов максимальных потоков и потоков минимальной стоимости.

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

Предложена новая классификация математических моделей анализа и оптимального планирования транспортных потоков.

Выполненные на основе разработанных процедур и унифицированного параллельного синхронного алгоритма реализации нечетких

моделей планирования многопродуктовых потоков в транспортных и информационных сетях, а также нечетких динамических и конкурентных моделей распределения потоков показали эффективность и универсальность предложенных методов.

## СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алгоритмы: построение и анализ : [пер. с англ.] / Клиффорд Штайн, Рональд Линн Ривест, Томас Кормен, Чарльз Эрик Лейзерсон. – 2-е изд. – Москва : Вильямс, 2010. – 1296 с.
2. Осин, В. Н. Эффективное распределение информационных потоков в сетевой информационной системе на основе нечетких моделей : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.25.05 / Осин Вячеслав Николаевич ; Тамбов. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2014. – 20 с.
3. Скалозуб, В. В. Интеллектуальные информационные технологии и системы железнодорожного транспорта / В. В. Скалозуб, С. Ю. Цейтлин, М. С. Чередниченко // Системные технологии моделирования сложных процессов : монография / под общ. ред. А. И. Михалёва. – Днепр, 2016. – С. 560–589.
4. Скалозуб, В. В. Моделирование и анализ потоковых задач с неоднородными носителями / В. В. Скалозуб, Л. А. Паник // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2007. – Вип. 19. – С. 125–133.
5. Скалозуб, В. В. Паралельні синхронні алгоритми аналізу та планування неоднорідних потоків у транспортних мережах / В. В. Скалозуб, Л. О. Панік // Системні технології : регіон. міжвуз. зб. наук. пр. – Дніпро, 2017. – № 5 (112). – С. 183–197.
6. Филлипс, Д. И. Методы анализа сетей / Д. И. Филлипс, А. Гарсиа-Диас. – Москва : Мир, 1984. – 496 с.
7. Bozhenyuk, A. Algorithm for Monitoring Minimum Cost in Fuzzy Dynamic Networks / Alexander Bozhenyuk, Evgeniya Gerasimenko // Information Technology and Management Science. – 2013. – Vol. 16. – Iss. 1. – P. 53–59. doi: 10.2478/itms-2013-0008
8. Grigoriadis, M. D. Approximate minimum-cost multicommodity flows in  $\epsilon$ -2 KNM) timetime / M. D. Grigoriadis, L. G. Khachiyan // Mathematical Programming. – 1996. – Vol. 75. – Iss. 3. – P. 477–482. doi: 10.1007/BF02592195
9. Holzhauser, M. Maximum flows in generalized processing networks / Michael Holzhauser, Sven O. Krumke, Clemens Thielen // Journal of Combinatorial Optimization. – 2016. – Vol. 33. – Iss. 4. – P. 1226–1256. doi: 10.1007/s10878-016-0031-y
10. Kovacs, P. Minimum-cost flow algorithms: An experimental evaluation EGRES Technical Report [Електронний ресурс] / P. Kovacs // EGRES Technical Report. – 2013. – No. 2013-04. – P. 1–40. – Режим доступа: <https://web.cs.elte.hu/egres/tr/egres-13-04.pdf> – Загл. с экрана. – Проверено : 17.05.2018.
11. Maximum and Minimum Cost Flow Finding in Networks in Fuzzy Conditions / A. V. Bozhenyuk, E. M. Gerasimenko, J. Kacprzyk, I. N. Rozenberg // Flows in Networks Under Fuzzy Conditions. – Cham : Springer, 2016. – P. 23–75. doi: 10.1007/978-3-319-41618-2\_2
12. Nasrabadi, E. Minimum cost time-varying network flow problems / E. Nasrabadi, S. M. Hashemi // Optim. Methods and Software. – 2010. – Vol. 25. – Iss. 3. – P. 429–447. doi: 10.1080/10556780903239121
13. Schiopu, C. The Maximum Flows in Planar Dynamic Networks / C. Schiopu, E. Ciurea // Intern. Journal of Computers Communications&Control. – 2016. – Vol. 11. – Iss. 2. – P. 282–291. doi: 10.15837/ijccc.2016.2.2444
14. Sifaleras, A. Minimum cost network flows: problems, algorithms, and software / A. Sifaleras // Yugoslav Journal of Operations Research. – 2013. – Vol. 23. – Iss. 1. – P. 3–17. doi: 10.2298/YJOR121120001S

В. В. СКАЛОЗУБ<sup>1\*</sup>, Л. О. ПАНИК<sup>2\*</sup>

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

<sup>2\*</sup>Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35,  
ел. пошта leon140377@gmail.com, ORCID 0000-0003-1343-3000

## РЕАЛІЗАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ, КОНКУРЕНТНИХ І НЕЧІТКИХ МОДЕЛЕЙ ПЛАНУВАННЯ БАГАТОПРОДУКТОВИХ ПОТОКІВ У ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖАХ

**Мета.** Головною метою статті є розробка нової уніфікованої процедури планування нечітких багатопродуктових, динамічних, а також конкурентних потоків у транспортних мережах і мережевих інформаційних системах. Процедура заснована на використанні паралельних синхронних алгоритмів розрахунку неоднорідних максимальних потоків. **Методика.** В роботі запропонована класифікація математичних моделей задач із планування потоків у транспортних мережах. Досліджено можливості використання уніфікованої процедури і паралельного синхронного алгоритму розрахунку максимальних неоднорідних потоків для реалізації завдань планування багатопродуктових, нечітких, динамічних і конкурентних потоків. **Результати.** Ефективність і універсальність запропонованих методів планування неоднорідних потоків встановлена шляхом порівняння отриманих у статті результатів розрахунків із відомими в літературі. Розроблено уніфіковану процедуру і паралельний синхронний алгоритм для планування нечітких багатопродуктових, динамічних і конкурентних потоків у транспортних мережах, а також реалізовано завдання оптимального розподілу цих потоків у транспортних мережах. **Наукова новизна.** У статті розроблена нова уніфікована процедура планування нечітких багатопродуктових, динамічних і конкурентних потоків у транспортних мережах інформаційних систем, що використовує паралельні синхронні алгоритми розрахунків максимальних потоків. Процедура дозволяє обчислити локальні екстремуми моделей оптимального розподілу потоків. **Практична значимість.** Практична цінність отриманих результатів визначається уніфікованими можливостями та ефективністю процедури і паралельно синхронного алгоритму, призначеного для розрахунку максимальних багатопродуктових потоків у транспортних мережах. Розроблена процедура забезпечує можливість вирішення завдань аналізу і планування багатопродуктових потоків у мережах для динамічних, нечітких і конкурентних моделей розподілу транспортних та інформаційних потоків.

**Ключові слова:** транспортні мережі; моделі планування; максимальні неоднорідні потоки; нечіткі й динамічні потоки; конкурентні інформаційні потоки; паралельні алгоритми

V. V. SKALOZUB<sup>1\*</sup>, L. O. PANIK<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Computer Information Technologies », Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. (056) 373 15 35, e-mail skalozhubtk@gmail.com, ORCID 0000-0002-1941-4751

<sup>2\*</sup>Dep. «Computer Information Technologies », Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. (056) 373 15 35, e-mail leon140377@gmail.com, ORCID 0000-0003-1343-3000

## IMPLEMENTATION OF THE DYNAMIC, COMPETITIVE AND FUZZY MODELS FOR PLANNING OF THE MULTI-PRODUCT FLOWS IN TRANSPORT NETWORKS

**Purpose.** The purpose of the article is to develop a new unified procedure for planning of the fuzzy multi-product, dynamic and competitive flows in the transport networks and in the information network systems. The procedure is based on the use of the parallel synchronous algorithms for inhomogeneous maximum flows calculating. **Methodology.** The paper proposes the mathematical models' classification of the tasks for planning the flows in transport networks. The possibilities of using the unified procedure and the parallel synchronous algorithm for calculating the maximum inhomogeneous flows for implementation of the tasks for planning multi-product, fuzzy, dynamic and competitive flows are investigated. The efficiency and universality of the proposed methods for the planning inhomogeneous flows is established by comparing the results of the calculations obtained in the article with the known results. **Findings.** The article proposes classification of the mathematical models for the planning inhomogeneous flows in the transport networks. The unified procedure and the parallel synchronous algorithm for planning fuzzy multi-product, dynamic and competitive flows in the transport networks have been developed. The tasks of the optimal distribution of the

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

fuzzy multi-product, dynamic and competitive flows in the transport networks are realized. **Originality.** The article describes the new unified procedure for planning fuzzy multi-product, dynamic and competitive flows in the transport and information systems, using the parallel synchronous algorithms for calculating maximum flows. The procedure allows us to calculate the local extrema of the optimal flows distribution models. **Practical value.** The practical value of the obtained results is determined by the unified capabilities and the procedure efficiency, as well as the parallel synchronous algorithm designed to calculate the maximum multi-product flows in transport networks. The developed procedure provides the possibility to solve the analysis and planning problems of the multi-product flows in the networks for dynamic, fuzzy and competitive models for the distribution of the transport and information flows.

**Keywords:** transport networks, planning models for maximum inhomogeneous flows, fuzzy and dynamic flows, competitive information flows, parallel algorithms

## REFERENCES

15. Shtayn, K., Rivest, R., Kormen, T., & Leyzerson, C. (2010). *Algoritmy: postroenie i analiz*. Moscow: Publisher Vilyams. (in Russian)
16. Osin, V. N. (2014) *Effektivnoe raspredelenie informatsionnykh potokov v setevoy informatsionnoy sisteme na osnove nechetkikh modeley*. (Avtoreferat dysertatsii kandydata tekhnicheskikh nauk). Tambov State Technical University, Tambov. (in Russian)
17. Skalozub, V. V., Tseytlin, S. Y., & Cherednichenko, M. S. (2016). Intellectualnye informatsionnye tekhnologii i sistemy zheleznodorozhnogo transporta. In A. I. Mikhaleva (Ed.), *Sistemnye tekhnologii modelirovaniya slozhnykh protsessov: Monografiya* (pp. 560-589). Dnipro. (in Russian)
18. Skalozub, V. V., & Panik, L. A. (2007). Modelirovanie i analiz potokovykh zadach s neodnorodnymi nositelyami. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 19, 125-133. (in Russian)
19. Skalozub, V. V., & Panik, L. O. (2017). Paralelni synkhronni alhorytmy analizu ta planuvannia neodnorodnykh potokiv u transportnykh merezhakh. *System technology: Regional intercollegiate collection of scientific works*, 5(112), 183-197. (in Ukrainian)
20. Fillips, D. I., & Garsia-Dias, A. (1984). *Metody analiza setey*. Moscow: Publisher Mir. (in Russian)
21. Bozhenyuk, A. & Gerasimenko, E. (2013). Algorithm for Monitoring Minimum Cost in Fuzzy Dynamic Networks. *Information Technology and Management Science*, 16(1), 53-59. doi: 10.2478/itms-2013-0008 (in English)
22. Grigoriadis, M. D., & Khachiyan, L. G. (1996). Approximate minimum-cost multicommodity flows in  $\epsilon$ -timetime. *Mathematical Programming*, 75(3), 477-482. doi: 10.1007/bf02592195 (in English)
23. Holzhauser, M., Krumke, S. O., & Thielen, C. (2016). Maximum flows in generalized processing networks. *Journal of Combinatorial Optimization*, 33(4), 1226-1256. doi: 10.1007/s10878-016-0031-y (in English)
24. Kovacs, P. (2013). Minimum-cost flow algorithms: An experimental evaluation EGRES Technical Report. *EGRES Technical Report*, 4, 1-40. Retrieved from <https://web.cs.elte.hu/egres/tr/egres-13-04.pdf> (in English)
25. Bozhenyuk, A. V., Gerasimenko, E. M., Kacprzyk, J., & Rozenberg, I. N. (2016). Maximum and Minimum Cost Flow Finding in Networks in Fuzzy Conditions. *Flows in Networks Under Fuzzy Conditions*, 23-75. Cham: Springer. doi: 10.1007/978-3-319-41618-2\_2 (in English)
26. Nasrabadi, E., & Hashemi, S. M. (2010). Minimum cost time-varying network flow problems. *Optimization Methods and Software*, 25(3), 429-447. doi :10.1080/10556780903239121 (in English)
27. Schiopu, C., & Ciurea, E. (2016). The Maximum Flows in Planar Dynamic Networks. *International Journal of Computers Communications & Control*, 11(2), 282-291. doi: 10.15837/ijccc.2016.2.2444 (in English)
28. Sifaleras, A. (2013). Minimum cost network flows: Problems, algorithms, and software. *Yugoslav Journal of Operations Research*, 23(1), 3-17. doi: 10.2298/YJOR121120001S (in English)

Стаття рекомендована к публікації д.т.н., проф. В. І. Шинкаренко (Україна)

Поступила в редколегію: 15.02.2017

Прийнята к печати: 24.05.2018

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

УДК 621.923

Р. П. ПОГРЕБНЯК<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Прикладна механіка», Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 743 32 76, +38 (095) 499 75 54, ел. пошта pogrebnyakk@ukr.net, ORCID 0000-0002-4685-1818

### НЕСТАЦІОНАРНІ РЕЖИМИ РОБОТИ ГОЛОВНОГО ПРИВОДА КАРУСЕЛЬНОГО ВЕРСТАТА ДЛЯ ОБРОБКИ СУЦІЛЬНОКАТАНИХ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС

**Мета.** У роботі передбачено визначити умови створення динамічного перевантаження приводу колесообробного верстата в різних нестационарних режимах експлуатації й запропонувати способи його зменшення. **Методика.** Поставлена задача вирішувалася шляхом створення динамічної розрахункової багатомасової ланцюгової пружної моделі з подальшим математичним моделюванням її навантаження зовнішніми силовими факторами, значення яких були отримані аналітичними й експериментальними методами. Розв'язання рівнянь руху з визначенням навантаження приводу в перехідному режимі розгону та в режимі врізання здійснювалось засобами MathCad. **Результати.** Розрахункова схема приводу обертового руху планшайби верстату представлена лінійною тримасовою рядною системою з двома пружними зв'язками і з трьома абсолютними ступенями вільності. Аналітичне визначення моментів сили різання враховує зміни кінематичних параметрів режиму різання під час обробки різних ділянок профілю чашковим різцем. Прийнятий найгірший випадок прикладання навантаження за одночасного врізання інструментів. Еквівалентний момент сил різання визначений як сума моментів від кожного з інструментів за умови багаторізевої обробки. Визначені моменти пружності зв'язків у стаціонарному стані приводу верстата. Динамічні перевантаження з коефіцієнтами динамічності у зв'язках  $K_{\partial 12} = 1,13$  і  $K_{\partial 23} = 1,04$  в режимі врізання незначні й швидко зменшують своє значення. Абсолютні значення крутного пружного моменту у наведеному зв'язку редуктора  $C_{23}$  в режимі пуску несуттєві й значно менші від величин стаціонарного навантаження. За допомогою методу розрахунку й експериментальних досліджень встановлене суттєве динамічне перевантаження приводу верстата в режимі реостатного пуску електродвигуном постійного струму. Реактивний пружний момент періодичної зміни у 2,7 разів перевищує номінальний момент стаціонарного режиму обробки. **Наукова новизна.** Була створена пружна динамічна модель приводу колесообробного верстата. Складені і розв'язані моделі й розв'язані рівняння руху мас та визначене навантаження зв'язків. З'ясовані теоретичні умови зниження навантаження в приводі. **Практична значимість.** На підставі моделювання перехідного процесу пуску приводу визначені суттєві перевантаження його елементів, які в декілька разів перевищують реакцію пружних зв'язків під час різання. Для запобігання цьому рекомендовано змінити режим багатоступеневого запуску двигуна зі зниженням пускового струму мінімум у два рази до величини не більше 1 200 А.

**Ключові слова:** залізничне колесо; колесообробний верстат; привід верстата; коливання; динамічні навантаження; перехідні процеси

#### Вступ

Для масової механічної обробки різанням прокатаних залізничних коліс на технологічних лініях металургійного виробництва використовують спеціальні колесотокарні верстати кару-

сельного типу, оснащені електрокопіювальними пристроями або пристроями числового керування (рис. 1). Це важке обладнання виробляють провідні світові компанії: «Hegenscheidt – MDF» (Німеччина), «SIMMONS», «OKUMA» (США), «Kreven», «Dorries Scharmann» (Великобрита-

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

нія), «ЮЗТС» (Росія), «Rafamet» (Польща), «Morando», «Mario Carnaghi» (Італія), «Sculfort» (Франція), «TOSHULIN» (Чехія), «BOST» (Іспанія).

Первинна чорнова обробка зі значними глибинами різання та суттєво нестаціонарним припуском викликає перевантаження вузлів верстата і зношування й руйнування деталей головного приводу й приводів подач. Такі динамічні перевантаження в приводах подач та особливості контурної обробки фасонних деталей призводять до похибок формоутворення профілю колеса й повторного переточування [11].

Небажані коливальні процеси в пружній системі приводу головного руху (обертання заготовки) стають причиною не тільки руйнування його деталей, але й практично завжди знижують стійкість різального інструмента. Зафіксовані систематичні руйнування підшипників і посадкових місць валів приводу, послаблення затяжок болтових кріплень фланцевих з'єднань, а в разі утворення понаднормативних зазорів у конічній передачі з круговим зубом рух планшайби стає ривкоподібним. Структурний аналіз приводу з пошуком і усуненням шкідливих надлишкових зв'язків виконаний у роботі [3], на його основі розроблені практичні рекомендації.

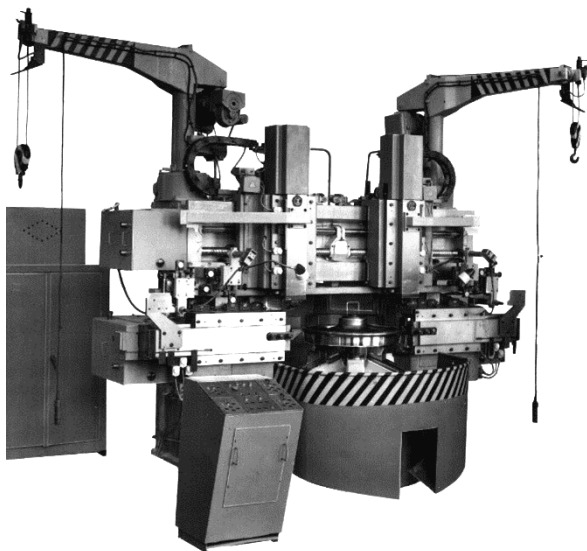


Рис. 1. Загальний вигляд колесообробного верстата моделі 1B502C

Fig. 1. General view of the wheel-processing machine model 1B502C

Динаміка приводу металорізальних верстатів із урахуванням пружності зв'язків висвітлювалася в роботах Рівіна Е. І., Gegg В. С., Пуша В. Э., Кожевнікова С. М., Кедрова С. С., Brecher С., Орликова М. Л., Петракова Ю. В., Струтинського В. Б. та ін. Монографії, підручники і статті з цієї тематики завжди містять передумову аналізу руху складання наведеної розрахункової ланцюгової схеми приводу. Цей етап підготовки аналізу найбільш відповідальний і потребує скрупульозності й точності, бо похибки на цьому етапі стають вирішальними на етапі аналізу результатів рішення рівнянь руху і, відповідно, розробки рекомендацій. Особливо втрата точності у визначенні власних частот приводу робить подальші розрахунки марними. Визначення пружно-масових характеристик машинними засобами за допомогою 3D-моделювання також потребує критичного контролю виконавця.

Методики розрахунків змушених і вільних коливань приводів верстатів [4, 5, 7, 8, 13–20] мають загальний характер, їх розробляли для універсальних верстатів із широким діапазоном забезпечення режимів обробки й без обліку специфіки навантаження, властивої спеціальним верстатам. Питанням моделювання рівнянь динаміки технологічних машин, у тому числі металорізальних верстатів, у режимі нестаціонарного навантаження і проблемам демпфування коливань присвячені роботи [6, 9, 14].

Перевантаження у головному приводі обертального руху заготовки (рис. 2, а) викликають руйнування зубчастих коліс, валів і підшипників, призводять до утворення та збільшення зазорів, які суттєво загострюють динамічну реакцію приводу на зовнішнє збурювання. У перехідних режимах розгону та гальмування в системі головного приводу зростає амплітуда пружних деформацій зв'язків і збільшується в них величина реактивних моментів.

У наведеній схемі моменти інерції мас  $I$  у  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$  складають:  $I_1 = 2,04$ ,  $I_2 = 1,387$ ,  $I_3 = 1,781$ ,  $I_4 = I_7 = 0,006$ ,  $I_5 = 0,0013$ ,  $I_6 = I_9 = 0,002$ ,  $I_8 = I_{10} = I_{11} = 0,001$ ,  $I_{12} = 0,026$ ,  $I_{13} = 0,004$ .

Коефіцієнти жорсткості зв'язків  $C$  у  $\text{Н} \cdot \text{м}$ :  $C_1 = 1,174 \cdot 10^6$ ,  $C_2 = 58 \cdot 10^3$ ,  $C_3 = 34,9 \cdot 10^4$ ,  $C_4 = 6,711 \cdot 10^6$ ,  $C_5 = 73,6 \cdot 10^4$ ,  $C_6 = 5,865 \cdot 10^6$ ,  $C_7 = 21,3 \cdot 10^4$ ,  $C_8 = 1,757 \cdot 10^6$ ,  $C_9 = 56 \cdot 10^3$ ,  $C_{10} = 69,2 \cdot 10^4$ ,  $C_{11} = 32 \cdot 10^3$ ,  $C_{12} = 78,3 \cdot 10^4$ .

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

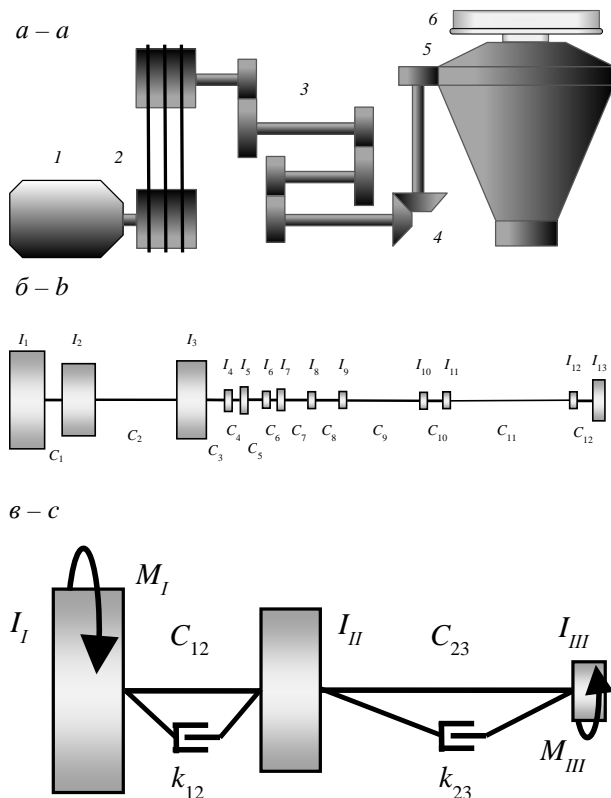


Рис. 2. Розрахункова схема приводу  
колесообробних верстатів:  
а – кінематична; б – наведена до валу двигуна;  
в – спрощена наведена

Fig. 2. Design scheme of the drive unit of the wheel-  
processing machine:  
а – kinematic; б – reduced to the motor shaft;  
с – simplified is presented

Момент інерції ротора двигуна та ведучого шківас пасової передачі  $I_I = 34,24$ , момент інерції редуктора та веденого шківас пасової передачі  $I_{II} = 18,12$ , момент інерції планшайби із заготовкою  $I_{III} = 0,32$ ; жорсткість пасової передачі  $C_{12} = 58 \cdot 10^3$ , жорсткість редуктора  $C_{23} = 20 \cdot 10^3$ .

### Мета

За основну мету статті ставиться визначення умов створення динамічного перевантаження приводу в різних режимах експлуатації і пошук способів його зменшення.

### Методика

Розв'язання поставленої задачі здійснюється за допомогою аналізу рівнянь руху методами інженерної динаміки машин та імітаційного

модельовання навантаження приводу. Модельовання навантаження приводу в перехідному режимі розгону та в режимі врізання здійснювалось за допомогою засобів MathCad.

### Результати

Для визначення поведінки пружної системи приводу верстата складена розрахункова схема (рис. 2). Розрахунковим методом були отримані значення моментів інерції обертових мас, крутильних жорсткостей елементів приводу, наведеної до крутильної жорсткості пасової та зубчастих передач, контактної жорсткості шпонкових та шліцьових з'єднань і згинальної жорсткості валів та опор. На етапі складання розрахункової схеми система розглядалася як лінійна, хоча контактна жорсткість взаємодії деталей приводу здебільшого нелінійна і збільшується зі зростанням статичного навантаження. Прийнято, що зосереджені моменти інерції мас не мають властивостей пружності, а вали невагомими. За цих умов складена повна ланцюгова 13-масова розрахункова схема приводу з дванадцятьма ступенями вільності у кутових координатах (рис. 2, б).

Експериментальні дослідження верстата визначили граничну величину частоти сил збурення ( $\omega_d = 125$  р/с), що викликана невідповідністю обертових мас і відповідає частоті обертання двигуна. Ця частота наявна у всіх режимах експлуатації верстату. Високочастотні процеси втрати стійкості під час різання чашковим різцем за значної довжини контакту різця з деталлю, які теж були зафіксовані експериментально, впливають лише на стійкість інструмента і шорсткість обробленої поверхні. Необхідна шорсткість обробленої поверхні за вимогами ДСТУ ГОСТ 10761:2016 [2] не перевищує  $R_z 80$ , а вид обробки відносять до чорнової. Тому в спектрі з дванадцяти власних частот системи практичний інтерес представляє поведінка приводу на перших двох. На більш високих частотах, де амплітуди коливань незначні, динамічне навантаження приводу несуттєве. За методикою [14] схема була спрощена до тримасової з двома ступенями вільності [10] (рис. 2, в).

Наведення пружних і масових елементів здійснювалось до вала привідного двигуна без урахування демпфування та жорсткості електромагнітного зв'язку в двигуні. Частотний аналіз

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

цієї схеми виконаний у роботі [10], в якій за кількісними значеннями параметрів схеми визначені власні частоти вільних коливань  $\beta_1 = 69,53$  p/c і  $\beta_2 = 252,32$  p/c, парціальні частоти  $n_1 = 69,96$  p/c і  $n_2 = 252,20$  p/c, коефіцієнт інерційного зв'язку  $\gamma = 0,107$ , коефіцієнт зв'язаності парціальних систем  $\sigma = 0,064$ , значення узагальненого параметра [1] склало 0,066.

Рух тримасової коливальної системи виразимо в абсолютних координатах за допомогою системи лінійних диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} I_1 \ddot{\varphi}_1 + C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + \frac{I_1 \beta_1 \delta}{\pi}(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) = M_1; \\ I_{II} \ddot{\varphi}_2 + C_{12}(\varphi_2 - \varphi_1) + \frac{I_{II} \beta_1 \delta}{\pi}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1) + \\ + C_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) + \frac{I_{II} \beta_2 \delta}{\pi}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) = 0; \\ I_{III} \ddot{\varphi}_3 + C_{23}(\varphi_3 - \varphi_2) + \frac{I_{III} \beta_2 \delta}{\pi}(\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_2) = M_{III}. \end{cases} \quad (1-3)$$

Тут:  $\delta$  – логарифмічний декремент коливань;  $M_1$ ,  $M_{III}$  – момент двигуна та зовнішній момент сил різання на планшайбі відповідно.

Математичний опис технологічних навантажень здійснений за результатами заводських експериментів та аналітичних узагальнень, які отримані в результаті зіставлення декількох схем формоутворення поверхонь колеса. На рис. 4 представлена схема чотирирізцевої обробки залізничного колеса, яка використовується в Україні. Супортом 1 підрізується торець і обточується зовнішня поверхня маточини із зовнішньої сторони колеса. По обробленому торцю колесо додатково притискається. Подальша обробка ведеться супортами 2, 3, 4 одночасно: бічним супортом 2 обточується поверхня кочення, бічним супортом 3 – торець обода з внутрішньої сторони колеса й гребінь, лівим супортом 4 підрізується торець і внутрішня поверхня обода з зовнішньої сторони колеса.

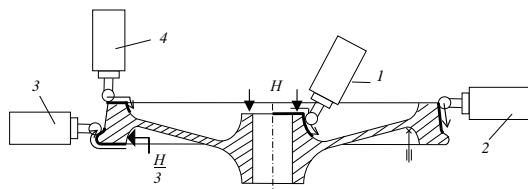


Рис. 3. Схема обробки колеса на верстатах моделей 1Б502, 1Б502С, 1Б502

Fig. 3. Scheme of wheel processing on machine tools models 1Б502, 1Б502С, 1Б502

Параметри, що визначають величину основної складової сили різання, не є сталими. За весь цикл обробки всіх поверхонь колеса суттєво змінюється середня глибина, швидкість різання, подача на криволінійних ділянках обробки і відстань від різця до осі обертання колеса на планшайбі. Найбільший вплив на зміну сили різання має зміна глибини різання, яка викликана змінністю припуску на обробку. Колесо може бути встановлене з ексцентриситетом на планшайбі ( $t_1 = 0...1,5$  мм), а також має обмеження третього роду ( $t_2 = 1,3...1,6$  мм) після обробки тиском на колесопркатному стані [12]. Тому глибина різання на окремих ділянках обробки профілю змінюється за залежністю:

$$t = t_0 + t_1 \sin(0,333\pi \cdot n \cdot \tau) + t_2 \sin[(0,1\pi \cdot n \cdot \tau) + \varphi], \quad (4)$$

де  $t_0$  – середня глибина різання ділянки профілю;  $t_2$  – амплітуда хвилеутворювання (ограничування);  $\tau$  – поточний час, с;  $\varphi$  – фазовий зсув між ексцентриситетом і хвилеутворюванням.

Момент сил різання визначимо як суму моментів від кожного з інструментів під час багаторізової обробки:

$$M_{III} = M_1 + M_2 + M_3 + M_4 =$$

$$= P_{Z1} \cdot R_1 + P_{Z2} \cdot R_2 + P_{Z3} \cdot R_3 + P_{Z4} \cdot R_4, \quad (5)$$

де  $R$  – поточні відстані від осі обертання колеса до інструмента кожного супорта; момент двигуна у номінальному режимі роботи  $M_1 = M_n + M_0 \sin(\omega_d \tau)$ ,  $M_n$  – номінальний момент двигуна,  $M_0$  – середній момент від невідновленості обертових мас. Зміна моменту на частоті обертання двигуна не викликає резонансних підсилювань, тому що частота впливу знаходиться у міжрезонансній зоні відносно власних частот системи ( $\beta_1 = 69,53$  p/c,  $\beta_2 = 252,32$  p/c) і у післярезонансній зоні відносно частот зміни моментів різання ( $\omega_1 = 3,14$  p/c,  $\omega_2 = 9,42$  p/c). Зрозуміло, що дія незрівноваженого моменту сил інерції обертових мас може бути виключена балансуванням.

Моменти пружності зв'язків у стаціонарному стані приводу [6], коли відсутні додаткові гармонічні складові навантаження на власних частотах, визначимо за залежностями:

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

$$M_{12c} = \frac{M_I(I_{II} + I_{III}) + M_{III}I_I}{I_I + I_{II} + I_{III}}; \quad (5)$$

$$M_{23c} = \frac{M_{III}(I_I + I_{II}) + M_I I_{III}}{I_I + I_{II} + I_{III}}.$$

У динамічно активних системах моменти сил пружності стаціонарного й нестационарного стану відрізняються один від одного. Чим більша ця різниця, тим більш динамічно недосконалою є машина.

Динамічні навантаження приводу під час врізання інструментів. Під час врізання інструмента в деталь сили різання змінюються дуже швидко, тому динамічні ефекти можуть бути значними, при цьому крутна деформація приводу не настає миттєво.

Під час врізання кожного з різців момент сил різання прийнятий лінійно зростаючим до номінальної величини за час врізання, далі момент змінюється відповідно до зміни основних параметрів сили різання (в основному зміни глибин). На рис. 4, *a* представлені графіки окремих моментів різання та сумарного моменту. Момент  $M_2$  змінюється бігармонійно, відповідно до зміни припуску за залежністю (4), моменти  $M_1$ ,  $M_3$ , й  $M_4$  змінюються з частотою обертання заготовки. Прийнятий найгірший випадок прикладання навантаження за одночасного врізання інструментів.

Пружна реакція системи в момент дії обмеженого лінійно зростаючого навантаження тим більша, чим менше відношення часу  $\tau_0$  врізання інструмента до періоду власних коливань системи  $T$ . Найбільше значення (два) коефіцієнт динамічності набуває за  $\tau_0/T = 0$  і змінюється від 2 до 1 в діапазоні  $0 \leq \tau_0/T < 1$ , подальші локальні максимуми настають за  $\tau_0/T$  кратного 1,5. Подачі супортів знаходяться в діапазоні 24...36 мм/хв, період власних коливань першої форми  $T_1 = 0,09$  с, тому для моделювання прийняте відношення  $\tau_0/T_1 = 1,5$ , тобто  $\tau_0 = 0,135$  с. Логарифмічний декремент коливань прийнятий  $\delta = 0,1$  [8, 13, 14].

Пружний момент у зв'язку  $C_{12}$  (рис. 4, *b*) змінюється з першою власною частотою з максимальною амплітудою першого півперіоду  $M_{12\max} = 1\,159$  Н·м, значення моменту стаціонарного стану  $M_{12c} = 1023$  Н·м, коефіцієнт динамічності становить  $K_{d12} = M_{12\max}/M_{12c} = 1,13$ .

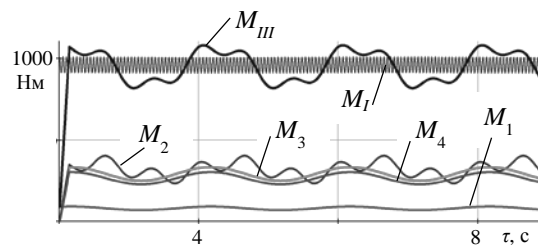
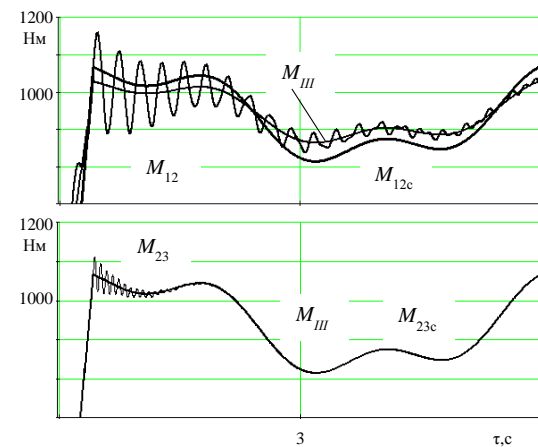
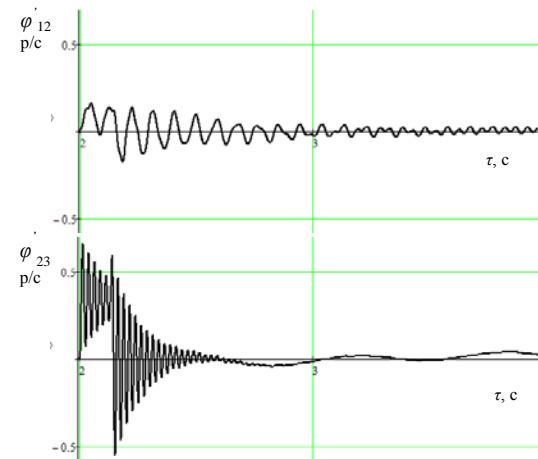
*a – a**b – b**в – в*

Рис. 4. Результати моделювання динамічного навантаження приводу верстата за одночасного врізання різців 2, 3 і 4 (за рис. 3):

*a* – зовнішнє навантаження; *b* – пружна реакція у зв'язках  $C_{12}$  і  $C_{23}$ ; *c* – відносна віброшвидкість зміни пружного моменту в зв'язках  $C_{12}$  і  $C_{23}$

Fig. 4. Simulation results of dynamic load of the machine drive unit with simultaneous tie-in of tools 2, 3 and 4 (according to Fig. 3):

*a* – external load; *b* – the elastic reaction in connections  $C_{12}$  and  $C_{23}$ ; *c* – relative vibration velocity of the change in the elastic moment in connections  $C_{12}$  and  $C_{23}$

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Пружний момент у зв'язку  $C_{23}$  (рис. 4, в) змінюється з другою власною частотою і максимальною амплітудою першого півперіоду  $M_{23\max} = 1\,110\text{ Н}\cdot\text{м}$ , момент стаціонарного стану складає  $M_{23c} = 1063\text{ Н}\cdot\text{м}$  і не відрізняється від моменту навантаження  $M_{II}$ , а коефіцієнт динамічності становить  $K_{d23} = M_{23\max}/M_{23c} = 1,04$ . Динамічні перевантаження у зв'язку незначні й швидко зменшують своє значення.

Динамічні навантаження приводу під час пуску двигуном постійного струму. Як відомо, навантаження верстатів у перехідних режимах можуть перевищувати навантаження в стаціонарному режимі роботи. У визначенні навантаження приводу в перехідному процесі пуску електродвигуном постійного струму з паралельним збудженням була прийнята зміна пускового моменту, пропорційна силі струму пуску за експериментальними даними (рис. 4).

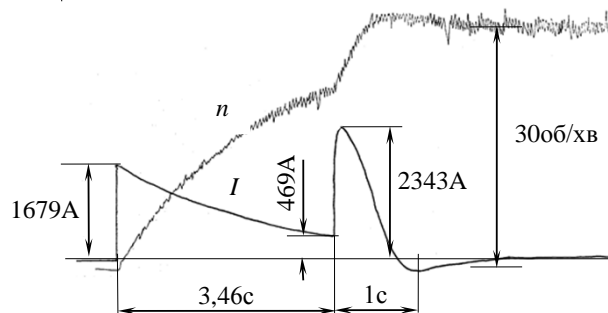
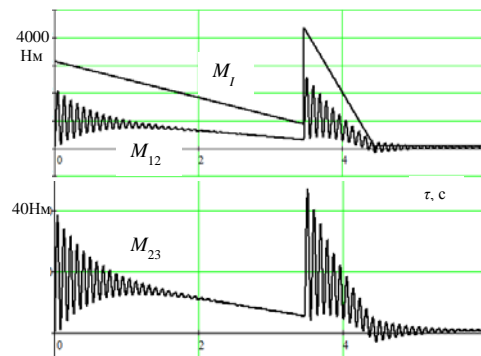


Рис. 5. Фрагмент осцилограми перехідного процесу двоступеневого реостатного пуску приводу верстата двигуном постійного струму ( $n$  – кутова швидкість обертання планшайби,  $I$  – сила струму двигуна, номінальна сила струму складає 511 А, номінальний момент двигуна – 955 Нм)

Fig. 5. An oscillogram segment of the transient process of a two-stage resistor start for the machine drive unit with a DC motor ( $n$  – angular velocity of the faceplate rotation,  $I$  – motor current, rated current is 511 A, the nominal motor moment is 955 Nm)

Для моделювання навантаження в цьому режимі в рівняннях (1–3) момент сил різання  $M_{II} = 0$ , а момент двигуна  $M_I$  представлений лінеаризованою функцією згідно з вище наведеною осцилограмою зміни струму. Реакція пружної системи приводу на таке збурення представлена на рис. 5.

$a - a$



$b - b$

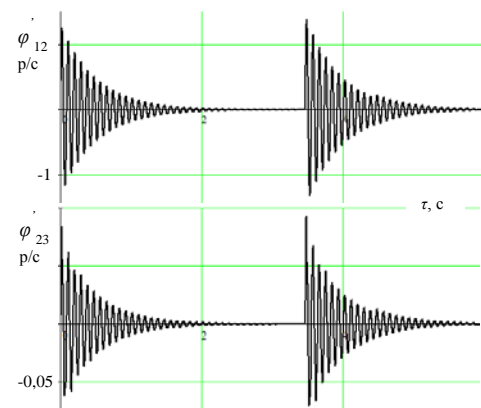


Рис. 6. Результати моделювання навантаження приводу під час перехідного процесу пуску верстата:

$a$  – зовнішнє навантаження й пружна реакція у зв'язках  $C_{12}$  і  $C_{23}$ ;  $b$  – відносна віброшвидкість зміни пружного моменту в зв'язках  $C_{12}$  і  $C_{23}$

Fig. 6. Simulation results of the drive unit load during the transition process of the machine start:

$a$  – external load and the elastic reaction in the connections  $C_{12}$  and  $C_{23}$ ;  $b$  – relative vibration velocity of the change in the elastic moment in connections  $C_{12}$  і  $C_{23}$

Як видно, за час пуску в обох підсистемах двічі збуджуються вільні коливання значної амплітуди тільки на першій власній частоті з періодом  $T_1$ . Максимальні амплітуди пружного моменту у зв'язку  $C_{12}$  на першому етапі перехідного процесу (рис. 6,  $a$ ) більш ніж у два рази ( $M_{12\max} = 2093\text{ Н}\cdot\text{м}$ ) перевищують величину номінального моменту двигуна і більш ніж у 2,5 рази ( $M_{12\max} = 2589\text{ Н}\cdot\text{м}$ ) – на другому. Абсолютні значення крутного пружного моменту у зв'язку  $C_{23}$  несуттєві й значно менші від величин стаціонарного навантаження.

Такі суттєві перевантаження стають причиною руйнування деталей приводу, а багатоциклі-

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

чні змінні механічні напруження призводять до їх втомного руйнування. Критичне накопичення втомних напружень настає доволі швидко, оскільки кількість оброблених коліс за зміну сягає 40. Перехідних режимів пуску ще більше за рахунок використання режиму «поштовх» після базування та закріплення колеса на планшайбі. Якщо первинне базування колеса здійснене зі значним биттям заготовки, то її розкріплюють і базують повторно, при цьому планшайба повертається на частину обороту короточасним імпульсом, який викликає подібний до вищенаведеного перехідний процес. Реакція може бути ще більшою, якщо запуск приводу здійснюється за відкритих зазорів у зубчастих передачах та стиках. Тоді початок навантаження здійснюється за ненульових початкових умовах, що викликає додаткове зростання пружних моментів.

Очевидно, що таке перевантаження приводу великим пусковим моментом недопустиме. Існує реальна практична можливість зниження пускових моментів за рахунок застосування багатоступеневого реостатного пуску, де максимальна величина струму не перевищувала б 1 200 А. Це збільшить час розгону приводу вдвічі, але зробить його більш плавним і зменшить перевантаження.

#### Наукова новизна та практична значимість

У ході дослідження була створена пружна динамічна модель приводу колесообробного

верстата. Складені і розв'язані рівняння руху мас та визначене навантаження зв'язків.

За допомогою моделювання перехідного процесу пуску приводу визначені суттєві перевантаження його елементів, які в декілька разів перевищують реакцію пружних зв'язків під час різання. Тому запуск двигуна повинен бути багатоступеневим, можливо, із додатковим передпусковим періодом, зі зниженням пускового струму мінімум у два рази до величини не більше 1 200 А.

#### Висновки

Під час точіння різних ділянок прокатаного залізничного колеса за багаторізевої обробки змінюються величина й характер моментів сил різання.

На підставі моделювання визначені якісні й кількісні значення динамічного навантаження приводу верстата у перехідних режимах запуску та різання інструментів.

За допомогою розрахункового методу та експериментальних досліджень встановлене суттєве динамічне перевантаження приводу верстата в режимі реостатного пуску електродвигуном постійного струму. Реактивний пружний момент періодичної зміни у 2,7 разів перевищує номінальний момент стаціонарного режиму обробки.

Для запобігання цьому запропонований спосіб зниження перевантаження приводу під час пуску.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Адамия, Р. Ш. Основы рационального проектирования металлургических машин / Р. Ш. Адамия, В. М. Лобода. – Москва : Металлургия, 1984. – 128 с.
2. ДСТУ ГОСТ 10761:2016. Колеса суцільнокатані. Технічні умови. – На заміну ГОСТ 10761-2004 та ГОСТ 9036-88. – Чинний від 2016–09–01. – Київ : Держспоживстандарт України, 2016. – 15 с.
3. Зданевич, В. А. Структура и рациональное проектирование привода станка модели 1Б502 для обработки железнодорожных колес / В. А. Зданевич, Р. П. Погребняк // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1995. – № 2. – С. 64–67.
4. Зданевич, С. В. Системная динамика приводов шестивалковых трубоправильных машин / С. В. Зданевич, В. А. Ермократьев, С. С. Зданевич // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2015. – № 7. – С. 137–142.
5. Кедров, С. С. Колебания металлорежущих станков / С. С. Кедров. – Москва : Машиностроение, 1978. – 199 с.
6. Кожевников, С. Н. Динамика нестационарных процессов в машинах / С. Н. Кожевников. – Киев : Наук. думка, 1986. – 288 с.
7. Левин, А. И. Математическое моделирование в исследованиях и проектировании станков / А. И. Левин. – Москва : Машиностроение, 1978. – 184 с.

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

8. Орликов, М. Л. Динамика станков / М. Л. Орликов. – Киев : Вища школа, 1989. – 272 с.
9. Петраков, Ю. В. Моделирование гашения колебаний при токарной обработке / Ю. В. Петраков // Вісн. нац. техн. ун-ту України «Київ. політехн. ін-т». Серія: Машинобудування : зб. наук. пр. – Київ, 2016. – № 2. – С. 119–124. doi: 10.20535/2305-9001.2016.77.78960
10. Погребняк, Р. П. Динамічні властивості пружної системи приводу важкого карусельного верстата для обробки залізничних коліс / Р. П. Погребняк // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій : зб. наук. пр. – Дніпро, 2017. – Вип. 27. – С. 129–136.
11. Погребняк, Р. П. Пружна нелінійна динаміка руху супорта карусельного верстата для обробки суцільнокатаних залізничних коліс / Р. П. Погребняк // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 4 (70). – С. 98–105. doi: 10.15802/stp2017/109606
12. Погребняк, Р. П. Экспериментальное исследование формы прокатанной заготовки железнодорожного колеса / Р. П. Погребняк // Производство проката. – 2012. – № 2. – С. 29–33.
13. Пуш, В. Э. Конструирование металлорежущих станков / В. Э. Пуш. – Москва : Машиностроение, 1977. – 390 с.
14. Ривин, Е. И. Динамика привода станков / Е. И. Ривин. – Москва : Машиностроение, 1966. – 204 с.
15. Струтинський, В. Б. Вібраційні процеси механічної обробки : монографія / В. Б. Струтинський, І. В. Перфілов. – Київ : Хімджест, 2015. – 579 с.
16. Струтинський, В. Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки / В. Б. Струтинський. – Житомир : ЖІТІ, 2001. – 612 с.
17. Dynamics prediction of spindle system using joint models of spindle tool holder and bearings / Chao Xu, Jianfu Zhang, Dingwen Yu, Zhijun Wu, Pingfa Feng // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. – 2015. – Vol. 229. – Iss. 17. – P. 3084–3095. doi: 10.1177/0954406215569588
18. Gegg, B. C. Machine Tool Vibrations and Cutting Dynamics / Brandon C. Gegg, C. Steve Suh, Albert C. J. Luo. – New York : Springer, 2011. – 179 p. doi: 10.1007/978-1-4419-9801-9
19. Hybrid analytic-experimental modeling for machine tool structural dynamics / Bosheng Ye, Weiwei Xiao, Kuanmin Mao, Bin Li // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2017. – Vol. 90. – Iss. 5-8. – P. 1679–1691. doi: 10.1007/s00170-016-9507-2
20. Multipoint Constraints for Modeling of Machine Tool Dynamics / C. Brecher, M. Fey, C. Tenbrock, M. Daniels // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2015. – Vol. 138. – Iss. 5. – P. 117–124. doi: 10.1115/1.4031771

Р. П. ПОГРЕБНЯК<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Прикладная механика», Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепро, Украина, 49005, тел. +38 (056) 743 32 76, +38 (095) 499 75 54, эл. почта pogrebnyakk@ukr.net, ORCID 0000-0002-4685-1818

## НЕСТАЦИОНАРНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ГЛАВНОГО ПРИВОДА КАРУСЕЛЬНОГО СТАНКА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЦЕЛЬНОКАТАНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС

**Цель.** В работе предусмотрено определить условия образования динамической перегруженности привода колесообрабатывающего станка в разных нестационарных режимах эксплуатации и предложить способы ее уменьшения. **Методика.** Задача решалась путем создания динамической расчетной многомассовой цепной модели с последующим моделированием ее нагружения внешними силовыми факторами, значения которых были получены аналитическим и экспериментальным методами. Решение уравнений движения с определением нагрузки привода в переходном режиме разгона и в режиме врезки осуществлялось средствами MathCad. **Результаты.** Расчетная схема привода вращательного движения планшайбы станка представлена линейной трехмассовой рядной системой с двумя упругими связями и с тремя абсолютными степенями свободы. Аналитическое определение моментов силы резания учитывает изменения кинематических параметров режима резания при обработке различных участков чашечным резцом профиля. Принят худший случай приложения нагрузки при одновременной врезке инструментов. Эквивалентный момент сил резания определен как сумма моментов от каждого из инструментов при многорезцовой обработке. Определены моменты упругости связей в стационарном состоянии привода станка. Динамические нагружения с коэффициентами динамичности в свя-

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

зях  $K_{d12} = 1,13$  и  $K_{d23} = 1,04$  в режиме врезки незначительные и быстро уменьшают свое значение. Абсолютные значения крутящего упругого момента в связи  $C_{23}$  в режиме пуска несут существенные и значительно меньше величин стационарной нагрузки. С помощью метода расчета и экспериментальных исследований установлена существенная динамическая перегрузка привода станка в режиме реостатного пуска электродвигателем постоянного тока. Реактивный упругий момент периодического изменения в 2,7 раза превышает номинальный момент стационарного режима обработки. **Научная новизна.** Была создана упругая динамическая модель привода станка для обработки железнодорожных колес. Соответственно модели составлены и решены уравнения движения масс и нагружения связей. Определены теоретические условия снижения нагруженности привода. **Практическая значимость.** На основании моделирования переходного процесса пуска привода определены значительные перегрузки его элементов, которые в несколько раз превышают реакцию упругих связей при резании. Для предотвращения этого рекомендовано изменить режим многоступенчатого пуска двигателя с уменьшением пускового тока минимум в два раза до величины не более 1 200 А.

**Ключевые слова:** железнодорожное колесо; колесообрабатывающий станок; привод станка; динамические нагрузки; колебания; переходные процессы

R. P. POGREBNYAK<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Applied Mechanics», National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin Av., 4, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 743 32 76, tel. +38 (095) 499 75 54, e-mail pogrebnnyakk@ukr.net, ORCID 0000-0002-4685-1818

## UNSTEADY OPERATING MODES OF THE MAIN DRIVE UNIT OF A MACHINE-TOOLS FOR SOLID RAILWAY WHEELS PROCESSING

**Purpose.** The paper deals with determining the conditions of the dynamic overload formation for a drive unit in the wheel-processing machine in various unsteady operating modes and suggests ways to reduce it. **Methodology.** The problem was solved by creating a dynamic computational multi-mass chain model followed by modeling of its loading by external force options, the values of which were obtained by analytical and experimental methods. The solution to equations of motion with determining the load of the drive unit in the transient acceleration mode and in the tie-in one was carried out by means of MathCad. **Findings.** The design scheme for the drive unit of the rotational movement of the machine faceplate is represented by a linear three-mass row system with two elastic connections and with three absolute degrees of freedom. The analytical determination of the cutting force moments takes into account changes in the kinematic parameters of the cutting regime when machining the different sections of the profile with cup-tip tool. The worst case of load application is accepted with simultaneous insertion of tools. The equivalent torque of the cutting forces is defined as the sum of the moments from each of the tools at multi-cut machining. The moments of elasticity of bonds in the steady state of the machine drive unit are determined. Dynamic loads with coefficients of dynamism in the bonds  $K_{d12} = 1.13$  and  $K_{d23} = 1.04$  are insignificant in the tie-in mode and rapidly decrease their value. Absolute values of the twisting elastic moment in the  $C_{23}$  bond in the start-up mode are insignificant and much less than the values of the steady load. Using the method of calculation and experimental research, a significant dynamic overload of the machine drive unit in the mode of rheostat start-up by a direct-current motor was established. The reactive elastic moment with the periodic change is 2.7 times higher than the nominal moment of steady processing regime. **Originality.** Authors created the elastic dynamic model of the machine drive unit for the processing of railway wheels. In accordance with the model, the equations of mass motion and bond loading are compiled and solved. The theoretical conditions for reducing the drive unit loading are determined. **Practical value.** Based on the simulation of the transient drive start-up process, significant overloads of its elements have been determined. They are several times higher than the response of elastic bonds during cutting. To prevent this, it is recommended to change the mode of multistage starting of the engine with a decrease of the starting current by at least two times up to a value of not more than 1 200 A.

**Keywords:** railway wheel; wheel-processing machine; machine drive unit; dynamic loads, vibrations; transitional processes

### REFERENCES

1. Adamiya, R. S., & Loboda, V. M. (1984). *Osnovy ratsionalnogo proektirovaniya metallurgicheskikh mashin*. Moscow: Metallurgiya. (in Russian)
2. Kolesa sutsilnokatani. Tekhnichni umovy, DSTU GOST 10761:2016 (2016). (in Ukrainian)

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

3. Zdanevich, V. A., & Pogrebnyak, R. P. (1995). Struktura i ratsionalnoe proektirovanie privoda stanka modeli 1B502 dlya obrabotki zheleznodorozhnykh koles. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*, 2, 64-67. (in Russian)
4. Zdanevich, S. V., Yermokratev, V. A., & Zdanevich, S. S. (2015). Sistemnaya dinamika privodov shestivalkovykh trubopravilnykh mashin. *Metallurgical and Mining Industry*, 7, 137-142. (in Russian)
5. Kedrov, S. S. (1978). *Kolebaniya metallovezhushchikh stankov*. Moscow: Mashinostroenie. (in Russian)
6. Kozhevnikov, S. N. (1986). *Dinamika nestatsionarnykh protsessov v mashinakh*. Kiev: Naukova dumka. (in Russian)
7. Levin, A. I. (1978). *Matematicheskoe modelirovanie v issledovaniyakh i proektirovanii stankov*. Moscow: Mashinostroenie. (in Russian)
8. Orlikov, M. L. (1989). *Dinamika stankov*. Kiev: Vishcha shkola. (in Russian)
9. Petrakov, Y. (2016). Simulation of chatter suppression for lathe machining. *Journal of Mechanical Engineering of the National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»*, 2(77), 119-124. doi: 10.20535/2305-9001.2016.77.78960 (in Russian)
10. Pogrebnyak, R. P. (2017). Frequency analysis of elastic system of main drive of machine for railway wheels turning. *Problems of computational mechanics and strength of structures*, 27, 129-136. (in Ukrainian)
11. Pogrebnyak, R. P. (2017). Elastic nonlinear dynamics of motion of slide of vertical turning machine for working of solid-rolled railway wheels. *Science and Transport Progress*, 4(70), 98-105. doi 10.15802/stp2017/109606 (in Ukrainian)
12. Pogrebnyak, R. P. (2012). Eksperimentalnoe issledovanie formy prokatannoy zagotovki zheleznodorozhnogo kolesa. *Proizvodstvo prokata*, 2, 29-33. (in Russian)
13. Push, V. E. (1977). *Konstruirovanie metallovezhushchikh stankov*. Moscow: Mashinostroenie. (in Russian)
14. Rivin, Y. I. (1966). *Dinamika privoda stankov*. Moscow: Mashinostroenie. (in Russian)
15. Strutynskyi, V. B., & Perfilov, I. V. (2015). *Vibratsiini protsesy mekhanichnoi obrobky: Monografiia*. Kyiv: Khimdzhest. (in Ukrainian)
16. Strutynskyi, V. B. (2001). *Matematychne modeliuвання protsesiv ta system mekhaniky*. Zhytomyr: ZhITI. (in Ukrainian)
17. Chao, X., Jianfu, Z., Dingwen, Y., Zhijun, W. & Pingfa, F. (2015). Dynamics prediction of spindle system using joint models of spindle tool holder and bearings. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 229(17), 3084-3095. doi: 10.1177/0954406215569588 (in English)
18. Gegg, B. C., Suh, C. S., & Luo, A. C. J. (2011). *Machine Tool Vibrations and Cutting Dynamics*. doi: 10.1007/978-1-4419-9801-9 (in English)
19. Bosheng, Y., Weiwei, X., Kuanmin, M., & Bin, L. (2017). Hybrid analytic-experimental modeling for machine tool structural dynamics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(5-8), 1679-1691. doi: 10.1007/s00170-016-9507-2 (in English)
20. Brecher, C., Fey, M., Tenbrock, C., & Daniels, M. (2015). Multipoint Constraints for Modeling of Machine Tool Dynamics. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 138(5), 117-124. doi: 10.1115/1.4031771 (in English)

Стаття рекомендована до друку д.т.н., проф. С. В. Ракшею ( Україна)

Надійшла до редколегії: 12.02.2018

Прийнята до друку: 28.05.2018

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.463.65

М. І. ГОРБУНОВ<sup>1\*</sup>, О. В. ФОМІН<sup>2</sup>, А. О. ЛОВСЬКА<sup>3</sup>, В. В. КОВАЛЕНКО<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Залізничний, автомобільний транспорт та підйомно-транспортні машини», Східноукраїнський національний університет імені В. Даля, пр. Центральний, 59-а, Сєвєродонецьк, Україна, 93400, тел. +38 (095) 309 10 39, ел. пошта gorbunov0255@gmail.com, ORCID 0000-0002-8556-3392

<sup>2</sup>Каф. «Вагони та вагонне господарство», Державний університет інфраструктури і технологій, вул. Кирилівська, 9, Київ, Україна, 04071, тел. +38 (067) 813 97 88, ел. пошта fomin1985@ukr.net, ORCID 0000-0003-2387-9946

<sup>3</sup>Каф. «Вагони», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта alyonalovskaya.vagons@gmail.com, ORCID 0000-0002-8604-1764

<sup>4</sup>Каф. «Залізничний, автомобільний транспорт та підйомно-транспортні машини», Східноукраїнський національний університет імені В. Даля, пр. Центральний, 59-а, Сєвєродонецьк, Україна, 93400, тел. +38 (095) 142 90 74, ел. пошта kkaterina@ukr.net, ORCID 0000-0003-1706-2710

### КОМПЛЕКСНИЙ РОЗРАХУНОК ВИКОНАННЯ КРИШКИ ЛЮКА НАПІВВАГОНА З РІЗНОТИПНИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ПРОМІЖНИМ Ш-ПОДІБНИМ ОБВ'ЯЗУВАННЯМ

**Мета.** Запропоноване дослідження спрямоване на визначення показників міцності кришки люка універсального напіввагона, виконаного з проміжним Ш-подібним обв'язуванням із різнотипних матеріалів, за експлуатаційних схем навантажень. **Методика.** Для досягнення зазначеної мети створена принципово нова конструкція кришки люка напіввагона, особливістю якої є те, що вона складається з двох листів, що по периметру взаємодіють через Ш-подібне обв'язування. Простір, який утворюють листи та обв'язування, а також периметр кришки люка заповнені пружною (пружно-в'язкою) речовиною. Побудована просторова модель запропонованої конструкції кришки люка, проведений розрахунок її міцності. Розрахунок здійснений за методом скінчених елементів у середовищі програмного забезпечення CosmosWorks. **Результати.** Отримано показники міцності вдосконаленої конструкції кришки люка за експлуатаційних схем її навантаження. До уваги взяті основні схеми навантаження кришки люка напіввагона відповідно до нормативних документів, а також додаткові. До додаткових віднесено: імітація розкриття кришки люка під час експлуатаційних навантажень – безторсійний (без урахування роботи торсіону (-ів) неодноразовий (спочатку на один із упорів) удар кришки люка об упори проміжних балок рами вагона з максимальним кутом відкриття; неодноразове відкриття закидок – спирання кришки люка завантаженого вагона на одну закидку за один кронштейн (випадок, коли вже вибили одну закидку, а іншу ще не встигли); підтягування (закриття) кришки люка вивантаженого вагона ломиком. Встановлено, що міцність кришки люка забезпечується. **Наукова новизна.** Розроблена модель міцності вдосконаленої конструкції кришки люка універсального напіввагона дозволяє отримати показники її міцності за експлуатаційних схем навантажень. Результати проведених досліджень можуть бути використані під час проектування несучих конструкцій кузовів універсальних напіввагонів нового покоління з поліпшеними техніко-економічними показниками. **Практична значимість.** Урахування отриманих результатів сприятиме забезпеченню міцності конструкційних елементів кузовів напіввагонів під час експлуатації.

**Ключові слова:** напіввагон; кришка люка; удосконалена конструкція; моделювання міцності; експлуатаційні навантаження; еквівалентні напруження

#### Вступ

Розвиток зовнішньоекономічних зв'язків України як транзитної держави значною мірою залежить від транспортної галузі, провідною

складовою якої є залізничний транспорт. Для забезпечення безперебійного перевізного процесу в розпорядженні залізниць має бути справний рухомий склад.

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

За останні роки парк вантажних вагонів ПАТ «Укрзалізниця», а також промислових підприємств мало оновлювався через нестачу фінансових ресурсів. Тому на сьогодні значна частина вагонів залежно від типу і призначення в середньому на 80 % вичерпала термін служби, встановлений нормативно-технічними документами.

Відомо, що найбільш затребуваним типом вагонів в експлуатації є універсальні напіввагони. Аналіз статистичних даних спрацювання напіввагонів дозволив зробити висновок, що значна частка пошкоджень припадає на кришки люків.

Для ефективності функціонування напіввагонів необхідною є розробка заходів щодо удосконалення кришок люків як одного з найбільш навантажуваних елементів несучої конструкції кузова під час експлуатації.

Особливості оптимізації виконання стійок та обов'язки кузова напіввагона підвищеної вантажопідйомності наведені в роботі [4]. Аналіз проведений стосовно глухонного напіввагона.

Дослідження міцності знімного даху напіввагона описане в статті [3]. Виконані розрахунки на міцність даху в програмному комплексі FEMAP дозволили зробити висновок про доцільність прийнятих рішень.

Аналізу міцності удосконаленої несучої конструкції кузова напіввагона присвячена робота [12]. Розрахунки проведені для випадку його перевезення на залізничному поромі морем.

Моделювання міцності несучих конструкцій кузовів вантажних вагонів із урахуванням застосування в них у якості несучих елементів труб круглого перерізу викладене в працях [9, 18].

Питання проектування рухомого складу для перевезення великовагових вантажів розглянуті в статті [7]. Дослідження динаміки та міцності здійснене за допомогою сучасних засобів програмного забезпечення ProMechanica та CosmosWorks. Під час проектування несучої конструкції транспортера проведено дослідження щодо можливості його виконання з різнотипних матеріалів.

Вплив показників тертя між кузовом та візком на динамічні показники руху вагона досліджений у статті [16]. Моделювання проводило-

ся з використанням математичних методів розрахунку за допомогою програмного комплексу DYNRAIL.

Дослідження динаміки вагона з використанням методів мультитіла наведені у [13]. Розрахунок проведений у програмному забезпеченні MSC Adams.

У роботі визначений вплив конструкційних особливостей колісних пар на рух транспортних засобів під час проходження кривих відрізків колії [10].

Конструкційні особливості напіввагонів проаналізовані в статті [14], розглянуті переваги та недоліки перспективних конструкцій напіввагонів, а також тенденції їх удосконалення.

Дослідження міцності несучої конструкції модифікованого вантажного візка наведені в роботі [8]. Під час побудови моделі міцності до уваги прийняті нормативні величини навантажень відповідно до нормативних документів.

Стаття присвячена аналізу теоретичних та експериментальних досліджень міцності кузовів вагонів [5]. Теоретичні розрахунки проведені за методом скінчених елементів, а експериментальні за допомогою випробувань.

Дослідження міцності зварювальних швів у несучих конструкціях кузовів вагонів за методами математичного моделювання описане в роботі [6].

У статті наведений розрахунок статично й динамічно напруженого стану несучих конструкцій вагонів [15], а також представлені результати вібраційного аналізу вантажного та пасажирського вагонів.

Однак у розглянутих роботах не приділяється уваги дослідженню показників міцності кришок розвантажувальних люків напіввагонів, які як елементи несучої конструкції кузова сприймають найбільші навантаження під час експлуатації.

Окрім цього, у роботах [11, 17] визначені перспективи використання нових прогресивних матеріалів, проте у них не порушується питання впровадження цих матеріалів у конструкційні елементи кузовів вантажних вагонів.

### Мета

Основною метою дослідження є визначення показників міцності кришки люка універсального напіввагона, виконаної з різноманітних

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

матеріалів із проміжним Ш-подібним обв'язуванням, під дією експлуатаційних навантажень. Поставлена мета передбачає розв'язання наступних завдань:

1. Побудова просторової комп'ютерної моделі удосконаленої конструкції кришки люка напіввагона.

2. Дослідження міцності удосконаленої конструкції кришки люка напіввагона під час експлуатаційних навантажень.

### Методика

Дослідження міцності кришки люка типової конструкції дозволили зробити висновок, що  $a - a$

максимальні еквівалентні напруження за деяких схем її навантаження в умовах експлуатації перевищують допустимі. Це зумовлює необхідність удосконалення кришки люка напіввагона.

Для забезпечення міцності кришки люка пропонуємо створити її принципово нову конструкцію з різнотипних матеріалів зі стандартним кріпленням (рис. 1), елементи якої виконані наступним чином:

– полотно кришки люка виконане з верхнього та нижнього листів, простір між якими заповнений пружною (пружно-в'язкою) речовиною;

$b - b$

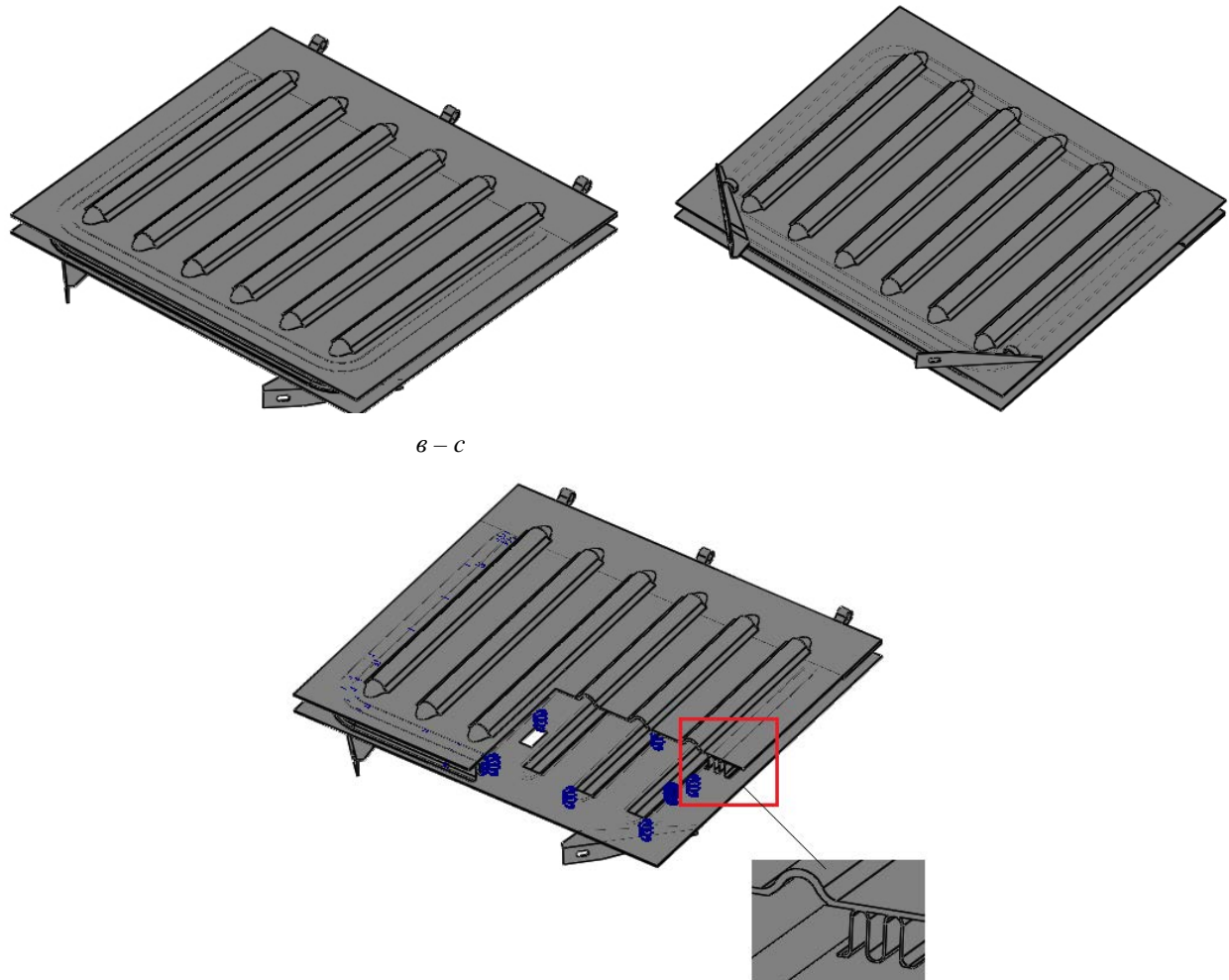


Рис. 1. Просторова комп'ютерна модель удосконаленої конструкції кришки люка напіввагона:  
 $a$  – вид знизу;  $b$  – вид зверху;  $c$  – розміщення пружного елемента в кришці люка

Fig. 1. Spatial computer model of the improved hatch cover design of the gondola car:  
 $a$  – bottom view;  $b$  – top view;  $c$  – placement of an elastic element in the hatch cover

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

- верхній гофрований лист має товщину 2,5 мм;
- нижній гофрований лист – 2,5 мм. Його гофри віддзеркалюють гофри верхнього листа на допустимих ділянках;
- обв’язування виконане з Ш-подібного профілю, гнутого з листа товщиною 5 мм, і заповнене пружною (пружно-в’язкою) речовиною по периметру кришки люка, а також у середній частині. Його висота адаптована до встановлення елементів стандартного кріплення до хребтової балки та нижньої обв’язки напіввагона;
- петлі кришки люка (елементи взаємодії з хребтовою балкою) кріпляться до кришки люка зварюванням (не заклепкове з’єднання);

– кронштейни кріпляться до нижньої обв’язки бокових стін типової конструкції.

Для визначення оптимального значення жорсткості кришки люка напіввагона до уваги взяте найбільше її навантаження під час експлуатації, а саме падіння на неї вантажу масою 150 кг з висоти 3 000 мм [1, 2].

## Результати

На підставі проведених розрахунків отримано графоаналітичну залежність (рис. 2), з якої можна зробити висновок, що міцність кришки люка забезпечується за умови жорсткості пружного елемента у вертикальному напрямку  $18\,000\text{ (Н/м)/м}^2$ .

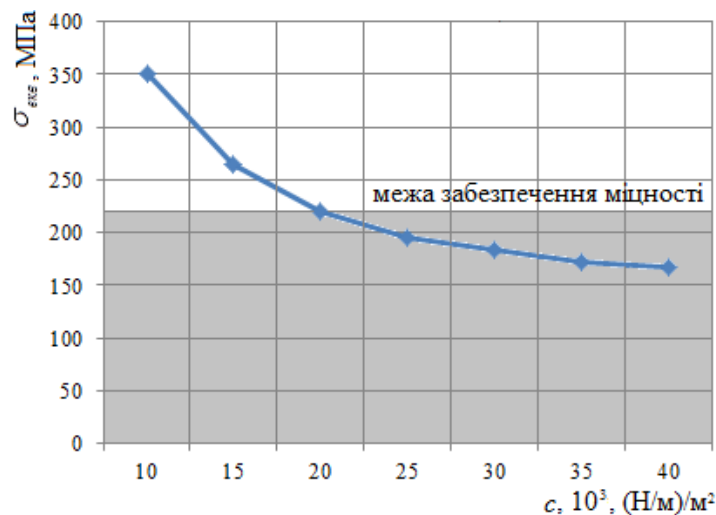


Рис. 2. Залежність максимальних еквівалентних напружень у кришці люка напіввагона від жорсткості розміщеного пружного елемента

Fig. 2. Maximum equivalent stresses in the hatch cover of the gondola car and the rigidity of the placed elastic element relationship

Модель міцності кришки люка наведена на рис. 3, а. Для розрахунку застосований метод скінченних елементів. Розрахунок проведений у середовищі програмного забезпечення CosmosWorks.

Кришка люка була закріплена за вушка петель. Враховувалося, що вона навантажена власною вагою. Матеріал конструкції – сталь марки 09Г2С зі значенням межі плинності 345 МПа.

Скінченно-елементна модель кришки люка наведена на рис. 3, б. В якості скінченних елементів використані ізопараметричні тетраедри. Оптимальна кількість елементів сітки визначе-

на за допомогою графоаналітичного методу, кількість елементів складала 115 171, вузлів – 36 363. Максимальний розмір елемента сітки дорівнює 80 мм, мінімальний – 16 мм, максимальне співвідношення боків елементів –  $2,75 \cdot 10^5$ , відсоток елементів зі співвідношенням боків менше трьох – 26, більше десяти – 5,81.

Результати розрахунку наведені на рис. 4, 5.

Максимальні еквівалентні напруження виникають у петлях, а також кінцевих частинах гофр, розміщених із боку петель, та складають близько 220 МПа. Максимальні переміщення у вузлах конструкції зафіксовані у запірних кронштейнах та складають близько 13 мм, мак-

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

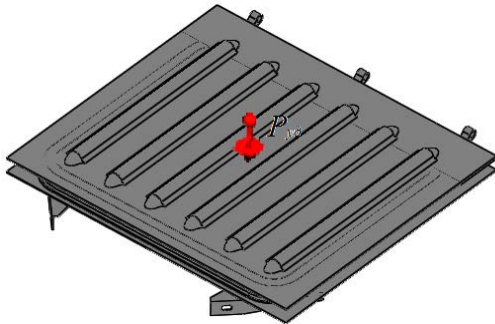
симальні деформації склали  $5,91 \cdot 10^{-1}$ . Тобто за заданої схеми навантаження міцність кришки люка забезпечується [1, 2].

Також проведене визначення показників міцності кришки люка удосконаленої конструкції під дією статичних навантажень.

Максимальні еквівалентні напруження від дії на кришку люка за її площею рівномірно

розподіленого навантаження  $P_b = 69,9$  кН виникають у петлях, а також кінцевих частинах гофр, розміщених із боку петель, та складають близько 150 МПа. Максимальні переміщення у вузлах конструкції зафіксовані у запірних кронштейнах, вони становлять близько 13 мм. Максимальні деформації склали  $5,34 \cdot 10^{-1}$ .

а – а



б – б

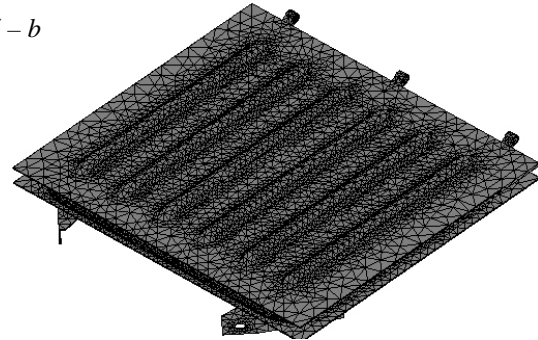


Рис. 3. Моделювання міцності удосконаленої конструкції кришки люка напіввагона:  
а – модель міцності; б – скінченно-елементна модель

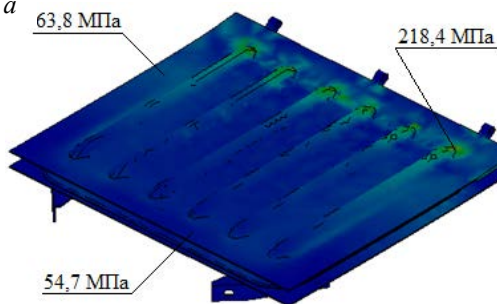
Fig. 3. Simulation of the strength of the improved hatch cover design of the gondola car:  
а – model of strength; б – finite element model

Під дією розподіленого в центрі кришки люка за площею  $25 \times 25$  см навантаження  $P_b = 50$  кН максимальні еквівалентні напруження складають близько 130 МПа. Вони виникають у петлях та кінцевих частинах гофр, розміщених із боку петель. Максимальні пере-

міщення у вузлах конструкції відбуваються у запірних кронштейнах і дорівнюють близько 10 мм. Максимальні деформації склали  $6,87 \cdot 10^{-1}$ .

Отже, за заданих схем навантаження міцність кришки люка забезпечується.

а – а



б – б

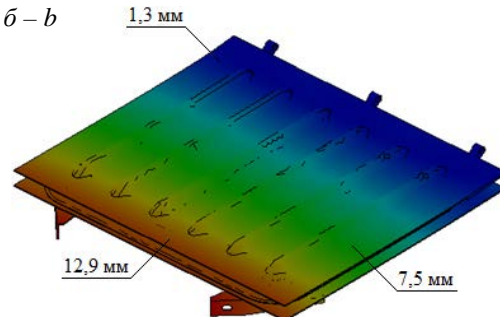


Рис. 4. Результати розрахунку вдосконаленої конструкції кришки люка напіввагона під дією на неї ударного навантаження:  
а – напружений стан; б – переміщення у вузлах

Fig. 4. Results of calculation of the improved hatch cover design of the gondola car at buffing loading effect:  
а – stress state; б – moving in nodes

Розрахунок міцності кришки люка удосконаленої конструкції на втому під дією циклічних ударних навантажень (500 циклів) також дозволив зробити висновок про дотримання

показників міцності в межах допустимих.

Окрім основних схем експлуатаційних навантажень удосконаленої конструкції кришки люка, до уваги взяті додаткові:

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

1) імітація розкриття кришки люка під час вивантаження вантажу – безторсійний (без урахування роботи торсіону (-ів) неодночасний (спочатку на один із упорів) удар кришки люка об упори проміжних балок рами вагона з максимальним кутом відкриття;

2) неодночасне відкриття закидок – спирання кришки люка завантаженого вагона на одну закидку за один кронштейн (випадок, коли вже вибили одну закидку, а іншу ще не встигли);

3) підтягування (закриття) кришки люка вивантаженого вагона ломиком.

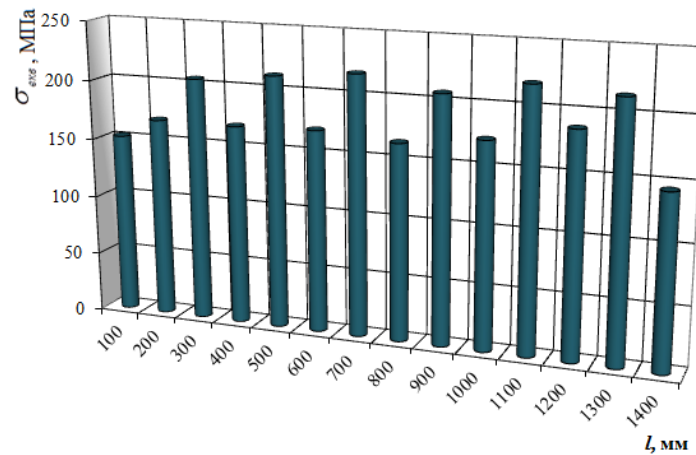


Рис. 5. Розподілення максимальних еквівалентних напружень у поперечному перетині верхнього листа кришки люка (зона розміщення кінцевих частин гофр) під дією ударного навантаження

Fig. 5. Distribution of maximum equivalent stresses in transverse crossing the top leaf of the hatch cover (area of placement of corrugation end portions) at buffing loading effect

Установлено, що максимальні еквівалентні напруження під час безторсійного неодночасного удару кришки люка об упори проміжних балок рами вагона виникають у петлях та складають близько 120 МПа. Максимальні переміщення у вузлах конструкції зафіксовані в запі-

рному кронштейні, що розміщений з протилежного боку від удару, складають близько 4 мм. Максимальні деформації склали  $8,5 \cdot 10^{-2}$  (рис. 6).

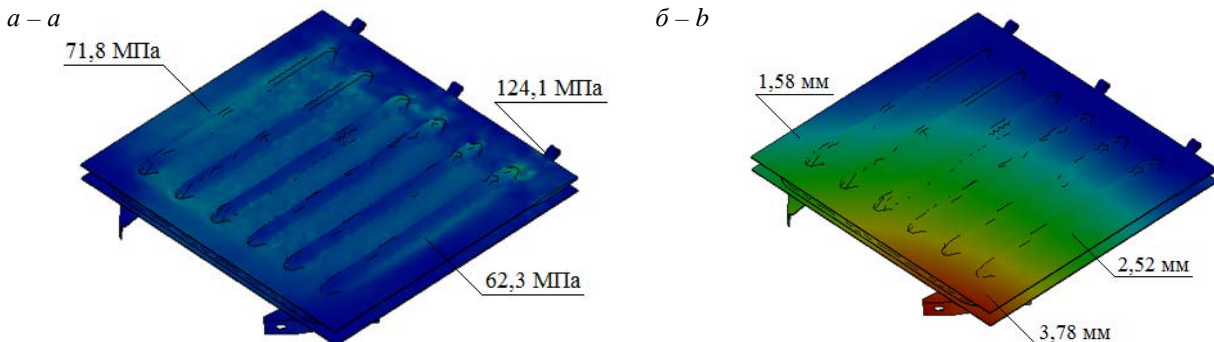


Рис. 6. Результати розрахунку вдосконаленої конструкції кришки люка напіввагона в момент безторсійного неодночасного удару об упори проміжних балок рами вагона: а – напружений стан; б – переміщення у вузлах

Fig. 6. Results of calculation of the improved hatch cover design of the gondola car at the moment of torsion-free non-simultaneous impact on the supports of the intermediate car frame beams: a – stress state; b – moving in nodes

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

У випадку безторсійного одночасного удару кришки люка об упори проміжних балок рами вагона максимальні еквівалентні напруження виникають у кінцевих частинах середніх гофр, розміщених із боку петель, вони дорівнюють близько 60 МПа. Максимальні переміщення у вузлах конструкції відбуваються в середній частині верхнього листа з боку розміщення запірних кронштейнів і складають близько 3 мм. Максимальні деформації склали  $6,7 \cdot 10^{-2}$ .

У разі неодногочасного відкривання закидок (спирання кришки люка завантаженого вагона на одну закидку за один кронштейн) максимальні еквівалентні напруження виникають у кінцевих частинах гофр, розміщених із боку петель (по діагоналі до запірного кронштейна, механізм якого знаходиться у закритому положенні), і складають близько 200 МПа (рис. 7).

Максимальні переміщення у вузлах конструкції зафіксовані у зоні розміщення запірного кронштейна, механізм якого знаходиться у закритому положенні, та складають близько 14,4 мм. Максимальні деформації склали  $5,2 \cdot 10^{-1}$ .

У випадку підтягування (закриття) кришки люка вивантаженого вагона ломиком максимальні еквівалентні напруження виникають у петлях і складають близько 75 МПа. Максимальні переміщення у вузлах конструкції зафіксовані в зоні розміщення запірних кронштейнів і складають 5,1 мм. Максимальні деформації склали  $2,24 \cdot 10^{-2}$ .

Отже, міцність кришки люка за додаткових схем навантажень забезпечується.

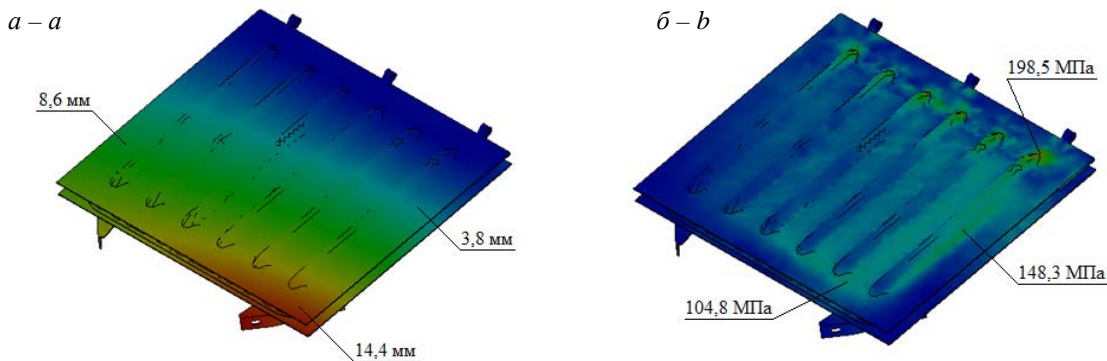


Рис. 7. Результати розрахунку міцності кришки люка напіввагона під час неодногочасного відкривання закидок:  
а – напружений стан; б – переміщення у вузлах

Fig. 7. Results of the calculation of the hatch cover strength of the gondola car at non-simultaneous opening of door latches:  
a – stress state; b – moving in nodes

### Наукова новизна та практична значимість

Розроблена модель удосконаленої конструкції кришки люка універсального напіввагона дозволяє отримати показники її міцності за експлуатаційних схем навантажень. Результати проведених досліджень можуть бути використані під час проектування несучих конструкцій кузовів універсальних напіввагонів нового покоління з поліпшеними техніко-економічними показниками.

Урахування отриманих результатів сприя-

тиме забезпеченню міцності конструкційних елементів кузовів напіввагонів під час експлуатації.

### Висновки

На підставі проведених досліджень можна зробити висновки:

1. Запропоновані заходи щодо вдосконалення конструкції кришки люка універсального напіввагона забезпечують її міцність за експлуатаційних схем навантажень.

2. Розрахунок показав, що показники міцності удосконаленої конструкції кришки люка за

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

експлуатаційних схем навантажень забезпечуються. Притому максимальні еквівалентні напруження виникають у момент падіння на неї вантажу масою 150 кг з висоти 3 000 мм і складають близько 220 МПа, тобто не перевищують допустимі.

3. Упровадження запропонованої конструкції кришки люка напіввагона в експлуатацію дозволить зменшити кількість пошкоджень кузовів і сприятиме підвищенню ефективності використання напіввагонів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. – Введ. 2014–12–22. – Москва : Стандартиформ, 2016. – 54 с.
2. Кирильчук, О. А. Исследование прочности конструкции съемной крыши для полувагонов / О. А. Кирильчук, Д. А. Шатунова // Вагонный парк. – 2016. – № 5/6 (110/111). – С. 50–53.
3. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – Москва : ГосНИИВ : ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.
4. Пешков, А. В. Поиск рационального конструктивного исполнения стоек и обвязки кузова глуходонного полувагона увеличенной грузоподъемности / А. В. Пешков, М. Р. Тохчукова // Трансп. Рос. Федерации. – 2011. – № 2 (33). – С. 65–68.
5. Analysis of the results of theoretical and experimental studies of freight wagon fals / S. Slavchev, K. Georgieva, V. Stoilov, S. Purgić // Facta Universitatis. – 2014. – Vol. 13. – Iss. 2. – P. 91–98.
6. Antipin, D. Ya. Justification of a Rational Design of the Pivot Center of the Open-Top Wagon Frame by means of Computer Simulation / D. Ya. Antipin, D. Yu. Racin, S. G. Shorokhov // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 150–154. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.738
7. Divya Priya, G. Modeling and analysis of twenty tonne heavy duty trolley / G. Divya Priya, A. Swarnakumari // Intern. J. of Innovative Technology and Research. – 2014. – Vol. 2, No. 6. – P. 1568–1580.
8. Dizo, J. Structural Analysis of a Modified Freight Wagon Bogie Frame / Ján Dižo, Jozef Harušinec, Miroslav Blatnický // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 134 : 18<sup>th</sup> Intern. Scientific Conference – LOGI 2017. – P. 00010. doi: 10.1051/mateconf/201713400010
9. Fomin, O. V. Improvement of upper bunding of side wall of gondola cars of 12-9745 model / O. V. Fomin // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – Vol. 7, No. 1. – P. 45–48.
10. Impact of wheelset steering and wheel profile geometry to the vehicle behavior when passing curved track / V. Hauser, O. S. Nozhenko, K. O. Kravchenko, M. Loulová, J. Gerlici, T. Lack // Manufacturing Technology. – 2017. – Vol. 17, No. 3. – P. 306–312.
11. Lovska, A. A. Peculiarities of computer modeling of strength of body bearing construction of gondola car during transportation by ferry-bridge / A. A. Lovska // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – No. 1. – P. 49–54.
12. Multi-body Simulations of Railway Wagon Dynamics / K. Wójcik, J. Małachowski, P. Baranowski, Ł. Mazurkiewicz, K. Damaziak, W. Krasoń // J. of KONES. Powertrain and Transport. – 2015. – Vol. 19. – Iss. 3. – P. 499–506. doi: 10.5604/12314005.1138164
13. Myamlin, S. V. Design Review of Gondola Car / S. V. Myamlin, I. U. Keбал, S. R. Kolesnykov // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 6 (54). – С. 136–145. doi: 10.15802/stp2014/33773
14. Numerical static and dynamic stress analysis on railway passenger and freight car models / C. Baykasoglu, E. Sunbuloglu, S. E. Bozdog, F. Aruk, T. Toprak and A. Mugan // International Iron & Steel Symposium, 02–04 April 2012, Karabük, Türkiye. – Karabük, 2012. – P. 579–586.
15. Research into surface properties of disperse fillers based on plant raw materials / Yu. Danchenko, V. Andronov, A. Kariev, V. Lebedev, E. Rybka, R. Meleshchenko, D. Yavorska // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 5. – Iss. 12 (89). – P. 20–26. doi: 10.15587/1729-4061.2017.111350
16. Research of friction indices influence on the freight car dynamics / S. Myamlin, L. Neduzha, A. Ten, A. Shvets // TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture. – 2013. – Vol. 13, No. 4. – P. 159–166.
17. Research of the intermolecular interactions and structure in epoxyamine composites with dispersed oxides / Yu. Danchenko, V. Andronov, E. Barabash, T. Obigenko, E. Rybka, R. Meleshenko, A. Romin // Eastern-

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 6. – Iss. 12 (89). – P. 4–12. doi: 10.15587/1729-4061.2017.118565

18. The influence of implementation of circular pipes in load-bearing structures of bodies of freight cars on their physico-mechanical properties / O. V. Fomin, A. O. Lovska, O. A. Plakhtii, V. P. Nerubatskyi // Науковий вісн. НГУ. – 2017. – № 6. – P. 89–96.

Н. И. ГОРБУНОВ<sup>1\*</sup>, А. В. ФОМИН<sup>2</sup>, А. А. ЛОВСКАЯ<sup>3</sup>, В. В. КОВАЛЕНКО<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Железнодорожный, автомобильный транспорт и подъемно-транспортные машины», Восточноукраинский национальный университет имени В. Даля, пр. Центральный, 59-а, Северодонецк, Украина, 93400, тел. +38 (095) 309 10 39, эл. почта gorbunov0255@gmail.com, ORCID 0000-0002-8556-3392

<sup>2</sup>Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Государственный университет инфраструктуры и технологий, ул. Кирилловская, 9, Киев, Украина, 04071, тел. +38 (067) 813 97 88, эл. почта fomin1985@ukr.net, ORCID 0000-0003-2387-9946

<sup>3</sup>Каф. «Вагоны», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, эл. почта alyonalovskaya.vagons@gmail.com, ORCID 0000-0002-8604-1764

<sup>4</sup>Каф. «Железнодорожный, автомобильный транспорт и подъемно-транспортные машины», Восточноукраинский национальный университет имени В. Даля, пр. Центральный, 59-а, Северодонецк, Украина, 93400, тел. +38 (095) 142 90 74, эл. почта kkaterina@ukr.net, ORCID 0000-0003-1706-2710

## КОМПЛЕКСНЫЙ РАСЧЕТ ВЫПОЛНЕНИЯ КРЫШКИ ЛЮКА ПОЛУВАГОНА ИЗ РАЗНОТИПНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ Ш-ОБРАЗНОЙ ОБВЯЗКОЙ

**Цель.** Предложенное исследование направлено на определение показателей прочности крышки люка универсального полувагона, исполненного с промежуточной Ш-образной обвязкой из разнотипных материалов при эксплуатационных схемах нагружения. **Методика.** Для достижения поставленной цели создана принципиально новая конструкция крышки люка полувагона, особенностью которой является то, что она состоит из двух листов, которые по периметру взаимодействуют через Ш-образную обвязку. Пространство, которое образуют листы и обвязка, а также периметр крышки люка, заполнены упругим (упруго-вязким) веществом. Построена пространственная модель предложенной конструкции крышки люка, проведен расчет ее прочности. Расчет осуществлен по методу конечных элементов в среде программного обеспечения CosmosWorks. **Результаты.** Получены показатели прочности усовершенствованной конструкции крышки люка при эксплуатационных схемах ее нагружения. К вниманию взяты основные схемы нагружения крышки люка полувагона соответственно нормативным документам, а также дополнительные. К дополнительным отнесены: имитация раскрытия крышки люка при эксплуатационных нагружениях – безторсионный (без участия работы торсиона (-ов) неодновременный (сначала на один из упоров) удар крышки люка по упорам промежуточных балок рамы вагона с максимальным углом открывания; неодновременное открывание закидок – опирание крышки люка загруженного вагона на одну закидку за один кронштейн (случай, когда уже выбили одну закидку, а другую еще не успели); подтягивание (закрывание) крышки люка выгруженного полувагона ломиком. Установлено, что прочность крышки люка обеспечивается. **Научная новизна.** Разработанная модель прочности усовершенствованной конструкции крышки люка универсального полувагона позволяет получить показатели ее прочности при эксплуатационных схемах нагружения. Результаты проведенных исследований могут использоваться при проектировании несущих конструкций кузовов универсальных полувагонов нового поколения с улучшенными технико-экономическими показателями. **Практическая значимость.** Использование полученных результатов будет способствовать обеспечению прочности конструктивных элементов кузовов полувагонов в эксплуатации.

**Ключевые слова:** полувагон; крышка люка; усовершенствованная конструкция; моделирование прочности; эксплуатационная нагруженность; эквивалентные напряжения

M. I. HORBUNOV<sup>1\*</sup>, O. V. FOMIN<sup>2</sup>, A. O. LOVSKA<sup>3</sup>, V. V. KOVALENKO<sup>4</sup><sup>1\*</sup>Dep. «Railway and Road Transport, Handling Equipment», Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Tsentralnyi Av., 59 a, Severodonetsk, Ukraine, 93400, tel. +38(095) 309 10 39, e-mail gorbunov0255@gmail.com, ORCID 0000-0002-8556-3392<sup>2</sup>Dep. «Cars and Carriage Facilities», State University of Infrastructure and Technologies, Kyrylivska St., 19, Kyiv, Ukraine, 03049, tel. +38 (067) 813 97 88, e-mail fomin1985@list.ru, ORCID 0000-0003-2387-9946<sup>3</sup>Dep. «Cars», Ukrainian State University of Railway Transport, Feierbakh Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61500, tel. +38 (057) 730 10 35, e-mail alyonalovskaya.vagons@gmail.com, ORCID 0000-0002-8604-1764<sup>4</sup>Dep. «Railway and Road Transport, Handling Equipment», Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Tsentralnyi Av., 59 a, Severodonetsk, Ukraine, 93400, tel. +38 (095) 142 90 74, e-mail kkaterina@ukr.net, ORCID 0000-0003-1706-2710

## COMPLEX CALCULATION OF HATCH COVER OF GONDOLA CAR FROM POLYTYPIC MATERIALS WITH INTERMEDIATE S-SHAPE STRAPPING

**Purpose.** The proposed study is aimed at determining the strength indicators of the hatch cover of universal gondola car with intermediate S-shaped strapping made of polytypic materials under operational loading schemes. **Methodology.** To achieve this goal, it has been proposed to create a fundamentally new hatch cover design for a gondola car. A feature of the hatch cover is that it consists of two leaves, which along the perimeter interact through the S-shaped strapping. The calculation was carried out using the finite element method implemented in the software environment of CosmosWorks. **Findings.** The strength indicators of the improved hatch cover design are obtained under operating schemes of its loading. The basic schemes of loading the hatch cover of the gondola car in accordance with the normative documents have been adopted, as well as additional ones. To the additional the following are classified as: simulating the opening of the hatch cover during operating loading - the torsion-free (without operation of the torsion (s)) non-simultaneous impact on the supports of the intermediate car frame beam with the maximum opening angle; non-simultaneous opening of the door latches - the hatch cover of the loaded car is supported by door latch for one bracket (the case when one has already knocked out one door latch and the other has not yet had time); pulling (closing) the hatch cover of the unloaded gondola car with a crowbar. It is established that the strength of the hatch cover is ensured. **Originality.** A developed strength model of the improved hatch cover design of the universal gondola car makes it possible to obtain indicators of its strength under operational loading schemes. The results of the carried out research can be used at designing of bearing designs of bodies of universal gondola cars of new generation with the improved technical and economic indicators. **Practical value.** The results of the research will contribute to ensuring the strength of the structural elements of the gondola car bodies in operation.

**Key words:** gondola car; hatch cover; improved design; strength modeling; operational loading; equivalent stresses

### REFERENCES

1. Vagony грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам, 54 GOST 33211-2014 (2016). (in Russian).
2. Kirilchuk, O. A., & Shatunova, D. A. (2016). Issledovanie prochnosti konstruktivnoy semnoy kryshi dlya poluvagonov. *Vagonnyy park*, 5-6 (110/111), 50-53 (in Russian).
3. *Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznnykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)*. (1996). Moscow: GosNIIV: VNIIZhT. (in Russian)
4. Peshkov, A. V., & Tokhchukova, M. R. (2011). Poisk ratsionalnogo konstruktivnogo ispolneniya stoek i obvyazki kuzova glukhodonnogo poluvagona uvelichennoy gruzopodemnosti. *Transport Rossiyskoy Federatsii*, 2 (33), 65-68. (in Russian).
5. Slavchev, S., Georgieva, K., Stoilov, V., & Purgic, S. (2015) Analysis of the results of theoretical and experimental studies of freight wagon fals. *Facta Universitatis*, 13 (2), 91- 98. (in English).
6. Antipin, D. Y., Racin, D.Y., & Shorokhov, S. G. (2016). Justification of a Rational Design of the Pivot Center of the OpenTop Wagon Frame by means of Computer Simulation. *Procedia Engineering*, 150, 150-154. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.738 (in English).

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

7. Divya, P. G., & Swarnakumari, A. (2014). Modeling and analysis of twenty tonne heavy duty trolley. *International Journal of Innovative Technology and Research*, 2 (6), 1568-1580. (in English)
8. Jan Dizo, Jozef Harusinec, & Miroslav Blatnický (2017). Structural analysis of a modified freight wagon bogie frame. *MATEC Web of Conferences: 18th International Scientific Conference*, 134, 00010, 1- 8. doi: 10.1051/mateconf/201713400010 (in English).
9. Fomin, O. (2015). Improvement of upper bundling of side wall of gondola cars of 12-9745 model. *Metallurgical and Mining Industry*, 7(1), 45-48. (in English)
10. Hauser, V., Nozhenko, O. S., Kravchenko, K. O., Loulová, M., Gerlici, J., & Lack, T. (2017). Impact of wheelset steering and wheel profile geometry to the vehicle behavior when passing curved track. *Manufacturing Technology*, 17, 3, 306-312. (in English).
11. Lovska, A. A. (2015). Peculiarities of computer modeling of strength of body bearing construction of gondola car during transportation by ferry-bridge. *Metallurgical and Mining Industry*, 1, 49-54. (in English)
12. Wójcik, K., Małachowski, J., Baranowski, P., Mazurkiewicz, Ł., Damaziak, K., & Krason, W. (2015). Multi-body Simulations of Railway Wagon Dynamics. *Journal of KONES. Powertrain and Transport*, 19(3), 499-506. doi: 10.5604/12314005.1138164 (in English)
13. Myamlin, S. V., Kebal, I. U., & Kolesnykov, S. R. (2014). Design review of gondola car. *Science and Transport Progress*, 6(54), 136-145. doi: 10.15802/stp2014/33773 (in English)
14. Baykasoglu, C., Sunbuloglu, E., Bozdog, S. E., Aruk, F., Toprak, T., & Mugan, A. (2012). Numerical static and dynamic stress analysis on railway passenger and freight car models. *International Iron & Steel Symposium (02-04 April 2012, Karabük, Türkiye)*, 579-586.
15. Danchenko, Y., Andronov, V., Kariev, A., Lebedev, V., Rybka, E., Meleshchenko, R., & Yavorska, D. (2017). Research into surface properties of disperse fillers based on plant raw materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(12) (89), 20-26. doi: 10.15587/1729-4061.2017.111350 (in English)
16. Myamlin, S. L., Neduzha, A., Ten, A., & Shvets, A. (2013). Research of friction indices influence on the freight car dynamics. *TEKA. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*, 13(4), 159-166. (in English).
17. Danchenko, Y., Andronov, V., Barabash, E., Obigenko, T., Rybka, E., Meleshenko, R., Romin, A. (2017). Research of the intermolecular interactions and structure in epoxyamine composites with dispersed oxides. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(12) (89), 4-12. doi: 10.15587/1729-4061.2017.118565 (in English).
18. Fomin, O. V., Lovska, A. O., Plakhtii, O. A., Nerubatskyi, V. P. (2017). The influence of implementation of circular pipes in load-bearing structures of bodies of freight cars on their physico-mechanical properties. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 6, 89- 96. (in English).

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. С. В. Мямліним (Україна)

Надійшла до редколегії: 01.03.2018

Прийнята до друку: 04.06.2018

## ПОДІЇ

---

### ENGINEER OF THE THIRD MILLENNIUM

The annual International Student Scientific Conference "Engineer of the third Millennium" has been held in Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan for the seventeenth time. The university is always hospitably open to students, young scientists, graduates from Ukraine and foreign countries so that they can join the scientific community and highlight their achievements in the corresponding sections of the conference.

The organization of such an important event in the life of young people has become a good tradition of the Philology and Translation Department of our university which was the first one in Prydniprovya region to launch such an essential scientific forum in foreign languages (English, French, German) as working ones. The multilingual status of the conference undoubtedly contributes to the developing international relations, strengthening the positions of young scientists in the international space; it is essential for the European integration processes of our country.

Currently, the conference is open to the students from almost all technical and most humanitarian universities of the region, a lot of Ukrainian cities (in particular Kiev, Kharkiv, Zaporozhye, etc.) and foreign countries (Germany, the Netherlands, Iran, Cameroon, Poland, China, etc.).

The conference "Engineer of the third Millennium" has two main goals: firstly, elucidating innovations in science and technology, and secondly, popularization of studying foreign languages, in particular English, for further using them in the researcher's scientific work and the engineer's practice. In the rapidly changing global world, it is hard to imagine any specialists who do not speak English, the language of international science and globalization.

Various urgent issues of environmental protection, modern information technologies and

their application in medicine, agriculture, industry, problems of genetic engineering, bridge construction, educational issues, and problems related to the solution of transport infrastructure, social and economic situation, issues of language competency of students, teaching foreign languages, the role of translators in the modern world were discussed during the conference. They aroused a lively discussion among the audience, young science enthusiasts, and experienced teachers who attended the conference.

Most of the speakers supplied their presentations with multimedia, videos, animations, drawings, diagrams. This provides the opportunity for the speakers to visualize some aspects of their works while presenting them to the audience.

The conference always pays a considerable attention to current problems in the field of railway transport because it is the basis of the national economy and transport system of Ukraine. Its stable and efficient functioning is a prerequisite for ensuring the country's defense capability, national security and integrity.

Among the main problems of this field, which are considered by the participants of the conference, are the imperfections of regulatory acts of rail transport activity, its low competitiveness in the external and internal market of transport services; insufficient level of investment and financing of technical and technological modernization of transport infrastructure.

The moderators of the conference were also selected from the student community; they played an important role introducing the speakers and inviting the guests of the conference.

Oleksandr M. Pshinko, doctor of technical sciences, professor, rector of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan is the chairman of the scientific committee of the conference. Among the members of the scientific committee are leading scientists of our university –

## ПОДІЇ

Sergiy V. Myamlin, doctor of technical sciences, professor, vice-rector of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan and Tetyana I. Vlasova, doctor of philosophy, professor, head of the Philology and Translation Department of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan and others.

By the decision of the scientific and organizing committees of the conference, the best speakers were awarded with honorary diplomas. But the

most important thing they got was an invaluable experience of communicating with the irrepressible seekers for new ideas, experienced instructors who attended the conference.

The members of the scientific committee of the conference noted the high level of preparation of the speakers, and also expressed their readiness to continue giving the opportunity to each one who wishes to share scientific ideas in the fields of such conferences in Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan.

*Instructor of the Philology and Translation Department  
A. V. Bezrukov*

## ЗМІСТ

### **НАУКА И ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ**

**О. М. ОГАР, О. В. РОЗСОХА, Г. В. ШАПОВАЛ, Ю. В. СМАЧИЛО**  
РОЗПОДІЛ ТРАНСПОРТНИХ ПОДІЙ НА ЗАЛІЗНИЦЯХ УКРАЇНИ ЗА КАТЕГОРІЯМИ ЗАЛЕЖНО ВІД ТЯЖКОСТІ НАСЛІДКІВ..... 7

### **ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ**

**М. М. БІЛЯЄВ, І. В. КАЛАШНІКОВ, І. В. КЛІМЕНКО, В. А. КОЗАЧИНА**  
3D ЧИСЕЛЬНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕРИТОРІАЛЬНОГО РИЗИКУ ПРИ ТЕРАКТІ..... 20

**Ю. В. БУЦ, О. В. КРАЙНЮК, Д. С. КОЗОДОЙ, В. В. БАРБАШИН**  
ОЦІНКА НАДЗВИЧАЙНИХ ПОДІЙ ПІД ЧАС ПЕРЕВЕЗЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВАНТАЖІВ У КОНТЕКСТІ ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ РЕГІОНІВ..... 27

**Л. Ф. ДОЛИНА, О. П. САВІНА**  
ОЧИЩЕННЯ ВОД ВІД ЗАЛИШКІВ ЛІКАРСЬКИХ ПРЕПАРАТІВ ..... 36

**Ю. О. СКОБ, М. Л. УГРІУМОВ**  
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАСЛІДКІВ ВИПАРОВУВАННЯ АВАРІЙНОГО ПРОЛИТТЯ ТОКСИЧНИХ РЕЧОВИН НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ ..... 52

### **ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ**

**І. М. ЛОМТЄВА, М. П. СНАЧОВ, О. А. ТОПОРКОВА, Л. А. ШИЛО**  
ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ФІНАНСОВИХ РЕСУРСІВ ПАТ «УКРАЇНСЬКА ЗАЛІЗНИЦЯ»..... 67

### **ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ**

**Д. В. УСТИМЕНКО**  
ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ РОБОТИ ЗМАЩУВАЛЬНИХ ШАРІВ У ТРИБОСИСТЕМІ «КОНТАКТНИЙ ПРОВІД – КОНТАКТНА ВСТАВКА СТРУМОПРИЙМАЧА»..... 78

### **ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ**

**С. ФІШЕР, А. НЕМЕС, Д. ХАРРАЧ, Е. ЮХАС**  
СПЕЦІАЛЬНИЙ МЕТОД ОЦІНКИ РУЙНУВАННЯ ЧАСТОК ЗАЛІЗНИЧНОГО БАЛАСТУ НА ОСНОВІ УНІКАЛЬНОГО ЛАБОРАТОРНОГО ВИПРОБУВАННЯКИ..... 87

### **МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО**

**С. О. ПЛІТЧЕНКО**  
МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ ЗВАРЮВАННЯ ТЕРТЯМ ІЗ ПЕРЕМІШУВАННЯМ ..... 95

### **МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ**

**В. Я. НЕЧАЙ, Д. О. ВОЛОШИН, О. І. НЕЖУМІРА**  
ДОСЛІДЖЕННЯ ГРАНИЧНИХ ЧАСОВИХ ПОКАЗНИКІВ ПРОГРАМНИХ СЕРЕДОВИЩ ОПЕРАЦІЙНИХ СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ..... 105

**В. В. СКАЛОЗУБ, Л. О. ПАНІК**  
РЕАЛІЗАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ, КОНКУРЕНТНИХ І НЕЧІТКИХ МОДЕЛЕЙ ПЛАНУВАННЯ БАГАТОПРОДУКТОВИХ ПОТОКІВ У ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖАХ ..... 113

### **НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ**

**Р. П. ПОГРЕБНЯК**  
НЕСТАЦІОНАРНІ РЕЖИМИ РОБОТИ ГОЛОВНОГО ПРИВОДА КАРУСЕЛЬНОГО ВЕРСТАТА ДЛЯ ОБРОБКИ СУЦІЛЬНОКАТАНИХ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС..... 128

### **РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ**

**М. І. ГОРБУНОВ, О. В. ФОМІН, А. О. ЛОВСЬКА, В. В. КОВАЛЕНКО**  
КОМПЛЕКСНИЙ РОЗРАХУНОК ВИКОНАННЯ КРИШКИ ЛЮКА НАПІВВАГОНА З РІЗНОТИПНИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ПРОМІЖНИМ Ш-ПОДІБНИМ ОБВ'ЯЗУВАННЯМ ..... 138

### **ПОДІЇ**

**А. В. БЕЗРУКОВ**  
ІНЖЕНЕР ТРЕТЬОГО ТИСЯЧОЛІТТЯ ..... 149

# СОДЕРЖАНИЕ

## **НАУКА И ПРОГРЕСС ТРАНСПОРТА**

- А. Н. ОГАР, А. В. РОЗСОХА, А. В. ШАПОВАЛ, Ю. В. СМАЧИЛО**  
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ УКРАИНЫ ПО КАТЕГОРИЯМ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЯЖЕСТИ ПОСЛЕДСТВИЙ ..... 7

## **ЭКОЛОГИЯ НА ТРАНСПОРТЕ**

- Н. Н. БЕЛЯЕВ, И. В. КАЛАШНИКОВ, И. В. КЛИМЕНКО, В. А. КОЗАЧИНА**  
3D ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО РИСКА ПРИ ТЕРАКТЕ ..... 20

- Ю. В. БУЦ, Е. В. КРАЙНЮК, Д. С. КОЗОДОЙ, В. В. БАРБАШИН**  
ОЦЕНКА ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СОБЫТИЙ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ ОПАСНЫХ ГРУЗОВ В КОНТЕКСТЕ ТЕХНОГЕННОЙ НАГРУЗКИ РЕГИОНОВ..... 27

- Л. Ф. ДОЛИНА, О. П. САВИНА**  
ОЧИСТКА ВОД ОТ ОСТАТКОВ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ПРЕПАРАТОВ ..... 36

- Ю. А. СКОБ, М. Л. УГРЮМОВ**  
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ИСПАРЕНИЯ АВАРИЙНОГО ПРОЛИВА ТОКСИЧНОГО ВЕЩЕСТВА НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ..... 52

## **ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

- И. Н. ЛОМТЕВА, Н. П. СНАЧЕВ, Е. А. ТОПОРКОВА, Л. А. ШИЛО**  
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ФИНАНСОВЫХ РЕСУРСОВ ПАО «УКРАИНСКАЯ ЖЕЛЕЗНАЯ ДОРОГА»..... 67

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ**

- Д. В. УСТИМЕНКО**  
ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАБОТЫ СМАЗОЧНЫХ СЛОЕВ В ТРИБОСИСТЕМЕ «КОНТАКТНЫЙ ПРОВОД – КОНТАКТНАЯ ВСТАВКА ТОКОПРИЕМНИКА»..... 78

## **ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ**

- С. ФИШЕР, А. НЕМЕС, Д. ХАРРАЧ, Е. ЮХАС**  
СПЕЦИАЛЬНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ РАЗРУШЕНИЯ ЧАСТИЦ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО БАЛЛАСТА НА ОСНОВЕ УНИКАЛЬНОГО ЛАБОРАТОРНОГО ИСПЫТАНИЯ ..... 87

## **МАТЕРИАЛОЗНАВСТВО**

- С. А. ПЛИТЧЕНКО**  
МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ..... 95

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТА И ЭКОНОМИКИ**

- В. Я. НЕЧАЙ, Д. А. ВОЛОШИН, А. И. НЕЖУМИРА**  
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ВРЕМЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОГРАММНЫХ СРЕД ОПЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ..... 105

- В. В. СКАЛОЗУБ, Л. А. ПАНИК**  
РЕАЛИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ, КОНКУРЕНТНЫХ И НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ ПЛАНИРОВАНИЯ МНОГОПРОДУКТОВЫХ ПОТОКОВ В ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЯХ ..... 113

## **НЕТРАДИЦИОННЫЕ ВИДЫ ТРАНСПОРТА. МАШИНЫ И МЕХАНИЗМЫ**

- Р. П. ПОГРЕБНЯК**  
НЕСТАЦИОНАРНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ГЛАВНОГО ПРИВОДА КАРУСЕЛЬНОГО СТАНКА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЦЕЛЬНОКАТАНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС..... 128

## **ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ И ТЯГА ПОЕЗДОВ**

- Н. И. ГОРБУНОВ, А. В. ФОМИН, А. А. ЛОВСКАЯ, В. В. КОВАЛЕНКО**  
КОМПЛЕКСНЫЙ РАСЧЕТ ВЫПОЛНЕНИЯ КРЫШКИ ЛЮКА ПОЛУВАГОНА ИЗ РАЗНОТИПНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ Ш-ОБРАЗНОЙ ОБВЯЗКОЙ ..... 138

## **СОБЫТИЯ**

- А. В. БЕЗРУКОВ**  
ИНЖЕНЕР ТРЕТЬЕГО ТЫСЯЧИЛЕТИЯ ..... 149

# CONTENTS

## **SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS**

<b>O. M. OHAR, O. V. ROZSOCHA, G. V. SHAPOVAL, Y. V. SMACHYLO</b> TRANSPORT ACCIDENTS DISTRIBUTION AT UKRAINIAN RAILWAYS ACCORDING TO CATEGORIES DEPENDING ON SEVERITY OF CONSEQUENCES .....	7
---	---

## **TRANSPORT ECOLOGY**

<b>M. M. BILIAIEV, I. V. KALASHNIKOV, I. V. KLIMENKO, V. A. KOZACHYNA</b> 3D NUMERICAL MODEL FOR TERRITORIAL RISK ASSESMENT AFTER TERRORIST ACT.....	20
---	----

<b>Y. V. BUTS, E. V. KRAYNYUK, D. S. KOZODOY, V. V. BARBASHIN</b> EVALUATION OF EMERGENCY EVENTS AT THE TRANSPORTATION OF DANGEROUS GOODS IN THE CONTEXT OF THE TECHNOGENIC LOAD IN REGIONS .....	27
--	----

<b>L. F. DOLINA, O. P. SAVINA</b> WATER CLEANING FROM RESIDUES OF MEDICINAL PREPARATIONS .....	36
---	----

<b>Y. O. SKOB, M. L. UGRYUMOV</b> MATHEMATICAL MODELING OF EVAPORATION CONSEQUENCES OF TOXIC SUBSTANCE EMERGENCY SPILLAGE AT RAILWAY TRANSPORT .....	52
---	----

## **ECONOMICS AND MANAGEMENT**

<b>I. M. LOMTIEVA, M. P. SNACHOV, O. A. TOPORKOVA, L. A. SHYLO</b> FORMATION PECULIARITIES OF FINANCIAL RESOURCES OF PJSC «UKRAINIAN RAILWAY» .....	67
--	----

## **ELECTRIC TRANSPORT**

<b>D. V. USTYMENKO</b> PHYSICO-TECHNOLOGICAL ASPECTS OF WORK OF LUBRICANT FILMS IN THE TRIBOSYSTEM «OVERHEAD LINE – CURRENT COLLECTOR CONTACT STRIP» .....	78
---	----

## **RAILWAY TRACK**

<b>S. FISCHER, A. NEMETH, D. HARRACH, E. JUHASZ</b> SPECIFIC ASSESSMENT METHOD OF RAILWAY BALLAST PARTICLE DEGRADATION BASED ON UNIQUE LABORATORY TEST .....	87
---	----

## **MATERIAL SCIENCE**

<b>S. O. PLITCHENKO</b> PROCEDURE FOR DETERMINING PROCESS CHARACTERISTICS OF FRICTION STIR WELDING ....	95
--	----

## **TRANSPORT AND ECONOMIC TASKS MODELING**

<b>V. Y. NECHAY, D. O. VOLOSHYN, O. I. NEZHUMIRA</b> RESEARCH OF LIMIT TIME INDICES OF SOFTWARE ENVIRONMENTS OF REAL TIME OPERATING SYSTEMS .....	105
--	-----

<b>V. V. SKALOZUB, L. O. PANIK</b> IMPLEMENTATION OF THE DYNAMIC, COMPETITIVE AND FUZZY MODELS FOR PLANNING OF THE MULTI-PRODUCT FLOWS IN TRANSPORT NETWORKS .....	113
---	-----

## **NON-TRADITIONAL TRANSPORT MODEL. MACHINES AND MECHANISMS**

<b>R. P. POGREBNYAK</b> UNSTEADY OPERATING MODES OF THE MAIN DRIVE UNIT OF A MACHINE-TOOLS FOR SOLID RAILWAY WHEELS PROCESSING.....	128
--	-----

## **ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION**

<b>M. I. HORBUNOV, O. V. FOMIN, A. O. LOVSKA, V. V. KOVALENKO</b> COMPLEX CALCULATION OF HATCH COVER OF GONDOLA CAR FROM POLYTYPIC MATERIALS WITH INTERMEDIATE S-SHAPE STRAPPING.....	138
--	-----

## **EVENTS**

<b>A. V. BEZRUKOV</b> ENGINEER OF THE THIRD MILLENNIUM .....	149
---	-----

## ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

До публікації в журналі приймаються статті українською, російською або англійською мовами проблемного, узагальнюючого, методичного характеру, оригінальні наукові, практичні дослідження, які раніше ніде не видавалися.

Матеріали необхідно надавати в друкованому та електронному вигляді у програмі Microsoft Word. Для набору формул використовується MathType.

Наукова стаття повинна відповідати вимогам п. 3 Постанови ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 року.

Матеріали рецензуються членами редакційної колегії журналу та сторонніми незалежними експертами, виходячи з принципу об'єктивності та з позицій вищих міжнародних академічних стандартів якості, та редагуються. Редакція залишає за собою право на стилістичну правку рукопису.

### **Вимоги щодо обсягу наукових статей, повідомлень, відгуків та рецензій:**

- оглядові та проблемні статті – до 45 000 знаків з пробілами (7–10 с.);
- загальні статті за рубриками видання – до 30 000 знаків з пробілами (5–7 с.);
- наукове повідомлення – до 8 000 знаків з пробілами (до 2,5 с.);
- відгук або рецензія – до 6 000 знаків з пробілами (до 2 с.).

Матеріал надається у форматі A4, враховуючи таблиці, ілюстрації, список використаних джерел. Статті, більші за обсягом, можуть бути прийняті до розгляду на підставі рішення редколегії.

### **Для здачі статті до друку авторам необхідно надати наступні документи:**

- 1) файл зі статтею та друкований примірник рукопису з підписами всіх співавторів на останньому аркуші роботи;
- 2) оригінал Ліцензійного договору з підписами всіх співавторів;
- 3) файл з відомостями про кожного з авторів – прізвище, ім'я, по-батькові повністю, посада, місце роботи, наукове звання, науковий ступінь, контактна інформація (телефон, адреса електронної пошти), код ORCID. Відомості про авторів подаються трьома мовами – українською, російською та англійською;
- 4) Оригінал експертного висновку.

**Увага! Згідно з міжнародними стандартами якості наукових публікацій необхідним є:** наявність авторських розширених (250-300 слів) і структурованих резюме (рефератів – abstracts), у т.ч. англійською мовою, рецензій, присланих списків літератури в романському алфавіті тощо.

### **Виклад основного матеріалу статті повинен мати такі елементи:**

- **вступ:** постановка проблеми, аналіз останніх досліджень;
- **мету;**
- **методику:** виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Докладно описують загальну методику дослідження, щоб його результати могли бути відтворені: описується послідовність виконання дослідження, обґрунтовується вибір використовуваних і викладається суть запропонованих методів і моделей, змістовно визначається, що саме досліджувалося кожним методом;
- **результати:** містять експериментальні чи теоретичні дані, отримані в роботі, для демонстрації того, що отримано нове рішення проблеми, і що робота є значним кроком вперед у порівнянні з попередніми дослідженнями. Дані подаються у формі таблиць, графіків, діаграм, рівнянь, фотографій, рисунків, статистичними оцінками. Результати повинні бути викладені коротко і чітко, при цьому містити досить інформації для оцінки зроблених висновків, також має бути очевидно, чому для аналізу обрані саме ці дані;
- **наукову новизну та практичну значимість.** Наукова новизна отриманих результатів викладається аргументовано, коротко і чітко. До наукової новизни не можна відносити прикладні результати (способи, пристрої, методики, схеми, алгоритми). Практичне значення отриманих результатів становлять відомості про використання результатів досліджень або рекомендації з їх використання;
- **висновки:** необхідно навести досягнуті кількісні та якісні показники дослідження, викласти рекомендації з їх використання.

### **З усіх питань звертайтеся до редакції журналу за адресою:**

Науково-технічна бібліотека (ауд. 166),

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,

вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна,

49010

e-mail: visnik@diit.edu.ua

Сайт журналу: <http://stp.diit.edu.ua/>

Д л я н о т а т о к

Наукове видання

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

№3 (75) 2018

(українською, російською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – О. В. Помінова

Комп'ютерне верстання – О. В. Помінова

Літературна обробка – С. П. Лагдан

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ум. друк. арк. 18,02. Тираж 100 пр. Зам. №02/03

**Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна**

*Адреса редакції, видавця:*

вул. Лазаряна, 2, кім. 267, м. Дніпро, 49010, Україна

*Тел.:* +38 (056) 371-51-05

*E-mail:* lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

*Друк:*

Видавництво «Герда», 49000, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 60

Свідцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 397 від 03.04.2001 р.



Научное издание

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

№ 3 (75) 2018

(на українском, русском и английском языках)

Ответственный за выпуск – О. В. Поминова

Компьютерная верстка – О. В. Поминова

Литературная обработка – С. П. Лагдан

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ус. печат. лист. 18,02. Тираж 100 экз. Зак. №02/03

**Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта  
имени академика В. Лазаряна**

*Адрес редакции, издателя:*

ул. Лазаряна, 2, ком. 267, г. Днипро, 49010, Украина

*Тел.:* +38 (056) 371-51-05

*E-mail:* lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

*Печать:*

Издательство «Герда», 49000, г. Днепр, пр. Д. Яворницкого, 60

Свидетельство субъекта издательского дела серия ДК № 397 от 03.04.2001 г.



Scientific Edition

**NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU.  
VİSNIK DNİPROPETROVS'KOGO NACİONAL'NOGO UNİVERSİTETU  
ZALİZNIČNOGO TRANSPORTU**

=

**SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS**

No. 3 (75) 2018

(in Ukrainian, Russian and English languages)

Responsible for issue – O. V. Pominova

Desktop publishing – O. V. Pominova

Redaction – S. P. Lahdan

Format 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Conventional printed sheet 18,02. Circulation 100. Order no. 02/03

**Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan**

Address of editor and editorial office

Lazaryan St., 2, r. 267, Dnipro, 49010, Ukraine

*Tel.:* +38 (056) 371-51-05

*E-mail:* lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

*Printing*

Publishing house «Gerda», 49000, Dnipro, Yavornitsky av., 60

