



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



# НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ  
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

№ 5(83)

•• 2019 ••

Дніпровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна

## НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Науковий журнал

№ 5 (83) 2019

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

*Автоматизовані та телематичні системи на транспорті*  
*Екологія та промислова безпека*  
*Економіка та управління*  
*Експлуатація та ремонт засобів транспорту*  
*Електричний транспорт, енергетичні системи та комплекси*  
*Залізнична колія та автомобільні дороги*  
*Інформаційно-комунікаційні технології та математичне моделювання*  
*Матеріалознавство*  
*Машинобудування*  
*Рухомий склад і тяга поїздів*  
*Транспортне будівництво*

Дніпро

2019

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

ГОЛОВА РЕДАКЦІЙНОЇ РАДИ УНІВЕРСИТЕТУ  
ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛУ

Пшінько О. М., доктор технічних наук  
Пічуров С. О., доктор фізико–математичних наук

ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА  
ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР

Козаченко Д. М., доктор технічних наук  
Колесникова Т. О., кандидат наук  
із соціальних комунікацій

**ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:**

Аврамовіс З. З., Белградський університет (Сербія); Бела І., Інститут логістики (Угорщина); Біляєв М. М., ДНУЗТ (Україна); Бобровський В. І., ДНУЗТ (Україна); Богдєвичус М., Вільнюський технічний університет імені Гедимінаса (Литва); Боднар Б. Є., ДНУЗТ (Україна); Бондаренко І. О., ДНУЗТ (Україна); Вакуленко І. О., ДНУЗТ (Україна); Воронін С. В., УкрДУЗТ (Україна); Головкова Л. С., ДНУЗТ (Україна); Єфременко В. Г., Приазовський державний технічний університет (Україна); Жуковицький І. В., ДНУЗТ (Україна); Калівода Я., Чеський технічний університет (Чехія); Капіца М. І., ДНУЗТ (Україна); Капустян В. О., НТТУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Україна); Кершіс Р., Каунаський технологічний університет (Литва); Кузнецов В. Г., Науково-дослідний інститут залізниць (Польща); Манашкин Л., Незалежний вчений (США); Марущак П. О., Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (Україна); Піттман Р., Антимонопольний відділ Департаменту юстиції (США); Ракша С. В., ДНУЗТ (Україна); Сладковскі А., Сілезький технологічний університет (Польща); Суглер Дж., Варшавська школа економіки (Польща); Тютюкін О. Л., ДНУЗТ (Україна); Шинкаренко В. І., ДНУЗТ (Україна).

Журнал зареєстровано Державною реєстраційною службою Міністерства юстиції України.  
Свідоцтво про реєстрацію КВ № 19609-9409ПР від 29.12.2012 р.  
Видання внесено до Переліку наукових фахових видань України наказом Міністерства освіти і науки України 29.12.2014 р. № 1528 (технічні науки).  
Журнал зареєстровано: в міжнародних каталогах періодичних видань Ulrichsweb™, Global Serials Directory, OCLC WorldCat; наукометричних системах Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus та ін.  
Друкується за рішенням вченої ради університету від 28.10.2019 р., протокол № 3

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

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

Видання публікується з 1936 р.:

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

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта  
имени академика В. Лазаряна

## НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Научный журнал

№ 5 (83) 2019

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

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

Днепро

2019

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

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОГО  
СОВЕТА УНИВЕРСИТЕТА

Пшинько А. Н., доктор технических наук

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛА

Пичугов С. А., доктор физико-математических наук

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Козаченко Д. Н., доктор технических наук

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Колесникова Т. А., кандидат наук  
по социальным коммуникациям

*ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:*

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

Журнал  
зарегистрирован

Государственной регистрационной службой Министерства юстиции Украины.  
Свидетельство о регистрации КВ № 19609-9409ПР от 29.12.2012 г.  
Издание внесено в Перечень научных специализированных изданий Украины приказом Министерства образования и науки Украины 29.12.2014 г. № 1528 (технические науки).  
Журнал зарегистрирован: в международных каталогах периодических изданий Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; наукометрических системах Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus и др.  
Печатается по решению ученого совета университета от 28.10.2019 г., протокол № 3

Издатель

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

Адрес  
учредителя

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

Издание публикуется с 1936 г.:

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

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

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

**Scientific journal**

**No. 5 (83) 2019**

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

*Automated and Telematic Systems on Transport*  
*Ecology and Industrial Safety*  
*Economics and Management*  
*Operation and Repair of Transport Means*  
*Electric Transport, Power Systems and Complexes*  
*Railroad and Roadway Network*  
*Information and Communication Technologies and Mathematical Modelling*  
*Material Science*  
*Mechanical Engineering*  
*Rolling Stock and Train Traction*  
*Transport Construction*

Dnipro

2019

Founder:

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

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

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

**EDITORIAL BOARD MEMBERS:**

Avramovic Z. Ž., Faculty of Transport and Traffic Engineering (Serbia); Béla I., Logistics Institute (Hungary); Biliaiev M. M., DNURT (Ukraine); Bobrovskiy, V. I., DNURT (Ukraine); Bodnar B. E., DNURT (Ukraine); Bogdevičius M., Vilniaus Gedimino technikos universitetas (Lithuania); Bondarenko I. O., DNURT (Ukraine); Cygler J., Szkoła Główna Handlowa w Warszawie (Poland); Efremenko V. G., Priazovsky State Technical University (Ukraine); Golovkova L. S., DNURT (Ukraine); Kalivoda J., Czech Technical University in Prague (Czech Republic); Kapitsa M. I., DNURT (Ukraine); Kapustyan V. O., National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», (Ukraine); Kersys R., Kaunas University of Technology (Lithuania); Kuznetsov V. G., The Railway Research Institute, (Poland); Manashkin L., Self-Employed (USA); Maruschak P. O., Ternopil Ivan Puluj National Technical University (Ukraine); Pittman R., Antitrust Division of the USA. Department of Justice (USA); Raksha S. V., DNURT (Ukraine); Shinkarenko V. I., DNURT (Ukraine); Ślaskowski A., Politechnika Śląska w Gliwicach (Poland); Tiutkin O. L., DNURT (Ukraine); Vakulenko I. O., DNURT (Ukraine); Voronin S. V., UkrSURT (Ukraine); Zhukovitskiy I. V., DNURT (Ukraine)

|                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Journal<br>was registered | by the State Registration Service of the Ministry of Justice of Ukraine.<br>Certificate of Registration KB no.19609-9409PR from 29.12.2012<br>Edition is included in the list of scientific professional publications of Ukraine by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine 29.12.2014 r. no. 1528 (technical sciences).<br>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.<br>Published according to the Academic Council decision of the University from 28.10.2019, Protocol no. 3 |
| Publisher                 | Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (Dnipro)<br>Certificate of Publisher ДК no. 1315 from 31.03.2003                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Address<br>of Founder     | St. Lazaryana, 2, room 267, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.: +38 (056) 371-51-05;<br>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»

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

УДК 504.5:621.565.8

Л. В. АМЕЛІНА<sup>1\*</sup>, О. В. БЕРЛОВ<sup>2\*</sup>, М. Г. МАЛЮГІН<sup>3\*</sup>, З. М. ЯКУБОВСЬКА<sup>4\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-8525-7096

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

<sup>3\*</sup>Каф. «Безпека життєдіяльності», ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 756 34 57, ел. пошта pa9@bigmir.net, ORCID 0000-0001-9422-8265

<sup>4\*</sup>Каф. «Фізика», Український державний хіміко-технологічний університет, пр. Гагаріна, 8, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (056) 753 56 38, ел. пошта physics@udhtu.edu.ua, ORCID 0000-0002-9893-3479

### РОЗРАХУНОК ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ЗОН У РАЗІ АВАРІЙНОЇ ЕМІСІЇ АМІАКУ

**Мета.** Ця робота передбачає розробку математичної моделі для розрахунку вибухонебезпечних зон у разі аварійної емісії аміаку. Як приклад розглянуто аварійну емісію аміаку на території насосної станції, що здійснює перекачування. **Методика.** Для розв'язання поставленої задачі використано рівняння для потоку невязкої нестисливої рідини – рівняння для потенціалу швидкості. Чисельне розв'язання цього тривимірного рівняння проведено за допомогою методу Річардсона. Після визначення потенціалу швидкості розраховано поле швидкості повітряного потоку. Для прогнозування вибухонебезпечних зон використано чисельне розв'язання тривимірного рівняння масопереносу аміаку. Під час використання цієї математичної моделі враховано нерівномірне поле швидкості вітрового потоку, зміну вертикального коефіцієнта атмосферної дифузії з висотою, інтенсивність емісії аміаку, місце викиду хімічно небезпечної речовини. Для чисельного розв'язання рівняння переносу аміаку в атмосферному повітрі використано різницеву схему розщеплення. На кожному кроці розщеплення невідоме значення концентрації аміаку визначено за явною схемою біжучого рахунку. **Результати.** На основі розробленої математичної моделі проведено обчислювальний експеримент для оцінки динаміки формування вибухонебезпечних зон на території насосної станції, що перекачує аміак. Отримано інформацію про формування зон хімічного зараження на території насосної станції. **Наукова новизна.** Розроблено математичну модель, що дозволяє оперативно розраховувати динаміку формування вибухонебезпечних зон на території хімічно небезпечного об'єкта в разі виникнення надзвичайної ситуації. Ця модель може бути використана для оцінки ризику токсичного ураження людей на хімічно небезпечному об'єкті під час виникнення аварійних ситуацій. **Практична значимість.** На базі розробленої чисельної моделі створено комп'ютерну програму, що дозволяє проводити серійні обчислювальні експерименти з визначення динаміки формування зон хімічного зараження атмосферного повітря. Для використання розробленої програми необхідні стандартні вхідні дані. Розроблена чисельна модель може бути використана для проведення серійних розрахунків під час розробки ПЛАСу (план ліквідації аварійної ситуації) для хімічно небезпечних об'єктів.

*Ключові слова:* хімічне забруднення атмосфери; аміак; чисельне моделювання

#### Вступ

У наш час значну увагу привертають задачі оцінки забруднення навколишнього природного середовища та ризику ураження людей у ви-

падках надзвичайних ситуацій на хімічно небезпечних об'єктах або терактів [1, 2, 4, 6–9]. До таких об'єктів в Україні належить аміакопровід «Тольятті – Одеса». Цей об'єкт є потенці-

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

льним джерелом небезпеки, бо у випадку аварійної ситуації в атмосферне повітря може потрапляти значна кількість токсичної речовини. До комплексу задач, які розглядають у разі можливих аварій на таких хімічно небезпечних об'єктах, належать задачі з визначення вибухонебезпечних зон. Ці зони формуються біля місця витoku хімічно небезпечної речовини, а розміри зон змінюються з часом. Для практики важливо мати надійну інформацію щодо формування вибухонебезпечних зон біля об'єкта з метою зниження ризику ураження людей. Слід підкреслити, що особливо важливо мати таку інформацію для насосних станцій, що перекачують аміак. Це пов'язано з тим, що на території насосних станцій перебувають люди, і можливі ситуації, за яких буде мати вибух суміші «аміак+повітря».

Для розв'язання задач цього класу необхідно швидко розрахункові математичні моделі, що дозволяють у рамках обмеженого часу, проводити серійні розрахунки [10–14].

**Мета**

У цій роботі ми передбачаємо розробити чисельну модель для оперативного прогнозування вибухонебезпечних зон під час аварійної емісії аміаку.

**Методика**

Процес поширення аміаку у випадку його аварійного викиду будемо розраховувати на базі наступного рівняння масопереносу [2, 3, 5]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_g)C}{\partial z} + \sigma C = \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} C) + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i), \quad (1)$$

де  $C$  – концентрація аміаку;  $u, v, w$  – компоненти вектора швидкості вітрового потоку;  $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i)$  – дельта-функція Дірака;  $\mu = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$  – коефіцієнти турбулентної дифузії;  $x_i, y_i, z_i$  – координати джерела ви-

киду аміаку;  $\sigma$  – коефіцієнт, що враховує хімічний розпад домішки, вимивання опадами;  $Q$  – інтенсивність викиду аміаку;  $w_g$  – швидкість гравітаційного осідання домішки;  $t$  – час.

Крайові умови для рівняння масопереносу розглянуті в [5].

Під час проведення розрахунків будемо враховувати нерівномірність вертикального коефіцієнта дифузії та швидкості повітря по висоті

$$u = u_1 \left( \frac{z}{z_1} \right)^p, \quad \mu_z = k_1 \left( \frac{z}{z_1} \right)^m, \\ \mu_x = \mu_y = k_0 u, \quad (2)$$

де  $p = 0,15$ ;  $m = 1$ ;  $k_1 = 0,2$ ;  $k_0 = 0,1 \div 1$ .

Для чисельного інтегрування рівняння (1) будемо використовувати кінцево-різницеві методи. Попередньо здійснимо розщеплення рівняння (1) на послідовність розв'язання наступних рівнянь:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right); \\ \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right); \\ \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (w - w_g)C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right); \\ \frac{\partial C}{\partial t} + \sigma C = \sum Q_i(t) \delta(x - x_i(t)) \delta(y - y_i(t)). \quad (3)$$

Для чисельного інтегрування перших трьох рівнянь використовують неявну поперемінно-трикутну різницеву схему.

Розглянемо побудову цієї різницевої схеми. Виконаємо наступні перетворення [5]:

$$\frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x}; \\ \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y}; \\ \frac{\partial wC}{\partial z} = \frac{\partial w^+ C}{\partial z} + \frac{\partial w^- C}{\partial z},$$

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

де

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

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

Далі виконаємо апроксимацію похідних так [5]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) \approx \mu_x \frac{C_{i+1,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} -$$

$$-\mu_x \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1};$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \approx \mu_y \frac{C_{i,j+1,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y^2} -$$

$$-\mu_y \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j-1,k}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1};$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \approx \mu_z \frac{C_{i,j,k+1}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z^2} -$$

$$-\mu_z \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k-1}^{n+1}}{\Delta z^2} = M_{zz}^- C^{n+1} + M_{zz}^+ C^{n+1}.$$

Для апроксимації конвективних похідних використовуємо вирази [3]:

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

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

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

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

$$\frac{\partial w^+ C}{\partial z} \approx \frac{w_{i,j,k+1}^+ C_{i,j,k}^{n+1} - w_{i,j,k}^+ C_{i,j,k-1}^{n+1}}{\Delta z} = L_z^+ C^{n+1};$$

$$\frac{\partial w^- C}{\partial z} \approx \frac{w_{i,j,k+1}^- C_{i,j,k+1}^{n+1} - w_{i,j,k}^- C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z} = L_z^- C^{n+1}.$$

Різницеву схему, за допомогою якої визначають концентрацію хімічно небезпечної речовини, розглянемо на прикладі тільки першого рівняння із системи (3). Різницева схема має вигляд:

– на першому кроці розщеплення:

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

– на другому кроці розщеплення:

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

Ті самі дії проводимо для другого та третього рівняння із системи рівнянь розщеплення.

Значення концентрації  $C$  на кожному кроці розщеплення знаходимо за формулою «розрахунку, що біжить». Останнє рівняння із системи (3) розв'язуємо за допомогою методу Ейлера.

Для математичного моделювання поля вітрового потоку на території промислового об'єкта, де має місце викид хімічно небезпечної речовини, була використана модель течії ідеальної рідини. Моделювальне рівняння в цьому випадку має вигляд [5]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0, \quad (6)$$

де  $P$  – потенціал швидкості.

Компоненти швидкості повітряного потоку визначають так:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x} \quad v = \frac{\partial P}{\partial y} \quad w = \frac{\partial P}{\partial z}. \quad (7)$$

Граничні умови для рівняння (6) такі:

1)  $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$  на непроникливих границях та на верхній поверхні розрахункової зони;

2)  $\frac{\partial P}{\partial n} = V_n$  на границі, де потік входить у розрахункову зону,  $V_n$  – відома швидкість повітря;

3)  $P = \text{const}$  – на границі «виходу» потоку із зони.

Для чисельного розв'язання рівняння (6) використовують метод Річардсона, тому це рівняння приводимо до вигляду:

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}, \quad (8)$$

де  $t$  – фіктивний час.

Розрахункову залежність для визначення потенціалу швидкості записуємо так:

$$P_{ijk}^{n+1} = P_{ijk}^n + \Delta t \frac{P_{i+1,j,k}^n - 2P_{ijk}^n + P_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \Delta t \frac{P_{i,j+1,k}^n - 2P_{ijk}^n + P_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \Delta t \frac{P_{i,j,k+1}^n - 2P_{ijk}^n + P_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2}. \quad (9)$$

Розрахунок за залежністю (9) закінчується, коли виконується умова:

$$|P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^n| \leq \varepsilon, \quad (10)$$

де  $\varepsilon$  – мале число;  $n$  – номер ітерації.

Компоненти вектора швидкості визначають так:

$$u_{i,j,k} = \frac{P_{i,j,k} - P_{i-1,j,k}}{\Delta x}; \quad v_{i,j,k} = \frac{P_{i,j,k} - P_{i,j-1,k}}{\Delta y};$$

$$w_{i,j,k} = \frac{P_{i,j,k} - P_{i,j,k-1}}{\Delta z}.$$

На базі розглянутих різницевих рівнянь була створена комп'ютерна програма. Для кодування різницевих рівнянь використано Фортран.

### Результати

На базі розробленої чисельної моделі було проведено розрахунки з визначення вибухонебезпечних зон на території насосної станції, що перекачує аміак. Під час проведення обчислювального експерименту взято, що швидкість вітру дорівнює 3 м/с, інтенсивність викиду 100 кг/с,  $w_g = 1$  см/с,  $\sigma = 0$ .

Розрахункова схема промислового об'єкта (модельна задача, станція перекачування аміаку) та місце викиду аміаку на території об'єкта показано на рис. 1.

На рис. 2, 4 показано зону хімічного зараження атмосферного повітря на території насосної станції, де має місце виток аміаку. Значен-

ня концентрації аміаку наведено в безрозмірному вигляді, кожне число на цих рисунках представляє концентрацію аміаку у відсотках від максимального значення концентрації на конкретний момент часу в цій зоні.

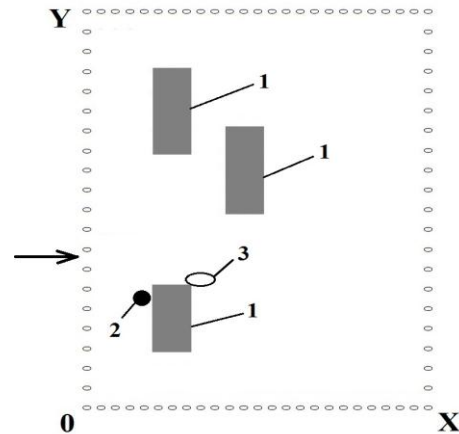


Рис. 1. Розрахункова схема:

1 – будівлі на території насосної станції;  
2 – місце викиду аміаку; 3 – положення рецептора

Fig. 1. Sketch of computational region:

1 – ammonia pump station buildings;  
2 – spot of ammonia emission; 3 – receptor position

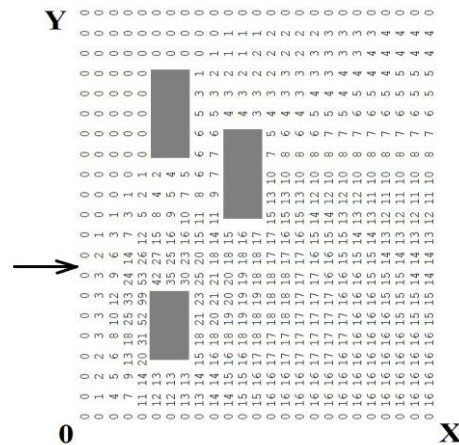


Рис. 2. Зона забруднення атмосферного повітря (рівень  $z = 2$  м,  $t = 35$  с)

Fig. 2. Computed zone of chemical contamination (level  $z = 2$  m,  $t = 35$  sec)

Як бачимо з рис. 2, 4, на території насосної станції дуже швидко формується велика зона хімічного зараження. Для практики важливо мати інформацію про розміри вибухонебезпечних зон, що з'являються у випадку аварійних ситуацій. У розробленій комп'ютерній програ-

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

мі наявна операція щодо друку вибухонебезпечних зон на території хімічно небезпечного об'єкта. У цьому випадку вибухонебезпечна зона – це зона де концентрація аміаку перебувала в діапазоні 106–198 г/м<sup>3</sup>. Комп'ютерна програма виділяє таку зону друком числа «99». Це дозволяє дуже швидко проаналізувати розміри вибухонебезпечних зон на території об'єкта під час проведення обчислювального експерименту й оцінювати зміну цих зон із часом. Так, на рис. 3, 5 наведені вибухонебезпечні зони для різних моментів часу після початку аварійного викиду аміаку. Зони показані за допомогою описаної процедури.

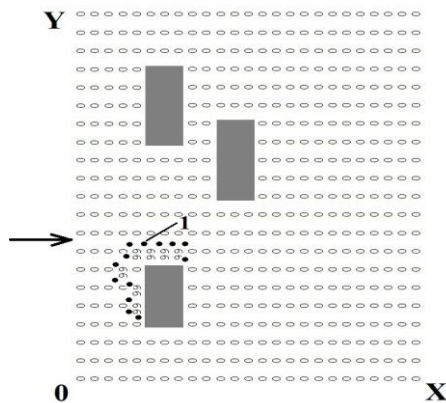


Рис. 3. Вибухонебезпечна зона:  
1 – межа зони (рівень  $z = 2$  м,  $t = 35$  с)

Fig. 3. Computed zone of possible explosion:  
1 – zone boundary (level  $z = 2$  m,  $t = 35$  sec)

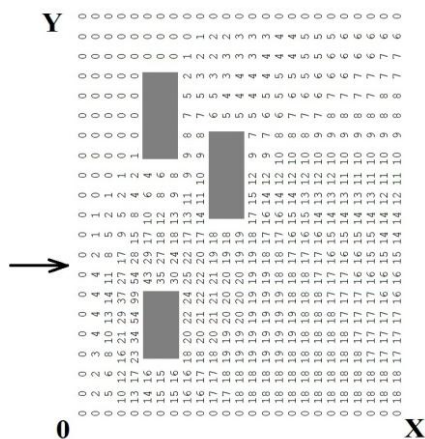


Рис. 4. Зона забруднення атмосферного повітря  
(рівень  $z = 2$  м,  $t = 55$  с)

Fig. 4. Computed zone of chemical contamination  
(level  $z = 2$  m,  $t = 55$  sec)

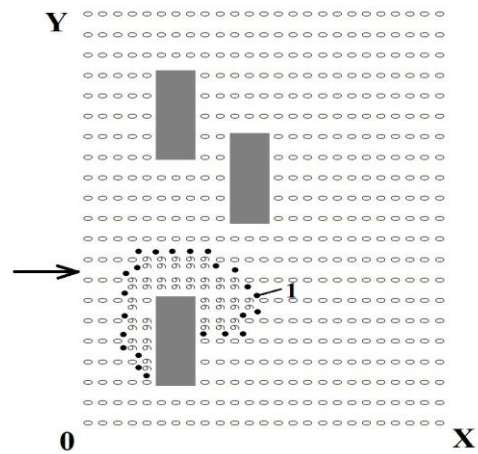


Рис. 5. Вибухонебезпечна зона:  
1 – межа зони (рівень  $z = 2$  м,  $t = 55$  с)

Fig. 5. Computed zone of possible explosion:  
1 – zone boundary (level  $z = 2$  m,  $t = 55$  sec)

З аналізу рис. 3, 5 можна зробити висновок, що у випадку аварійного викиду аміаку на території насосної станції дуже швидко формується вибухонебезпечна зона біля будівлі насосної станції, оскільки вибух може бути як на навітряній, так і на підвітряній стороні будівлі.

На рис. 6 наведена концентрація аміаку біля будинку насосної станції, де мав місце аварійний витік (рівень  $z = 2$  м). Значення концентрації приведено для точки, що показана на рис. 1 як місце положення рецептора.

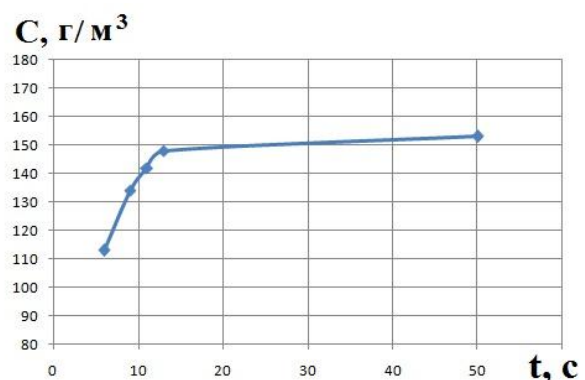


Рис. 6. Концентрація аміаку біля будівлі  
(рівень  $z = 2$  м)

Fig. 6. Computed ammonia concentration  
near building (level  $z = 2$  m)

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Як бачимо з рис. 6, біля будівлі вже за 7 с буде мати місце вибухонебезпечна концентрація суміші, в разі виникнення джерела тепла – вибух.

Слід зазначити, що для розв'язання задачі потрібно було 5 с комп'ютерного часу.

### Наукова новизна і практична значимість

Розроблена чисельна модель дозволяє оперативного прогнозувати динаміку формування зон хімічного зараження атмосферного повітря у випадку аварійного витіку аміаку на території насосної станції, де відбувається його перекачування. Особливістю моделі є можливість оперативного представлення інформації щодо розмірів вибухонебезпечних зон на території об'єкта і їх зміна з часом, після аварії.

Модель дозволяє швидко проводити прогнозні розрахунки на комп'ютерах малої та середньої потужності. Вона враховує найбільш суттєві фізичні фактори, що впливають на фор-

мування зон хімічного зараження, а саме: швидкість повітря, потужність джерела емісії, атмосферну турбулентну дифузію, наявність будівель на території хімічно небезпечного об'єкта.

Модель може бути використана під час розробки ПЛАСу для хімічно небезпечних об'єктів. У подальшому потрібно розробляти математичну модель аеродинаміки, що враховує в'язкість повітря.

### Висновки

1. Запропоновано математичну модель для оцінки розмірів вибухонебезпечних зон у разі аварійних викидів аміаку.

2. Розроблено комп'ютерну програму для проведення експрес-розрахунків із визначення динаміки формування зон хімічного зараження під час аварійних викидів аміаку.

3. Виконано прогноз розмірів вибухонебезпечних зон у випадку аварійного викиду аміаку на станції перекачування.

### 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.
3. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – Москва : Наука, 1982. – 320 с.
4. Оценка техногенного риска при эмиссии опасных веществ на железнодорожном транспорте / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, П. С. Кириченко, Л. Я. Мунтян. – Кривой Рог : Р. А. Козлов, 2017. – 127 с.
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 [Електронний ресурс] // Croner-i. – Режим доступу: <https://app.croneri.co.uk/news/cefic-guidance-safety-risk-assessment-chemicaltransport-operations?product=139> – Назва з екрана. – Перевірено : 15.10.2019
10. Development of advanced mathematical predictive models for assessing damage avoided accidents on potentially-dangerous sea-based energy facility / Aleksandr Tumanov, Vasily Gumenyuk, Vladimir Tumanov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 90. doi: 10.1088/1755-1315/90/1/012027

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

11. 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.
12. Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Allocation for Sustainable Disaster Supply Chain / Cejun Cao, Congdong Li, Qin Yang, Fanshun Zhang // Sustainability. – 2017. – Vol. 9. – Iss. 11. doi: 10.3390/su9112103
13. 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> – Назва з екрана. – Перевірено : 15.10.2019
14. The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes / Ondrej Zavila, Pavel Dobes, Jakub Dlabka, Jan Bitta // The Science for Population Protection. – 2015. – No. 2.

Л. В. АМЕЛИНА<sup>1\*</sup>, А. В. БЕРЛОВ<sup>2\*</sup>, М. Г. МАЛЮГИН<sup>3\*</sup>, З. М. ЯКУБОВСКАЯ<sup>4\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта [water.supply.treatment@gmail.com](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCID 0000-0002-8525-7096

<sup>2\*</sup>Каф. «Безопасность жизнедеятельности», ГБУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24а, Днепро, Украина, 49600, тел. +38 (056) 756 34 57, эл. почта [berlov@pgasa.dp.ua](mailto:berlov@pgasa.dp.ua), ORCID 0000-0002-7442-0548

<sup>3\*</sup>Каф. «Безопасность жизнедеятельности», ГБУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24а, Днепро, Украина, 49600, тел. +38 (056) 756 34 57, эл. почта [pa9@bigmir.net](mailto:pa9@bigmir.net), ORCID 0000-0001-9422-8265

<sup>4\*</sup>Каф. «Физика», Украинский государственный химико-технологический университет, пр. Гагарина, 8, Днепро, Украина, 49000, тел. +38 (056) 753 56 38, эл. почта [physics@udhtu.edu.ua](mailto:physics@udhtu.edu.ua), ORCID 0000-0002-9893-3479

## РАСЧЕТ ВЗРЫВООПАСНЫХ ЗОН ПРИ АВАРИЙНОЙ ЭМИССИИ АММИАКА

**Цель.** Данная работа предусматривает разработку математической модели для расчета взрывоопасных зон при аварийной эмиссии аммиака. В качестве примера рассмотрена аварийная эмиссия аммиака на территории перекачивающей насосной станции. **Методика.** Для решения поставленной задачи использовано уравнение для потока невязкой несжимаемой жидкости – уравнение для потенциала скорости. Численное решение данного трехмерного уравнения проведено с помощью метода Рундсона. После определения потенциала скорости рассчитано поле скорости воздушного потока. Для прогнозирования взрывоопасных зон использовано численное решение трехмерного уравнения массопереноса аммиака. При использовании этой математической модели учтены неравномерное поле скорости ветрового потока, изменение вертикального коэффициента атмосферной диффузии с высотой, интенсивность эмиссии аммиака, место выброса химически опасного вещества. Для численного решения уравнения переноса аммиака в атмосферном воздухе использована разностная схема расщепления. На каждом шаге расщепления неизвестное значение концентрации аммиака определено по явной схеме бегущего счета. **Результаты.** На основе разработанной математической модели проведен вычислительный эксперимент по оценке динамики формирования взрывоопасных зон на территории насосной станции, перекачивающей аммиак. Получена информация о формировании зон химического заражения на территории насосной станции. **Научная новизна.** Разработана математическая модель, позволяющая оперативно рассчитывать динамику формирования взрывоопасных зон на территории химически опасного объекта при возникновении чрезвычайной ситуации. Эта модель может быть использована для оценки риска токсического поражения людей на химически опасном объекте при возникновении аварийных ситуаций. **Практическая значимость.** На базе разработанной численной модели создана компьютерная программа, позволяющая проводить серийные вычислительные эксперименты по определению динамики формирования зон химического заражения атмосферного воздуха. Для использования разработанной программы необходимы стандартные входные данные. Разработанная численная модель может быть использована для проведения серийных расчетов при разработке ПЛАСа (план ликвидации аварийной ситуации) для химически опасных объектов.

**Ключевые слова:** химическое загрязнение атмосферы; аммиак; численное моделирование

L. V. AMELINA<sup>1\*</sup>, O. V. BERLOV<sup>2\*</sup>, M. H. MALIUHIN<sup>3\*</sup>, Z. M. YAKUBOVSKA<sup>4\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-8525-7096

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

<sup>3\*</sup>Dep. «Life Safety», Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskoho St., 24a, 49600, tel. +38 (056) 756-34-57 e-mail pa9@bigmir.net, ORCID 0000-0001-9422-8265

<sup>4\*</sup>Dep. «Physics», Ukrainian State University of Chemical Technology, Haharina Av., 8, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (056) 753 56 38, e-mail physics@udhtu.edu.ua, ORCID 0000-0002-9893-3479

## CALCULATION OF EXPLOSIVE ZONES IN EMERGENCY EMISSION OF AMMONIA

**Purpose.** This work involves the development of a mathematical model for the calculation of hazardous areas during emergency ammonia emissions. As an example emergency ammonia emissions at the pumping station are considered. **Methodology.** To solve this problem, we used the equation for the flow of ideal liquid – the equation for the velocity potential. The numerical solution of this three-dimensional equation is carried out using the Richardson method. After determining the velocity potential, the air velocity field is calculated. To predict explosive zones, a numerical solution of the three-dimensional equation of the ammonia mass transfer is used. When using this mathematical model, the non-uniform field of the wind flow velocity, the change in the vertical coefficient of atmospheric diffusion with height, the intensity of ammonia emission, and the place of release of the chemically hazardous substance are taken into account. To numerically solve the equation of ammonia transport in atmospheric air, a difference splitting scheme is used. At each step of the splitting, the unknown value of ammonia concentration is determined by the explicit formula of the point-to-point computation. **Findings.** Based on the developed mathematical model, a computational experiment was conducted to assess the dynamics of the formation of explosive zones in the territory of a pumping station that pumps ammonia. Information was obtained on the formation of chemical contamination zones at the pumping station. **Originality.** A mathematical model has been developed that allows you to quickly calculate the dynamics of the formation of explosive zones in the territory of a chemically hazardous object in case of emergency. The developed mathematical model can be used to assess the risk of toxic damage to people at a chemically hazardous facility in case of emergency. **Practical value.** On the basis of the developed numerical model a computer program was created, which allows to carry out serial computational experiments to determine the formation dynamics of the chemical contamination zones of atmospheric air. Standard input data are required to use the developed program. The developed numerical model can be used for serial calculations in the development of the emergency response plan for chemically hazardous facilities.

**Keywords:** chemical pollution of the atmosphere; ammonia; numerical simulation

## 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. Marchuk, G. I. (1982). *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy*. Moscow: Nauka. (in Russian)
4. Belyaev, N. N., Gunko, Y. Y., Kirichenko, P. S., & Muntyan, L. Y. (2017). *Otsenka tekhnogennogo riska pri emissii opasnykh veshchestv na zheleznodorozhnom transporte*. Krivoi Rog: Kozlov R. A. (in Russian)
5. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Belyaev, N. N. (1997). *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kyiv: 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, Pittsburg. (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)

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

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*, 87-91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8\_15 (in English)
9. CEFIC Guidance on safety Risk Assessment for Chemical Transport Operations. *Croner-i*. Retrived from <https://app.croneri.co.uk/news/cefic-guidance-safety-risk-assessment-chemical-transportoperations?product=139> (in English)
10. Tumanov, A., Gumenyuk, V., & Tumanov, V. (2017). Development of advanced mathematical predictive models for assessing damage avoided accidents on potentially-dangerous sea-based energy facility. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 90. doi: 10.1088/1755-1315/90/1/012027 (in English)
11. 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)
12. Cao, C., Li, C., Yang, Q., & Zhang, F. (2017). Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Allocation for Sustainable Disaster Supply Chain. *Sustainability*, 9(11). doi: 10.3390/su9112103 (in English)
13. Government of Alberta. (2017). Protective Action Criteria: A Review of Their Derivation, Use, Advantages and Limitations. Environmental Public Health Science Unit, Health Protection Branch, Public Health and Compliance Division, Alberta Health. Edmonton, Alberta. Retrived from <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> (in English)
14. Zavila, O., Dobes, P., Dlabka, J., & Bitta, J. (2015). The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes. *The Science for Population Protection*, 2. (in English)

Надійшла до редколегії: 16.05.2019

Прийнята до друку: 20.09.2019

## UDC 504.5:[622.41:519.87]

M. M. BILIAIEV<sup>1\*</sup>, I. O. BONDARENKO<sup>2\*</sup>, T. I. RUSAKOVA<sup>3\*</sup>, V. I. SHYNKARENKO<sup>4\*</sup>,  
V. A. GABRINETS<sup>5\*</sup><sup>1\*</sup>Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882<sup>2\*</sup>Dep. «Track and Track Facilities», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 802 21 80, e-mail irina\_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-3032<sup>3\*</sup>Dep. «Aerohydrodynamics and Masstransfer», Oles Honchar Dnipro National University, Kazakova St., 18, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 776 82 05, e-mail rusakovati1977@gmail.com, ORCID 0000-0001-5526-3578<sup>4\*</sup>Dep. «Computer and Information Technologies», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail shinkarenko\_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225<sup>5\*</sup>Dep. «Heat Engineering», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 87, e-mail vgora@ukr.net, ORCID 0000-0002-8952-952XPREDICTION OF ATMOSPHERE POLLUTION IN CASE OF EMISSIONS  
FROM MAIN MINE FANS

**Purpose.** Emissions from mine ventilation system can create intensive atmosphere air pollution. As a rule, a huge amount of dust from mine fan enters atmosphere low layers. An important task is the development of methods to assess levels of the atmosphere pollution near mines and settlements. To solve this problem it is important to have physically proved mathematical models. Nowadays to predict the atmosphere pollution near settlements which are effected by mine fan the empirical model OND–86 is used. This model does not take into account many important physical factors. So, the purpose of this study is the development of quick computing mathematical model to predict the atmosphere pollution in case of dust emissions from mine fan. **Methodology.** To predict levels of the atmosphere pollution in case of mine fan work 3D equation of dust convective – diffusive flow was used. This equation takes into account gravity fallout, wind velocity, atmosphere turbulent diffusion, location of dust emission source. To sole modeling equation the implicit difference scheme of splitting was used. **Findings.** Developed mathematical model allows quick prediction of the level of atmosphere pollution in case of dust emissions from mine ventilation fan. The models allow to obtain zones of contamination near settlements which are situated in vicinity of mine. **Originality.** The developed mathematical model takes into account a number of physical factors, which at the present time are not considered on the days when prediction of the atmosphere pollution in settlements near mine is carried out. **Practical value.** On the basis of the developed mathematical model program code was created. This code can be used for evaluation of atmosphere pollution in settlements which are effected mine fan emissions.

**Keywords:** atmosphere pollution; mine fan; mathematical modelling; numerical model

## Introduction

The task of assessing the level of air pollution from the different techno sources of emission (accidents, industrial chimneys, main fans at mines, dumps of wastes, etc) [1, 2, 3, 6, 7–13] has a huge interest. The main pollution of the atmosphere by coal mining enterprises occurs during coal mining. The gas – methane released from the formations together with coal dust is emitted through the diffuser of the ventilation shaft into the atmosphere. The volumetric flow rate of the dust-gas-air mixture

is 14 000 m<sup>3</sup>/min. The concentration of dust in the gas-air mixture is 5.5 mg/m<sup>3</sup>, methane – 0.1 % per ton of produced coal. When unloading coal and storing it in a warehouse, coal dust is emitted into the atmospheric air. When coal moves through a closed gallery, the rocks are periodically cleaned and spilled, which is dumped through the hatch. Inorganic dust containing silicon dioxide enters the atmospheric air. With the passage of the mine workings, a large part of the rock mass (90 %) is removed to the rock heap, and a small part (10 %) is used for laying the worked-out space. When

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

loading and unloading the rock and forming the dump by the bulldozer, inorganic dust with a high content of silicon dioxide enters the air.

Significant role in air pollution is performed by the main ventilation fans (MVF), as they operate around the clock, discharging the exhaust mine air into the atmosphere. Mine air emissions contain gaseous impurities ( $CO$ ,  $CO_2$ ,  $NO_x$ ) and solid particles of coal and rock dust. The dust emissions of the «West Donbas Mine» are about 2000 tons/year.

The pathogenic effect of dust is determined by the mass of dust, the time of its impact, the material composition and dispersion.

The material composition of coal and rock dust is determined by the composition of coal rocks. The host rocks contain: quartz, mica, hydromica, calcite, dolomite, magnesite, sulfides.

The degree of dust dispersion is influenced by the physical and mechanical properties of coal, loading and transportation of rock, the degree of turbulence in ventilation flows. The dispersed composition of dust is not constant and can vary: 5 mkm – 12 %; 5–10 mkm – 23 %; 10–30 mkm – 59 %; more than 30 mkm – 6 %.

The maximum permissible concentration for the most harmful types of industrial dust is in the range of 0.01 – 10 mg/m<sup>3</sup>, depending on the characteristics of the dust and the silicon dioxide content of  $SiO_2$ ; for the settlements, this concentration is lower and amounts to 0.5 – 1.5 mg/m<sup>3</sup>.

Currently, to calculate the concentration of impurities in atmospheric air experimental, empirical, analytical, numerical methods are used.

Experimental methods are effective, but they allow to take into account only accomplished events with specific meteorological parameters, they are performed locally, they require high-quality expensive equipment, and material and time costs.

Most computer programs regarding the calculation of pollutant transport in the surface layer of the atmosphere from various sources are based on the model of M. E. Berland – OND–86. This technique is very simple to implement, but it is difficult to use it to calculate the dynamics of the process, since it uses the dimensionless and empirical coefficients obtained on the basis of average annual values of the parameters of the pollution source. The results obtained by this method are somewhat

underestimated, their error increases with increasing distance from the source of emission.

Analytical methods of solving allow solving differential equations taking into account real physical parameters: wind speed, diffusion coefficient, particles sedimentation rate, ejection source power. However, all these solutions are obtained according to the introduced simplifications, since the analytical solution of the three-dimensional transport equations is rather complicated.

Numerical methods of calculation take into account all the factors listed, are implemented on the basis of the Navier-Stokes equations or by finite difference methods. These methods are operational. They have a smaller calculation error, but require skills of numerical simulation.

Thus, there is a shortage of operational control methods, in particular, dust emissions, which does not allow them to assess objectively, promptly identify the reason for their increase, select the desired mode of operation based on the dust factor or carry out dust suppression measures.



Fig. 1. West Donbas Mine:  
1 – main ventilation fan

Emissions from MVF pose a threat of dust pollution of atmospheric air in the areas adjacent to the mine. To assess the impact of these emissions on air pollution, it is necessary to have effective mathematical models. On the basis of such models, it is possible to predict the change in the quality of atmospheric air for different weather situations characteristic of a particular region and for different intensity of coal dust emission, which may vary during the operation of the mine.

At present, the forecast of the atmospheric air pollution level is being carried out on the basis of

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

simplified models that do not take into account the velocity profile of the wind flow. In addition, the OND-86 model used in practice, the Gauss model and the Berland model carry out a forecast only for a permanently operating source of emissions. For practice, it is important to have mathematical models of wider use.

### Purpose

The purpose of this work is to create a numerical model and software for the rapid conduct of computational experiments to analyze and predict the level of air pollution by dust emissions from the main ventilation fan. On the basis of such an assessment, the risk for the population in the zone of influence of emissions from this fan is analyzed.

### Methodology

In this paper, the solution of two problems is considered related to the simulation of atmospheric air pollution from dumps.

The process of dispersion of dust from the fan was modeled by the following equation [1, 4, 5]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s)C}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x}(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z}) + \\ + Q_0(t)\delta(x - x_0)\delta(y - y_0)\delta(z - z_0). \end{aligned} \quad (1)$$

where  $C$  – dust concentration (mg/m<sup>3</sup>);  $u$ ,  $v$ ,  $w$  – airflow components (m/s);  $w_s$  – dust settling rate (m/s);  $\mu = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$  – turbulent diffusion coefficients (m<sup>2</sup>/s);  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $z_0$  – the coordinates of the point source of the main ventilation fan MVF (m);  $Q_0$  – the averaged value of the dust intensity at the location of the point source of emission (mg/s);  $\delta(x - x_0)\delta(y - y_0)\delta(z - z_0)$  – Dirac's delta-function, which is used to simulate the arrival of dust from MVF. The values of the diffusion coefficient is calculated by dependencies  $\mu_x = (0.1-1) \cdot U$ ,  $\mu_y = (0.1-1) \cdot U$ ,  $\mu_z = k(z/z_1)m$ , where  $U$  – wind speed (m),  $z$  – height above ground level (m),  $z_1$  – height, where wind speed is given  $U$  (m),  $m \approx 1$ ,  $k = 0.2$ .

The composition of the dust is not uniform, taking into account the settling of individual fractions of dust is achieved by setting a different sedimentation rate  $w_s$  for each fraction, so the calculation on this model must be performed for each fraction. This parameter is calculated using the Stokes formula (2) or is given from epy known experimental data.

$$w_s^2 c_x = \frac{4d(\rho_p - \rho_a)g}{3\rho_a}, \quad (2)$$

where  $d$  – the equivalent particle diameter of the pollutant (m);  $\rho_p$  – particle density of the pollutant (mg/m<sup>3</sup>);  $\rho_a$  – air density (mg/m<sup>3</sup>);  $c_x = 24/\text{Re} + 4/\sqrt{\text{Re}}$  – the dependence of the drag coefficient on the Reynolds number.

An extremely important feature of this model is taking into account the stability of the atmosphere due to the task according to M.E. Berland of different values of the vertical diffusion coefficient  $\mu_z$ . It should be noted that the normative methodology of OND-86 does not allow to take into account the different stratification of the atmosphere.

Two approaches are used.

The first approach is based on splitting of the model equations into four fractional steps. At each splitting step, two physical processes are taken into account: convective transport and atmospheric diffusion; in addition, at each splitting step, the influence of the dust emission source on the formation of the contaminated zone is taken into account.

To build a numerical model, an implicit alternating triangular difference scheme is used, approximating the modeling equation (1). It is built on a rectangular differential grid. The concentration is determined in the center of the difference cells, the components of the air velocity vector are set at the boundaries of the difference cells [5]. For approximation of time derivatives the formula is used:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{C_{ijk}^{n+1} - C_{ijk}^n}{\Delta t}.$$

Prior to discretization, convective derivatives are written as the sum of signed variables:

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

$$\frac{\partial u C}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x}, \quad \frac{\partial v C}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y},$$

$$\frac{\partial w C}{\partial z} = \frac{\partial w^+ C}{\partial z} + \frac{\partial w^- C}{\partial z},$$

where  $u^+ = \frac{u + |u|}{2}$ ,  $u^- = \frac{u - |u|}{2}$ ,  $v^+ = \frac{v + |v|}{2}$ ,  
 $v^- = \frac{v - |v|}{2}$ ,  $w^+ = \frac{w + |w|}{2}$ ,  $w^- = \frac{w - |w|}{2}$ .

Difference approximations of the first derivatives are written as:

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1jk}^+ C_{ijk}^{n+1} - u_{ijk}^+ C_{i-1jk}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1jk}^- C_{i+1jk}^{n+1} - u_{ijk}^- C_{ijk}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^+ C}{\partial y} \approx \frac{v_{ij+1k}^+ C_{ijk}^{n+1} - v_{ijk}^+ C_{ij-1k}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^- C}{\partial y} \approx \frac{v_{ij+1k}^- C_{ij+1k}^{n+1} - v_{ijk}^- C_{ijk}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1},$$

$$\frac{\partial w^+ C}{\partial z} \approx \frac{w_{ijk+1}^+ C_{ijk}^{n+1} - w_{ijk}^+ C_{ijk-1}^{n+1}}{\Delta z} = L_z^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial w^- C}{\partial z} \approx \frac{w_{ijk+1}^- C_{ijk+1}^{n+1} - w_{ijk}^- C_{ijk}^{n+1}}{\Delta z} = L_z^- C^{n+1},$$

where

$$L_x^+ = \frac{u_{i+1jk}^+ C_{ijk}^{n+1} - u_{ijk}^+ C_{i-1jk}^{n+1}}{\Delta x},$$

$$L_x^- = \frac{u_{i+1jk}^- C_{i+1jk}^{n+1} - u_{ijk}^- C_{ijk}^{n+1}}{\Delta x} \text{ etc. – notation for dif-}$$

ference operators in the approximation of convective derivatives.

Difference approximations of second order derivatives are written this way:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) \approx \mu_x \frac{C_{i+1jk}^{n+1} - C_{ijk}^{n+1}}{\Delta x^2}$$

$$-\mu_x \frac{C_{ijk}^{n+1} - C_{i-1jk}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \approx \mu_y \frac{C_{ij+1k}^{n+1} - C_{ijk}^{n+1}}{\Delta y^2}$$

$$-\mu_y \frac{C_{ijk}^{n+1} - C_{ij-1k}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \approx \mu_z \frac{C_{ijk+1}^{n+1} - C_{ijk}^{n+1}}{\Delta z^2}$$

$$-\mu_z \frac{C_{ijk}^{n+1} - C_{ijk-1}^{n+1}}{\Delta z^2} = M_{zz}^- C^{n+1} + M_{zz}^+ C^{n+1}.$$

The following notation is used to shorten the writing of difference equations:

$$M_{xx}^+ = -\mu_x \frac{C_{ijk}^{n+1} - C_{i-1jk}^{n+1}}{\Delta x^2},$$

$$M_{xx}^- = \mu_x \frac{C_{i+1jk}^{n+1} - C_{ijk}^{n+1}}{\Delta x^2}.$$

Applying the introduced notation of difference operators, the transport equation takes the following form:

$$\begin{aligned} & \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^{n+1} + L_x^- C^{n+1} + L_y^+ C^{n+1} + \\ & + L_y^- C^{n+1} + L_z^+ C^{n+1} + L_z^- C^{n+1} + \sigma C_{i,j,k}^{n+1} = \\ & = M_{xx}^+ C^{n+1} + M_{xx}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1} + M_{yy}^- C^{n+1} + \\ & + M_{zz}^+ C^{n+1} + M_{zz}^- C^{n+1} + q(t)\delta. \end{aligned}$$

At the next stage of the construction of the difference scheme, the splitting of this difference equation into four steps is performed with integration over the time interval  $dt$ :

– in the first splitting step  $k = 1/4$ :

$$\begin{aligned} & \frac{C_{ijk}^{n+k} - C_{ijk}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^+ C^k + L_z^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ijk}^k = \\ & = \frac{1}{4} (M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^k + M_{yy}^+ C^n + \\ & + M_{yy}^- C^n + M_{zz}^+ C^n + M_{zz}^- C^n) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}(t)_l}{4} \delta_l. \end{aligned}$$

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

– in the second splitting step  $k = n + 1/2$ ;  
 $c = n + 1/4$ :

$$\begin{aligned} \frac{C_{ijk}^k - C_{ijk}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^- C^k + L_z^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ijk}^k = \\ = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + \\ + M_{yy}^+ C^c + M_{zz}^- C^k + M_{zz}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}(t)_l}{4} \delta_l. \end{aligned}$$

– in the third splitting step  $k = n + 3/4$ ;  
 $c = n + 1/2$ :

$$\begin{aligned} \frac{C_{ijk}^k - C_{ijk}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ C^k + L_y^- C^k + L_z^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ijk}^k = \\ = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^c + M_{xx}^+ C^k + M_{yy}^- C^k + \\ + M_{yy}^+ C^c + M_{zz}^- C^k + M_{zz}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}(t)_l}{4} \delta_l. \end{aligned}$$

– in the fourth splitting step  $k = n + 1$ ;  
 $c = n + 3/4$ :

$$\begin{aligned} \frac{C_{ijk}^k - C_{ijk}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^+ C^k + L_z^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ijk}^k = \\ = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^c + \\ + M_{yy}^+ C^k + M_{zz}^- C^c + M_{zz}^+ C^k) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}(t)_l}{4} \delta_l. \end{aligned}$$

In discrete form, the Dirac delta function is «distributed» to a single difference cell so as to preserve the total amount  $q_i$  of the contaminant that is placed in the cell. Moreover, the function  $\delta_l$  that is used in difference expressions is not zero only in the cells where the source of dust emission is located. Using the above splitting scheme allows us to obtain difference equations of a simpler form, which makes it possible to carry out their software implementation.

The initial condition for each splitting equation is as follows [10–11]:

$$\begin{aligned} \left. C \right|_{t=t^n}^1 = C(x, y, z, t^n), \quad \left. C \right|_{t=t^n}^k = \left. C \right|_{t=t^{k-1}}^{k-1}, \\ k = 2, 3, 4, \quad C(x, y, z, t^{n+1}) = \left. C \right|_{t=t^4}^4, \end{aligned}$$

where  $\left. C \right|_{t=t^n}^1, \left. C \right|_{t=t^n}^k, \left. C \right|_{t=t^4}^4$  – is the impurity concentration value at one or another calculation step.

The boundary condition of non-leakage is realized due to the use of dummy cells. Based on the constructed numerical model, the software package «Dust source pollution 3D» has been developed.

In addition to the considered difference scheme, a different numerical model is used, its feature is the splitting of the modeling equation so that at each fractional step only one physical process is taken into account: convection, atmospheric diffusion, action of the emission source.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial u C}{\partial x} + \frac{\partial v C}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s) C}{\partial z}, \\ \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\mu_z \frac{\partial C}{\partial z}), (3) \\ \frac{\partial C}{\partial t} = Q_0(t) \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - z_0). \end{aligned}$$

Such splitting allows you to calculate separately the process of dust dispersion when there is calm, in this case it is necessary to solve the second equation from system (3).

## Findings

The developed program allowed to carry out computational experiments to calculate the dust dispersion in the atmospheric air contained in the emissions of the fan of the main airing in the «West Donbas Mine» based on the following characteristics of the MVF and its release:

- emitted substance – coal dust;
- dispersed composition – polydisperse dust with particle sizes from 1 mkm too 60–100 mkm;
- the average density of the dust substance – 1900 kg/m<sup>3</sup>;
- temperature of emission is 24°C, so cold ejection is considered;
- the intensity of dust emission  $Q_0 = 61.6$  g/s;

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

- height of the mouth of the diffuser above ground level – 6.5 m;
- the width of the mouth of the source – 6 m;
- the length of the mouth of the source – 6 m;
- average ejection velocity – 11.9 m/s;
- the volume of gas-air mixture 430 m<sup>3</sup>/s.

The calculation was performed with the following parameters: the size of the computational area was 4 km by 2 km, the wind speed was  $U = 4$  m/s with the direction indicated by the arrow (Fig. 2).

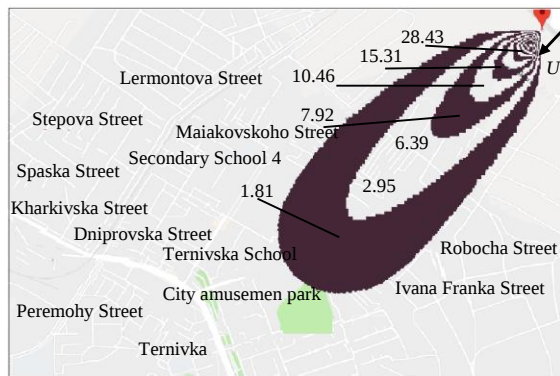


Fig. 2. Distribution of dust concentration from MVF of the «West Donbas Mine»,  $C$  [mg/m<sup>3</sup>]

As can be seen from Figure 2 zones of air pollution cover nearby villages. Obviously, when the meteorological situation changes, the position of the pollution zones will change, but these territories will fall to some extent into the pollution radius.

Figure 3 shows the concentration distribution at 1.7 m, which corresponds to the position of the human respiratory system. As can be seen from this figure, if we take  $MPC_{\text{dust}} = 10^{\circ}\text{mg/m}^3$ , then at a distance of 300 m there is a violation of the MPC. When the MPC is reduced to  $10^{\circ}\text{mg/m}^3$ , the unfavorable zone increases.

### Originality and practical value

Numerical models were developed to predict atmosphere pollution from main ventilator fan. The model is based on equation of dust convective – diffusive transfer. For the numerical integration of modeling equation, the implicit difference scheme of splitting was used. The developed model can be used for quick computing of influence of mine ventilator fan on the settlements, which are situated near mines.

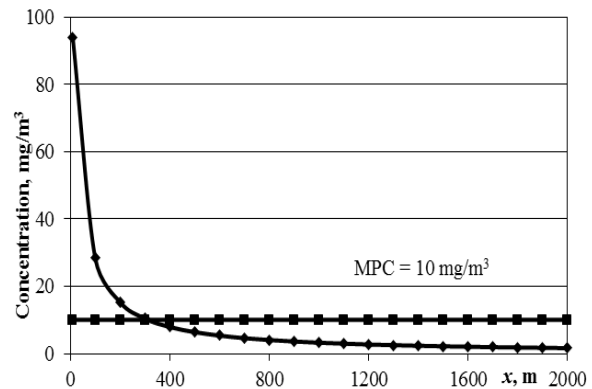


Fig. 3. Distribution of dust concentration along the plume axis,  $C$  [mg/m<sup>3</sup>]

### Conclusions

As a result of research we obtained the following.

1. Developed numerical model for predicting the level of air pollution in the zone of influence of MVF based on the three-dimensional impurity transport equation, which is solved by finite-difference methods.

2. The forecast can be performed on the basis of two numerical models. The models differ in the used splitting patterns. Both splitting schemes allow to calculate quickly the concentration of dust in ambient air. Calculation time is 10 s.

3. The developed numerical models take into account almost all the physical factors affecting the formation of pollution zones in the event of emission from MVF.

4. These models are implemented in the form of the «Dust Source Pollution 3D» program code, in which the transition to the calculation using one model for any meteorological conditions and the other, which is realized in the case of a calm situation, is foreseen.

Carrying out this class of calculations is a necessary tool for the practical assessment of a safe environmental situation during the operation of a public year survey, whose activity is related to the entry of dust into the atmosphere.

## LIST OF REFERENCE LINKS

1. 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.
2. Бересневич, П. В. Аэрология карьеров : справочник / П. В. Бересневич, В. А. Михайлов, С. С. Филатов. – Москва : Недра, 1991. – 280 с.
3. Колесник, В. Е. Пылевой выброс вентилятора главного проветривания угольной шахты : монография / В. Е. Колесник, Л. А. Головина, М. В. Левченко. – Днепропетровск : Национальный горный университет, 2011. – 125 с.
4. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – Москва : Наука, 1982. – 320 с.
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. Air pollution dispersion modeling in a polluted industrial area of complex terrain from Romania / G. Grigoras, V. Cuculeanu, G. Ene, G. Mocioaca, A. Deneanu // Romanian Reports in Physics. – 2012. – Vol. 64, No. 1. – P. 173–186.
7. Alvarez, J. T. Dust barriers in open pit blasts. Multiphase Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulations / J. T. Alvarez, I. D. Alvarez, S. T. Lougedo // WIT Transactions on Ecology and the Environment. – 2008. – Vol. 116. – P. 86–93. doi:10.2495/AIR080101
8. Anand Kumar Varma, S. Mathematical modeling of air pollution in a thermal power project [Electronic resource] / S. Anand Kumar Varma. – Available at: [https://www.researchgate.net/publication/318284616\\_mathematical\\_modeling\\_of\\_air\\_pollution\\_in\\_a\\_thermal\\_power\\_project](https://www.researchgate.net/publication/318284616_mathematical_modeling_of_air_pollution_in_a_thermal_power_project) – Title from the screen. – Accessed : 05.11.2019.
9. 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
10. Jyotsna, K. A mathematical model to study the impact of mining activities and pollution on forest resources and wildlife population / K. Jyotsna, A. Tandon // Journal of Biological Systems. – 2017. – Vol. 25, No. 02. – P. 207–230. doi: 10.1142/S0218339017500115
11. Protective Action Criteria. A Review of Their Derivation, Use, Advantages and Limitations [Electronic resource] // Environmental Public Health Science Unit, Health Protection Branch, Public Health and Compliance Division, Alberta Health. – Edmonton, Alberta, 2017. – Available at: <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> – Title from the screen. – Accessed : 05.11.2019.
12. Škuta, R. Assessment of mining activities with respect to the environmental protection / R. Škuta, R. Kučerová, Z. Pavelek, V. Dirner // Acta Montanistica Slovaca. – 2017. – Vol. 22 (1). – P. 79–93.
13. The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes [Electronic resource] / O. Zavila, P. Dobes, J. Dlabka, J. Bitta // The science for population protection. – 2015. – № 2. – Available at: <http://www.population-protection.eu/prilohy/casopis/eng/22/112.pdf> – Title from the screen. – Accessed : 05.11.2019.

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

М. М. БІЛЯЄВ<sup>1\*</sup>, І. О. БОНДАРЕНКО<sup>2\*</sup>, Т. І. РУСАКОВА<sup>3\*</sup>, В. І. ШИНКАРЕНКО<sup>4\*</sup>,  
В. О. ГАБРИНЕЦЬ<sup>5\*</sup>

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

<sup>2\*</sup>Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 802 21 80, ел. пошта irina\_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-3032

<sup>3\*</sup>Каф. «Аерогідромеханіка та енергомасоперенос», Дніпровський національний університет імені О. Гончара, вул. Казакова, 18, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 776 82 05, ел. пошта rusakovati1977@gmail.com, ORCID 0000-0001-5526-3578

<sup>4\*</sup>Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта shinkarenko\_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225

<sup>5\*</sup>Каф. «Теплотехніка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 87, ел. пошта gabrin62@gmail.com, ORCID 0000-0002-6115-7162

## ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ В РАЗІ ВИКИДІВ З ОСНОВНИХ ШАХТНИХ ВЕНТИЛЯТОРІВ

**Мета.** Викиди із системи вентиляції шахти можуть створювати інтенсивне забруднення атмосферного повітря. Як правило, величезна кількість пилу з шахтного вентилятора потрапляє в атмосферу в приземних шарах. Важливим завданням є розробка методів оцінки рівня забруднення атмосфери поблизу шахт і населених пунктів. Для вирішення цієї проблеми важливо мати фізично обґрунтовані математичні моделі. У наш час для прогнозування забруднення атмосфери шахтним вентилятором поблизу населених пунктів, використовують емпіричну модель OND–86. Ця модель не враховує багато важливих фізичних факторів. Тому метою нашого дослідження є розробка швидкодійної математичної моделі для прогнозування забруднення атмосфери в разі викидів пилу з шахтного вентилятора. **Методика.** Для прогнозування рівня забруднення атмосфери під час роботи шахтного вентилятора використано тривимірне рівняння пилового конвективно-дифузійного потоку. Це рівняння враховує гравітаційні випадання, швидкість вітру, турбулентну дифузію в атмосфері, розташування джерела викидів пилу. Як єдине модельне рівняння використано неявну різницево-схему розщеплення. **Результати.** Розроблена математична модель дозволяє швидко прогнозувати рівень забруднення атмосфери в разі викидів пилу від шахтного вентилятора. Модель дозволяє виявити зони забруднення поблизу населених пунктів, які знаходяться в безпосередній близькості від шахти. **Наукова новизна.** Розроблена математична модель враховує ряд фізичних факторів, які наразі не беруть до уваги в дні, коли здійснюють прогноз забруднення атмосфери в населених пунктах, розташованих поблизу шахти. **Практична значимість.** На основі розробленої математичної моделі створено програмний код. Цей код може бути використаний для оцінки забруднення атмосфери в населених пунктах, де відбуваються викиди від шахтних вентиляторів.

**Ключові слова:** забруднення атмосфери; шахтний вентилятор; математичне моделювання; чисельна модель

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Н. Н. БЕЛЯЕВ<sup>1\*</sup>, И. А. БОНДАРЕНКО<sup>2\*</sup>, Т. И. РУСАКОВА<sup>3\*</sup>, В. И. ШИНКАРЕНКО<sup>4\*</sup>,  
В. А. ГАБРИНЕЦ<sup>5\*</sup>

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

<sup>2\*</sup>Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (063) 802 21 80, эл. почта irina\_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-3032

<sup>3\*</sup>Каф. «Аэрогидромеханика и энергомассоперенос», Днепропетровский национальный университет имени О. Гончара, ул. Казакова, 18, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 776 82 05, эл. почта rusakovati1977@gmail.com, ORCID 0000-0001-5526-3578

<sup>4\*</sup>Каф. «Компьютерные информационные технологии», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, эл. почта shinkarenko\_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225

<sup>5\*</sup>Каф. «Теплотехника», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 87, эл. почта gabrin62@gmail.com, ORCID 0000-0002-6115-7162

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ В СЛУЧАЕ ВЫБРОСОВ ИЗ ОСНОВНЫХ ШАХТНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ

**Цель.** Выбросы из системы вентиляции шахты могут создавать интенсивное загрязнение атмосферного воздуха. Как правило, огромное количество пыли из шахтного вентилятора попадает в атмосферу в приземных слоях. Важной задачей является разработка методов оценки уровня загрязнения атмосферы вблизи шахт и населенных пунктов. Для решения этой проблемы важно иметь физически обоснованные математические модели. В настоящее время для прогнозирования загрязнения атмосферы шахтным вентилятором вблизи населенных пунктов, используют эмпирическую модель OND–86. Эта модель не учитывает многие важные физические факторы. Поэтому целью данного исследования является разработка быстродействующей математической модели для прогнозирования загрязнения атмосферы в случае выбросов пыли из шахтного вентилятора. **Методика.** Для прогнозирования уровня загрязнения атмосферы при работе шахтного вентилятора использовано трехмерное уравнение пылевого конвективно-диффузионного потока. Это уравнение учитывает гравитационные выпадения, скорость ветра, турбулентную диффузию в атмосфере, расположение источника выбросов пыли. В качестве единственного модельного уравнения использована неявная разностная схема расщепления. **Результаты.** Разработанная математическая модель позволяет быстро прогнозировать уровень загрязнения атмосферы при выбросах пыли от шахтного вентилятора. Модель позволяет определить зоны загрязнения вблизи населенных пунктов, которые находятся в непосредственной близости от шахты. **Научная новизна.** Разработанная математическая модель учитывает ряд физических факторов, которые в настоящее время не учитываются в дни, когда осуществляют прогноз загрязнения атмосферы в населенных пунктах, расположенных вблизи шахты. **Практическая значимость.** На основе разработанной математической модели создан программный код. Этот код может быть использован для оценки загрязнения атмосферы в населенных пунктах, где происходят выбросы от шахтных вентиляторов.

**Ключевые слова:** загрязнение атмосферы; шахтный вентилятор; математическое моделирование; численная модель

### REFERENCES

1. Biliaiev, N. N., Gunko, E. Y., & Rostochilo, N. V. (2014). *Zashchita zdaniy ot proniknoveniya v nikh opasnykh veshchestv: Monografiya*. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (in Russian)
2. Beresnevich, P. V., Mikhaylov, V. A., & Filatov, S. S. (1991). *Aerologiya karerov: spravochnik*. Moscow: Nedra. (in Russian)
3. Kolesnik, V.Ye., Golovina, L.A., & Levchenko, M. V. (2011). *Pylevoy vybros ventilyatora glavnogo provetrvaniya ugolno: Monografiya*. Dnipropetrovsk: Natsionalnyy gornyy universitet. (in Russian)

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

4. Marchuk, G. I. (1982). *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy*. Moscow: Nauka. (in Russian)
5. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Biliaiev, N. N. (1997). *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
6. Grigoras G., Cuculeanu V., Ene G., Mocioaca G., & Deneanu A. (2012). Air pollution dispersion modeling in a polluted industrial area of complex terrain from. *Romanian Reports in Physics*, 64(1), 173-186. (in English)
7. Alvarez, J. T., Alvarez, I. D., & Lougedo, S. T. (2008). Dust Barriers In Open Pit Blasts. Multiphase Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulations. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 116, 86-93. doi: 10.2495/AIR080101 (in English)
8. Anand Kumar Varma, S. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/318284616\\_mathematical\\_modeling\\_of\\_air\\_pollution\\_in\\_a\\_thermal\\_power\\_project](https://www.researchgate.net/publication/318284616_mathematical_modeling_of_air_pollution_in_a_thermal_power_project) (in English)
9. Biliaiev, M. M., & Kharytonov, M. M. (2012). Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security*, 87-91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8\_15 (in English)
10. Jyotsna, K., & Tandon, A. (2017). A mathematical model to study the impact of mining activities and pollution on forest resources and wildlife population. *Journal of Biological Systems*, 25(2), 207-230. doi: 10.1142/S0218339017500115
11. Government of Alberta. (2017). Protective Action Criteria: A Review of Their Derivation, Use, Advantage-sand Limitations. Environmental Public Health Science Unit, Health Protection Branch, Public Health and Compliance Division, Alberta Health. Edmonton, Alberta. Retrieved from <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> (in English)
12. Škuta, R., Kučerová, R., Pavelek, Z., & Dirner, V. (2017). Assessment of mining activities with respect to the environmental protection. *Acta Montanistica Slovaca*, 22(1), 79-93. (in English)
13. Zavila, O., Dobes, P., Dlabka, J., & Bitta, J. (2015). The analysis of the use of mathematical modeling fore-mergency planning purposes. The Science for Population Protection, 2. Retrieved from <http://www.population-protection.eu/prilohy/casopis/eng/22/112.pdf> (in English)

Received: May 16, 2019

Accepted: September 12, 2019

## UDC 004.94:[622.411:504.5]

V. V. BILIAIEVA<sup>1\*</sup>, P. S. KIRICHENKO<sup>2\*</sup>, E. Y. GUNKO<sup>3\*</sup>, I. O. BONDARENKO<sup>4\*</sup>,  
P. B. MASHYKHINA<sup>5\*</sup>, Z. M. YAKUBOVSKA<sup>6\*</sup><sup>1\*</sup>Dep. «Fluid Dynamics, Energy and Mass Transfer», Oles Honchar Dnipro National University, Kazakova St., 18, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (056) 374 98 22, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0003-2399-3124<sup>2\*</sup>Dep. «Heat and Gas Supply, Drainage and Ventilation», Kryvyi Rih National University, Vitaliia Matusevycha St., 11, Kryvyi Rih, Ukraine, 50027, tel. +38 (056) 409 06 06, e-mail pasha\_129@ukr.net, ORCID 0000-0002-0793-9593<sup>3\*</sup>Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0001-9257-763X<sup>4\*</sup>Dep. «Track and Track Facilities», Dnipro National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 802 21 80, e-mail irina\_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-3032<sup>5\*</sup>Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0003-3057-9204<sup>6\*</sup>Dep. «Physics», Ukrainian State University of Chemical Technology, Haharina Av., 8, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (056) 753 56 38, e-mail physics@udhtu.edu.ua, ORCID 0000-0002-9893-3479COMPUTER SIMULATION OF DEAD-END MINE WORKING  
VENTILATION

**Purpose.** The important problem in the field of ecological safety and industrial safety is providing of normal microclimate in dead-end mine working. In these regions of the mine methane gas can be accumulated and as a result explosion may take place. So, to avoid these accidents it is important to ventilate appropriately dead-end mine working. The purpose of the work is development of quick computing mathematical model to obtain information about dead-end mine working ventilation process. **Methodology.** The process of dead-end mine working ventilation computing is separated in two stages. At the first stage the velocity flow field is computed in the dead-end mine working. We consider the situation when the suction tube is situated in this region. To solve this problem the fluid dynamics model of inviscid gas flow was used. At the second stage of the computational modeling the convective-diffusive equation of admixture transfer was used. The equation takes into account non-uniform flow field in the dead end mine workings. **Findings.** The developed numerical model was coded using FORTRAN language. The developed computer code allows to perform numerical experiment to assess the efficiency of suction tube implementation to decrease methane gas concentration in dead-end mine working. **Originality.** The developed numerical model takes into account physical factors, which are not considered nowadays in the empirical models, which are used for solving the problems of dead-end mine working ventilation. It allows taking into account the geometrical form of the dead-end mine working. **Practical value.** The developed computer program allows to perform calculations to assess the efficiency of suction system used for the ventilation of the dead-end mine working.

**Keywords:** air pollution; dead end mine workings; mathematical modelling; numerical model

## Introduction

The development of the mining industry is based on increasing the intensity of work in the mine workings, which leads to an increase in dust and gas emission [2, 6, 9, 11]. This problem is connected with risk assessment [10, 12]. This places high demands on the efficiency of the ventilation system. The increase in the volume of cleaning space and the intensity of mining operations causes an increase in the volume of air, and this requires rational use of the supplied air. In this

connection, it is necessary to know how the impurity concentration changes in the process of airing the mine working. Airing of underground workings is one of the most urgent problems of aerology in the mining industry. As part of this problem, the task of developing forecasting methods for calculating the ventilation time of underground workings should be highlighted [1, 2].

In recent years numerical models, computational fluid dynamics models are widely used by engineers to solve different problems [3–7]. Numerical simulation of the aerodynamics of air flow in under-

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

ground workings helps to optimize the process of efficient air circulation and the removal of pollution.

Unfortunately, the development of numerical models for solving problems of ventilation of underground workings is carried out in Ukraine is not as active as abroad. The current approaches in Ukraine to calculate the parameters of the ventilation workings are based either on theoretical assumptions that require experiments to determine empirical coefficients, or use the values of average velocity over the mine working cross section and constant coefficients of turbulent diffusion throughout the volume. It is not possible to determine the concentration fields of pollutants at any given time, and thus control the process of ventilation.

### Purpose

The aim of the work is to develop computing numerical models to assess dumps influence on air pollution and to solve the problem of choosing of rational dump location.

### Methodology

An underground dead end mine working of a given size is considered, in which the air environment is polluted with fine dust of a known concentration. The space ventilation is carried out by supplying clean air through the discharge duct. The task is to develop a mathematical model for the operational calculation of the process of ventilation of the dead end mine working using suction of polluted air.

*Modeling equations.* To compute the velocity field in the underground dead end mine working when the suction of polluted air takes place, the potential flow model is used. In this case, the governing equation has the following form [1, 6, 8]:

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

where  $P$  – is velocity potential,  $x, y$  – are Cartesian coordinates, m.

When applying this equation, it is assumed that the  $Y$  axis is directed vertically upwards.

To solve the equation (1) the following boundary conditions is used [4]:

1) on the walls of the dead end mine working, as well as on other solid surfaces located inside it, a boundary condition is set:  $\partial P / \partial n = 0$ , where  $n$  – is unit vector of external normal to solid wall;

2) at the inlet boundary the boundary condition is  $\partial P / \partial n = V_n$ , where  $V_n$  – is known airflow velocity,  $m \cdot s^{-1}$ ;

3) at the outlet boundary the boundary condition is:  $P = P_0 + \text{const}$ ,  $P_0$  – is an arbitrary number (Dirichlet condition).

To simulate the dispersion of dust in the underground mine, the mass transfer equation is used [3, 8]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \sum_i Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \end{aligned} \quad (2)$$

where  $C$  – is pollutant concentration in the air,  $\mu g \cdot m^{-3}$ ;  $u, v$  – are airflow velocity components in the mine working,  $m \cdot s^{-1}$ ;  $\mu = (\mu_x, \mu_y)$  – are turbulent diffusion coefficients,  $m^2 \cdot s^{-1}$ ;  $(x_i, y_i)$  – are emission source coordinates, m;  $Q_i$  – is pollutant emission rate at the point  $(x_i, y_i)$ ,  $\mu g \cdot s^{-1}$ ;  $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$  – are Dirac's delta function, which is used to simulate the entry of a pollutant into the mine working.

Boundary conditions for (2) are discussed in [3, 4]. The initial condition is  $C = C_0$ , for  $t = 0$ . Here,  $C_0$  is known concentration of pollutant in dead end mine working.

*Numerical model.* Numerical integration of modeling equations is carried out using a rectangular difference grid.

Before a numerical solution of equation (2), it was splitted, at the differential level, as follows [3]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \sum_i Q_i(t) \delta(x - x_i(t)) \delta(y - y_i(t)).$$

The construction of a numerical model is carried out by applying the following procedure.

Convective derivatives are represented as [4]:

$$\frac{\partial u C}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x}, \quad \frac{\partial v C}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y},$$

where

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

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

The approximation of these derivatives is carried out according to the formulas [4]:

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{ij}^{n+1} - u_{ij}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^+ C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{ij}^{n+1} - v_{ij}^+ C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1},$$

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

The time derivative is approximated as follows:

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

To approximate the second derivatives, the following formulas are used [4]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} (\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}) &\approx \tilde{\mu}_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta x^2} - \\ &- \tilde{\mu}_x \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y} (\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}) &\approx \tilde{\mu}_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta y^2} - \\ &- \tilde{\mu}_y \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}. \end{aligned}$$

The two-dimensional dust transport equation is written in a difference form [4]:

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^{n+1} + L_x^- C^{n+1} + L_y^+ C^{n+1} + L_y^- C^{n+1} = \\ = (M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1} + M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}) + \\ + Q_{ij} \delta_{ij}. \end{aligned} \quad (4)$$

In this equation, a symbol  $\delta_{ij}$  means either «1» or «0», depending on whether or not there is a source of dust emission in the differential cell «ij». Value  $Q_{ij}$  is calculated as:

$$Q_{ij} = \frac{Q_k}{\Delta x \Delta y},$$

where  $Q_k$  – the intensity of the emission of the  $k$ -th point source of dust emission, which is located in the difference cell «ij».

The splitting of difference equation (4) is carried out as following [4]:

1) on the first step of splitting  $k = 1/4$  the difference equation has the appearance:

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^{n+k} - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) = \\ = \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^k + M_{yy}^- C^n + M_{yy}^+ C^n) + \\ + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l; \end{aligned} \quad (5)$$

2) on the second step of splitting  $k = n + 1/2$ ;  $c = n + 1/4$  the difference equation has the appearance:

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^- C^k + L_y^- C^k) = \\ = \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c) + \\ + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l; \end{aligned} \quad (6)$$

3) on the third step of splitting  $k = n + 3/4$ ;  $c = n + 1/2$  the difference equation has the appearance:

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ C^k + L_y^- C^k) = \\ = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^c + M_{xx}^+ C^k + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c) + \\ + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l; \quad (7) \end{aligned}$$

4) on the fourth step of splitting  $k = n + 1$ ;  $c = n + 3/4$  the difference equation has the appearance:

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ C^k + L_y^- C^k) = \\ = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^c + M_{yy}^+ C^k) + \\ + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l. \quad (8) \end{aligned}$$

From equations (5) – (8) unknown value of the dust concentration on the highest time layer is calculated by explicit formula of running calculation [4]. The initial condition for these equations is written as:

$$C^1 = C(x, y, t^n), C^k = C^{k-1}.$$

To construct the boundary condition on the solid walls of the form  $\partial C / \partial n = 0$  fictitious cells are used.

In conclusion, we note that the applied difference schemes have an important advantage – the calculation of the unknown value of the dust concentration in the working area is carried out using explicit formulas, which ensures a simple software implementation of these formulas.

For the numerical integration of this equation, the method of total approximation is applied. To consider the two-dimensional equation for the velocity potential, first of all, this equation in evolutionary form is written [11]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (9)$$

where  $t$  – fictitious time (dimensionless).

It is known, that when  $t \rightarrow \infty$  the solution of this equation will approach to the Laplace equation solution for the velocity potential. In the numerical solution of equation (9), it is necessary to specify the potential field at  $t = 0$ . For example, before starting the calculation, you can take  $P = 0$  in the entire computational domain for  $t = 0$ .

The solution of equation (9) is carried out on a rectangular grid, the function  $P$  is determined in the center of the difference cells. The solution of this equation is split into two steps. Difference equations at each step of the splitting are written as:

$$\begin{aligned} \frac{P_{ij}^{n+\frac{1}{2}} - P_{ij}^n}{\Delta t} &= \left[ \frac{-P_{ij}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[ \frac{-P_{ij}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right], \\ \frac{P_{ij}^{n+1} - P_{ij}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} &= \left[ \frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{ij}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[ \frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{ij}^{n+1}}{\Delta y^2} \right]. \end{aligned}$$

At each splitting step, the unknown value of the velocity potential is determined by the explicit running calculation formula. The calculation is terminated when the following condition is fulfilled:

$$|P_{ij}^{n+1} - P_{ij}^n| \leq \varepsilon, \quad (10)$$

where  $\varepsilon$  – is small number (e.g.,  $\varepsilon = 0.001$ );  $n$  – iteration number.

We also used Libman method for numerical integration of equation (1). In this case the calculation formula is as follows

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

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

After determining the velocity potential field, the components of the air velocity vector are calculated by dependencies:

$$u_{ij} = \frac{P_{ij} - P_{i-1,j}}{\Delta x},$$

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

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

The components of the air velocity vector are calculated on the sides of the difference cells (control volumes), which makes it possible to construct a conservative difference scheme for the dust transport equation (2).

To code the difference formulae of the developed numerical model Fortran language has been used.

## Findings

The developed numerical model was used to simulate the air cleaning in the dead-end mine working. To clean the air suction of the polluted air takes place. The suction opening is situated as it is shown in Figure 1.

To make all parameters dimensionless, we have chosen the following scales:

1)  $v_w$  is the air velocity at the left boundary,  $v_w = 2 \text{ m/s}$ ;

2)  $L_m$ ,  $m$  is the length of the dead-end mine working;

3)  $C_0$ ,  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  is the initial dust concentration in the dead-end mine working for  $t=0$ .

The dimensionless parameters are calculated as following:

1)  $t = t_p \cdot v_w / L_m$ , where  $t_p$  is time,  $s$ ;

2)  $C = C_p / C_0$ , where  $C_p$  is dust concentration,  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ;

3)  $L = L_p / L_m$ , where  $L_p$  is length,  $m$ ;

4)  $v = v_p / v_w$ ,  $v_p$  is local air velocity,  $\text{m/s}$ .

At the initial moment of time throughout the mine working, a uniform impurity concentration is set  $C=1$  (in dimensionless form). Air supply for ventilation is carried out through the duct (Fig. 1). The length of the dead-end mine working is  $L=1$  (dimensionless), the width is  $W=0.3$  (dimensionless). The length of the computational domain  $L_x=2.5$ , the width of the computational domain is  $L_y=1.5$ .

The computational experiment was carried out in two stages. At the first stage, the calculation of dead end mine working ventilation was carried out without the suction system.

In Figures 2 – 4 the change of the polluted zone in the dead end mine working for different time is shown. Time is dimensionless. In Figures 2–4, 6–7 the arrow indicates the wind flow direction.

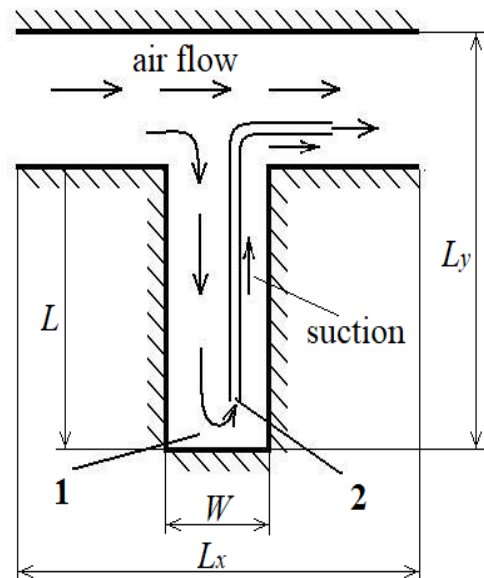


Fig. 1. Scheme of calculation zone:  
1 – dead-end mine working; 2 – suction inlet

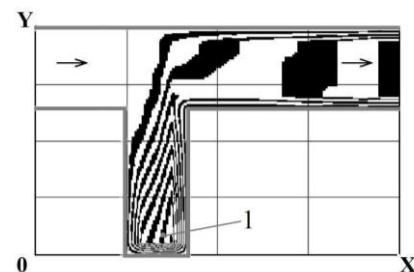


Fig. 2. Dimensionless dust concentration field in mine working,  $t = 22$  (no suction of dust, time is dimensionless):  
 $1 - C=0.68$

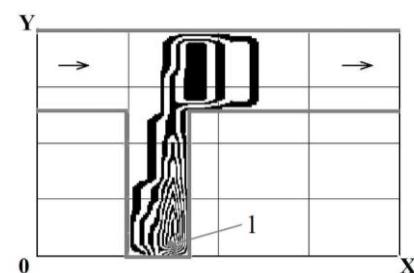


Fig. 3. Dimensionless dust concentration field in mine working,  $t = 58$  (no suction of dust, time is dimensionless):  
 $1 - C=0.2$

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

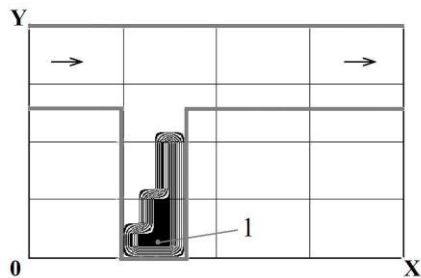


Fig. 4. Dimensionless dust concentration field in mine working,  $t = 105$  (no suction of dust, time is dimensionless):  
 $1 - C = 0.05$

In Figure 5 the maximum dust concentration change in the mine working during time is shown.

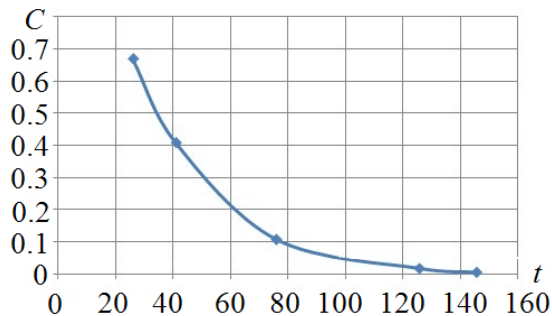


Fig. 5. Dimensionless maximum dust concentration in mine working vs time (no suction of dust, time is dimensionless)

From Figure 5 it is seen that the process of concentration decrease takes part very slowly. It depends upon the aerodynamics process of ventilation: in this case the local speed in the dead-end mine working is very small. This results in small intensity of dust evacuation from the dead-end mine working. So, to increase the intensity of dust evacuation from dead-end mine working it is necessary to imply “external” impact. For example, we can use suction of dust from dead-end mine working.

It is well known, that suction application can be efficient if the suction opening is situated properly in the dead-end mine. The process of dust suction strictly depends on the length from the walls of the dead-end mine, coal heaps to the suction opening. Obtaining the proper position of the suction opening is possible by numerical experiment.

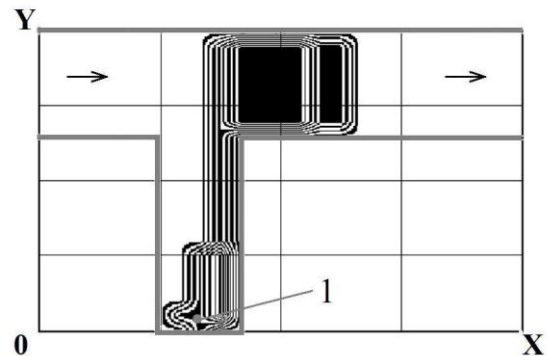


Fig. 6. Dimensionless dust concentration field in mine working (suction of dust, suction speed is 2.2 m/s),  $t = 22$  (time is dimensionless):  
 $1 - C = 0.14$

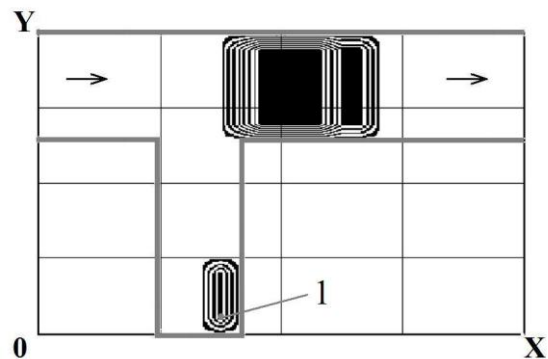


Fig. 7. Dimensionless dust concentration field in mine working (suction of dust, suction speed is 2.2 m/s),  $t = 41$  (time is dimensionless):  
 $1 - C = 0.016$

In Figure 8, for this scenario, the maximum dust concentration change in mine working during time is shown.

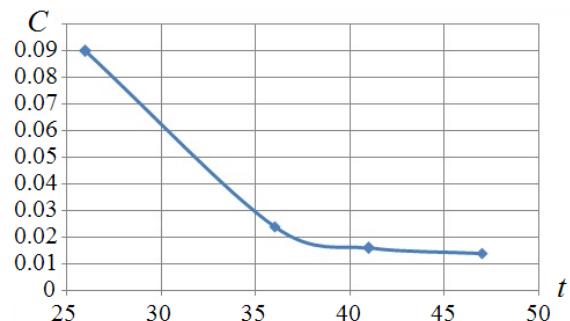


Fig. 8. Dimensionless maximum dust concentration in mine working vs time (suction of dust, time is dimensionless)

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

From Figures 6–8 one can see that the process of ventilation is rapidly increased when suction of dust takes place.

In conclusion, it should be noted that the calculation took 10 seconds of computer time.

### Originality and practical value

Fluid dynamics numerical models were developed to predict the efficiency of dead-end mine working ventilation. For ventilation the suction system was used. The models are based on equation of pollutant dispersion and equation for potential flow. Difference schemes were used for numerical integration. The developed models can be used on the stage the ventilation system development.

### Conclusions

An effective numerical model was developed for calculating the process of ventilation of dead-end mine workings. The calculation of the aerodynamics of air flow is based on the model of potential flow. The process of dispersion of impurities is modeled on the basis of the mass transfer equation. Practical implementation of the model requires small amount of computer time. The model makes it possible to improve the quality of engineering calculations. Further development of this direction is associated with the creation of a three-dimensional numerical model of the process of ventilation of underground workings.

### LIST OF REFERENCE LINKS

1. Беляев, Н. Н. Защита зданий от проникновения в них опасных веществ : монография / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гулько, Н. В. Росточило. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. – 136 с.
2. Бересневич, П. В. Аэрология карьеров : справочник / П. В. Бересневич, В. А. Михайлов, С. С. Филатов. – Москва : Недра, 1991. – 280 с.
3. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – Москва : Наука, 1982. – 320 с.
4. 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.
5. Air pollution dispersion modeling in a polluted industrial area of complex terrain from Romania / G. Grigoras, V. Cuculeanu, G. Ene, G. Mocioaca, A. Deneanu // Romanian Reports in Physics. – 2012. – Vol. 64, No. 1. – P. 173–186.
6. Alvarez, J. T. Dust barriers in open pit blasts. Multiphase Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulations / J. T. Alvarez, I. D. Alvarez, S. T. Lougedo // WIT Transactions on Ecology and the Environment. – 2008. – Vol. 116. – P. 86–93. doi:10.2495/AIR080101
7. Anand Kumar Varma, S. Mathematical modeling of air pollution in a thermal power project [Electronic resource] / S. Anand Kumar Varma. – Available at: [https://www.researchgate.net/publication/318284616\\_mathematical\\_modeling\\_of\\_air\\_pollution\\_in\\_a\\_thermal\\_power\\_project](https://www.researchgate.net/publication/318284616_mathematical_modeling_of_air_pollution_in_a_thermal_power_project) – Title from the screen. – Accessed : 16.10.2019.
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: [http://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8\\_15](http://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15)
9. Jyotsna, K. A mathematical model to study the impact of mining activities and pollution on forest resources and wildlife population / K. Jyotsna, A. Tandon // Journal of Biological Systems. – 2017. – Vol. 25, No. 02. – P. 207–230. <http://doi.org/10.1142/S0218339017500115>
10. Protective Action Criteria. A Review of Their Derivation, Use, Advantages and Limitations [Electronic resource] // Environmental Public Health Science Unit, Health Protection Branch, Public Health and Compliance Division, Alberta Health. – Edmonton, Alberta, 2017. – Available at: <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> – Title from the screen. – Accessed : 16.10.2019.
11. Škuta, R. Assessment of mining activities with respect to the environmental protection / R. Škuta, R. Kučerová, Z. Pavelek, V. Dirner // Acta Montanistica Slovaca. – 2017. – Vol. 22 (1). – P. 79–93.
12. The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes [Electronic resource] / O. Zavila, P. Dobes, J. Dlabka, J. Bitta // The science for population protection. – 2015. – № 2. – Available at: <http://www.population-protection.eu/prilohy/casopis/eng/22/112.pdf> – Title from the screen. – Accessed : 16.10.2019.

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

В. В. БІЛЯЄВА<sup>1\*</sup>, П. С. КІРІЧЕНКО<sup>2\*</sup>, О. Ю. ГУНЬКО<sup>3\*</sup>, І. О. БОНДАРЕНКО<sup>4\*</sup>,  
П. Б. МАШИХІНА<sup>5\*</sup>, З. М. ЯКУБОВСЬКА<sup>6\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Аерогідромеханіка та енергомасоперенос», Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, вул. Казакова, 18, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 776 82 05, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0003-2399-3124

<sup>2\*</sup>Каф. «Теплогазопостачання, водовідведення та вентиляція», Криворізький національний університет, вул. Віталія Матусевича, 11, Кривий Ріг, Україна, 50027, тел. +38 (056) 409 06 06, ел. пошта pasha\_129@ukr.net, ORCID 0000-0002-0793-9593

<sup>3\*</sup>Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0001-9257-763X

<sup>4\*</sup>Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 802 21 80, ел. пошта irina\_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-3032

<sup>5\*</sup>Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0003-3057-9204

<sup>6\*</sup>Каф. «Фізика», Український державний хіміко-технологічний університет, пр. Гагаріна, 8, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (056) 753 56 38, ел. пошта physics@udhtu.edu.ua, ORCID 0000-0002-9893-3479

## КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЕНТИЛЯЦІЇ ШАХТНОЇ ВІЙМКИ

**Мета.** Важливою проблемою в галузі екологічної та промислової безпеки є створення нормального мікроклімату в тупиковій шахтній виїмці. У цій зоні шахти може накопичуватися газоподібний метан, що в результаті призводить до вибуху. Тому, щоб уникнути нещасних випадків, важливо належним чином провітрити шахтну виїмку. Метою роботи є розробка швидкодіючої математичної моделі для отримання інформації про процес вентиляції тупикової шахтної виїмки. **Методика.** Процес розрахунку вентиляції шахтної виїмки розділено на два етапи. На першому етапі обчислюють поле швидкісного потоку в шахтній виїмці. Розглядаємо ситуацію, коли усмоктувальна труба знаходиться в цій зоні. Для розв'язання задачі використано гідродинамічну модель потоку нев'язкого газу. На другому етапі обчислювального моделювання використано конвективно-дифузійне рівняння переносу домішки. Рівняння враховує нерівномірне поле потоку у виїмці. **Результати.** Розроблена чисельна модель була закодована з використанням мови FORTRAN. Створений комп'ютерний код дозволяє провести чисельний експеримент для оцінки ефективності застосування всмоктувальної труби з метою зниження концентрації метану в тупиковій виїмці. **Наукова новизна.** Розроблена чисельна модель враховує такий фізичний фактор, який у наш час не враховують в емпіричних моделях, застосовуваних для розв'язання задачі вентиляції шахтної виїмки, – це її геометрична форма. **Практична значимість.** Розроблена комп'ютерна програма дозволяє проводити розрахунки для оцінки ефективності системи всмоктування, використовуваної для вентиляції шахтної виїмки.

**Ключові слова:** забруднення повітря; шахтна виїмка; математичне моделювання; чисельна модель

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

В. В. БЕЛЯЕВА<sup>1\*</sup>, П. С. КИРИЧЕНКО<sup>2\*</sup>, Е. Ю. ГУНЬКО<sup>3\*</sup>, И. А. БОНДАРЕНКО<sup>4\*</sup>,  
П. Б. МАШИХИНА<sup>5\*</sup>, З. М. ЯКУБОВСКАЯ<sup>6\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Аэрогидромеханика и энергомассоперенос», Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, ул. Казакова, 18, Днепро, Украина, 49000, тел. +38 (056) 374 98 22, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0003-2399-3124

<sup>2\*</sup>Каф. «Теплогазоснабжение, водоотведение и вентиляция», Криворожский национальный университет, ул. Виталия Матусевича, 11, Кривой Рог, Украина, 50027, тел. +38 (056) 409 06 06, эл. почта pasha\_129@ukr.net, ORCID 0000-0002-0793-9593

<sup>3\*</sup>Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0001-9257-763X

<sup>4\*</sup>Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (063) 802 21 80, эл. почта irina\_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-3032

<sup>5\*</sup>Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0003-3057-9204

<sup>6\*</sup>Каф. «Физики», Украинский государственный химико-технологический университет, пр. Гагарина, 8, Днепро, Украина, 49000, тел. +38 (056) 753 56 38, эл. почта physics@udhtu.edu.ua, ORCID 0000-0002-9893-3479

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЯЦИИ ШАХТНОЙ ВЫЕМКИ

**Цель.** Важной проблемой в области экологической и промышленной безопасности является обеспечение нормального микроклимата в тупиковой шахтной выемке. В этой зоне шахты может накапливаться газообразный метан, что в результате приводит к взрыву. Поэтому, чтобы избежать несчастных случаев, важно надлежащим образом проветрить шахтную выемку. Целью работы является разработка быстродействующей математической модели для получения информации о процессе вентиляции тупиковой шахтной выемки.

**Методика.** Процесс расчета вентиляции шахтной выемки разделен на два этапа. На первом этапе вычисляют поле скоростного потока в шахтной выемке. Рассматриваем ситуацию, когда всасывающая труба находится в этой зоне. Для решения задачи была использована гидродинамическая модель потока невязкого газа. На втором этапе вычислительного моделирования использовано конвективно-диффузионное уравнение переноса примеси. Уравнение учитывает неравномерное поле потока в выемке. **Результаты.** Разработанная численная модель была закодирована с использованием языка FORTRAN. Созданный компьютерный код позволяет провести численный эксперимент для оценки эффективности применения всасывающей трубы для снижения концентрации метана в тупиковой выемке. **Научная новизна.** Разработанная численная модель учитывает такой физический фактор, который в настоящее время не учитывают в эмпирических моделях, используемых для решения задачи вентиляции шахтной выемки, – это её геометрическая форма. **Практическая значимость.** Созданная компьютерная программа позволяет проводить расчеты для оценки эффективности системы всасывания, используемой для вентиляции шахтной выемки.

**Ключевые слова:** загрязнение воздуха; шахтная выемка; математическое моделирование; численная модель

### REFERENCES

1. Belyaev, N. N., Gunko, Y. Y., & Rostochilo, N. V. (2014). *Zashchita zdaniy ot proniknoveniya v nikh opasnykh veshchestv: Monografiya*. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (in Russian)
2. Beresnevich, P. V., Mikhaylov, V. A., & Filatov, S. S. (1991). *Aerologiya karerov: spravochnik*. Moscow: Nedra. (in Russian)
3. Marchuk, G. I. (1982). *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy*. Moscow: Nauka. (in Russian)
4. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Biliaiev, N. N. (1997). *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

5. Grigoras, G., Cuculeanu, V., Ene, G., Mocioaca, G., & Deneanu, A. (2012). Air pollution dispersion modeling in a polluted industrial area of complex terrain from. *Romanian Reports in Physics*, 64(1), 173-186. (in English)
6. Alvarez, J. T., Alvarez, I. D., & Lougedo, S. T. (2008). Dust Barriers In Open Pit Blasts. Multiphase Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulations. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 116, 86-93. doi: 10.2495/AIR080101 (in English)
7. Anand Kumar Varma, S. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/318284616\\_mathematical\\_modeling\\_of\\_air\\_pollution\\_in\\_a\\_thermal\\_power\\_project](https://www.researchgate.net/publication/318284616_mathematical_modeling_of_air_pollution_in_a_thermal_power_project) (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*, 87-91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8\_15 (in English)
9. Jyotsna, K., & Tandon, A. (2017). A mathematical model to study the impact of mining activities and pollution on forest resources and wildlife population. *Journal of Biological Systems*, 25(2), 207-230. <http://doi.org/10.1142/S0218339017500115> (in English)
10. Government of Alberta. (2017). Protective Action Criteria: A Review of Their Derivation, Use, Advantages and Limitations. Environmental Public Health Science Unit, Health Protection Branch, Public Health and Compliance Division, Alberta Health. Edmonton, Alberta. Retrived from <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> (in English)
11. Škuta, R., Kučerová, R., Pavelek, Z., & Dirner, V. (2017). Assessment of mining activities with respect to the environmental protection. *Acta Montanistica Slovaca*, 22(1), 79-93. (in English)
12. Zavila, O., Dobes, P., Dlabka, J., & Bitta, J. (2015). The analysis of the use of mathematical modeling fore-mergency planning purposes. *The Science for Population Protection*, 2. Retrieved from <http://www.population-protection.eu/prilohy/casopis/eng/22/112.pdf> (in English)

Received: May 20, 2019

Accepted: September 23, 2019

## УДК 628.35:519.87

В. А. КОЗАЧИНА<sup>1\*</sup>, В. І. ШИНКАРЕНКО<sup>2\*</sup>, І. О. БОНДАРЕНКО<sup>3\*</sup>, В. О. ГАБРИНЕЦЬ<sup>4\*</sup>,  
В. М. ГОРЯЧКІН<sup>5\*</sup><sup>1\*</sup>Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532<sup>2\*</sup>Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта shinkarenko\_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225<sup>3\*</sup>Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 802 21 80, ел. пошта igina\_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-3032<sup>4\*</sup>Каф. «Теплотехніка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 87, ел. пошта gabrin62@gmail.com, ORCID 0000-0002-6115-7162<sup>5\*</sup>Каф. «Теплотехніка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 87, ел. пошта vgora@ukr.net, ORCID 0000-0002-6115-7162МОДЕЛЮВАННЯ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ У ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ  
ВІДСТІЙНИКУ

**Мета.** Підвищення ефективності роботи очисних споруд у системах водопостачання та водовідведення є важливою технічною задачею. Для аналізу ефективності очищення води конкретної споруди, на етапі проектування, потрібно мати спеціальні математичні моделі. Метою цієї роботи є розробка чисельної моделі процесу масопереносу у горизонтальному відстійнику для оцінки ефективності його роботи.

**Методика.** Процес розповсюдження забруднювача в очисній споруді (відстійнику) розраховують на базі рівняння розповсюдження домішки, що виражає закон збереження маси. Моделювальне рівняння враховує конвективний перенос домішки та перенос домішки за рахунок турбулентної дифузії. Математична модель враховує нерівномірне поле швидкості потоку в споруді. Для визначення цього нерівномірного поля швидкості потоку використано математичну модель течії ідеальної рідини. При цьому враховано вихрову природу потоку.

**Результати.** Розв'язання моделювальних рівнянь знайдено чисельним шляхом. Для чисельного інтегрування моделювального рівняння переносу в споруді використано різницеві схеми розщеплення. Базове рівняння масопереносу попередньо розщеплено на рівняння, що враховує рух домішки у відстійнику за рахунок конвекції, та на рівняння, що враховує перенос домішки за рахунок дифузії. Для чисельного інтегрування моделювальних рівнянь течії невязкої рідини використано неявні різницеві схеми розщеплення. Чисельний розрахунок здійснено на прямокутній різницевій сітці.

**Наукова новизна.** Особливістю розробленої математичної моделі є можливість визначення поля швидкості та процесу переносу домішки з урахуванням геометричної форми відстійників та можливістю використання в них пластин, що впливають на гідродинаміку потоку в споруді, а значить – на ефективність очищення води.

**Практична значимість.** Час розрахунку одного варіанта завдання на базі побудованих математичних моделей складає кілька секунд. Моделі можна використати для отримання експертної оцінки роботи очисних споруд, які проектують. Зазначено результати проведеного обчислювального експерименту з визначення ефективності роботи відстійника з двома пластинами.

*Ключові слова:* очищення води; математичне моделювання; очисні споруди

## Вступ

Відстійники відіграють суттєву роль у системах водопостачання та водовідведення. На практиці використовують різні типи відстійників, але в системах очищення дуже часто для

очистки стічних вод використовуються горизонтальні відстійники. Для оцінки ефективності роботи відстійників за різних навантажень, потрібно мати математичні моделі, що дозволяють визначати ступінь очищення стічних вод для конкретних умов експлуатації [1–3, 5, 7–9].

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Для розв'язання задач з оцінки ефективності роботи очисних споруд використовують математичні моделі, а саме емпіричні [4, 11] й аналітичні [3, 4, 7, 9, 10, 12]. Недоліком цих моделей є неможливість урахування нерівномірного потоку в споруді та геометричної форми споруди. Тому більш ефективними є чисельні моделі [1, 2, 6, 13], що дозволяють проводити розрахунки з урахуванням геометричної форми споруд. Але недоліком цих моделей є, у деяких випадках, значні витрати комп'ютерного часу їх на практичну реалізацію [13].

**Мета**

Зважаючи на викладене, метою нашої роботи є розробка чисельної моделі процесу масопереносу у горизонтальному відстійнику для оцінки ефективності його роботи.

**Методика**

Будемо розглядати рух води з домішками в очисній споруді, наприклад, у горизонтальному відстійнику. Ставимо задачу розробки математичної моделі, що дозволяє визначати ефективність роботи споруди з урахуванням її геометричної форми та гідродинаміки потоку.

**Модель гідродинаміки.** Найважливішою задачею під час розрахунку очисних споруд систем водопостачання та водовідведення є визначення поля швидкості водного потоку. Це пов'язано з тим, що рух домішок у споруді визначається переважно, конвекцією. Тому під час створення моделей оцінки ефективності роботи очисних споруд розв'язання задачі гідродинаміки постає на першому місці. У роботі будемо використовувати модель рівнянь Нав'є–Стокса для розв'язання задачі гідродинаміки. Моделювальні рівняння мають вигляд:

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

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

де  $\psi$  – функція потоку;  $\text{Re} = \frac{V_0 L}{\nu}$  – число Рейнольдса;  $\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$  – завихореність;  $u = \frac{\partial \psi}{\partial y}$ ,  $v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$  – компоненти вектора швидкості водного потоку;  $L$  – характерний лінійний розмір;  $V_0$  – характерна швидкість.

Постановку граничних умов для системи рівнянь (2)–(3) наведено в роботі [2].

Розглянемо побудову різницевих схем для чисельного інтегрування рівнянь Нав'є–Стокса. Представимо швидкість потоку в такому вигляді:

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

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

Виконаємо заміну конвективних похідних так [1]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^+ \omega}{\partial x} &\approx \Lambda_x^+ \omega = (u_{i+1,j}^+ \omega_{i,j} - u_{i,j}^+ \omega_{i-1,j}) / \Delta x; \\ \frac{\partial u^- \omega}{\partial x} &\approx \Lambda_x^- \omega = (u_{i+1,j}^- \omega_{i+1,j} - u_{i,j}^- \omega_{i,j}) / \Delta x; \\ \frac{\partial v^+ \omega}{\partial y} &\approx \Lambda_y^+ \omega = (v_{i,j+1}^+ \omega_{i,j} - v_{i,j}^+ \omega_{i,j-1}) / \Delta y; \\ \frac{\partial v^- \omega}{\partial y} &\approx \Lambda_y^- \omega = (v_{i,j+1}^- \omega_{i,j+1} - v_{i,j}^- \omega_{i,j}) / \Delta y. \end{aligned} \quad (3)$$

Для апроксимації других похідних використовуємо залежності [1]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} &\approx L_{xx}^+ \omega - L_{xx}^- \omega = \\ &= (-\omega_{i,j} + \omega_{i-1,j}) / \Delta x^2 + (\omega_{i+1,j} - \omega_{i,j}) / \Delta x^2; \\ \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} &\approx L_{yy}^+ \omega - L_{yy}^- \omega = \\ &= (\omega_{i,j-1} - \omega_{i,j}) / \Delta y^2 + (\omega_{i,j+1} - \omega_{i,j}) / \Delta y^2, \end{aligned} \quad (4)$$

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

де в подальшому різниці оператори  $L_{xx}^+, L_{xx}^-, L_{yy}^+, L_{yy}^-$  визначатимуться на різних розрахункових шарах. Замінюючи похідні розділеними різницями (3)–(4), отримуємо наступну різницеву схему [8]:

$$\begin{aligned} & \frac{\omega_{i,j}^{n+1} - \omega_{i,j}^n}{\Delta t} + \\ & + \left( \Lambda_x^+ + \Lambda_x^- + \Lambda_y^+ + \Lambda_y^- \right) \left( \omega^{n+1} \xi + (1 - \xi) \omega^n \right) = \\ & = \frac{1}{\text{Re}} \left( L_{xx}^+ + L_{xx}^- + L_{yy}^+ + L_{yy}^- \right) \left( \omega^{n+1} \xi + (1 - \xi) \omega^n \right). \end{aligned} \quad (5)$$

або

$$\begin{aligned} & \left( (E + \Delta t \xi) \left( \Lambda_x^+ + \Lambda_x^- + \Lambda_y^+ + \Lambda_y^- \right) - \right. \\ & \quad \left. - \frac{\Delta t}{\text{Re}} \xi \left( L_{xx}^+ + L_{xx}^- + L_{yy}^+ + L_{yy}^- \right) \right) \omega^{n+1} = \\ & = \left( E - \Delta t (1 - \xi) \left( \Lambda_x^+ + \Lambda_x^- + \Lambda_y^+ + \Lambda_y^- \right) + \right. \\ & \quad \left. + \frac{\Delta t}{\text{Re}} (1 - \xi) \left( L_{xx}^+ + L_{xx}^- + L_{yy}^+ + L_{yy}^- \right) \right) \omega^n. \end{aligned} \quad (6)$$

Схема (6) за  $\xi = 1/2$  має другий порядок точності за часовою координатою, однак для визначення невідомих  $\omega^{n+1}$  необхідно розв'язувати систему алгебраїчних рівнянь великої розмірності.

Далі записуємо різницеву схему розщеплення [1]:

$$\begin{aligned} & \left( E + \frac{\Delta t}{2} \left( \Lambda_x^+ + \Lambda_y^+ \right) - \frac{\Delta t}{2 \text{Re}} \left( L_{xx}^+ + L_{yy}^+ \right) \right) \omega^{n+1/2} = \\ & = \left( E - \frac{\Delta t}{2} \left( \Lambda_x^- + \Lambda_y^- \right) + \frac{\Delta t}{2 \text{Re}} \left( L_{xx}^- + L_{yy}^- \right) \right) \omega^n; \\ & \left( E + \frac{\Delta t}{2} \left( \Lambda_x^- + \Lambda_y^- \right) - \frac{\Delta t}{2 \text{Re}} \left( L_{xx}^- + L_{yy}^- \right) \right) \omega^{n+1} = \\ & = \left( E - \frac{\Delta t}{2} \left( \Lambda_x^+ + \Lambda_y^+ \right) + \frac{\Delta t}{2 \text{Re}} \left( L_{xx}^+ + L_{yy}^+ \right) \right) \omega^{n+1/2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Розрахунок невідомого значення  $\omega$  на кожному кроці розщеплення визначаємо за методом біжучого рахунку.

Для чисельного інтегрування рівняння для функції потоку використовуємо метод ітерацій. Для цього рівняння Пуассона приводимо до вигляду:

$$\frac{\partial \psi}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \omega, \quad (8)$$

де  $\eta$  – фіктивний час. Функція  $\psi(x, y, \eta)$ , будучи розв'язком нестационарного рівняння (3.14), буде розв'язком рівняння Пуассона за  $\eta \rightarrow \infty$ .

Використана різницева схема має вигляд [1]:

$$\begin{aligned} \frac{\psi_{ij}^{l+1} - \psi_{ij}^l}{\Delta \eta} = & \left( L_{xx}^+ + L_{xx}^- \right) \frac{\psi^{l+1} - \psi^l}{2} + \\ & + \left( L_{yy}^+ + L_{yy}^- \right) \frac{\psi^{l+1} - \psi^l}{2} + \tilde{\omega}_{ij}; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\tilde{\omega}_{ij} = \frac{1}{4} \left( \omega_{ij} + \omega_{i-1,j} + \omega_{i,j-1} + \omega_{i-1,j-1} \right).$$

Схема розщеплення має вигляд:

$$\begin{aligned} \psi^{l+1/4} &= \psi^l + \tilde{\omega} \frac{\Delta \eta}{2}; \\ \left( E - \frac{\Delta \eta}{2} \left( L_{xx}^+ + L_{yy}^+ \right) \right) \psi^{l+2/4} &= \\ &= \left( E + \frac{\Delta \eta}{2} \left( L_{xx}^- + L_{yy}^- \right) \right) \psi^{l+1/4}; \\ \left( E - \frac{\Delta \eta}{2} \left( L_{xx}^- + L_{yy}^- \right) \right) \psi^{l+3/4} &= \\ &= \left( E + \frac{\Delta \eta}{2} \left( L_{xx}^+ + L_{yy}^+ \right) \right) \psi^{l+2/4}; \\ \psi^{l+1} &= \psi^{l+3/4} + \tilde{\omega} \frac{\Delta \eta}{2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Значення функції потоку  $\psi^{l+2/4}$ ,  $\psi^{l+3/4}$  визначаємо методом біжучого рахунку на другому та третьому кроках розщеплення.

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Компоненти вектора швидкості визначаємо так:

$$u_{ij} = (\psi_{i,j+1} - \psi_{ij}) / \Delta y; \quad v_{ij} = -(\psi_{i+1,j} - \psi_{ij}) / \Delta x.$$

Для формування вигляду розрахункової області використовуємо маркери.

*Модель масопереносу у відстійнику.*

Після розрахунку нерівномірного поля швидкості потоку у відстійнику необхідно розрахувати рух домішки. Для математичного опису переносу домішки в очисній споруді будемо використовувати рівняння балансу маси [1, 2, 6, 13]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v-w)C}{\partial y} + \sigma C = 0, \quad (11)$$

де  $C$  – концентрація домішки;  $u, v$  – компоненти вектора швидкості потоку в напрямку осей  $x$  і  $y$ ;  $w$  – гравітаційна швидкість осадження домішки;  $x, y$  – Декартові координати;  $\sigma$  – коефіцієнт, що враховує процес флокуляції і розпаду частинок, а також біохімічне окислення.

Крайові умови для рівняння (11) розглянуто в [11].

Для чисельного інтегрування рівняння (11) використовуємо неявну змінно-трикутну схему розщеплення [11].

### Результати

На базі побудованої чисельної моделі створено пакет програм. Основні модулі цього пакета наступні:

- 1) підпрограма EVORZ – розрахунок поля вихору на базі рівнянь Нав'є–Стокса;
- 2) підпрограма EFUZ – розрахунок функції потоку на базі рівнянь Нав'є–Стокса;
- 3) підпрограма ECOZ – розрахунок концентрації домішки у відстійнику;
- 4) підпрограма EPRZ – друк результатів обчислювального експерименту.

На рис. 1 показано розподіл домішки у горизонтальному відстійнику. Обчислювальний експеримент на базі побудованої чисельної моделі проведено для відстійника, що має дуже складну геометричну форму. Як відомо, для таких розрахункових областей ряд чисельних методів втрачає стійкість, але побудована чисельна модель не має такого недоліку. Числа

на рис. 1 показують у процентах концентрацію домішки від значення концентрації домішки на вході у відстійник ( $C = 99\%$ ). На базі такої технології можна швидко аналізувати, яка концентрація домішки буде на виході з відстійника.

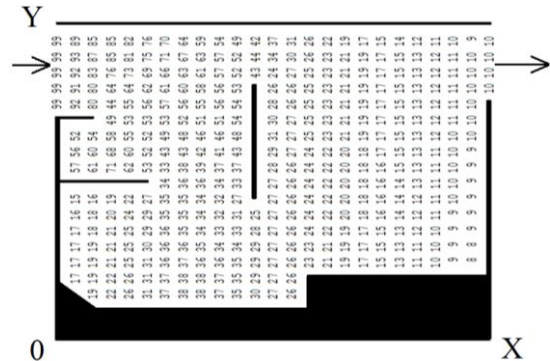


Рис. 1. Концентрація домішки у горизонтальному відстійнику

Fig. 1. Impurity concentration in a horizontal settler

Як ми бачимо з рис. 1, ефективність очищення води в цій споруді буде близько 90 %.

Відзначимо, що час розрахунку склав близько 15 сек.

### Наукова новизна та практичне значення

Запропоновано чисельну модель, що базується на рівнянні Нав'є–Стокса та рівнянні переносу домішки у горизонтальному відстійнику. Розроблена модель дозволяє оперативно розраховувати нерівномірне поле швидкості потоку в споруді та розподіл концентрації домішки в споруді. Модель може бути застосована на етапі проектування очисних споруд систем водовідведення.

### Висновки

У статті розглянуто чисельну модель, що дозволяє оперативно оцінювати ефективність роботи горизонтальних відстійників. Модель базується на використанні фундаментальних рівнянь механіки суцільного середовища.

Подальший розвиток цього наукового напрямку слід проводити в галузі створення 3D-моделей для оцінки ефективності роботи очисних споруд.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Беляев, Н. Н. Математическое моделирование массопереноса в горизонтальных отстойниках / Н. Н. Беляев, В. А. Козачина. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2015. – 115 с.
2. Беляев, Н. Н. Математическое моделирование массопереноса в отстойниках систем водоотведения / Н. Н. Беляев, Е. К. Нагорная. – Днепропетровск : Новая идеология, 2012. – 112 с.
3. Горносталь, С. А. Аналіз результатів моделювання процесу біологічного очищення стічних вод / С. А. Горносталь, О. А. Петрухов // Науковий вісник будівництва. – ХНУБА, 2014. – № 1. – С. 112–114.
4. ДБН В.2.5-75-2013. Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. – Київ : Мінрегіон України, 2013. – 128 с.
5. Епоян, С. М. Особенности работы пористой полимербетонной перегородки водопроводного горизонтального відстійника і її регенерація / С. М. Епоян, Д. Г. Сухоруков // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА. – 2012. – Вип. 69. – С. 327–331.
6. Козачина, В. А. Моделирование процесса массопереноса в отстойнике при импульсной подаче примеси / В. А. Козачина // Науковий вісник будівництва. – ХНУБА, 2015. – № 1 (79). – С. 162–165.
7. Олійник, О. Я. Моделювання і розрахунки біологічної очистки стічних вод на краплинних біофільтрах / О. Я. Олійник, О. А. Колпакова // Екологічна безпека та природокористування : зб. наук.-техн. пр. – Київ, 2014. – Вип. 16. – С. 68–86.
8. Олійник, О. Я. Моделювання очистки стічних вод від органічних забруднень в біореакторах-аеротенках зі зваженим (вільно плаваючим) і закріпленим біоценозом / О. Я. Олійник, Т. С. Айрапетян // Доповіді НАН України. – 2015. – № 5. – С. 55–60. doi: <http://doi.org/10.15407/dopovidi2015.05.055>
9. Олійник, О. Я. Підвищення ефективності біологічного очищення стічних вод в аеротенках за рахунок зваженого та закріпленого біоценозу / О. Я. Олійник, Т. С. Айрапетян // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА, 2015. – № 3 (81). – С. 106–109.
10. Олійник, О. Я. Підвищення ефективності роботи аеротенків-витискувачів за рахунок завислого і зваженого біоценозу / О. Я. Олійник, Т. С. Айрапетян // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідрравліки : наук.-техн. зб. – Київ, 2016. – Вип. 26. – С. 123–130.
11. Олійник, О. Я. Розрахунок кисневого режиму при біологічному очищенні стічних вод в аеротенках-змішувачах з закріпленим і зваженим біоценозом / О. Я. Олійник, Т. С. Айрапетян // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА, 2018. – № 4 (98). – С. 187–191.
12. Реконструкція і інтенсифікація споруд водопостачання та водовідведення: навч. посіб. / О. А. Василенко, П. О. Грабовський, Г. М. Ларкін та ін. – К.: ІВНВКП «Укреліотек», 2010. – 272 с.
13. Griborio, A. Secondary Clarifier Modeling: A Multi-Process Approach / A. Griborio // Dissertation and Theses (for the degree of Doctor of Philosophy in The Engineering and Applied Sciences Program). – University of New Orleans : USA, 2004. – 440 p.

В. А. КОЗАЧИНА<sup>1\*</sup>, В. І. ШИНКАРЕНКО<sup>2\*</sup>, І. А. БОНДАРЕНКО<sup>3\*</sup>,  
В. А. ГАБРИНЕЦЬ<sup>4\*</sup>, В. Н. ГОРЯЧКИН<sup>5\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта [water.supply.treatment@gmail.com](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCID 0000-0002-6894-5532

<sup>2\*</sup>Каф. «Компьютерные информационные технологии», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, эл. почта [shinkarenko\\_vi@ua.fm](mailto:shinkarenko_vi@ua.fm), ORCID 0000-0001-8738-7225

<sup>3\*</sup>Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (063) 802 21 80, эл. почта [irina\\_bondarenko@ua.fm](mailto:irina_bondarenko@ua.fm), ORCID 0000-0003-4717-3032

<sup>4\*</sup>Каф. «Теплотехника», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 87, эл. почта [gabrin62@gmail.com](mailto:gabrin62@gmail.com), ORCID 0000-0002-6115-7162

<sup>5\*</sup>Каф. «Теплотехника», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 87, эл. почта [vgora@ukr.net](mailto:vgora@ukr.net), ORCID 0000-0002-8952-952X

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЧИСТКИ ВОДЫ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ОТСТОЙНИКЕ

**Цель.** Повышение эффективности работы очистных сооружений в системах водоснабжения и водоотведения – важная техническая задача. Для анализа эффективности очистки воды конкретного сооружения, на этапе проектирования, нужно иметь специальные математические модели. Целью данной работы является разработка численной модели процесса массопереноса в горизонтальном отстойнике для оценки эффективности его работы. **Методика.** Процесс распространения загрязнителя в очистном сооружении (отстойнике) рассчитывают на базе уравнения распространения примеси, что выражает закон сохранения массы. Моделирующее уравнение учитывает конвективный перенос примеси и перенос примеси за счет турбулентной диффузии. Математическая модель учитывает неравномерное поле скорости потока в сооружении. Для определения этого неравномерного поля скорости потока используют математическую модель течения идеальной жидкости. При этом учитывают вихревую природу потока. **Результаты.** Решение моделирующих уравнений найдено численным путем. Для численного интегрирования моделирующего уравнения переноса в сооружении использованы разностные схемы расщепления. Базовое уравнение массопереноса предварительно расщеплено на уравнения, учитывающие движение примеси в отстойнике за счет конвекции, и на уравнения, учитывающие перенос примеси за счет диффузии. Для численного интегрирования моделирующих уравнений течения невязкой жидкости использованы неявные разностные схемы расщепления. Численный расчет осуществлен на прямоугольной разностной сетке. **Научная новизна.** Особенностью разработанной математической модели является возможность определения поля скорости и процесса переноса примеси с учетом геометрической формы отстойников и возможностью использования в них пластин, влияющих на гидродинамику потока в сооружении, а значит – на эффективность очистки воды. **Практическая значимость.** Время расчета одного варианта задания на базе построенных математических моделей составляет несколько секунд. Модели можно применить для получения экспертной оценки работы проектируемых очистных сооружений. Описаны результаты проведенного вычислительного эксперимента по определению эффективности работы отстойника с двумя пластинами.

*Ключевые слова:* очистка воды; математическое моделирование; очистные сооружения

V. A. KOZACHYNA<sup>1\*</sup>, V. I. SHYNKARENKO<sup>2\*</sup>, I. O. BONDARENKO<sup>3\*</sup>,  
V. A. GABRINET<sup>4\*</sup>, V. M. HORIACHKIN<sup>5</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

<sup>2\*</sup>Dep. «Computer and Information Technologies», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail shinkarenko\_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225

<sup>3\*</sup>Dep. «Track and Track Facilities», Dnipro National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 802 21 80, e-mail irina\_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-3032

<sup>4\*</sup>Dep. «Heat Engineering», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 87, e-mail vgora@ukr.net, ORCID 0000-0002-8952-952X

<sup>5\*</sup>Dep. «Heat Engineering», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 87, e-mail vgora@ukr.net, ORCID 0000-0002-8952-952X

## WATER CLEANING MODELING IN A HORIZONTAL SETTLER

**Purpose.** Improving the efficiency of wastewater treatment plants in water supply and sanitation is an important technical task. To analyze the effectiveness of water treatment of a particular structure, at the design stage, you need to have special mathematical models. The work is aimed to develop a numerical model of the mass transfer process in a horizontal settler to assess its performance. **Methodology.** The spread of the pollutant in the treatment plant (settler) is calculated on the basis of the distribution equation of the impurity, which expresses the law of mass conservation. The modeling equation takes into account the convective transfer of impurities and the transfer of impurities due to turbulent diffusion. The mathematical model takes into account the uneven flow velocity field in the

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

building. To determine this uneven flow velocity field, a mathematical model of the flow of an ideal fluid is used. In this case, the vortex nature of the flow is taken into account. **Findings.** The solution of modeling equations is found numerically. For numerical integration of the modeling transport equation in the structure, difference splitting schemes were used. The basic mass transfer equation is preliminarily split into equations that take into account the movement of an impurity in a settling tank due to convection, and into equations that take into account the transfer of an impurity due to diffusion. For numerical integration of the modeling equations of the inviscid fluid flow, implicit difference splitting schemes are used. The numerical calculation is carried out on a rectangular difference grid. **Originality.** A feature of the developed mathematical model is the possibility of modeling the velocity field and the process of impurity transfer taking into account the geometric shape of the settlers and the possibility of using plates in them, which affect the flow hydrodynamics in the structure and, therefore, the efficiency of water treatment. **Practical value.** The calculation time for one version of the task based on the constructed mathematical models is a few seconds. The models can be used to obtain an expert assessment of the operation of treatment facilities designed. The results of a computational experiment in determining the efficiency of the settler with two plates are presented.

**Keywords:** water treatment; mathematical modeling; wastewater treatment plants

## REFERENCES

1. Biliaiev, N. N., & Kozachina, V. A. (2015). *Modelirovaniye massoperenosa v gorizontalnykh otstoynikakh: Monografiya*. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (in Russian)
2. Biliaiev, N. N., & Nagornaya, E. K. (2012). *Matematicheskoye modelirovaniye massoperenosa v otstoynikakh sistem vodootvedeniya*. Dnepropetrovsk: Novaya ideologiya. (in Russian)
3. Gornostal, S. A., & Petrukhov, O. A. (2014). Analysis of simulation results of biological wastewater treatment process. *Scientific Bulletin of Construction*, 1, 112-114. (in Ukrainian)
4. Kanalizatsiia. Zovnishni mrezi ta sporudy. Osnovni polozhennia proektuvannia, 128 DBN V.2.5-75-2013 (2013). (in Ukrainian)
5. Epoian, S. M., & Sukhorukov, D. G. (2012). Osoblyvosti roboty porystoi polimerbetonnoi perehorodky vodoprovodnoho horyzontalnoho vidstiinyka i yii reheneratsiia. *Scientific Bulletin of Construction*, 69, 327-331. (in Ukrainian)
6. Kozachina, V. A. (2015). Modeling of the mass transfer process in a sump during impulse supply of impurities. *Scientific Bulletin of Construction*, 1(79), 162-165. (in Russian)
7. Oleynik, A. Y., & Kolpakova, O. A. (2014). Modelling and calculation of bioilgical wastewater treatment to trickling biofilters. *Environmental safety and natural resources*, 16, 68-86. (in Ukrainian)
8. Oleynik, A. Y., & Airapetyan, T. S. (2015). The modeling of the clearance of waste waters from organic pollutions in bioreactors-aerotanks with suspended (free flow) and fixed biocenoses. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 5, 55-60. doi: <http://doi.org/10.15407/dopovidi2015.05.055> (in Ukrainian)
9. Oliinyk, O. Ya. & Airapetyan, T. S. (2015). Pidvyshchennia efektyvnosti biolohichnoho ochyshchennia stichnykh vod v aerotenkakh za rakhunok zvazhenoho ta zakriplenoho biotsenozu. *Scientific Bulletin of Construction*, 3(81), 106-109. (in Ukrainian)
10. Oliinyk, O. Ya. & Airapetyan, T. S. (2016). Pidvyshchennia efektyvnosti roboty aerotenkiv-vytyskuvachiv za rakhunok zavysloho i zvazhenoho biotsenozu. *Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliky*, 26, 123-130. (in Ukrainian)
11. Oliinyk, O. Ya. & Airapetyan, T. S. Rozrakhunok kysnevoho regymu pry biolohichnomu ochyshchenni stichnykh vod v aerotenkakh-zmishuvachakh z zakriplenym i zvagenym biotsenozom. *Scientific Bulletin of Construction*, 4(98), 187-191. (in Ukrainian)
12. Vasylenko, O. A., Hrabovskyi, P. O., Larkin, H. M., & others. (2010). *Rekonstruktsiia i intensyfikatsiia sporud vodopostachannia ta vodovidvedennia: navch.posib*. K.: IVNVKP «Ukrheliotek». (in Ukrainian)
13. Griborio, A. (2004). Secondary Clarifier Modeling: A Multi-Process Approach. Dissertation and Theses. USA, University of New Orleans Publ. (in English)

Надійшла до редколегії: 13.05.2019

Прийнята до друку: 16.09.2019

# ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

UDC 656.2.025

D. V. LOMOTKO<sup>1\*</sup>, H. O. PRYMACHENKO<sup>2\*</sup>, Y. I. HRYHOROVA<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Transport Systems and Logistics», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 19 55, e-mail den@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-7624-2925

<sup>2\*</sup>Dep. «Transport Systems and Logistics», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 19 55, e-mail gannaprymachenko@gmail.com, ORCID 0000-0001-7326-8997

<sup>3\*</sup>Dep. «Transport Systems and Logistics», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 19 55, e-mail lizkiz1208@gmail.com, ORCID 0000-0003-4351-3263

## THE ROLE OF UKRAINIAN RAILWAY TRANSPORT IN MODERN LOGISTIC PROCESSES

**Purpose.** As Ukraine actively develops its transport and logistics network taking into account the modern changes, the ever-increasing trade volume between the Europe and Asia, presents a good opportunity for increasing interoperability for the networks of international railway transportations. The study is aimed to consider in detail main components of railway interoperability and possible ways for achievement of their interaction. **Methodology.** The idea of interoperability was taken as a basis as a part of logistic system at railway. The crossing of different types of gauges was analyzed on the example of collaboration of Ukraine with European and Asian countries due to the increased freight traffic volume between them. **Findings.** Taking into account the basic technical parameters unifying the railway operation we found out the following principles: to agree upon a set of technical parameters, essential for the interoperability of the entire region; to determine the values and methods for agreement of the technical parameters to achieve technical interoperability; to decide on gradual implementation of technical interoperability, starting from the international corridors in a coordinated way depending on the priorities of international transportations. **Originality.** We considered the value of interoperability as a part of railway logistic systems. **Practical value.** The obtained results of search can be used during implementation of common platform of Ukraine's collaboration with other countries related to the railway interoperability by establishing common base for work in prospective collaboration.

**Keywords:** interoperability; track gauge; logistic systems; supplies chains

### Introduction

In rail transport, the concept of interoperability appeared along with the implementation of European Directives relating to the establishment of the rail market and the increase in the possibility of the transfer of transport by rail between countries [3, 10]. Interoperability of railway transport development is not only a matter of achieving Ukraine's potential but also ensuring the country's access to international markets. Movements of people, goods and information have always been fundamental components of human societies. Contemporary economic processes have been accompanied by

a significant increase in mobility and higher levels of accessibility [16]. Ukraine can take the right steps to seize this opportunity by enhancing development of interoperability in railways through initiatives such as support the investments in railway infrastructure to achieve technical interoperability, harmonization of the regulatory framework for the railway industry (mainly common safety rules), regulation of the border crossing procedures to facilitate international traffic and implementation of the commercial and legal framework for international rail transport [3, 13].

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

**Purpose**

The article is aimed to streamline the study by suggesting that we could offer a common platform of collaboration of Ukraine with other countries for activities related to the railway interoperability subject, preserving common data base for member countries.

**Methodology**

The contemporary transportation market requires from the railway transport of Ukraine the high level of quality, regularity and reliability of transport services in field of logistics [4]. In the conditions of market economy one of the main factors that contributes to the establishing and securing a leading position at the transportation market is the competitiveness of railway transport in different kinds of traffic volumes. In addition, the transport infrastructure state of Ukraine should comply with the requirements of the European Union (EU) [13]. Under the existing state of the Ukrainian railways technical equipment that needs renewals at almost 80%, there also arises the problem of optimization of the passenger complexes functioning process to achieve the effective organization of transportation process [17]. This is necessary in order to obtain economic effect, which will yield the possibility to gradually update the carrier's rolling stock in our days.

Transportations must not be only convenient and affordable, but they should also meet the requirements of safety and high-speed delivery in order to ensure the competitiveness of the railway transport with logistics methods [4]. In view of the extent and complexity of the rail system, it has proved necessary, for practical reasons, to break it down into the following subsystems: infrastructure, control command and signaling, energy, rolling stock, operation and traffic management, maintenance for freight services. For each of these subsystems the essential requirements must be specified and the technical specifications and interfaces to meet these essential requirements [3].

The railway transport improvements should be sent generally on maintenance of trains and wagons. The main improvement tasks regarding the technology of the trains and wagons processing are the reduction of technological operations duration, the decrease of the interoperable downtime dura-

tion for minimizing transportation costs, ease of the wagons and trains replacement during the circulation in the places of destination [15]. One of the means for the achievement of the interoperability is the division of the European railway system into sub-systems:

- infrastructure (rails, switches, constructions),
- energy (electrification equipment, overhead trolley lines),
- control, command and signaling (equipment for ensuring the safety, control and regulation of the movement of trains),
- interface (current collectors, wheel-rail interface, etc.) [25].

The idea of interoperability it is a part of logistic system work in the world. To implement interoperability into Ukrainian's railway logistic system and around the world means to eliminate the operational barriers in developing flawless international transport services. To make railway interoperable with other railways means to harmonize the technical parameters, operational procedures and the legal environment of the two entities. It is a complicated goal, as it depends on the interoperability of many other entities in the countries to which the two railways belong. International experience shows that achieving railway interoperability may become in some cases an exceptionally difficult task, as it requires strong political support and active involvements from all involved countries to harmonize national policies and practices [10]. Railway interoperability can be achieved through a coordinated approach of the member countries in three major directions shown in Figure 1. There are unified contractual obligations vis-a-vis customers from origin to destination; common technical parameters of railways infrastructure and rolling stock; harmonized operational practices over an entire international route.

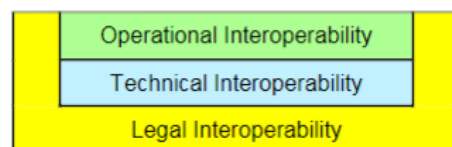


Fig. 1. Components of railway interoperability

Technical interoperability is usually the most expensive component to be achieved compared with the operational and legal components of interoperability. It requires very large investments.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Most major railway corridors connecting between two and more railways will include at least one exchange of gauge and so the common technical parameters must be agreed upon the technical means necessary to allow trains to continue their routes through destination, running over different gauge of railways. Possible list of countries where Ukraine can have a common platform of collaboration is shown in Table 1 [16].

Currently, when large railway networks are already built on different track gauges, the efforts are directed to develop and implement technical and operational procedures for increasing the interoperability between the existent different track railways by reducing the operating time in the track changing stations and diminishing the operating costs of railway transport from origin to destination.

Collaboration is the highest level of decision making. It involves political alliances between heads of state, parliaments, and governments along the corridor. Cooperation is mutual support by ministries and agencies. Management refers to the effective running of the corridor. An agreement refers to any form of document, binding or not, that reflects the willingness and commitment of the parties concerned by the development of the corridor and endorsed by them, including a memorandum of understanding, a convention, a treaty, or other types of agreements [20]. Joining the existing international railway conventions is the only way to comprehensively address the legal issues of international rail transport across the entire continent and in relationship with Europe. After joining one of the existing international railways conventions, neighboring countries or all countries along a corridor may sign subsequent bilateral or multilateral agreements for joint implementation of their agreed up on obligations for managing international railway transport services, but only in the general framework established by the international convention they belong to [19]. Figure 2 presents schematically the cascade of agreements in their logical order: governmental agreements, agreements of state institutions involved in border crossing procedures, agreements of neighboring railways for handing over the train at border, agreements between railways along the corridor for providing joint transport services.

Table 1

## List of countries –Track Gauges

| Nr | Country      | Track gauge [mm] |      |      |
|----|--------------|------------------|------|------|
|    |              | 1676             | 1520 | 1435 |
| 1  | Ukraine      |                  |      |      |
| 2  | Belarus      |                  |      |      |
| 3  | Poland       |                  |      |      |
| 4  | Slovakia     |                  |      |      |
| 5  | Romania      |                  |      |      |
| 6  | Moldova      |                  |      |      |
| 7  | Bolgaria     |                  |      |      |
| 8  | Turkey       |                  |      |      |
| 9  | Georgia      |                  |      |      |
| 10 | Armenia      |                  |      |      |
| 11 | Azerbaijan   |                  |      |      |
| 12 | Russian Fed. |                  |      |      |
| 13 | Kazakhstan   |                  |      |      |
| 14 | Uzbekistan   |                  |      |      |
| 15 | Mongolia     |                  |      |      |
| 16 | Pakistan     |                  |      |      |
| 17 | Nepal        |                  |      |      |
| 18 | India        |                  |      |      |
| 19 | China        |                  |      |      |



Fig. 2. Layers of legal interoperability

As customers are interested in door to door transport solutions, railways must develop adequate interfaces with road, water and air transport to become part of logistic chains. It should be a vital objective for the railways, knowing that the

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

decision of choosing the routes and modes of transport is usually made not by shippers, but by logistic operators. Any transport corridor will attract traffic and trade only when it will be competitive in the context of supply chains. The needs of specific supply chains, the flexibility of the inter-modal services and the provided value-added services will play paramount roles in the logistic decisions. These requirements do not apply to particular sections of the international routes, but to entire transport-logistic chains. However, infrastructure alone would not facilitate the movement of people and goods between countries if non-physical impediments are not removed. Efforts to facilitate transport are paramount to the smooth movement of goods and people especially in international traffic, as transport facilitation contributes to the diminishing of the economic distance to markets. Transport facilitation can only serve its purpose if based on harmonized legislation, institutions, and practices, at national, sub-regional, regional and international level [2].

### Findings

The reality illustrates that it is not easy to define and to put in place a harmonized concept for improving the interoperability of railways across the region. One of the main difficulties is the huge diversity of countries and railways in region. But presently, all European countries are members of The Convention concerning International Carriage by Rail (COTIF) and a lot of barriers to the interoperability of railways, are eliminated. The railway traffic between the European countries is based on these rules and regulations. Also, the Organization for Cooperation of Railways (OSJD) was established as the equivalent of the International Union of Railways to create and improve the coordination of international rail transport. Concerning especially the transports between Europe and Asia, it has helped develop cooperation between railway companies and with other international organizations. The members of this organization created an international transport law [19]. Following from our search work we assumed that both of these organizations can be used as a ground to collaboration of all countries from the list in Table 1 guided by the principles of interoperability set forth in this work.

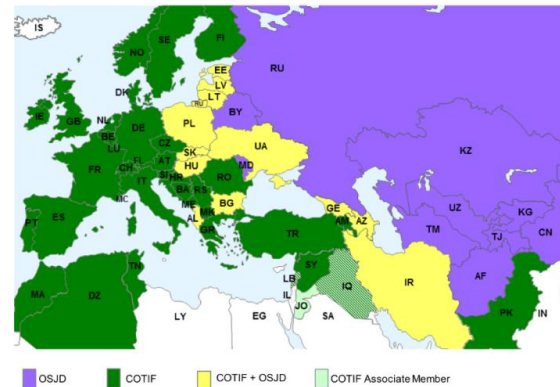


Fig. 3. COTIF / OSJD membership

As we see in Figure 3 Ukraine is a member of both organizations what gives geographically great opportunity for development in interoperable field in the direction with Europe and Asia. Interoperability can use its worldwide influence to invite the experts from OSJD, COTIF and from other relevant international entities to support the efforts of the railways of the regions in this direction. To become competitive on international railway transport is a very challenging task which requires cooperation of countries, adaptability of railways to the market demands and continuous improvement of the quality of railway transport services. Once a system is interoperable it opens the door to new markets, and not just in Europe. Railways have always needed to conform to standards and with an assurance regime to certify that products and systems comply. The EU interoperability regulations provide a common system for verification and approval across all of Europe [2]. The implementation of the interoperability may help the member countries to achieve this objective in a coordinated approach and using working methods adapted to the needs and possibilities of each country.

### Originality and practical value

The competitiveness of the international railway transport is a matter of active participation in a coordinated approach of all involved parties, as in all cases of logistic chains, the quality of operation of international traffic along a certain route is defined by the possibility of interactions of transport modes on the way between countries, optimized material and informational flows also. Conducted research on the example of Asian and European countries gave us the opportunity to consider Ukraine as

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

a possible participant in interoperable work with Asian countries in connection because of the growth of freight traffic volumes to the country. Presently, maritime transport is by far the dominating mode of transport in the Euro-Asian trade. However, by integrating railways as part of the logistic chains, land transport maybe come an important complement to shipping services and may increase the reliability of high-value and time-sensitive supply chains using all the basics of interoperability. That means the ability of a rail system to allow the safe and uninterrupted movement of trains which accomplish the required levels of performance for these lines. This ability depends on all the regulatory, technical and operational conditions which must be met to satisfy the essential requirements.

In the conducted studies, the analysis of possible variants of transportation logistics from Eastern Ukraine to Poland was made. For comparison, seven possible variants of transportation and a new project solution is selected. Based on the SWOT analysis, as well as marketing and logistics research on project variants, it has been proved that the proposed direct rail route can compete on an equal footing with existing variants of transport [1].

Recently, the demand for international transportation and transport services has increased significantly among Ukrainians and residents of Europe. But nowadays, the clients most often act as a logistician of their transportation, without having complete data on the reliability and safety of transport networks, rolling stock of different modes of transport, schedules and routes.

The introduction of logistic approaches to the development of Ukraine's transport system will allow the client to make his own decision about the option of a trip depending on the most important factors and characteristics of transport service for him. Ukrzaliznytsya (UZ) and Polish Railways (PKP) have a unique opportunity to assist clients in providing information and logistic services, as well as in selecting the most favorable transportation options. For this purpose, it is necessary to organize traffic between the largest cities of Europe and to enable goods to cross the border conveniently and quickly. Therefore, one of the most promising ways of solving this problem is to diversify the activity of railway transport in the market of transport and international transportation services. Expanding the network of international rail

routes will attract goods from other modes of transport, as well as increase the percentage of tourists who plan to visit popular corners of both Ukraine and other EU countries [12, 16].

### Conclusions

Opening the railway market for services requires the implementation of the interoperability conditions, to integrate railway systems and enable the movement of passenger and freight trains without unnecessary restrictions arising from the technical and organizational differences in these systems. Allowing access of interoperable trains to interoperable networks is preceded by activities that allow the assessment of the fulfillment of all basic conditions in terms of technical compatibility, performance, and organization of the trains [11]. Taking into consideration the huge financial impact of eliminating the existing technical barriers in railway transportation system, it is highly advisable to develop a strategy for achieving the technical interoperability in stages, starting with the major railway corridors. Railway in the region must be aware that the smooth interoperation of different modes of transport will facilitate more efficient use of the existing infrastructure and will increase the efficiency of transport system. Finally, high-performance transport corridors using intermodal transport chains and integrated routes will facilitate more rapid economic growth. All these challenges require further harmonized efforts of the member countries to identify appropriate solutions to complex issues, as: a) intermodal trans-shipment terminals and logistics centers; b) trans-shipment technologies; c) electronic fare management systems across different transport modes; d) transport management across different modes of transport. The rail transport mode is the more effective and efficient by the fact it connects the most populated areas at increasingly high speeds, providing social cohesion at national, European and international level. The interoperability and resilience of the rail systems are the key challenges to strengthen the competitiveness of rail products and operations. Moreover, the increasing speed opens the door to new services, crossing borders [7]. This issue is highlighted as the next essential step for enhancing the railway transport competitiveness, once the railway interoperability is achieved.

## LIST OF REFERNECE LINKS

1. Альошинський, Є. С. Дослідження перспектив розвитку логістики пасажирських залізничних перевезень в країнах Східної Європи / Є. С. Альошинський, Г. О. Примаченко // *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences.* – Budapest, 2017. – Vol. 15. – Iss. 140. – P. 52–55.
2. Ломотко, Д. В. Формування транспортного процесу залізниць України на базі логістичних принципів : автореф. дис. ... доктора техн. наук : 05.22.01 / Ломотко Денис Вікторович ; Укр. держ. акад. залізн. трансп. – Харків, 2008. – 39 с.
3. Примаченко, Г. О. Рационалізація технології пасажирських залізничних перевезень за рахунок логістичного підходу в Україні / Г. О. Примаченко, Є. І. Григорова // *Вагонний парк.* – 2018. – № 1–2. – С.37–39.
4. Aleshinskiy, E. S. Using the Petri nets for forming the technological lines of the passenger trains processing in Ukraine / E. S. Aleshinskiy, V. S. Naumov, H. O. Prymachenko // *Archives of Transport.* – 2016. – Vol. 38. – Iss. 2. – P. 7–15. doi: 10.5604/08669546.1218789
5. Collart-Dutilleul, S. Interoperability, performance and resilience of railway transport systems / S. Collart-Dutilleul, F. Rotoli // *2015 Inter. Conf. on Ind. Eng. and Systems Management.* – Spain, 2015. – P. 23–35. doi:10.1109/iesm.2015.7380124
6. Concept of diversification activities of railway transport of Ukraine through the establishment of regional transport – logistical clusters // E. S. Alyoshinskiy, E. I. Balaka, S. O. Svetlichna, G. A. Sivakoneva // *Railway transport of Ukraine.* – 2012. – № 6 (97). – P. 24–28.
7. Darlington, P. Interoperability – A necessary complication [Electronic resource] / P. Darlington. – Available at: <https://www.railengineer.co.uk/2015/08/12/interoperability-a-necessary-complication/> – Title from the screen. – Accessed : 18.11.2019.
8. European Parliament, Council of the European Union. Directive 2008/57/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 on the interoperability of the rail system within the Community [Electronic resource]. – Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L:2008:191:TOC>
9. Galushko, D. Study on Corridors [Electronic resource]. – Available at: <https://cutt.ly/1eFwy2R> – Title from the screen. – Accessed : 15.11.2019.
10. GS1 Logistics Interoperability Model Application Standard [Electronic resource]. – Available at: [https://www.gs1.org/docs/EDI/GS1\\_Logistics\\_Interoperability\\_Model\\_Application\\_Standard.pdf](https://www.gs1.org/docs/EDI/GS1_Logistics_Interoperability_Model_Application_Standard.pdf)
11. Interoperability [Electronic resource] / Technology platform of Czech. – Available at: <https://www.sizi.cz/interoperability> – Title from the screen. – Accessed : 18.11.2019.
12. Jacyna, M. A holistic approach for analyzing the interoperability of a railway system / M. Jacyna // *Sustainable Development and Planning VII.* – 2015. – Vol. 193. – P. 23–45. doi:10.2495/sdp150341
13. Kunaka, C. Trade and Transport Corridor Management Toolkit / C. Kunaka, R. Carruthers. – The World Bank, 2014. – 411 p. doi:10.1596/978-1-4648-0143-3
14. List of track gauges [Electronic resource] / Wikipedia. – Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_track\\_gauges](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_track_gauges) – Title from the screen. – Accessed : 18.11.2019.
15. Olievski, V.-N. Enhancing Interoperability for facilitation of International Railway Transport [Electronic resource]. – Available at: <https://cutt.ly/meFohJN> – Title from the screen. – Accessed : 15.11.2019.
16. Prymachenko, H. O. Analysis of the Current State of Logistics in Railway Passenger Transport in the Countries of Eastern Europe / H. O. Prymachenko // *Bulletin OSJD.* – 2018. – № 1 (357). – P. 15–18.
17. Prymachenko, H. Development of intermodal transport and logistics schemes for passenger transportation by railway transport within Ukraine-Europe direction / H. Prymachenko // *Scientific technical union of mechanical engineering “Industry-4.0”.* – Bulgaria, 2017. – Vol. 3. – Iss. 2. – P. 258–260.
18. Prymachenko, G. O. Development of proposals for increasing the profitability of passenger rail transportation in Ukraine / G. O. Prymachenko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* – 2015. – Vol. 6, Iss. 3 (78). – P. 33–39. doi:10.15587/1729-4061.2015.56580
19. Rodrigue, J.-P. The geography of transport systems [Electronic resource] / J.-P. Rodrigue, C. Comtois, B. Slack. – Available at: [https://transportgeography.org/wp-content/uploads/GTS\\_Third\\_Edition.pdf](https://transportgeography.org/wp-content/uploads/GTS_Third_Edition.pdf) – Title from the screen. – Accessed : 15.11.2019.
20. Stroiko, T. Transport Infrastructure of Ukraine: The Modern Realities and Development Prospects / T. Stroiko, V. Bondar // *Baltic Journal of Economic Studies.* – 2017. – Vol. 3. – Iss. 2. – P. 141–146. doi:10.30525/2256-0742/2017-3-2-141-146

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

21. Szkopiński J. The certain approach to the assessment of interoperability of railway lines / J. Szkopiński // The Archives of Transport. – 2014. – Vol. 29. – Iss. 1. – P. 65-75. doi: 10.5604/08669546.1146969.
22. Technical Specifications for Interoperability [Electronic resource] / Wikipedia. – Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Technical\\_Specifications\\_for\\_Interoperability](https://en.wikipedia.org/wiki/Technical_Specifications_for_Interoperability) – Title from the screen. – Accessed : 18.11.2019.
23. Towards a Harmonized Legal Regime on Transport Facilitation in the ESCAP Region Guidelines [Electronic resource]. – Available at: <https://cutt.ly/jeJSQmA> – Title from the screen. – Accessed : 18.11.2019.
24. UIC Statistics (on-line statistics) [Electronic resource]. – Available at: <https://uic.org/support-activities/statistics/> – Title from the screen. – Accessed : 18.11.2019.
25. Westerheim, H. Interoperability in supply chain and logistics: What can the Common Framework offer?—A scientific evaluation / H. Westerheim, J. Baalsrud Hauge // International Journal of Advanced Logistics. – 2015. – Vol. 4. – Iss. 1. – P. 9–16. doi:10.1080/2287108x.2015.1015472

Д. В. ЛОМОТЬКО<sup>1\*</sup>, Г. О. ПРИМАЧЕНКО<sup>2\*</sup>, Є. І. ГРИГОРОВА<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Транспортні системи та логістика», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейербаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 19 55, ел. пошта [den@kart.edu.ua](mailto:den@kart.edu.ua), ORCID 0000-0002-7624-2925

<sup>2\*</sup>Каф. «Транспортні системи та логістика», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейербаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 19 55, ел. пошта [gannaprymachenko@gmail.com](mailto:gannaprymachenko@gmail.com), ORCID 0000-0001-7326-8997

<sup>3\*</sup>Каф. «Транспортні системи та логістика», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейербаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 19 55, ел. пошта [lizkiz1208@gmail.com](mailto:lizkiz1208@gmail.com), ORCID 0000-0003-4351-3263

## РОЛЬ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ УКРАЇНИ В СУЧАСНИХ ЛОГІСТИЧНИХ ПРОЦЕСАХ

**Мета.** Оскільки Україна активно розвиває свою транспортно-логістичну мережу з урахуванням сучасних змін, обсяг торгівлі між Європою й Азією, який постійно зростає, представляє гарну можливість підвищення функціональної сумісності мереж для міжнародних залізничних перевезень. У дослідженні передбачено детально розглянути основні компоненти сумісності залізниць і можливі шляхи досягнення їх взаємодії. **Методика.** За основу була взята ідея інтероперабельності як складової логістичної системи на залізниці. Проаналізовано перетинання різних типів колій на прикладі співпраці України з країнами Європи й Азії через збільшення товарообігу між ними. **Результати.** З огляду на загальні технічні параметри, які об'єднують роботу залізниць, ми з'ясували такі принципи: узгодити набір технічних параметрів, необхідних для взаємодії в усьому регіоні; виявити значення й методи узгодження технічних параметрів для досягнення технічної сумісності; прийняти рішення про поступове впровадження технічної сумісності, починаючи з міжнародних коридорів, скоординовано залежно від пріоритетів міжнародних перевезень. **Наукова новизна.** У роботі було розглянуто значення сумісності як частини залізничних логістичних систем. **Практична значимість.** Отримані результати пошуку можуть бути використані під час впровадження загальної платформи співпраці України з іншими країнами, пов'язаними з експлуатаційною сумісністю залізниць, шляхом створення загальної бази для роботи в перспективному співробітництві.

*Ключові слова:* інтероперабельність; колія; логістичні системи; канали постачання

Д. В. ЛОМОТЬКО<sup>1\*</sup>, А. А. ПРИМАЧЕНКО<sup>2\*</sup>, Е. І. ГРИГОРОВА<sup>3\*</sup><sup>1\*</sup>Каф. «Транспортные системы и логистика», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 19 55, эл. почта den@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-7624-2925<sup>2\*</sup>Каф. «Транспортные системы и логистика», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 19 55, эл. почта gannaprymachenko@gmail.com, ORCID 0000-0001-7326-8997<sup>3\*</sup>Каф. «Транспортные системы и логистика», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 19 55, эл. почта lizkiz1208@gmail.com, ORCID 0000-0003-4351-3263

## РОЛЬ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА УКРАИНЫ В СОВРЕМЕННЫХ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

**Цель.** Поскольку Украина активно развивает свою транспортно-логистическую сеть с учетом современных изменений, постоянно растущий объем торговли между Европой и Азией предоставляет хорошую возможность повышения функциональной совместимости сетей для международных железнодорожных перевозок. В исследовании предусмотрено подробно рассмотреть основные компоненты совместимости железных дорог и возможные пути достижения их взаимодействия. **Методика.** Как основа была взята идея интероперабельности как части логистической системы на железной дороге. Проанализировано пересечение различных типов колеи на примере сотрудничества Украины со странами Европы и Азии в связи с увеличением грузопотока между ними. **Результаты.** Учитывая общие технические параметры, объединяющие работу железных дорог, мы определили следующие принципы: согласовать набор технических параметров, необходимых для взаимодействия во всем регионе; выявить значения и методы согласования технических параметров для достижения технической совместимости; принять решение о постепенном внедрении технической совместимости, начиная с международных коридоров, скоординированным образом в зависимости от приоритетов международных перевозок. **Научная новизна.** В работе было рассмотрено значение совместимости как части железнодорожных логистических систем. **Практическая значимость.** Полученные результаты поиска могут быть использованы при внедрении общей платформы сотрудничества Украины с другими странами, связанными с эксплуатационной совместимостью железных дорог, путем создания общей базы для работы в перспективном сотрудничестве.

**Ключевые слова:** интероперабельность; колея; логистические системы; каналы поставок

### REFERENCES

1. Aleshinskiy, E. S., & Prymachenko, G. O. (2017). Research prospects for the development of passenger rail transport logistics in Eastern Europe. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, 15(140), 52-55. (in Ukrainian)
2. Lomotko, D. V. (2008). *Formuvannia transportnoho protsesu zaliznyts Ukrainy na bazi lohistychnykh pryntsyppiv*. (Avtoreferat dysertatsii doktora tekhnichnykh nauk). Ukrajins'kyj derzhavnyj universytet zaliznychnogho transport. (in Ukrainian)
3. Prymachenko, G. O. & Ghryghorova Je. I. (2018). Racionalizacija tekhnologhiji pasazhyrs'kykh zaliznychnykh perevezenj za rakhunok lohistychnogho pidkhodu v Ukrajinu. *Vaghonnyj park*, 1-2, 37-39. (in Ukrainian)
4. Aleshinskiy, E. S., Naumov, V. S., & Prymachenko, H. O. (2016). Using the Petri nets for forming the technological lines of the passenger trains processing in Ukraine. *Archives of Transport*, 38(2), 7–15. doi: 10.5604/08669546.1218789 (in English)
5. Collart-Dutilleul, S. & Rotoli, F. (2015). Interoperability, performance and resilience of railway transport systems. *2015 Inter. Conf. on Ind. Eng. and Systems Management*, 23–35. doi:10.1109/iesm.2015.7380124 (in English)
6. Alyoshinskiy, E. S., Balaka, E. I., Svetlichna, S. O., & Sivakoneva, G. A. (2012). Concept of diversification activities of railway transport of Ukraine through the establishment of regional transport – logistical clusters. *Railway transport of Ukraine*, 6(97), 24–28. (in English)

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

7. Darlington, P. Interoperability – A necessary complication. Retrieved from <https://www.railengineer.co.uk/2015/08/12/interoperability-a-necessary-complication/> (in English)
8. European Parliament, Council of the European Union. Directive 2008/57/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 on the interoperability of the rail system within the Community Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L:2008:191:TOC> (in English)
9. Galushko, D. Study on Corridors. Retrieved from <https://cutt.ly/1eFwy2R> (in English)
10. GS1 Logistics Interoperability Model Application Standard. Retrieved from [https://www.gs1.org/docs/EDI/GS1\\_Logistics\\_Interoperability\\_Model\\_Application\\_Standard.pdf](https://www.gs1.org/docs/EDI/GS1_Logistics_Interoperability_Model_Application_Standard.pdf) (in English).
11. Interoperability. Retrieved from <https://www.sizi.cz/interoperability> (in English)
12. Jacyna, M. (2015). A holistic approach for analysing the interoperability of a railway system. *Sustainable Development and Planning VII*, 193, 23-45. doi:10.2495/sdp150341 (in English)
13. Kunaka, C., & Carruthers, R. (2014). Trade and Transport Corridor Management Toolkit. doi:10.1596/978-1-4648-0143-3 (in English)
14. List of track gauges. Retrieved from: [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_track\\_gauges](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_track_gauges) (in English)
15. Olievski, V.-N. Enhancing Interoperability for facilitation of International Railway Transport. Retrieved from <https://cutt.ly/meFohJN> (in English)
16. Prymachenko, H. O. (2018). Analysis of the Current State of Logistics in Railway Passenger Transport in the Countries of Eastern Europe. *Bulletin OSJD*, 1(357), 15-18. (in English)
17. Prymachenko, H. (2017). Development of intermodal transport and logistics schemes for passenger transportation by railway transport within Ukraine-Europe direction. *Scientific technical union of mechanical engineering "Industry-4.0"*, 3(2), 258-260. (in English)
18. Prymachenko, G. O. (2015). Development of proposals for increasing the profitability of passenger rail transportation in Ukraine. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(3(78)), 33-39. doi:10.15587/1729-4061.2015.56580 (in English)
19. Rodrigue, J.-P., Comtois, C., & Slack, B. The geography of transport systems. Retrieved from [https://transportgeography.org/wp-content/uploads/GTS\\_Third\\_Edition.pdf](https://transportgeography.org/wp-content/uploads/GTS_Third_Edition.pdf) (in English)
20. Stroiko, T., & Bondar, V. (2017). Transport infrastructure of Ukraine: the modern realities and development prospects. *Baltic Journal of Economic Studies*, 3(2), 141–146. doi:10.30525/2256-0742/2017-3-2-141-146 (in English)
21. Szkopiński, J. (2014). The certain approach to the assessment of interoperability of railway lines. *The Archives of Transport*, 29(1), 65-75. doi: 10.5604/08669546.1146969 (in English)
22. Technical Specifications for Interoperability. Retrieved from [https://en.wikipedia.org/wiki/Technical\\_Specifications\\_for\\_Interoperability](https://en.wikipedia.org/wiki/Technical_Specifications_for_Interoperability) (in English)
23. Towards a Harmonized Legal Regime on Transport Facilitation in the ESCAP Region Guidelines. Retrieved from <https://cutt.ly/jeJSQmA> (in English)
24. UIC Statistics (on-line statistics). Retrieved from <https://uic.org/support-activities/statistics/> (in English).
25. Westerheim, H., & Baalsrud Hauge, J. (2015). Interoperability in supply chain and logistics: What can the Common Framework offer? – A scientific evaluation. *International Journal of Advanced Logistics*, 4(1), 9-16. doi:10.1080/2287108x.2015.1015472 (in English)

Received: May 16, 2019

Accepted: September 12, 2019

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

УДК 656.224/.225:625.112-047.37

М. Б. КУРГАН<sup>1</sup>, В. Г. ВЕРБИЦЬКИЙ<sup>2</sup>, Д. М. КУРГАН<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Проектування і будівництво доріг», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056)373 15 48, ел. пошта kunibor@gmail.com, ORCID 0000-0002-8182-7709

<sup>2</sup>Каф. «Програмне забезпечення автоматизованих систем», Запорізька державна інженерна академія, пр. Соборний, 226, Запоріжжя, Україна, 69006, тел. +38 (061) 227 12 31, ел. пошта oxsidan@ukr.net, ORCID 000-0002-1039-8548

<sup>3\*</sup>Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, ел. пошта kurhan.d@gmail.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДМІННОСТЕЙ УКРАЇНСЬКОЇ ТА ЄВРОПЕЙСЬКОЇ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

**Мета.** У роботі передбачено проаналізувати основні відмінності української залізничної інфраструктури від інфраструктури країн, з якими Україна межує на західному кордоні, та країн, до яких може бути заведена колія 1 520 мм, враховуючи напрямок основного вантажопотоку зі Сходу на Захід. Також передбачено надати кількісну та якісну оцінку технічної сумісності та інших показників залізничних мереж відносно території України. **Методика.** Для отримання даних щодо інфраструктури й обсягів перевезень в окреслених завданнях країнах проведено огляд світової літератури з теми роботи з використанням повнотекстових і статистичних баз даних. Методика передбачає аналіз і систематизацію отриманої інформації для встановлення відповідних залежностей, висновків і пропозицій. **Результати.** Доведено, що міжнародні перевезення, які здійснюються через територію України, мають певні особливості. Зміна стандартів залізничної колії на кордоні з європейськими країнами змушує шукати найбільш раціональні маршрути для транспортування вантажів (врахування дальності, технічного стану й параметрів міжнародного транспортного коридору (МТК), швидкості доставки тощо) і раціональні технології передачі вантажів на прикордонних пунктах, що дозволить вивести ці перевезення на інноваційний шлях розвитку. **Наукова новизна.** Базуючись на позитивному досвіді насамперед країн Європейського Союзу, автори показали, що за умов наявності ефективною транспортної мережі та розвинутої системи передачі вантажів у пунктах зміни стандартів залізничної інфраструктури значно підвищуються як внутрішні, так і транзитні вантажопотоки, що дає можливість збільшити привабливість країни в міжнародній системі перевезень. **Практична значимість.** На основі отриманих результатів показано, що залізничний транспорт України може бути інтегрований у європейську транспортну мережу за умови: виконання модернізації колії, штучних споруд та інших пристроїв, що входять до інфраструктури залізниці; упровадження нового рухомого складу, що забезпечить перевезення пасажирів денними поїздами з необхідним комфортом і максимально встановленою швидкістю.

**Ключові слова:** залізничний транспорт; інфраструктура залізниці; технічна сумісність залізниць; швидкість руху; міжнародний транспортний коридор

#### Вступ

Залізнична мережа України органічно вписується у європейську через Польщу, Словаччину, Угорщину, Румунію, Молдову, Болгарію (поромна переправа). Україна має надзвичайно

вигідне географічне положення, пов'язане з її близькістю до світових, зокрема центрально- і західноєвропейських, ринків [20]. Однак вигідне, з погляду транспортних перевезень, геопо-

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

літичне розташування України не використовується повною мірою [23].

Стратегічним завданням науково-технічної політики в галузі транспортної системи України є вихід на світовий рівень за технічними параметрами та якістю послуг, що реалізуються транспортом. У зв'язку з цим першочерговим і пріоритетним завданням для транспортної галузі є розширення наукових досліджень з проблем створення прогресивних технологій організації міжнародних вантажних перевезень, формування та забезпечення функціонування ефективної транспортної системи, розробка принципово нових систем управління з використанням прогресивних інформаційних технологій.

Ширина залізничної колії у всьому світі розвивалась по-різному з різних історичних причин. Якщо більшість центральних і східних країн використовують мережу колій стандарт-

ної ширини 1 435 мм, то країни СНД використовують ширококоліїну мережу з колією 1 520 мм.

Сьогодні наявна ширококоліїна мережа 1 520 мм фактично закінчується на східному кордоні Євросоюзу. Деякі ширококоліїні коридори заходять на територію Євросоюзу, наприклад, з України до Катовіце в Польщі, з України до Захоні в Угорщині, і з українського міста Ужгород до Кошице і до Черна-над-Тисою в Словаччині (рис. 1, рисунок створено на основі відкритого використання Google Карт).

Перша спроба створення безперервного залізничного ширококоліїного сполучення між Азією та Європою започаткована 2001 року, коли Україна підписала меморандум про участь у міжконтинентальному транспортному проєкті століття. Проєкт передбачав продовжити залізничну колію (113 км) до ст. Богумін (Чехія) [1]. На жаль, цей проєкт не вдалося здійснити.

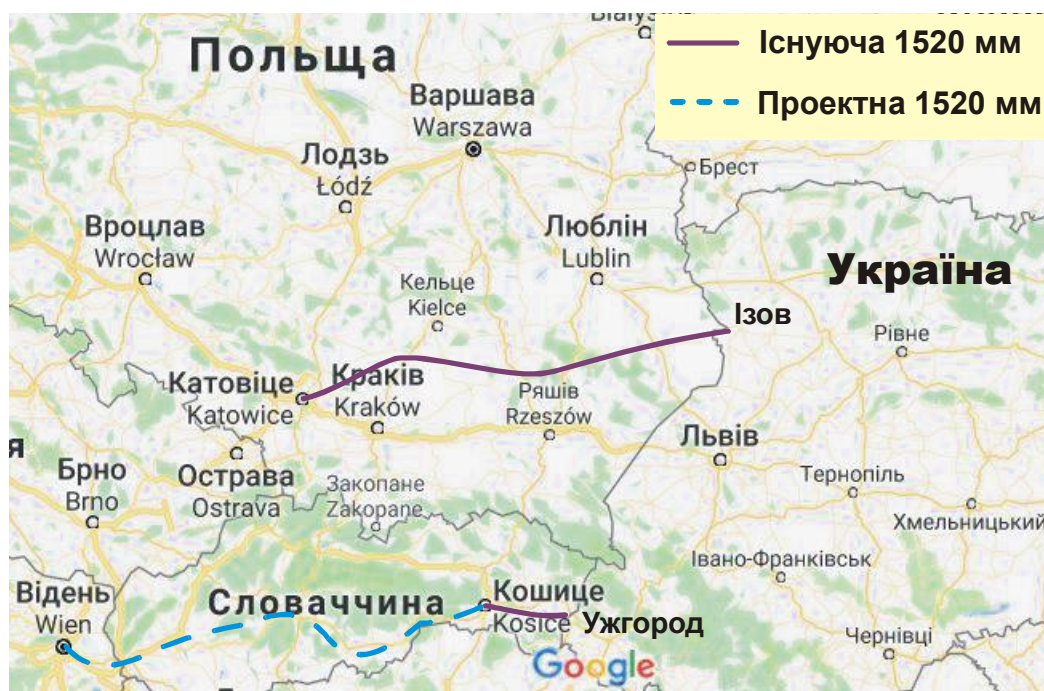


Рис. 1. Україна і суміжні з нею країни

Fig. 1. Ukraine and its neighboring countries

Через десять років повернулись до ідеї продовження ширококоліїного залізничного коридору. Ширококоліїною залізницею з Кошице (Словаччина) заплановано з'єднати дві столиці держав-членів Євросоюзу – Відень (Австрія) та

Братиславу (Словаччина). Цей регіон представляє міжнародний центр перевезень з ідеальним розташуванням на перетині кількох європейських транспортних ліній, наприклад, пріоритетних ліній Транс'європейських транспортних

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

мереж TEN17 (Париж – Відень – Братислава / Будапешт), TEN22 (Афіни – Відень – Нюрнберг) і TEN23 (Гданськ – Відень – Трієст).

Для реалізації проекту широкої колії до Відня потрібно, щоб залізнична інфраструктура була приведена до стандартів ЄС на території України, а також у Словаччині від українського кордону до Кошиць. Загальний час перевезення від Східного Китаю до Відня становитиме 15 діб. Такий час є значно коротшим порівняно з сьогоdnішніми залізничними перевезеннями, що тривають 23 доби, та морськими перевезеннями, що тривають від 25 до 45 діб [3].

Зважаючи на вищевикладене, дослідження відмінностей української залізничної інфраструктури розглянуто як для країн, з якими Україна межує на західному кордоні, так і для країн, до яких може бути заведена широка колія (Австрія, Чехія).

### Мета

У роботі передбачено проаналізувати основні відмінності української залізничної інфраструктури від інфраструктури країн, з якими Україна межує на західному кордоні, та країн, до яких може бути заведена колія 1 520 мм, враховуючи напрямок основного вантажопотоку зі Сходу на Захід. Також передбачено надати кількісну та якісну оцінку технічної сумісності й інших показників залізничних мереж відносно території України.

### Методика

Для отримання даних щодо інфраструктури й обсягів перевезень в окреслених завданнях країнах автори провели огляд світової літератури з теми роботи з використанням повнотекстових і статистичних баз даних. Методика передбачає аналіз і систематизацію отриманої інформації для встановлення відповідних залежностей, висновків і пропозицій.

*Австрійські федеральні залізниці (Österreichische Bundesbahnen – ÖBB).* Австрія, територія якої витягнута у вигляді клина, сильно звуженого до заходу, займає небагато місця на карті Європи, її площа становить 83,871 тис. кв. км. Географічне положення Австрії сприяє її співпраці з іншими європейськими країнами,

безпосередньо вона межує з сімома державами. Найбільш важлива за економічним потенціалом і найбільш густонаселена східна частина країни має кордон із Чехією і Словаччиною, на півночі з Угорщиною, на південному сході зі Словенією. Це забезпечує Австрії сприятливі транспортно-географічні умови для взаємовигідної торгівлі із сусідніми країнами.

На заході Австрія межує зі Швейцарією і тісно пов'язаним з нею Ліхтенштейном. На північному заході й півдні до неї примикають Німеччина й Італія. Розташування в центрі Європи робить Австрію перехрестям ряду транс'європейських меридіональних шляхів (зі скандинавських країн і держав Центральної Європи через альпійські перевали Бреннер і Земмерінг в Італію та інші країни).

Транспортна система Австрії прекрасно розвинена й ефективна. Протяжність залізниць становить 5 624 км, з них 56,9 % електрифіковані. На лініях з електричною тягою широкої колії – однофазний струм 15 кВ, 16,7 Гц. На вузькоколіїних лініях – однофазний струм 6 кВ, 25 Гц. Спосіб струмознімання – від контактного проводу з ланцюговою підвіскою. Залізнична мережа Австрії складається з магістральних ліній: Відень – Лінц – Зальцбург – Інсбрук, Відень – Грац, Відень – Філлах. Чотири залізничні лінії перетинають Альпи: одноколійна лінія через Тауерн, двоколіїні через Бреннер, Земмерінг, Шобер.

Протяжність приватних залізниць становить близько 600 км. Загальна кількість тягового складу Австрійських федеральних залізниць – понад 1,6 тис. одиниць, зокрема понад 700 електровозів і близько 500 тепловозів. Із 30 тис. одиниць рухомого складу державних залізниць майже 25 тис. одиниць складають вантажні вагони.

Наприклад, у 2016 р. по австрійських залізницях перевезено майже 85 млн т вантажів. При цьому на перевезення у внутрішньому сполученні припадало понад 30 %, на транспортне обслуговування зовнішньоторговельного вантажообігу – майже 50 %, а на транзитні перевезення – приблизно 20 %. Пасажирські перевезення становлять майже 188 млн пасажирів [21].

Залізничний транспорт нерентабельний передусім у зв'язку зі збитковою експлуатацією залізничних колій місцевого значення. Австрія

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

має залізничне сполучення з більшістю європейських країн. Мережа залізниць Австрії не така велика, як у багатьох інших країнах Європи. Пояснюється це тим, що значну частину території Австрії займають гори. Проте поїзд залишається найзручнішим засобом пересування, особливо на великі відстані.

На продовженні коридору в бік Словаччини рух пасажирських поїздів було переключено на нову лінію Відень – Братислава через Парндорф – Кіттзе, максимальна швидкість руху поїздів на якій дорівнює 160 км/год. Завдяки цьому тривалість поїздки швидким поїздом за маршрутом Відень – Південна – Братислава – Петржалка зараз становить усього 45 хв, що дає поїзду помітну перевагу перед автомобілем, особливо з урахуванням тривалого очікування при перетині кордону по автомобільній дорозі [2].

Польські державні залізниці (*Polskie Koleje Państwowe – PKP SA*). Протяжність ліній 19,290 тис. км, зокрема магістральних колій 4 235 км, першорядних 10 551 км, другорядних 3 815 км, ділянок місцевого значення 2 561 км. Частка виконуваної експлуатаційної роботи відповідно становить: 43,6; 48,6; 6,4; 1,4 % [15].

Основні залізничні станції і вузли: Варшава, Ольштин, Катовіце, Вроцлав, Гданськ, Краків, Люблін. Прикордонні переходи й пункти перевантаження з українськими залізницями: Медика – Мостиська, Дорогуськ – Ягодин; з білоруськими залізницями: Малашевич – Брест, Семянувка – Свіслоч, Кузня – Лососна; з латвійською залізницею: Тракішкі – Моцкава; з німецькими залізницями: Катовіце – Франкфурт-на-Одері та ін.; з чеськими залізницями: Гміна Зебжидовіце – Петровице та ін.; з румунськими залізницями: Мушина – Плавеч та ін.

Максимальна технічна швидкість і частка виконуваної експлуатаційної роботи відповідно: понад 120 км/год (7,6 %), 120–80 км/год (65,8 %), 79–50 км/год (21,2 %), менше ніж 50 км/год (5,4 %).

Парк рухомого складу містить приблизно 92 тис. вантажних вагонів, зокрема піввагонів 68,9 %, критих 13,2 %, платформ 15,2 % і незначну кількість рефрижераторних і цистерн.

У 2016 р. перевезено 222,2 тис. вантажів, зокрема внутрішні перевезення становили 61 %, експорт – 22 %, імпорт – 14,4 %, транзит – 2,6 %.

Основні вантажі: вугілля (48 %), камінь і пісок (10,1 %), руда (7,2 %), нафта і нафтопродукти (7,0 %), метали і вироби з них (7,6 %), інтермодальні перевезення вантажів становили майже 1 %.

Парк пасажирських вагонів становить 5 917 одиниць. У парку локомотивів: вантажних електровозів – 1 263, пасажирських – 507, тепловозів – 2 062.

Близько 19 тис. км залізничних ліній мають колію 1 435 мм, діє лінія з широкою колією (1 520 мм) Ізов – Грубешів – Славкув Південний (м. Катовіце). Між Польщею і Швецією працює поромна переправа.

Автоблокуванням оснащено 2 108 км, 17 станцій із 312 стрілочними переводами і 95 переїздів, які керуються комп'ютерними системами.

Польські залізниці зберігають першорядні позиції в перевезеннях на внутрішньому ринку, систематично підтримують і поліпшують діяльність на міжнародних транспортних коридорах [6].

Польща має плани щодо організації високошвидкісного руху поїздів. Будівництво високошвидкісної залізничної лінії Варшава – Лодзь – Познань – Вроцлав буде, безсумнівно, одним із найбільших інфраструктурних проєктів у Польщі в майбутньому десятилітті. Майже 450 км нової, побудованої з нуля лінії безпосередньо з'єднають міські агломерації, що налічують понад 4,5 млн жителів [10].

У наш час польська залізнична компанія вважається другою в Європі за обсягами вантажних перевезень. Хоча порівняно з Україною ці показники виглядають дуже скромно. Так, за результатами 2017 року, вантажний підрозділ PKP Cargo перевіз 119 млн т вантажів, тоді як «Укрзалізниця» майже в 3 рази більше – 339 млн т.

Румунські залізниці (*Căile Ferate Române – CFR*). Румунія розташована на південному сході Європи. Межує на півночі з Україною, на заході з Угорщиною, на південному заході – із Сербією, на півдні – з Болгарією, на сході – з Республікою Молдова й Україною. Кордон із Болгарією, Сербією і Чорногорією формує річка Дунай, яка утворює при впадінні в Чорне море велику дельту. Протяжність кордонів: із Болгарією – 608 км, із Угорщиною – 443 км, із Молдовою –

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

450 км, із Сербією – 476 км, з Україною – 531 км. Загальна площа країни 238,4 тис. кв. км.

Румунія має міжнародне залізничне сполучення з усіма сусідніми країнами (Сербією, Угорщиною, Україною, Болгарією, Молдовою), кількома країнами Євросоюзу (наприклад, Австрією), РФ і Туреччиною [16]. Експлуатаційна довжина залізниць – 10,766 тис. км, з них 4 тис. км (36,9 %) електрифіковано на змінному струмі.

Залізнична сфера є основою транспортної структури Румунії. Середня швидкість автобуса на румунських дорогах становить 60 км/год. Головними залізничними вузлами вважаються Ясси, Констанца, Ремніца, Бухарест, Галац. Із Бухареста розходиться чотири основних напрямки: Бухарест – Констанца; Бухарест – Плоешті – Брашов – Тиргу – Муреш і далі на Клуж – Напока, Арад, Тімошоаре, Сату-Маре; Бухарест – Плоешті – Бузеу – Бакеу і далі на Ясси й Сучаву; Бухарест – Крайова – Тімошоаре. Від цих напрямків і Бухареста розходиться ще кілька напрямків. Між собою вони з'єднані великою кількістю рокадних ліній.

Румунія реалізовує довгострокові програми модернізації інфраструктури. До великих проєктів розвитку інфраструктури належать два, які пов'язані з так званими критськими коридорами. Румунська ділянка довжиною 888 км, що є складовою коридору IV, проходить зі сходу на захід від угорського кордону до чорноморського порту Констанца; ділянка довжиною 585 км коридору IX північ – південь пов'язує Україну з Болгарією і Грецією. Коридори IV і IX уже інтенсивно використовують для міжміських перевезень.

Реконструкція дозволила підвищити максимальну швидкість пасажирських поїздів зі 120 до 160 км/год і вантажних із 80 до 120 км/год. Обмеження швидкості збереглися на окремих ділянках у Карпатах, де ухили досягають 27 %, і в кривих малого радіуса. Крім реконструкції колії із заміною або посиленням штучних споруд, передбачено ремонт контактної мережі змінного струму напругою 25 кВ.

Механізація робіт з утримання інфраструктури дозволила скоротити чисельність персоналу до 37,5 тис. Очікується, що скорочення часу поїздки за рахунок підвищення максимальної швидкості руху до 160 км/год приведе до збільшення кількості пасажирів.

З 2016 року компанія CFR Calatori виконала половину пасажирообігу у внутрішніх сполученнях, інша половина припадає на автомобільний і повітряний транспорт. Тенденція серйозного зниження обсягу перевезень, що спостерігалася в кінці XX ст., зупинена. Підйом національної економіки став поштовхом до зростання перевезень. Пасажирообіг досяг 4 460 млн пас.-км.

Так, у Бухаресті до поїзда Київ – Софія чіпляють різні вагони європейських габаритів, які прямують у Болгарію й Туреччину (Бухарест – Софія, Бухарест – Димитровград, Бухарест – Стамбул).

Перспективи розвитку залізничного транспорту пов'язані також із використанням сучасних високошвидкісних поїздів типу ICE або Pendolino в сполученні з Віднем і Грецією. На саміті прем'єрів Центральної та Східної Європи, а також Китаю, що проходив у Белграді, було повідомлено, що Румунія й Молдова розпочнуть найближчим часом консультації з питань спільного будівництва залізниці для високошвидкісного руху поїздів і виконають необхідні дослідження у співпраці з китайською стороною. Китай, у свою чергу, готовий побудувати швидкісну залізницю, яка зв'яже Молдову й Румунію.

Аналізують можливість будівництва швидкісної залізниці за маршрутом Бухарест – Ясси – Кишинів та планують підготовку техніко-економічного обґрунтування будівництва (рис. 2).

Перевезення вантажів по Румунії з країн СНД і у зворотному напрямку здійснюють за такою схемою:

– Залізничні перевезення з подачею під навантаження вагонів СНД по широкій колії прямо на деякі станції Румунських залізниць, куди прокладено колію шириною 1 520 мм, що дозволяє подавати вагони СНД під навантаження/вивантаження й доставляти вантаж у Румунію без зміни тари вантажу. До таких станцій належать Галац, Крістешть Жижія і Сокола (місто Ясси/Iasi), Дорнешти і Халмеу.

– Залізничні перевезення з перевалкою товарів з євровагонів або автотранспорту у вагони СНД або у зворотному напрямку. Зазвичай перевалку вантажу здійснюють на залізниці, що приймає вантаж, крім випадків, коли не пого-

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

джено інше. Якщо стороною, що приймає, є румунська залізниця, то вона й здійснює перевалку вантажів на своїх станціях.

– Залізничні перевезення з чи в Румунію з перестановкою колісних пар. У таких випадках

вагони СНД переставляють на візки європейської колії, і далі вони в супроводі вагонів прикриття прямують на станцію завантаження/розвантаження вглиб Румунії.

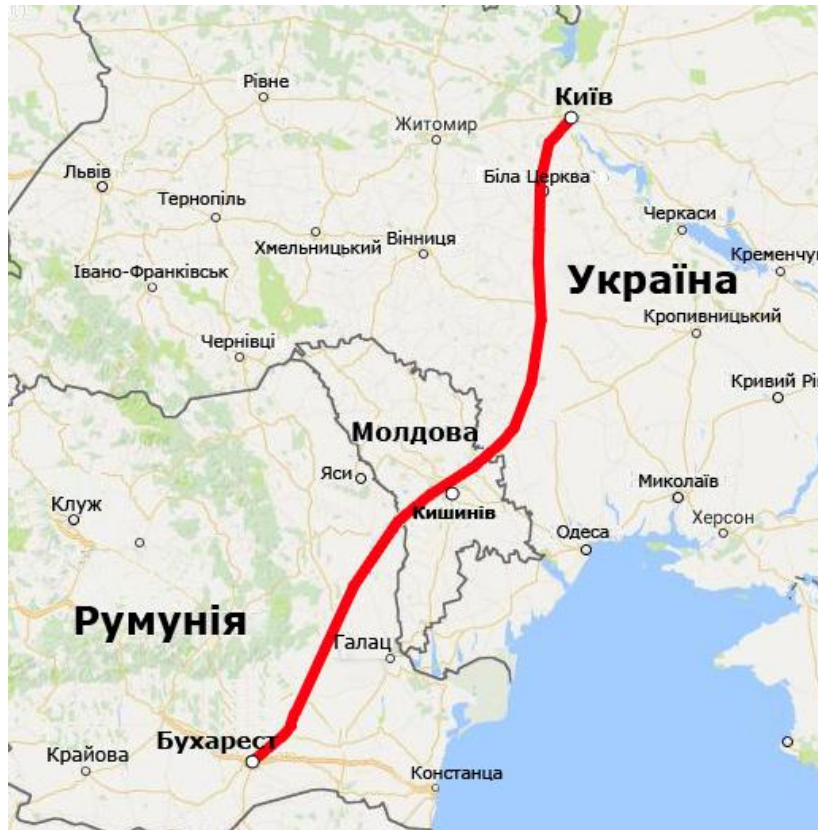


Рис. 2. Перспективи розвитку високошвидкісної магістралі (ВШМ) Бухарест – Кишинів – Київ

Fig. 2. Development prospects of high-speed mainline Bucharest – Chisinau – Kyiv

Словацькі залізниці (*Zelznice Slovenskej Republiky – ZSR*). Експлуатаційна довжина 3 626 км. Орган управління – керуючий радою та Генеральний директор, виконавчий орган – генеральна дирекція, яка керує роботою відділень, цільових і спеціальних підрозділів. Комерційно-перевізні управління (у Кошице, Братиславі, Жилиці й Зволени) надають комплексні послуги з усіх питань державного й міжнародного транспорту. Залізнична колія шириною 1 435 мм має протяжність одноколієних ліній 68,7 %, двоколієних – 28,2 %. Крім того, вузькоколієних залізниць – 50 км, ліній з колією 1 520 мм – 100 км. Електрифіковано 1 587 км, зокрема 51 % на постійному струмі 3 кВ і 49 % на змінному струмі 25 кВ, 50 Гц. На залізничній

колії діє близько 10 тисяч стрілочних переводів; працюють 402 станції. Рухомий склад: 1 159 локомотивів, 17,9 тис. вантажних і 1,1 тис. пасажирських вагонів. Залізниці Словацької Республіки мають розвинену інфраструктуру для організації комбінованих перевезень. Залізниця в основному прокладена вздовж річок і між гір; найвища точка траси розташована у Високих Татрах на висоті 1 320 м над рівнем моря, найнижча – у Східній Словаччині на висоті 101 м. Через гірський ландшафт 252 км головних колій мають криві радіусом менше 300 м, 814 км мають ухил 10 ‰. На залізницях побудовано 2 285 мостів загальною довжиною майже 50 км і 76 тунелів (43,3 км).

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Основні залізничні вузли: Братислава, Жиліна, Зволєн і Кошице; прикордонні станції: Кути, Чадца, Комарно, Русовцах, Девінська Нова Вес, Плавеч; перевантажувальні станції: Матшовце і Чієрна-над-Тисоу. Торговельний і перевантажувальний центр Чієрна-над-Тисоу забезпечує комерційну діяльність, перевантаження товарів з вагонів широкої колії 1 520 мм у вагони для колії 1 435 мм і навпаки, а також додаткові послуги, ремонт технічних засобів, контакт з органами державного управління [10].

Частка залізниці в транспортних перевезеннях країни становить 19,8 %. Щодо забезпечення країни транспортними послугами, залізниця Словачкої Республіки (ZSR) належить до найбільш ефективно діючих залізниць у Європі.

У міжнародному пасажирському сполученні курсують поїзди категорії «Євросіті», «Інтерсіті», «Експрес», а також швидкі, прискорені й пасажирські. Максимальна швидкість пасажирського поїзда 140 км/год, середня 120 км/год.

Новий імпульс для залізничних перевезень як Словаччини, так і України може надати проект створення колії 1 520 від Кошице до Відня. Ідея продовження широкої колії до країн Центральної Європи вперше була публічно озвучена в травні 2006 року під час міжнародного форуму «Стратегічне партнерство 1 520». У 2008 році на підставі матеріалів, представлених Австрією, Росією, Україною та Словаччиною, розроблено проект «Обґрунтування інвестицій у будівництво залізничної лінії з шириною колії 1 520 мм Кошице – Братислава – Відень» [11].

Завдяки прокладанню широкої колії до Відня буде сформований сухопутний залізничний шлях, альтернативний морському маршруту між країнами Далекого Сходу й Західної Європи, що проходить через Суецький канал. При цьому однією з основних переваг нового маршруту є те, що перевезення контейнера буде займати всього 13–14 діб, у той час як перевезення морським шляхом – майже 30 діб. Лінія Кошице – Відень може мати важливе значення для транзитних контейнерних перевезень із країн Азії до Європи.

Конкурсна документація містить технічні умови на проектування нової лінії. У них є кілька принципових моментів. По-перше, зафіксова-

но, що лінія буде мати широку колію 1 520 мм. По-друге, встановлено, що магістраль потрібно будувати за нормами й стандартами країн СНД. Це, зокрема, визначає використання габариту наближення споруд. Крім того, визначено й технічні параметри нової лінії. Так, відповідно до прогнозованих розмірів перевезень, залізниця належить до II категорії. Згідно з її призначенням і обсягами перевезень, залізниця повинна бути одноколісною й електрифікованою.

*Залізниця Угорщини (Magyar Allamvasutak – MAV).* Залізниця Угорщини являють собою густу мережу, що розгалужується на всі напрямки від Будапешта.

Стан багатьох залізничних ліній в Угорщині не відповідає сучасним вимогам. Реконструкція магістралі Белград – Будапешт, яку здійснюють за участю китайських компаній, є одним з найбільших інфраструктурних проєктів Центральної та Східної Європи [14].

Держава здійснює управління транспортною інфраструктурою через Міністерство національного розвитку. Перевезення виконує державна компанія MAV. В Угорщині діє також спільна з Австрією залізнична компанія АТ «Залізниця Дьйор – Шопрон – Ебенфурт», яка за довжиною ліній та обсягами роботи має другорядне значення (Угорщині належать 60 % акцій, Австрії майже 30 % і приблизно 10 % – іншим акціонерам). Залізнична мережа MAV розділена на 7 дирекцій: Будапештська, Дебреценська, Мишкольцька, Печська, Сегедська, Сомбатхейська й Захонська (перевантажувальна комерційна дирекція).

Експлуатаційна довжина залізниць (2016 р.) 7,829 км (27-ме місце у світі) [10]. Ширина колії в основному 1 435 мм; широку колію мають залізниці в Захонському вузлі (36,5 км), разом зі станційними коліями їх загальна протяжність становить 149,6 км. На мережі працюють 736 станцій. Угорські залізниці мають 26 стикових пунктів із залізницями сусідніх країн, зокрема з Україною (Захонь – Чоп, Еперешке – Батьово), з Румунією, Хорватією, Словенією, Австрією, Словаччиною.

Залізниця Угорщини виконують 29,3 % вантажних і 39,0 % дальніх пасажирських перевезень у країні. Територією Угорщини через залізничну мережу проходять міжнародні транспорт-

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

ні коридори: IV, V, Va, Vb, Vv/10a [19]. За щільністю залізничної мережі Угорщина не поступається середньоевропейським показникам; технічна оснащеність є трохи нижчою. Двоколійні лінії мають довжину 1 292 км (16,6 %), 39,5 % загальної протяжності залізниць електрифіковано; безстикова колія становить 45,5 %; майже на 35 % залізниць реалізується максимальна допустима швидкість 100–120 км/год, на одній лінії (Будапешт – Хедьєшхалом) швидкість – до 160 км/год. Автоблокуванням обладнано 35 % ліній. Із тягових засобів 33,3 % складають електровози; 1,7 % – електропоїзди; 43,9 % – тепловози і 21,1 % – дизель-поїзди.

У 2016 році перевезено 109 млн пасажирів і 35,9 млн т вантажів; пасажирообіг становив 5,7 млрд пас. км, вантажообіг – 7,5 млрд т·км. У вантажообігу внутрішнє повідомлення становить 2,3; експорт – 1,5; імпорт – 2,4; транзит – 1,2 млрд т·км. Середня дальність вантажних перевезень 171 км, середня маса вантажного поїзда 939 т; середній обіг вантажного вагона 3,8 діб. За допомогою електричної тяги виконують 83,4 % вантажообігу (нетто).

У процесі розвитку залізничного транспорту з'явилася необхідність масового перевантаження на кордоні Угорщини. Для цього в східній частині Угорщини в районі ст. Захонь поетапно був створений потужний перевантажувальний комплекс – один із найбільших «сухопутних портів» Середньої і Східної Європи, у розвиток якогокладають інвестиції з метою збільшення переробної спроможності району, створення митних складів загального користування й захисту навколишнього середовища.

*Чеські залізниці (Ceske Drahy – CD).* Чеська Республіка розташована в центрі Європи на порівняно невеликій території – майже 79 тис. кв. км. і є однією з розвинутих індустріальних країн світу. Чехія має спільні кордони з Німеччиною, Словаччиною, Австрією і Польщею.

Залізниці Чехії мають загальну довжину 9,567 тис. км ліній нормальної колії і 96 км вузької, електрифіковано 3 237 км (34,2 %). Чехія прагне до якомога швидшої інтеграції в європейські економічні структури й уже є асоційованим членом Європейського Союзу. Тому всі галузі національної економіки приводять у відповідність до вимог ЄС.

Парламент Чехії ратифікував закон про залізницю, відповідно до якого Чеські залізниці отримали статус акціонерної компанії, що передбачає підвищення якості управління, а також усунення перешкод для створення спільних підприємств із приватними фірмами [17].

У новостворену компанію залучені кваліфіковані управлінські кадри з приватного сектора шляхом продажу акцій. Однак на першому етапі держава зберегла за собою 100 % акцій; залізнична інфраструктура, рухомий склад та інше майно залишилися у власності CD. Окремі лінії здали в оренду приватним експлуатаційним компаніям, що повинно було привести до посилення конкуренції на залізничному транспорті. Із переведенням CD в приватну акціонерну експлуатаційну компанію (2002 р.) право на володіння власністю й керівництво інфраструктурою отримує новий державний орган – Sprava Zeleznicni Dopravni Cesty (SZDC).

Чеські залізниці були першими серед нових країн-членів ЄС, які почали процес європейської інтеграції в галузі залізничного транспорту. При цьому інфраструктура залізниць була поділена між Чехією і Словаччиною відповідно до територіальних кордонів, а рухомий склад та інше рухоме майно – пропорційно чисельності населення двох нових держав, у співвідношенні 2:1.

Чеські залізниці на сьогодні є акціонерним товариством, при цьому найбільшим оператором із перевезення всіх видів вантажів на своїй території відносно інших видів транспорту [13]. Головною проблемою в пасажирських перевезеннях є подолання конкуренції з боку автобусного транспорту (наприклад, на напрямку Прага – Брно).

На формування транспортної системи Чехії вплинуло її географічне положення в центрі Європи, характер території й неодноразова зміна спрямованості її економічних і політичних зв'язків. Усі найкоротші шляхи сполучення між північними європейськими країнами й країнами Південно-Східної Європи, а також Балканського півострова проходять через Чехію. Залізниці перетинають державний кордон більше ніж 20 разів, а шосейні автодороги – більше ніж 40 разів.

Одним з шляхів збереження свого становища залізниці розглядають розширення змішаних

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

перевезень, зокрема й у міжнародних сполученнях. Прикладом може бути відкриття регулярного руху контейнерних поїздів між Ловосице і Дрезденом.

У планах передбачена модернізація залізниць, що входять у міжнародні транспортні коридори. Національний транзитний коридор III зв'язав Німеччину (Нюрнберг) із Польщею через Прагу. Загальні витрати становили приблизно 42 млрд крон і на 70 % покривались СД. Транзитний національний коридор IV (вартість робіт 26,6 млрд крон) зв'язав Дрезден із Лінцем через Прагу і Чеське-Будейовіце. Це найкоротший шлях від Праги до портів Адріатики через Зальцбург і Філлах. Загальна довжина національних коридорів становить 1 962 км, з яких 73 % підлягали реконструкції. Перші три коридори в перспективі увійдуть до транс'європейської мережі TEN. Серед них виділяється двоколійна електрифікована лінія в Східній Чехії від Коліна до Брно через Гавлічків-Брод, по якій будуть перевозити переважно транзитні вантажі. Згідно зі статистикою, майже 34 % всіх залізничних ліній Чехії електрифіковані, понад 20 % двоколіїні, приблизно 40 % обладнані сучасними пристроями СЦБ.

Залізничні зв'язки із суміжними країнами: Австрія – зміна напруги (25 кВ/15 кВ змінного струму); Німеччина – зміна напруги (3 кВ постійного струму/15 кВ змінного); Польща – напруга 3 кВ постійного струму; Словаччина – напруга 3 кВ постійного струму або 25 кВ змінного.

План перспективного розвитку СД: річний обсяг перевезень – 90 млн т, вантажообіг – 20 млрд т·км; обсяг пасажирських перевезень на рівні 200 млн пасажирів за рік; пасажирообіг – 8 млрд пас. км. Якщо для залізниць будуть створені рівні з автотранспортом умови конкуренції, СД можуть отримувати хороші експлуатаційні показники у разі збільшення транзитних перевезень.

«Українська залізниця» (УЗ). Українські залізниці мають експлуатаційну довжину 19,8 тис. км, зокрема електрифікованих ліній 9,4 тис. км, або 47,3 % загальної довжини головних колій. Щільність мережі – 32,8 км на 1 000 км<sup>2</sup> території. Ширина колії 1 520 мм. Довжина ліній, обладнаних автоблокуванням і диспетчерською

централізацією, становить 12,2 тис. км. Залізничний транспорт України є провідною галуззю економіки, виконує 82,9 % вантажообігу і 36,4 % пасажирообігу всіх видів транспорту (за даними Держстату без урахування трубопровідного транспорту та даних анексованої території Автономної Республіки Крим і м. Севастополь), на відміну від країн Європейського Союзу, де частка залізничних перевезень становить 6–8 % пасажирські й до 20 % – вантажні. Основні обсяги вантажних і пасажирських перевезень на початок 2017 року наведені в табл. 1 за даними [4].

Інвентарний парк рухомого складу налічує 1,7 тис. електровозів, 2,1 тис. тепловозів, 5,1 тис. пасажирських вагонів і 104,3 тис. вантажних. Найбільшою загрозою сталому функціонуванню залізничного транспорту є майновий знос його основних фондів, особливо рухомого складу, що перевищив 90 % [7].

Для подальшого успішного розвитку залізничного транспорту необхідно провести технічну модернізацію інфраструктури залізничних коридорів, реструктурувати пасажирське господарство, вдосконалити організацію й технологію пасажирських і вантажних перевезень, створити рухомий склад нового покоління [12].

Як і в минулі роки, умови роботи українських залізниць залишаються більш складними, ніж європейських залізниць. Експлуатаційна довжина залізниць за останні роки незначно скорочується в усіх країнах Європи, зокрема і в Україні: за останні 10 років цей показник знизився в середньому на 1 % і на початок 2017 року становить 19,8 тис. км. Виробіток на одного працівника залізниці – 753 тис. зведених тонно-кілометрів на рік, чому сприяло скорочення за останні десять років майже на третину кількості працівників основної діяльності.

Сьогодні реалізують програму реформування залізничного транспорту, розраховану до 2020 року. Центральний орган управління залізничним транспортом загального користування – АТ «Укрзалізниця», має великі права щодо розвитку залізничного транспорту. До складу АТ «Укрзалізниця» входять регіональні філії «Донецька залізниця», «Львівська залізниця», «Одеська залізниця», «Придніпровська залізниця», «Південно-Західна залізниця», «Південна залізниця».

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Модернізація й реконструкція залізничних колій, електрифікація мережі, будівництво других головних колій – планові завдання для збільшення пропускної спроможності залізниць, упровадження швидкісного руху поїздів як умови реалізації геополітичних переваг України.

Необхідно протяжність другої колії довести до 35–40 %, електрифікованих залізниць – до 50–55 %, залізниць, облаштованих автоблокуванням і ДЦ, – до 80 % від експлуатаційної довжини [9].

### Результати

Оскільки основним завданням на період до 2030 року є інтеграція залізничного транспорту України до Європейської транспортної системи [12], то виникає питання, а що являють собою сьогодні українські залізниці. За протяжністю вони займають 11-те місце у світі та 4-те місце у Європі після Німеччини, Франції, Польщі. За щільністю залізничної колії (0,037 км на 1 км<sup>2</sup>) наближаються до найбільш розвинених європейських країн (Німеччина – 0,128, Великобританія – 0,078, Польща – 0,074, Франція – 0,066) [9].

Але умови роботи залізниць України залишаються більш важкими, ніж закордонних, навіть за зниження обсягів перевезень за останні роки. Сказане підтверджується насамперед величиною статичного навантаження на вісь [22], середньою масою вантажних поїздів, інтенсивністю перевезень [5], наявністю бар'єрних місць, що унеможливають постійну реалізацію встановленої швидкості [18].

Основними відмінностями залізниць є ширина колії й напруга в контактній мережі. У європейських країнах, що межують з Україною, ширина колії 1 435 мм, а в Україні 1 520 мм. В Австрії, Польщі, Угорщині та Чехії напруга в контактній мережі 3 кВ постійного струму, 15 кВ змінного струму частотою 16,7 Гц, а в Словаччині й Україні напруга в контактній мережі 3 кВ постійного струму і 25 кВ змінного струму частотою 50 Гц.

Основні показники роботи залізниць вищезазначених країн наведено в табл. 1 і на рис. 3, 4.

Таблиця 1

### Показники роботи залізниць

Table 1

#### Performance indicators of railways

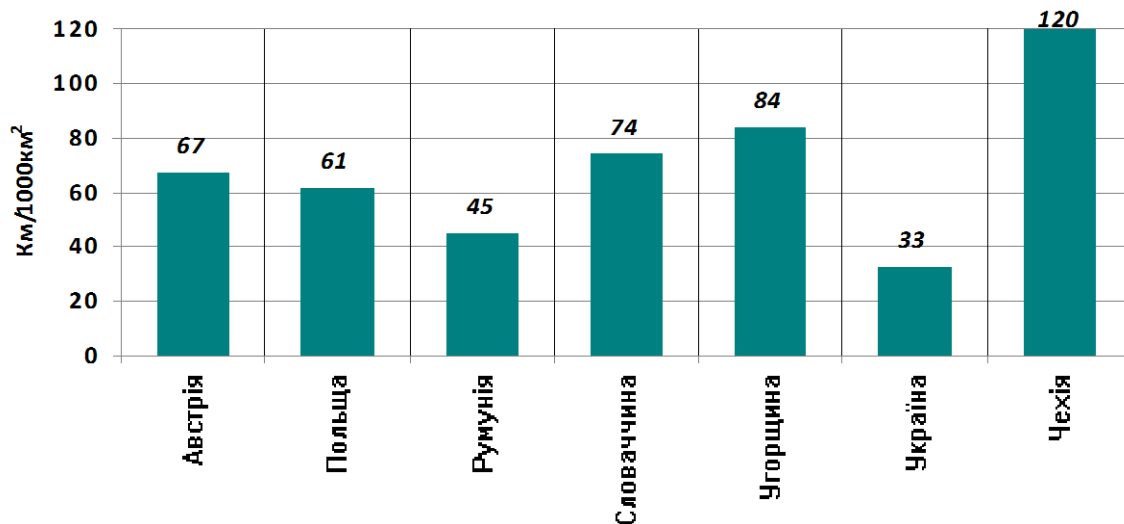
| Показники                              | Австрія | Польща | Румунія | Словаччина | Угорщина | Україна | Чехія  |
|----------------------------------------|---------|--------|---------|------------|----------|---------|--------|
| Площа, тис км <sup>2</sup>             | 83,9    | 312,7  | 2 38,4  | 49,0       | 93       | 603,7   | 78,9   |
| Населення, млн чол.                    | 7,9     | 38,4   | 21,6    | 5,4        | 10,3     | 42,4    | 10,3   |
| Експлуатаційна довжина залізниць, км   | 5 620   | 19 210 | 10 777  | 3 626      | 7 829    | 19 791  | 9 487  |
| Довжина електрифікованих залізниць, км | 3 200   | 11 831 | 3 979   | 1 587      | 3 090    | 9 350   | 3 240  |
| Частка електрифікованих залізниць, %   | 56,9    | 61,6   | 36,9    | 43,8       | 39,5     | 47,3    | 34,2   |
| Перевезено пасажирів, млн пас.         | 187,9   | 2 92,5 | 52,9    | 65,61      | 109      | 393,6   | 1 79,2 |
| Пасажирообіг, млрд пас.км              | 7,97    | 19,181 | 4,46    | 3,193      | 5,7      | 28,0    | 8,84   |

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Продолжение табл 1

Continuation of Table 1

| Показники                                              | Австрія | Польща | Румунія | Словаччина | Угорщина | Україна | Чехія |
|--------------------------------------------------------|---------|--------|---------|------------|----------|---------|-------|
| Перевезено вантажів, млн т                             | 85,4    | 222,0  | 24,5    | 35,6       | 35,9     | 343,4   | 98,0  |
| Вантажообіг, млрд т·км                                 | 12,7    | 50,6   | 8,6     | 7,1        | 7,5      | 191,9   | 15,5  |
| Чисельність працівників, тис. чол.                     | 40,3    | 123,5  | 37,5    | 32,6       | 37,1     | 219,1   | 38,1  |
| Щільність мережі за площею, км/1 000 км <sup>2</sup>   | 67,0    | 61,4   | 45,2    | 73,9       | 84,2     | 32,8    | 120,2 |
| Щільність мережі за кількістю населення, км/1 млн чол. | 711,4   | 500,3  | 498,9   | 673,4      | 760,1    | 466,8   | 921,1 |
| Вантажонапруженість, млн т·км/км                       | 3,7     | 3,6    | 1,2     | 2,8        | 1,7      | 13,1    | 2,6   |

Рис. 3. Щільність мережі залізниць, км/1 000 км<sup>2</sup> площі територіїFig. 3. Railway network density, km/1000 km<sup>2</sup> of area

Аналізуючи наведену вище діаграму, можна зробити висновок, що значення щільності мережі залізниць Австрії, Словаччини та Польщі близькі між собою, України – у 2 рази менше, а щільність залізничної мережі Чехії майже в 4 рази більша за щільність мережі України, у 3 рази більша за щільність мережі Румунії,

у 1,5 раза більша ніж щільність мережі Угорщини й Словаччини і у 2 рази більша за щільність мережі Австрії та Польщі.

Також розглянемо діаграму щільності залізничної мережі щодо населення вказаних країн, наведену на рис. 4.

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

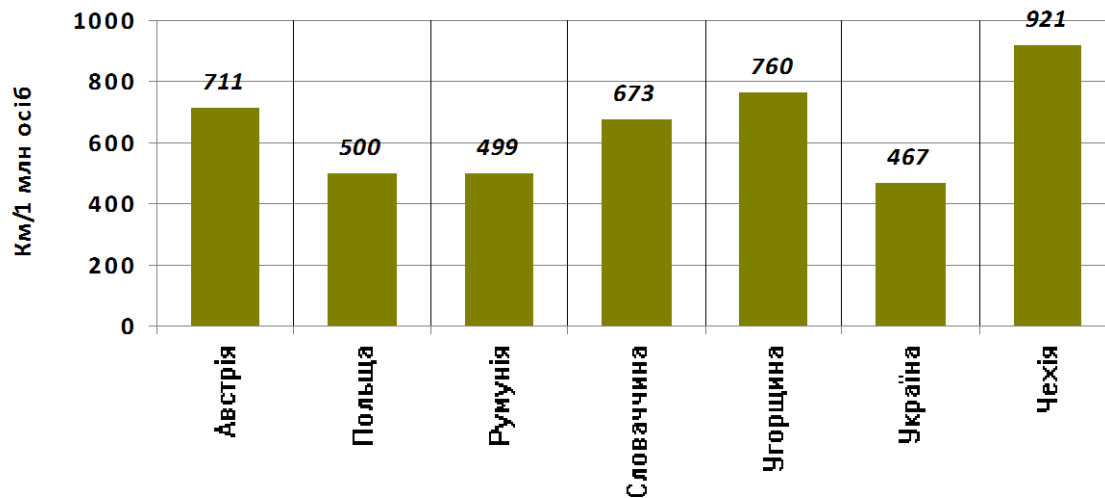


Рис. 4. Щільність мережі залізниць, щодо населення км/1 000 км² площі території

Fig. 4. Railway network density relative to the population of km/1000 km² of area

Із діаграми видно, що серед порівнюваних країн лідером є Чехія, а в Україні, Польщі й Румунії цей показник близький за значенням і майже у 2 рази менший, ніж у Чехії.

За відносною щільністю залізничної мережі Чехія займає одне з перших місць у Європі в розрахунку як на душу населення (0,92 м/особу проти 0,76 в Угорщині, 0,71 в Австрії, 0,67 у Словаччині), так і на одиницю площі (120 м/км² проти 0,84 в Угорщині, 0,74

в Словаччині, 0,67 в Австрії). Такий, на перший погляд, сприятливий стан пов'язаний, однак, зі значними фінансовими труднощами, оскільки експлуатувати цю мережу, ступінь завантаження якої неоднаковий для різних ліній, економічно невигідно.

Порівняння електрифікованих залізничних ліній європейських країн, що межують з Україною, наведено на рис. 5.

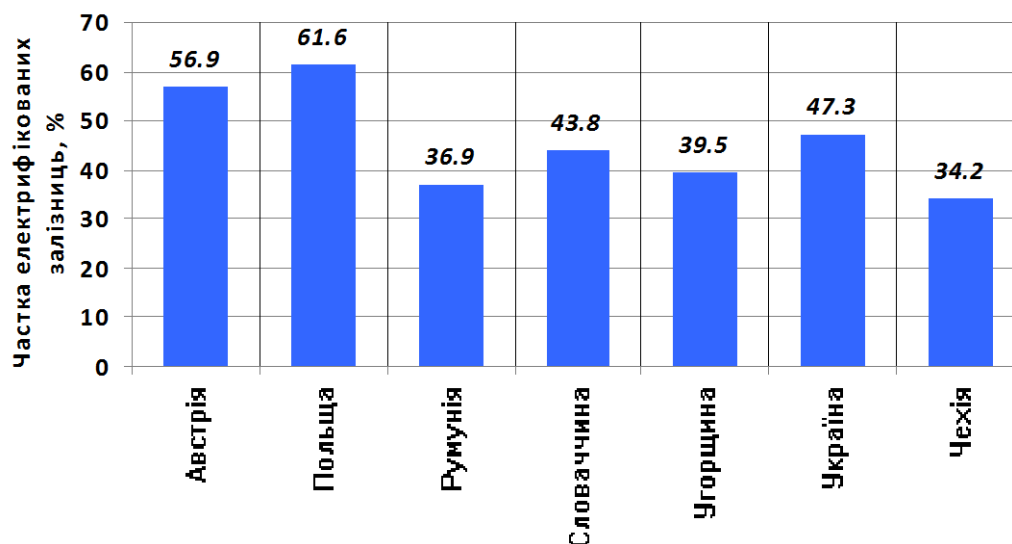


Рис. 5. Протяжність електрифікованих залізниць

Fig. 5. The length of electrified railways

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Із вищенаведеної діаграми видно, що найбільша протяжність електрифікованих залізниць у Польщі (11,8 тис. км) й Україні (9,4 тис. км), що становить відповідно 61,6 і 47,3 %. В Австрії питома вага електрифікованих залізниць становить 56,9 %, але в лінійних вимірах це 3,2 тис. км від експлуатаційної довжини 5,6 тис. км. Це один із найбільш важливих показників, бо, наприклад, в Україні питома вага

електричної тяги в загальному вантажообігу становить 89 % [4].

Порівнюючи вантажонапруженість залізничної мережі України із сусідніми країнами (рис. 6), бачимо, що найбільша вантажонапруженість в Україні. В Австрії й Польщі цей показник менший у 3 рази, у Словаччині й Чехії – у 4,5 рази, в Угорщині – у 5 разів, а в Румунії – майже в 10 разів.

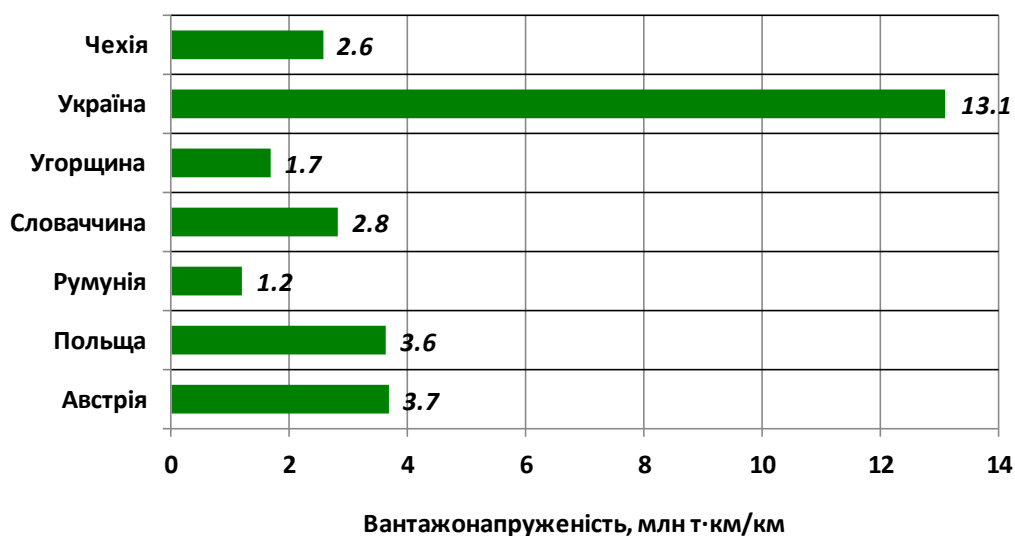


Рис. 6 Вантажонапруженість залізниць

Fig. 6. Freight traffic density of railways

Пояснити таку ситуацію можна тим, що залізниці Польщі й Чехії орієнтовані переважно на пасажирські й транзитні перевезення. Потенціал подальшого зростання перевезень цих країн пов'язаний із розвитком змішаних сполучень із країнами Східної Європи.

Залізничний транспорт Румунії реформований у 1998 році. Національне товариство румунських залізниць було розділене на п'ять компаній із незалежним управлінням: Compania Națională de Căi Ferate «CFR» SA (National Railway Company «CFR» – контакт з інфраструктурою), CFR Călători (CFR Passenger Services – оператор пасажирських поїздів), CFR Marfă (компанія з вантажопотоку), CFR Gevaro (послуги вагонів-ресторанів), і SAAF (контакт із рухомим складом, який буде продано, орендовано або переглянуто). Після цього фінансовий стан румунських залізниць значно покращився. Залізничний транспорт став повністю відпові-

дати європейській моделі реформування: розділені інфраструктура й експлуатація [8]. Реформування залізничного транспорту України тільки розпочалося, а тому викликає інтерес порівняння показників роботи залізничного транспорту Румунії та України.

Установлено, що протяжність залізниць в Румунії у 2 рази менша, ніж в Україні, при цьому відсоток електрифікованих ліній становить 37 проти 47; пасажирообіг у Румунії менший у 7 разів, а вантажообіг – у 21 раз порівняно з Україною; обсяг вантажних і пасажирських перевезень в Україні вищий, ніж у Румунії відповідно в 14 і 7,5 рази.

Широке впровадження механізації робіт з утримання інфраструктури залізниць дозволило в багатьох європейських країнах скоротити чисельність працівників, що призвело до збільшення такого показника, як виробіток на одну особу за рік (рис. 7).

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

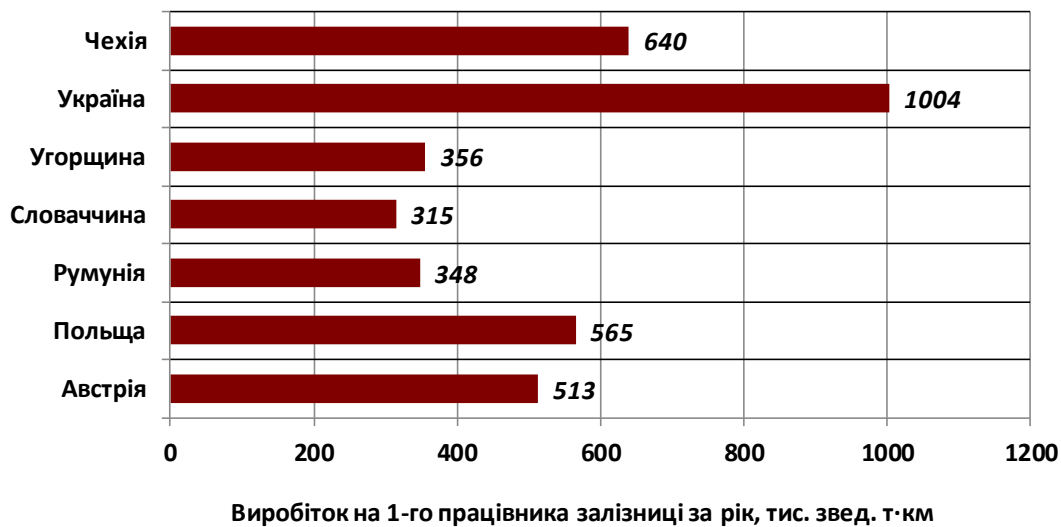


Рис. 7. Вантажонапруженість залізниць

Fig. 7. Freight traffic density of railways

**Наукова новизна та практична значимість**

Автори цієї роботи, базуючись на позитивному досвіді насамперед країн Європейського Союзу, показали, що за умови наявності ефективної транспортної мережі та розвинутої системи передачі вантажів у пунктах зміни стандартів залізничної інфраструктури, значно підвищуються як внутрішні, так і транзитні вантажопотоки, що дає можливість збільшити привабливість країни в міжнародній системі перевезень.

На основі отриманих результатів установленно, що залізничний транспорт України може бути інтегрований у європейську транспортну мережу за умови виконання модернізації колії, штучних споруд та інших пристроїв, що входять до інфраструктури залізниці, упровадження нового рухомого складу, що забезпечить перевезення пасажирів денними поїздами з необхідним комфортом і максимально встановленою швидкістю.

Ураховуючи значні обсяги перевезень у напрямку Схід – Захід, а також вигідне географічне положення України, можна стверджувати, що створення ефективних способів організації транспортування вантажів у міжнародному

сполученні з країнами Євросоюзу дозволить залучити додаткові обсяги транзитних вантажопотоків.

**Висновки**

Залізниці України та європейських країн мають різні умови експлуатації, відрізняються технічним станом, оснащенням, параметрами профілю й плану, а тому, зважаючи на різні обсяги й вартість робіт із реконструкції наявних залізниць, потребують додаткового фінансування – не тільки державного, але й від Європейського Союзу.

Під час перевезення вантажів у країнах, що межують з Україною, залізничний транспорт використовують на 16–20 % порівняно з автомобільним, за винятком Австрії (51,2 %) й України (84,6 %). Щодо перевезень пасажирів, цей показник становить 6–13 %, за винятком Словаччини (37,0 %) й України (49,3 %). Якщо для залізниць будуть створені рівні з автотранспортом умови конкуренції, то європейські країни зможуть отримувати хороші експлуатаційні показники за збільшення обсягів транзитних перевезень.

За відносною густотою залізничної мережі одне з перших місць у Європі займає Чехія – у розрахунку як на душу населення

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

(0,92 м/особу проти 0,76 в Угорщині, 0,71 в Австрії, 0,67 в Словаччині), так і на одиницю площі (120 м/км<sup>2</sup> проти 84 в Угорщині, 74 у Словаччині, 67 в Австрії). Однак це спричиняє значні фінансові труднощі, оскільки експлуатувати мережу, ступінь завантаження якої неоднаковий для різних ліній, складно й може бути економічно не вигідно.

Виконаний аналіз показав, що для країн, які межують з Україною, питома вага електрифікованих залізниць становить у середньому 50 %, а саме: у Польщі 61,6 %, Австрії 56,9 %, Словаччині 43,8 %, в Угорщині й Румунії цей показник наближається до 40 %, в Україні – 47,3 %. Це один із важливих показників, який визначає питому вагу використання електричної тяги в загальному вантажообігу країн (в Україні – 89 %).

Порівнюючи вантажонапруженість залізничної мережі України із сусідніми країнами, слід відзначити, що найбільша вантажонапруженість саме в Україні, в Австрії й Польщі цей показник менший у 3 рази, у Словаччині й Чехії – у 4,5 рази, в Угорщині – у 5 разів, а в Румунії – майже в 10 разів. Тобто в Україні була й залишається більш висока інтенсивність використання залізниць для перевезень вантажів і пасажирів.

Сьогодні залізнична конкурентоспроможність держав-членів ЄС обмежується відмінностями в устаткуванні, технологіях, сигналізації, правилах безпеки, у системі гальмування, тяговому струмі, а також за швидкістю. Така ситуація вимагає, щоб міжнародні поїзди, що проходять через кілька країн, зупинялися на кордоні. Технічні відмінності між державами склалися історично й пов'язані з необхідністю захистити власні інтереси.

Через відмінності в технічних вимогах до рухомого складу, залізничної колії під час організації безперевантажувальних перевезень

необхідно вирішити низку технічних питань. Частина питань з інфраструктури й рухомому складу регламентована в TSI, частина – у пам'ятках UIC і ОСЗ, але багато з них залишаються невирішеними повною мірою (ширина колії, обрис бандажів коліс рухомого складу, габаритні розбіжності, гармонізація вимог до ходових частин, зчіпних приладів, відмінності гальмівних систем тощо). Ці проблемні питання потребують додаткових досліджень і раціональних рішень.

Національні залізничні компанії України й Польщі – АТ «Укрзалізниця» і «Polskie Koleje Państwowe» Spolka Akcyjna (PKP SA) – мають схожі риси й проблеми. Перш за все в основному експлуатують старий парк рухомого складу й інфраструктуру.

Головні відмінності – значне випередження польської групи в проведенні реформ. В останні роки польську залізницю активно модернізують. Польща має більш густу мережу залізниць і більший відсоток електрифікованих ліній. У цілому це властиво розвиненим країнам ЄС. Україна є лідером у Європі і значно перевершує PKP SA за обсягами вантажних перевезень.

Законопроект «Про залізничний транспорт України» № 7 316 пропонує нову модель ринку залізничних перевезень, що враховує європейське законодавство, установлює принцип рівноправного доступу до послуг інфраструктури, поширюється на всіх осіб, зацікавлених в отриманні таких послуг. У зв'язку з побудовою нової структури взаємовідносин на залізничному транспорті в проекті закріплені основні вимоги, обов'язки й права оператора інфраструктури, перевізника, права й обов'язки пасажира, основні вимоги до рухомого складу та основи діяльності операторів залізничного рухомого складу, норми з управління об'єктами інфраструктури тощо.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Болвановська, Т. В. Аналіз прикордонних станцій на прикордонних переходах з залізницями третіх країн / Т. В. Болвановська // Матеріали міжнар. конф. «Науково-технічне забезпечення розвитку залізничних перевезень у міжнародному сполученні» / Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпро, 2018. – С. 103–105.
2. Водяников, Ю. Я. Вопросы адаптации подвижного состава зарубежных производителей к условиям железных дорог Украины / Ю. Я. Водяников, Л. С. Ольгард // Вагонный парк, 2012. – № 12. – С. 58.

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

3. Волков, Б. А. Анализ сметной стоимости строительство железных дорог / Б. А. Волков, А. Д. Ларионов. – Москва : Транспорт, 1980. – 159 с.
4. Довідник основних показників роботи залізниць України (2006–2016 роки) / ПАТ «Українська залізниця». – Київ, 2017. – 44 с.
5. Дорошенко, О. Ю. Вплив поверхні кочення на коливання та стійкість динамічної системи колесо-рейка / О. Ю. Дорошенко, В. О. Демченко, В. Г. Вербицький // Зб. наук. пр. Держ. економіко-технологічного ун-ту трансп. – 2013. – №. 23. – С. 5–12.
6. Железные дороги Польши [Електронний ресурс] // Железные дороги мира. – Режим доступу: <http://www.1430mm.ru/railway-poland>. – Назва з екрана. – Перевірено : 11.11.2019.
7. За стратегією розвитку Укрзалізниці до 2021 року [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.uz.gov.ua/press\\_center/up\\_to\\_date\\_topic/458113/](https://www.uz.gov.ua/press_center/up_to_date_topic/458113/). – Назва з екрана. – Перевірено : 19.11.2019.
8. Инфокарты транспортной статистики [Електронний ресурс] // ЕЭК ООН 2018. – Режим доступу: [https://www.unecce.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2018/wp6/\\_Infocards\\_RUS.pdf](https://www.unecce.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2018/wp6/_Infocards_RUS.pdf). – Назва з екрана. – Перевірено : 19.11.2019.
9. Кірпа, Г. М. Інтеграція залізничного транспорту України у європейську транспортну систему : монографія / Г. М. Кірпа. – Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2004. – 248 с.
10. Курган, М. Б. Теоретичні основи впровадження високошвидкісного руху поїздів в Україні : монографія / М. Б. Курган, Д. М. Курган ; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпро : ДНУЗТ, 2016. – 283 с.
11. Курган, Н. Б. Повышение интероперабельности в международном железнодорожном сообщении Австрия-Словакия-Украина-Россия / Н. Б. Курган, Е. В. Возная // Укр. залізниці. – 2014. – № 12 (18). – С. 24–33.
12. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року [Електронний ресурс] // М-во інфраструктури України. – Режим доступу: <https://mtu.gov.ua/news/28581.html> – Назва з екрана. – Перевірено : 11.11.2019.
13. Программа модернизации железных дорог Чехии // Железные дороги мира. – 2016. – № 1. – С. 13–16.
14. Реконструкция коридора Белград-Будапешт // Железные дороги мира. – 2017. – № 4. – С. 20–24.
15. Annual Report [Електронний ресурс] // PKP Polskie Kine Kolejowe S. A. – Режим доступу: <https://en.plk-sa.pl/press/annual-report/>. – Назва з екрана. – Перевірено : 19.11.2019.
16. Căile Ferate Române [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ru.knowledgr.com/00190614/CaileFerateRomane>. – Назва з екрана. – Перевірено : 11.11.2019.
17. ČD Group. History [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ceskedrahy.cz/skupina-cd/historie/-12991/>. – Назва з екрана. – Перевірено : 19.11.2019.
18. Fischer, S. Traction energy consumption of electric locomotives and electric multiple units at speed restrictions / S. Fischer // Acta Technica Jaurinensis. – 2015. – Vol. 8. – Iss. 3. – P. 240–256. doi: 10.14513/actatechjaur.v8.n3.384
19. Horvat, F. Magistrale for Europe / F. Horvat, S. Fischer // Közlekedésépítési Szemle. – 2009. – Vol. 59. – Iss. 5. – P. 33–37.
20. Kurhan, M. Providing the railway transit traffic Ukraine–European Union / M. Kurhan, D. Kurhan // Pollack Periodica. – 2019. – Vol. 14. – Iss. 2. – P. 27–38. doi: 10.1556/606.2019.14.2.3
21. ÖBB-Presse Logo Presse. Nachhaltigkeitsberichte [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://presse.oebb.at/de/publikationen/nachhaltigkeitsberichte>. – Назва з екрана. – Перевірено : 19.11.2019.
22. Patlasov, O. M. Impact of Cars with 25 TF / Axle Load on the Track Condition / O. M. Patlasov, E. M. Fedorenko // Science and Transport Progress. – 2019. – Vol. 3. – Iss. 81. – P. 87–95. doi: 10.15802/stp2019/171297
23. Pittman, R. Reforming and restructuring Ukrzaliznytsia: a crucial task for Ukrainian reformers / R. Pittman // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – Vol. 1. – Iss. 67. – С. 34–50. doi: 10.15802/stp2017/92775

Н. Б. КУРГАН<sup>1</sup>, В. Г. ВЕРБИЦКИЙ<sup>2</sup>, Д. Н. КУРГАН<sup>3\*</sup><sup>1</sup>Каф. «Проектирование и строительство дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, эл. почта kunibor@gmail.com, ORCID 0000-0002-8182-7709<sup>2</sup>Каф. «Программное обеспечение автоматизированных систем», Запорожская государственная инженерная академия, пр. Соборный, 226, Запорожье, Украина, 69006, тел. +38 (061) 227 12 31, эл. почта oxsidan@ukr.net, ORCID 000-0002-1039-8548<sup>3\*</sup>Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, эл. почта kurhan.d@gmail.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

## ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗЛИЧИЙ УКРАИНСКОЙ И ЕВРОПЕЙСКОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

**Цель.** В работе предусмотрено проанализировать основные различия украинской железнодорожной инфраструктуры от инфраструктуры стран, с которыми Украина имеет западные границы, и стран, к которым может быть заведена колея 1 520 мм, учитывая направление основного грузопотока с Востока на Запад. Также предусмотрено дать количественную и качественную оценку технической совместимости и других показателей железнодорожных сетей в сравнении с территорией Украины. **Методика.** Для получения данных об инфраструктуре и объемам перевозок в обозначенных заданием странах выполнен обзор литературы по теме работы с использованием полнотекстовых и статистических баз данных. Методика предусматривает анализ и систематизацию полученной информации для установления соответствующих зависимостей, выводов и предложений. **Результаты.** Обосновано, что международные перевозки, которые осуществляются через территорию Украины, имеют определенные особенности. Изменение стандартов железнодорожного пути на границе с европейскими странами вынуждает искать наиболее рациональные маршруты для транспортировки грузов (с учетом дальности, технического состояния и параметров международных транспортных коридоров, скорости доставки и др.) и рациональные технологии передачи грузов на приграничных пунктах, что позволит вывести эти перевозки на инновационный путь развития. **Научная новизна.** Базируясь на позитивном опыте прежде всего стран Европейского Союза, авторы показали, что при условии наличия эффективной транспортной сети и развитой системы передачи грузов в пунктах изменения стандартов железнодорожной инфраструктуры значительно повышаются как внутренние, так и транзитные грузопотоки, что дает возможность увеличить привлекательность страны в международной системе перевозок. **Практическая значимость.** На основе полученных результатов показано, что железнодорожный транспорт Украины может быть интегрирован в европейскую транспортную сеть при условии: выполнения модернизации пути, искусственных сооружений и других устройств, которые представляют инфраструктуру железной дороги; внедрения нового подвижного состава, что обеспечит перевозки пассажиров дневными поездами с необходимым комфортом и максимально установленной скоростью.

**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт; инфраструктура железной дороги; техническая совместимость железных дорог; скорость движения; международный транспортный коридор

М. В. KURHAN<sup>1</sup>, V. G. VERBITSKII<sup>2</sup>, D. M. KURHAN<sup>3\*</sup><sup>1</sup>Dep. «Roads Design and Construction», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel +38 (056) 373 15 48, e-mail kunibor@gmail.com, ORCID 0000-0002-8182-7709<sup>2</sup>Dep. «Automated Systems Software», Zaporizhzhia State Engineering Academy, Sobornyi Av., 226, Zaporizhzhia, 69006, tel. +38 (061) 227 12 31, e-mail oxsidan@ukr.net, ORCID 000-0002-1039-8548<sup>3\*</sup>Dep. «Track and Track Facilities», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 42, e-mail kurhan.d@gmail.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

## DIFFERENCE RESEARCH OF UKRAINIAN AND EUROPEAN RAILWAY INFRASTRUCTURE

**Purpose.** The article is aimed to analyze the main differences of the Ukrainian railway infrastructure, comparing both with the neighboring countries at the western border and with the countries to which the 1520 mm track can be drawn, taking into account the direction of the main freight traffic volume from East to West. It is also aimed to provide quantitative and qualitative assessment of technical compatibility and other indicators of railway networks in relation to the territory of Ukraine. **Methodology.** To obtain data on infrastructure and transportation volumes in the mentioned countries, a world literature review on this subject was performed using full-text and statistical databases. The methodology involves the analysis and systematization of the information obtained to establish relevant dependencies, conclusions and proposals. **Findings.** It is proved that international transportations through the territory of Ukraine have certain features. Changing the railway track standards at the border with European countries forces to search for the most rational routes for cargo transportation (taking into account the distance, technical condition and parameters of international transport corridors, delivery speed, etc.) and rational technologies for the goods transfer at border points, which make it possible to take these transportations to an innovative path of development. **Originality.** Based on the positive experience, first of all of the European Union countries, the authors have shown that with the presence of efficient transport network and a developed system of cargo transfer at the points of changing the railway infrastructure standards, both domestic and transit freight traffic volumes significantly increase, which makes it possible to increase the attractiveness of the country in the international transportation system. **Practical value.** Based on the obtained results, it is shown that the Ukrainian railway transport can be integrated into the European transport network, providing the modernization of track, engineering structures and other facilities included in the railway infrastructure, the introduction of new rolling stock, which will ensure passenger transportations by day trains with the required comfort and maximal set speed.

**Keywords:** railway transport; railway infrastructure; technical compatibility of railways; movement speed; international transport corridor

### REFERENCES

1. Bolvanovska, T. V. (2018). Analysis of border stations on border transitions with railways of third countries. *Scientific and technical support of the railroading development in the international traffic*. Dnipro: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. (in Ukrainian)
2. Vodyannikov, Yu. Ya. & Olgard, L. S. (2012). Voprosy adaptatsii podvizhnogo sostava zarubezhnykh proizvoditeley k usloviyam zheleznykh dorog Ukrainy. *Vagonyy park*, 12, 58 p. (in Russian)
3. Volkov, B. A. & Larionov, A. D. (1980). *Analiz smetnoy stoimosti stroitelstvo zheleznykh dorog*. Moskva: Transport. (in Russian)
4. PJSC Ukrzaliznytsia (2017). *Dovidnyk osnovnykh pokaznykiv roboty zaliznyts Ukrainy (2006–2016 roky)*. Kyiv. (in Ukrainian)
5. Doroshenko, O. Ju., Demchenko, V. O., & Verbyckiy V. Gh. (2013). Vplyv poverkhni kochennja na kolyvannja ta stijkistj dynamichnoji systemy koleso-rejka. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho ekonomiko-tehnologichnogho universytetu transport*, 23, 5-12. (in Ukrainian)
6. Zheleznye dorogi Polshi. (undated). *Zheleznye dorogi mira*. Retrived from: <http://www.1430mm.ru/railway-poland> (in Russian)
7. Za stratehiyeju rozvytku Ukrzaliznyci do 2021 roku. (undated). Retrived from: [https://www.uz.gov.ua/press\\_center/up\\_to\\_date\\_topic/458113/](https://www.uz.gov.ua/press_center/up_to_date_topic/458113/) (in Ukrainian)
8. Infokarty transportnoy statistiki. (undated). *UNEC 2018*. Retrived from: [https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2018/wp6/\\_Infocards\\_RUS.pdf](https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2018/wp6/_Infocards_RUS.pdf) (in Russian)
9. Kirpa, Gh. M. (2004). *Integhracija zaliznychnogho transportu Ukrajiny u jevropsjku transportnu systemu: monoghrafija*. Dnipro: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. (in Ukrainian)
10. Kurhan, M. B., & Kurhan, D. M. (2016). *Teoretychni osnovy vprovadzhennia vysokoshvydkisnoho rukhu poizdiv v Ukraini: monoghrafia*. Dnipro: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. (in Ukrainian)

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

11. Kurgan, N. B. & Voznaya, Ye. V. (2014). Povyszenie interoperabelnosti v mezhdunarodnom zheleznodorozhnom soobshchenii Avstriya-Slovakiya-Ukraina-Rossiya. *Ukrainski zaliznytsi*, 12(18), 24-33. (in Russian)
12. Natsionalna transportna stratehiia Ukrainy na period do 2030 roku. (undated). *Ministerstvo infrastruktury Ukrainy*. Retrieved from <https://mtu.gov.ua/news/28581.html> (in Ukrainian)
13. Programma modernizatsii zheleznykh dorog Chekhii. (2016). *Zheleznye dorogi mira*, 1, 13-16. (in Russian)
14. Rekonstruktsiya koridora Belgrad-Budapesht. (2017). *Zheleznye dorogi mira*, 4, 20-24. (in Russian)
15. Annual Report. (undated). *PKP Polskie Kine Kolejowe S. A.* Retrived from: <https://en.plk-sa.pl/press/annual-report/> (in English)
16. Čáile Ferate Române. (undated). Retrived from: <http://ru.knowledgr.com/00190614/CaileFerateRomane> (in Czech)
17. ČD Group. History. (undated). Retrived from: <http://www.ceskedrahy.cz/skupina-cd/historie/-12991/> (in Czech)
18. Fischer, S. (2015). Traction energy consumption of electric locomotives and electric multiple units at speed restrictions. *Acta Technica Jaurinensis*, 8(3), 240-256. doi: 10.14513/actatechjaur.v8.n3.384 (in English)
19. Horvat, F., & Fischer, S. (2009). Magistrale for Europe. *Közlekedésépítési Szemle*, 59(5), 240-256. doi: 10.14513/actatechjaur.v8.n3.384 (in English)
20. Kurhan, M., & Kurhan, D. (2019). Providing the railway transit traffic Ukraine–European Union. *Pollack Periodica*, 14(2), 27-38. doi: 10.1556/606.2019.14.2.3 (in English)
21. ÖBB-Presse Logo Presse. Nachhaltigkeitsberichte. (undated). Retrived from: <https://presse.oebb.at/de/publikationen/nachhaltigkeitsberichte>. (in German)
22. Patlasov, O. M. & Fedorenko, E. M. (2019). Impact of Cars with 25 TF / Axle Load on the Track Condition. *Science and Transport Progress*, 3(81), 87-95. doi: 10.15802/stp2019/171297
23. Pittman, R. (2017). Reforming and restructuring Ukrzaliznytsia: a crucial task for Ukrainian reformers. *Science and Transport Progress*. 1(67), 34-50. doi: 10.15802/stp2017/92775 (in English)

Надійшла до редколегії: 17.05.2019

Прийнята до друку: 10.09.2019

# ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 656.21.07

О. В. ГОРБОВА<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта alexandra.gorbova@gmail.com, ORCID 0000-0002-5612-2715

## ФОРМАЛІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ СТАНЦІЙ НА ОСНОВІ ПОЕТАПНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

**Мета.** Для представлення технологічного процесу, що використовує методологію поетапного моделювання, необхідно застосувати спеціалізоване програмне забезпечення. Формалізація технологічного процесу є однією з основних задач на етапі проектування або оптимізації роботи залізничної станції. У статті передбачено розробити методику формалізації технологічних процесів на основі методу поетапного моделювання. **Методика.** Завдяки методиці поетапного проектування виконано побудову вхідної, внутрішньої та вихідної моделі проектування роботи залізничної станції. Вхідна модель утворена діаграмами прецедентів, станів і діяльностей, що побудовані за допомогою інструментів програмного комплексу IBM Rational Rose. Ця модель забезпечує можливість графоаналітичного представлення технологічних процесів залізничної станції з його візуальним контролем, який дозволяє уникнути трудомісткого ручного кодування та знизити ймовірність появи помилок. Наведені діаграми описують технологічний процес залізничної станції на базі ієрархічних діаграм послідовності робіт різного ступеня деталізації. А вихідна та внутрішня моделі побудовані за допомогою уніфікованої мови моделювання UML. Методами дослідження є методи об'єктно-орієнтованого проектування, скінченних автоматів і системного програмування. **Результати.** Запропонована методика дозволяє за допомогою діаграм Харела будувати імітаційні моделі залізничних станцій. Ці моделі являють собою ієрархічно організовану сукупність взаємодіючих скінченних автоматів, при цьому складна модель на кожному рівні ієрархії зберігає простоту й доступну для огляду структуру. Сигнали про початок і закінчення робіт, які генерують під час переходів між станами, дозволяють синхронізувати роботу моделі, а використання дій під час описання станів і сигналів (розширення, що надається мовою UML) дозволяє використовувати зовнішні алгоритми там, де звичайний/автоматний формалізм стає незручним. Методологія, що реалізована засобами мови UML, дозволяє істотно полегшити представлення й сприйняття моделі станції. **Наукова новизна.** Удосконалено методику представлення функціональної моделі залізничних станцій із застосуванням методів візуального проектування. **Практична значимість.** Запропонована методика призначена для графоаналітичного представлення технологічного процесу роботи залізничної станції, що використовує поетапне моделювання. Під час моделювання на базі графічної вхідної моделі виконано побудову внутрішньої та вихідної моделей, а також представлення методів їх перетворень.

**Ключові слова:** технологічний процес; діаграма станів; діаграма діяльностей; діаграма прецедентів; орієнтовний граф; мова UML; залізнична станція; модель роботи станції

### Вступ

В основі проектування технічного забезпечення автоматизованих систем управління, розробки різноманітних технологічних процесів

лежить моделювання предметної області. При цьому необхідно мати цілісне, системне уявлення моделі, яка повинна відображати всі аспекти функціонування майбутньої системи. Під

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

моделлю предметної області розуміють систему, що імітує структуру або функціонування досліджуваної цієї області [10]. Оцінні аспекти моделювання предметної області пов'язані з визначенням ефективності впровадження автоматизованих процесів на об'єкті автоматизації [14]. Проблему моделювання технологічних процесів досліджували багато вчених, що відображено у великій кількості вітчизняних та зарубіжних робіт.

Моделювання технологічних процесів на базі автоматів Мура та Мілі [6] показує досить високий рівень розуміння розв'язуваної задачі, проте тут відсутня формалізація процесу проектування. Описання дій, що реалізують автомати, є складним для проектувальника без відповідної кваліфікації.

У [5] розглянуто розробку інформаційної системи й процедуру побудови дедуктивної моделі процесу. Дослідження виконано в рамках динамічного моделювання, проте зовсім не описано формального підходу до побудови моделі технологічного процесу.

У [12] подано поняття й класифікацію методів моделювання технологічних процесів, показано основні етапи розробки технологічних процесів із позиції системного підходу. Розглянуто формальні підходи до описання математичних моделей та показано моделювання технологічних об'єктів, що розрізняються ступенем деталізації процесів.

У [13] розглянуто питання формалізації й автоматизації виконання синтезу моделей систем автоматичного управління технологічними процесами. Представлено підхід до побудови моделі, що включає такі етапи, як фізичне моделювання, математичне моделювання, дискретне комп'ютерне моделювання та імітаційне моделювання. Уведено поняття методу поетапного моделювання технологічних процесів. Технологія поетапного моделювання передбачає побудову технологічного процесу на декількох рівнях: від загального алгоритму процесу до детальних алгоритмів окремих операцій. В основі такого підходу лежить метод покрокової деталізації.

Під час моделювання технологічних процесів застосовують різні методи й підходи. Усі вони мають свої особливості, проте до моделю-

вання предметної області висуваються такі вимоги:

- однозначний опис структури предметної області;
- зрозумілість результатів предпроектного обстеження для замовників і розробників на основі застосування графічних засобів відображення моделі;
- реалізованість, під якою мрозуміють наявність засобів фізичної реалізації моделі предметної області в інформаційних системах;
- забезпечення оцінки ефективності реалізації моделі предметної області на основі певних методів та обчислюваних показників.

Ефективним способом описання функціонування об'єктів, що забезпечує високу інформативність та інтуїтивно зрозуміле представлення інформації, є візуальне моделювання. Під час візуального моделювання кожен елемент виробничого процесу зображують у вигляді графічного позначення. Графічну модель можна створювати як на паперових носіях, так і за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення на ЕОМ. Відображення наявних виробничих процесів у вигляді простих діаграм і коротких описів допомагає досягти єдиного розуміння чинних норм та оперативних процедур між розробником і замовником проектів розвитку залізничних станцій.

### Мета

Основною метою цієї статті є формалізація представлення технологічного процесу з використання методології поетапного моделювання.

### Методика

Представлення технологічного процесу використовує мову UML та її графічну інтерпретацію. Вказаний підхід зрозумілий для розробника технологічного процесу й не потребує спеціальних навичок роботи з комп'ютером.

Під час поетапного моделювання технологічного процесу роботи залізничної станції застосовують вхідну, внутрішню та вихідну моделі проектування, а також методи їх перетворень [1]. Кожна з представлених моделей пе-

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

редбачає наявність вхідних і вихідних даних, а також правил їх обробки.

Вхідну модель станції забезпечують графічні схеми представлення середовища IBM Rational Rose [11]. Система має можливості графічного введення технологічних процесів різних ступенів деталізації з візуальним контролем, який дозволяє уникнути трудомісткого ручного кодування й виключити появу помилок. Графічне введення технологічного процесу доповнюють параметризацією елементів (перелік виконавців, час виконання та ін.).

Внутрішня модель забезпечує можливість автоматичного відображення технологічного процесу й перетворення орієнтовного графа у списки інцидентності. Така модель призначена для автоматичного розрахунку основних параметрів робіт залізничної станції [1].

Вихідна модель може служити основою для вирішення широкого кола завдань, у тому числі й для функціонального моделювання роботи станцій із метою одержання їх техніко-технологічної оцінки.

Розробка технологічного процесу залізничної станції й створення її вхідної моделі характеризується найбільшим рівнем взаємодії технолога та ЕОМ. Для формування вхідної моделі доцільно використувати середовище IBM Rational Rose.

*Вхідна модель представлення технологічного процесу.* Створення вхідної моделі характеризується побудовою ефективного графічного представлення, орієнтованого на візуалізацію та формалізацію технологічного процесу.

На цьому етапі набір діаграм формалізації технологічного процесу представимо у вигляді множини графічних об'єктів  $Q_{BX}$ . При цьому виділені типи об'єктів:

- $D_p$  – діаграма прецедентів;
- $D_{scd}$  – діаграма станів;
- $D_{act}$  – діаграма діяльностей.

Кожний із наведених діаграм ставимо у відповідність набір інструментів для їх графічного відображення.

Діаграма прецедентів (*Use-Case Diagram*), представлена у вигляді орієнтовного графа, може бути описана такою структурою:

$$D_p = \{I_d^p, V^p, E^p, f_{begin}^p, f_{end}^p, vt\}, \quad (1)$$

де  $I_d^p$  – унікальний номер діаграми прецедентів;  $V^p$  – список вершин діаграми прецедентів;  $E^p$  – список переходів діаграми прецедентів;  $f_{begin}^p$  – початкова вершина переходу діаграми прецедентів;  $f_{end}^p$  – кінцева вершина переходу діаграми прецедентів;  $vt$  – функція типу переходу діаграми прецедентів.

Визначимо початкову та кінцеву вершини переходу:

$$f_{begin}^p : E^p \rightarrow V^p; \quad f_{end}^p : E^p \rightarrow V^p; \quad (2)$$

$$vt : V^p \rightarrow VT; \quad (3)$$

$$VT = \{\text{actor, entity, function}\}. \quad (4)$$

Інформація про діаграму міститься у файлі в такій моделі:

– перелік вершин – акторів ( $V_{act}^p$ ).  $V_{act}^p$  описує вершину, яку визначає її унікальний номер, поле *quid* та поле *stereotype*, він визначений функцією  $vt$ , кожний актор може мати список параметрів. Список параметрів визначає *class\_attribute\_list*, кожний атрибут – *ClassAttribute*;

– перелік вершин – функцій  $V_{func}^p$ , що визначені унікальним номером, ім'ям, полем *quid* та додатковою рядковою інформацією;

– список ребер  $E^p$ . Ребро визначене типом зв'язку *Association*, унікальним номером, ім'ям, полем *quid*, полем *roles*, списком із двох об'єктів *Role*. Для кожного ребра є список із двох вершин – кінцевої та початкової.

Діаграму станів (*StateChart Diagram*) опишемо такою структурою:

$$D_{scd} = \{I_d^{scd}, V^{scd}, E^{scd}, V_{start}^{scd}, V_{stop}^{scd}, f^{scd}, f_{begin}^{scd}, f_{end}^{scd}\}, \quad (5)$$

де  $I_d^{scd}$  – унікальний номер діаграми станів;  $V^{scd}$  – множина вершин діаграми станів;  $E^{scd}$  – список переходів діаграми станів;  $V_{start}^{scd}$  – вер-

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

шини початкового стану діаграми станів;  $V_{\text{stop}}^{scd}$  – вершини кінцевого стану діаграми станів;  $f_{\text{begin}}^{scd}$  – початкова вершина переходу діаграми станів;  $f_{\text{end}}^{scd}$  – кінцева вершина переходу діаграми станів;  $f^{scd}$  – функція, що ставить у відповідність час виконання операції на діаграмі станів.

Визначимо початкову та кінцеву вершини переходу:

$$f^{scd} : V^{scd} \rightarrow R. \quad (6)$$

Інформація про діаграму, що відображена у файлі, у моделі складається зі структур:

– перелік вершин – назви робіт.  $V^{scd}$  описує вершину, яку визначає її унікальний номер – поле *quid* та поле *type*, що містить рядок *StartState*, список атрибутів представлено у полі *actions*, кожний елемент цього списку – атрибут вершини, що має назву, унікальний номер і поле *ActionTime*. Поле *ActionTime* містить атрибут виконання операції у вершині графа значення множини  $W$ ;

– список ребер визначений полем *transitions* і службовим словом *list transition\_list*, кожне ребро – структурою *object State\_Transition*, унікальним номером, полем *label*. Кінцева вершина ребра визначена службовим словом *supplier*, *supplier\_quidu* – унікальний номер кінцевої вершини. Початкова вершина ребра визначена службовим словом *client*, *client\_quidu* – унікальний номер початкової вершини. Ребро характеризується виконанням дії під час переходу та визначене полем *Event*. Поле *Event* характеризується назвою типу рядок, унікальним номером та службовим повідомленням, що визначено полем *sendEvent*, а повідомлення має свій унікальний номер;

– вершини початкового стану діаграми представлені у файлі через поле *object State* та позначені рядком *\$UNNAMED\$0*, через поле *type StartState* вершина визначена як початковий стан для графа.

– вершини кінцевого стану діаграми представлені у файлі через поле *object State* і позначені рядком *\$UNNAMED\$1*. Через поле *type*

*EndState* вершина визначена, як початковий кінцевий стан для графа.

Діаграму діяльностей (*Activity Diagram*) описуємо такою структурою:

$$D_{act} = \{I_{act}^{ad}, V^{ad}, E^{ad}, V_{start}^{ad}, V_{stop}^{ad}, f_{begin}^{ad}, f_{end}^{ad}, S\}, \quad (7)$$

де  $I_{act}^{ad}$  – унікальний номер діаграми діяльності;  $V^{ad}$  – список вершин (станів) діаграми діяльності;  $S$  – список паралельних виконавців діаграми діяльності;  $E^{ad}$  – список переходів діаграми діяльності;  $V_{start}^{ad}$  – вершини початкового стану діаграми діяльності;  $V_{stop}^{ad}$  – вершини кінцевого стану діаграми діяльності;  $f_{begin}^{ad}$  – початкова вершина діаграми діяльності;  $f_{end}^{ad}$  – кінцева вершина діаграми діяльності;  $f^{ad}$  – функція, що ставить у відповідність час виконання кожної операції діаграми діяльності.

Для списку вершин справедливо:

$$V^{ad} = VA \cup VC \cup VD \cup VG, \quad (8)$$

де  $VA$  – множина вершин переходів вершина діаграми діяльності;  $VC$  – множина вершин умовних переходів вершина діаграми діяльності;  $VD$  – множина вершин переходів точок роз'єднання діаграми діяльності;  $VG$  – множина вершин переходів точок склеювання діаграми діяльності.

Множини  $VA$ ,  $VC$ ,  $VD$ ,  $VG$  попарно не перетинаються. У множини  $VD$  може бути тільки один вхід у ребро, що набуває вигляду:

$$(\forall v \in VD) \text{Card} \{e \in E^{ad}, f_{begin}^{ad}(e) = v\} = 1, \quad (9)$$

$$(\forall v \in VD) \text{Card} \{e \in E^{ad}, f_{end}^{ad}(e) = v\} = 1, \quad (10)$$

$$s : V^{ad} \rightarrow S. \quad (11)$$

Інформація про діаграму, що відображена у файлі, у моделі складається зі структур:

– перелік вершин – назви робіт або переходів спеціального типу;

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

– перехід типу *State*;  
 – умовний перехід;  
 – перехід точки роз'єднання та склеювання типу *SynchronizationState* визначений унікальним номером та полем *quid*. Для точки роз'єднання характерним є список ребер роз'єднання. Список визначений полем *transitions (list transition\_list)* та списком ребер із полем *object State\_Transition*. Кожна вершина визначена полем *quid*, унікальним номером ребра та списком ребер початкового стану й кінцевих. Ребра початкові описані полем *supplier*, вони містять посилання на початковий стан графа та кінцеві, описані полем *client*. Усі переходи мають свої унікальні номери та подію передачі даних під час здійснення переходів;

– вершини початкового та кінцевого станів, список ребер і станів діаграми описані за допомогою службових слів;

– список виконавців *S* визначений у діаграмі як розділ *partitions (list Partitions)*. Список виконавців ініційований полем *object Partition*, має назву, унікальний номер визначений полем *quid*. Поле *class* містить дані на посилання належності до сутності діаграми прецедентів, поле *persistence* визначає тип сутності.

У цілому модель являє собою список графічних об'єктів, що записані в певному порядку.

Таким чином, у вхідній моделі запропоновано описання графоаналітичного представлення технологічного процесу залізничної станції, що виконано в середовищі IBM Rational Rose.

*Внутрішня модель представлення технологічного процесу.* Розглянуті діаграми станів і діяльностей визначають правила функції моделі залізничної станції. Станція являє собою сукупність автоматів, що взаємодіють між собою в дискретному часі. Частина автоматів існує весь час роботи моделі (постійні), а частину створюють і знищують у процесі роботи (тимчасові).

Постійні автомати відповідають ресурсам станції (маневрові локомотиви, колії, бригади ПТО та ін.). Тимчасовим автоматам відповідають поїзди.

Постійний автомат приймає запити від тимчасового автомата на виділення ресурсу, якщо в його розпорядженні є достатня кількість оди-

ниць ресурсів. Після закінчення роботи тимчасового автомата вивільняється задіяний ресурс постійного автомата.

Тимчасовий автомат створюється в разі активації вузла або вершини «діаграму прецедентів». Алгоритм виконання наступних дій описують відповідною діаграмою станів. Після завершення робіт, що відповідають поточному стану тимчасового автомата, він змінює свій стан під час переходу в нову активну вершину.

Якщо з однієї вершини виходить декілька дуг, то перехід відбувається уздовж однієї з них. Правило, що дозволяє обрати ребро, є атрибутом вершини. Робота тимчасового автомата закінчується, і він знищується після досягнення кінцевого стану.

Задача передбачає моделювання роботи станції, коли тимчасовий автомат знаходиться в одній із вершин діаграми станів. Цій вершині поставлена у відповідність діаграма діяльностей, вершини якої описують групи робіт, причому деякі роботи можуть виконуватися паралельно.

Внутрішня модель повинна бути основою для розробки ефективних методів функціонального моделювання роботи станцій. Побудову внутрішньої моделі здійснюють автоматично на основі вхідної моделі за допомогою UML – діаграм: прецедентів, станів і діяльностей.

На підставі діаграми прецедентів формують списки виконавців *E* та шаблонів об'єктів *D*, кожний елемент яких описують наступною структурою даних:

$$e_r = \{i_e, P_e\}, \quad (12)$$

де  $i_e$  – унікальний номер виконавця;  $P_e$  – список параметрів виконавця.

Шаблон об'єкта  $d_y \in D$

$$d_y = \{i_d, P_c, E_d, A\}, \quad (13)$$

де  $i_d$  – унікальний номер шаблону об'єкта;  $P_c$  – множина властивостей об'єкта зі значеннями за замовчуванням;  $E_d$  – список виконавців, необхідних для обслуговування об'єкта;  $A$  – скінченний автомат, що описує порядок виконання технологічних операцій з об'єктом.

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Формування скінченного автомата, що описує порядок виконання технологічних операцій з об'єктом, здійснюють на підставі діаграми станів. Для описання автомата використовують орієнтовний параметричний граф, вершини якого відповідають станам скінченного автомата, а дуги – переходам. Для описання структури графа використовують списки інцидентності вершин. При цьому кожен стан автомата описують структурою

$$s_a = \{i_a, R, X\}, \quad (14)$$

де  $i_a$  – унікальний номер стану автомата;  $R$  – технологія обслуговування об'єкта в окремій фазі технологічного процесу;  $X$  – список переходів автомата.

Елемент списку переходів описують структурою

$$x_q = \{z, i_a, f_p\}, \quad (15)$$

де  $z$  – вхідний сигнал;  $f_p$  – функція переходу.

Технологія обслуговування об'єкта в окремих фазах технологічного процесу формується на підставі діаграми діяльності. Моделлю технології є орієнтовний граф

$$T = \{O, G\} \quad (16)$$

Вершинам графа  $o_j \in O$  відповідають технологічні операції, а також точки початку та закінчення технологічного процесу, розгалуження, злиття та прийняття рішень. Зокрема, технологічні операції представляють структурами:

$$q_i = \{i_q, i_{qn}, f_s, f_d, f_e, E_q\}, \quad (17)$$

де  $i_q$  – унікальний номер вершини;  $i_{qn}$  – унікальний номер наступної вершини;  $f_s, f_e$  – функції, які виконують відповідно на початку та після закінчення операції;  $f_d$  – функція, що визначає тривалість операції;  $E_q$  – список виконавців. Кожен елемент списку виконавців визначають спеціалізацією виконавця, необхідною для початку роботи, і параметром, що вказує на порядок його звільнення. При цьому прийнято, що якщо вершина, яка пов'язана із

зазначеною, розміщується на тій же доріжці виконавця, що й одна з пов'язаних із нею вершин, то після закінчення виконання операції виконавець залишається зайнятим об'єктом, інакше виконавець звільняється.

### Результати

Запропонована методика дозволить за допомогою діаграм прецедентів, станів і діяльності мови UML будувати імітаційні моделі залізничних станцій. перевагою моделі є те, що вона являє собою ієрархічно організовану сукупність взаємодіючих скінчених автоматів, при цьому складна модель на кожному рівні ієрархії зберігає просту й доступну для огляду структуру.

### Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна роботи полягає в розробці функціональної моделі залізничних станцій із застосуванням методів візуального проектування, що дозволяє зменшити витрати часу на етапі параметризації моделі.

Модель роботи залізничної станції дозволяє вирішувати завдання оперативного планування її роботи.

### Висновки

У цій статті запропоновано методику формалізації описання технологічних процесів залізничних станцій на основі методів візуального програмування. Адаптовано діаграми станів і діяльності UML для представлення технології роботи залізничних станцій. Під час формалізації описання діаграми станів залізничної станції описують зміну фаз обслуговування об'єктів у процесі виконання цього технологічного процесу. Діаграма станів являє собою скінченний автомат, який моделює послідовності зміни станів об'єкта. Деталізацію поведінки об'єктів, які обслуговують на залізничних станціях, виконують за допомогою діаграм діяльності. Їх використовують для формального описання технологічних операцій з об'єктами та виконавцями, що їх забезпечують.

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бобровский В. И. Модели, методы и алгоритмы автоматизированного проектирования железнодорожных станций : монография / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Р. В. Вернигора, В. В. Малашкин. – Д. : Изд-во Маковецкий, 2010. – 156 с. doi: 10.15802/978-966-1507-24-0
2. Бобровский В. И. Функциональное моделирование работы железнодорожных станций: монография / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Р. В. Вернигора, В. В. Малашкин; Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна. – Днепропетровск, 2015. – 269 с.
3. Глушков, В. М. Синтез цифровых автоматов / В. М. Глушков. – Москва: Физматлит, 1962. – 476 с.
4. Горбова, О. В. Удосконалення методів техніко-експлуатаційної оцінки роботи залізничних станцій : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.20 / Горбова Олександра Вікторівна ; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпро, 2016. – 167 с.
5. Дозорцев, В. М. Динамическое моделирование в оптимальном управлении и автоматизированном обучении операторов технологических процессов. Ч. 2. Компьютерные тренажеры реального времени / В. М. Дозорцев // Приборы и системы управления. – 1996. – № 8. – С.41–50.
6. Жуковичкий, И. В. Моделирование в процессе проектирования информационных систем на железнодорожном транспорте / И. В. Жуковичкий, А. А. Косолапов // Системные технологии моделирования сложных процессов : монография / под общ. ред. проф. А. И. Михалева. – Днепр, 2016. – С. 268–286.
7. Козаченко, Д. Н. Автоматизированное формирование функциональных моделей железнодорожных станций / Д. Н. Козаченко, Р. В. Вернигора, В. В. Малашкин // Транспортні системи та технології перевезень : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2014. – Вип. 8. – С. 65–73.
8. Козаченко, Д. Н. Математическая модель для оценки технико-технологических показателей работы железнодорожных станций / Д. Н. Козаченко // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 3 (45). – С. 22–28. doi: 10.15802/stp2013/14540
9. Козаченко, Д. Н. Объектно-ориентированная модель функционирования железнодорожных станций / Д. М. Козаченко // Наука та прогрес трансп. – 2013. – № 4 (46). – С. 47–55.
10. Козаченко, Д. М. Программный комплекс для імітаційного моделювання роботи залізничних станцій на основі добового плану графіку / Д. М. Козаченко, Р. В. Вернигора, Р. Г. Коробйова // Залізн. трансп. України. – 2008. – № 4 (70). – С. 18–20.
11. Леоненков, А. В., Самоучитель UML / А. В. Леоненков. – СПб. : БХВ–Петербург, 2002.
12. Мальков, М. В. Моделирование технологических процессов: методы и опыт / М. В. Мальков, А. Г. Олейник, А. М. Федоров // Труды КНЦ РАН, 2010. – С. 93–101.
13. Петросов, Д. А. Поэтапное моделирование технологических процессов с использованием интеллектуального структурно-параметрического синтеза / Д. А. Петросов., В. А. Игнатенко // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 12 (1). – С. 97–102. doi:10.17513/fr.41986
14. Bianco, Vieri del. A formalization of UML statecharts for real-time software modeling [Електронний ресурс] / Vieri del Bianco, L. Lavazza, M. Mauri. – Режим доступу: <https://cutt.ly/QeZxM3q> – Назва з екрана. – Перевірено : 20.11.2019.
15. Bobrovskiy, V. I. Functional simulation of railway stations on the basis of finite-state automata / V. I. Bobrovskiy, D. N. Kozachenko, R. V. Vernigora // Transport problems. – 2014. – Vol. 9. – Iss. 3. – P. 57–65.
16. Gorbova, O. V. Modeling Work of Sorting Station Using UML / O. V. Gorbova // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 1 (55). – С. 129–138. doi 10.15802/STP2015/38260
17. Harel, D. Statecharts: A visual formalism for complex systems / D. Harel // Science of Computer Programming. – North-Holland, 1987. – Vol. 8. – Iss. 3. – P. 231–274. doi:10.1016/0167-6423(87)90035-9
18. Harel, D., Statecharts: A visual formalisms / Devid Harel // Communications of the ACM. – New York, 1988. – Vol. 31, Iss. 5, P. 514–530.
19. On Modelling of Hierarchical and Distributed Discrete-Event Systems / M. Silva, J.-M. Colom, J. Julvez, C. Mahulea, J. H. van Schuppen, R. Su, J. Komenda, J. Raisch, S. Geist, P. Darondeau // The DISC Project Perspective. – 2007. – p. 85.
20. Zimmermann, A. Eine Quantitative Untersuchung des European Train Control System mit UML State Machines [Електронний ресурс] / A. Zimmermann, J. Trowitzsch. – Режим доступу: <https://cutt.ly/HeZxV5r> – Назва з екрана. – Перевірено : 20.11.2019.

А. В. ГОРБОВА<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта alexandra.gorbova@gmail.com, ORCID 0000-0002-5612-2715

## ФОРМАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ НА ОСНОВЕ ПОЭТАПНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Цель.** Для представления технологического процесса с использованием методологии поэтапного моделирования необходимо применять специализированное программное обеспечение. Формализация технологического процесса является одной из основных задач на этапе проектирования или оптимизации работы железнодорожной станции. В статье предусмотрено разработать методику формализации технологических процессов на основе метода поэтапного моделирования. **Методика.** С помощью методики поэтапного проектирования выполнено построение входной, внутренней и исходной модели проектирования работы железнодорожной станции. Входная модель образована диаграммами прецедентов, состояний и деятельностей, построенных с помощью инструментов программного комплекса IBM Rational Rose. Эта модель обеспечивает возможность графоаналитического представления технологических процессов железнодорожной станции с его визуальным контролем, который позволяет избежать трудоемкого ручного кодирования и исключить появление ошибок. Приведенные диаграммы описывают технологический процесс железнодорожной станции на базе иерархических диаграмм последовательности работ различной степени детализации. А исходная и внутренняя модели построены с помощью унифицированного языка моделирования UML. В качестве методов исследования использованы методы объектно-ориентированного проектирования, конечных автоматов и системного программирования. **Результаты.** Предложенная методика позволяет с помощью диаграмм Харела строить имитационные модели железнодорожных станций. Эти модели представляют собой иерархически организованную совокупность взаимодействующих конечных автоматов, при этом сложная модель на каждом уровне иерархии сохраняет простую и доступную для осмотра структуру. Сигналы о начале и окончании работ, которые генерируют при переходе между состояниями, позволяют синхронизировать работу модели, а использование действий при описании состояний и сигналов (расширение, предоставляемое на языке UML) позволяет использовать внешние алгоритмы там, где обычный/автоматный формализм становится неудобным. Методология, реализованная средствами языка UML, позволяет существенно облегчить представление и восприятие модели станции. **Научная новизна.** Усовершенствована методика представления функциональной модели железнодорожных станций с применением методов визуального проектирования. **Практическая значимость.** Предложенная методика предназначена для графоаналитического представления технологического процесса работы железнодорожной станции с использованием методологии поэтапного моделирования. При моделировании на базе графической входной модели выполнено построение внутренней и исходящей моделей, а также представление методов их преобразований.

**Ключевые слова:** технологический процесс; диаграмма состояний; диаграмма действий; диаграмма прецедентов; язык UML; железнодорожная станция; модель работы станции

А. V. GORBOVA<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Computer Information Technologies», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail alexandra.gorbova@gmail.com, ORCID 0000-0002-5612-2715

## FORMALIZATION OF THE TECHNOLOGICAL PROCESSES AT RAILWAY STATIONS BASED ON THE STEP-BY-STEP MODELING

**Purpose.** Specialized software must be used to represent the technological process using step-by-step modeling methodology. Formalizing the technological process is one of the main tasks in the design or optimization phase of a railway station. The article proposes to develop a methodology of formalizing the technological processes based

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

on the step-by-step modeling. **Methodology.** Using the methodology of stage-by-stage design, the input, internal and initial model of the railway station's operation were constructed. The input model of the proposed method is formed by the use case diagram, the statechart and activities diagrams, which are constructed using the tools of the IBM Rational Rose software. This model provides a graphoanalytic representation of the technological processes of a railway station with its visual control, which avoids time-consuming manual coding and eliminates errors. The diagrams below describe the technological process of a railway station based on hierarchical diagrams of the sequence of works of different detail degrees. Both initial and internal models are constructed using a unified UML modeling language. The methods of object-oriented design, finite state machines and system programming are used as research methods. **Findings.** The proposed methodology will make it possible to construct simulation models of railway stations using Harel statecharts. These models represent a hierarchically organized set of interacting finite state machines, while the complex model at each level of the hierarchy retains a simple and accessible structure. The start and finish signals generated by the state transition allow the model to be synchronized, and the use of state and signal description actions (UML extension) makes it possible to use external algorithms where the usual/automatic formalism becomes inconvenient. And the methodology implemented by means of the UML language, significantly facilitates the presentation and perception of the station model. **Originality.** The methodology of presenting a functional model of railway stations with the use of visual design methods has been improved. **Practical value.** The proposed method is intended for semigraphical representation of technological process of railway station operation, using the methodology of step-by-step modeling. Modeling on the basis of a graphical input model constructs internal and output models, as well as presents the methods for their transformations.

**Keywords:** technological process; statechart; activity diagram; use case diagram; UML language; railway station; railway station operation model

## REFERENCES

1. Bobrovskiy, V. I., Kozachenko, D. N., Vernigora, R. V., & Malashkin, V. V. (2015). *Functional modeling of the work of railway stations. Monografiya*. Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. (in Russian)
2. Bobrovskiy, V. I., Kozachenko, D. N., Vernigora, R. V., & Malashkin, V. V. (2010). *Models and Methods of Automatization Railway Station Engineering*. Dnipropetrovsk: Makovetskiy. doi: 10.15802/978-966-1507-24-0 (in Russian)
3. Glushkov, V. M. (1962). *Sintez tsifrovyykh avtomatov*. Moscow: Fizmatlit. (in Russian)
4. Gorbova, O. V. (2016). *Udoskonalnya metodiv tekhniko-eksploatatsiyno otsinki robots zaliznychnykh stantsiy*. (Dysertatsiia kandydata tekhnichnykh nauk). Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro. (in Ukrainian)
5. Dozortsev, V. M. (1996). *Dinamicheskoe modelirovanie v optimalnom upravlenii i avtomatizirovannom obuchenii operatorov tekhnologicheskikh protsessov. Vol. 2. Kompyuternye trenazhery realnogo vremeni. Pribory i sistemy upravleniya*. (in Russian)
6. Zhukovitsky, I. V. & Kosolapov A. A. Modelirovanie v protsesse proektirovaniya informatsionnykh sistem na zheleznodorozhnom transporte. In A. I. Mikhaleva (Ed.). *Sistemnye tekhnologii modelirovaniya slozhnykh protsessov: Monografiya*. Dnipro. (in Russian)
7. Kozachenko, D. N., Vernigora, R. V. & Malashkin, V. V. (2014). Avtomatizirovannoe formirovanie funktsionalnykh modeley zheleznodorozhnykh stantsiy. *Collection of scientific works of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan «Transport System and Transportation Technologies»*, 8, 65-73. (in Russian)
8. Kozachenko, D. N. (2013). Mathematical model for estimating of technical and technological indicators of railway stations operation. *Science and transport progress*, 3(45), 22–28. doi: 10.15802/stp2013/14540 (in Russian)
9. Kozachenko D. N. (2014). The object-oriented model of the functioning of railway stations. *Science and Transport Progress*, 4(46), 47-55. (in Russian)
10. Kozachenko, D. M., Vernigora, R. V., & Korobyova, R. G. (2008). Programnyy kompleks dlja imitacijnogho modeljuvannja roboty zaliznychnykh stancij na osnovi dobovogho planu ghrafiku. *Zaliznychnyj transport Ukrainy*, 4(70), 18-20. (in Russian)
11. Leonenkov, A. V. (2002). *Samouchitel UML*. St. Petersburg: BHV-Petersburg. (in Russian)
12. Malkov, M. V, Oleynik, A. G., & Fedorov, A. M. (2010). Modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov: metody i opyt. *Trudy KNTs RAN*, 93-101. (in Russian)

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

13. Petrosov, D. A., & Ignatenko, V. A. (2017). Step-by-modeling of technological processes with use of intelligent structural-parametric synthesis. *Fundamentalnye issledovaniya*, 12(1), 97-102. doi:10.17513/fr.41986 (in Russian)
14. Bianco, Vieri del, Lavazza, L., Mauri, M. *A formalization of uml statecharts for real-time software modeling*. <https://cutt.ly/HeZxV5r> (in English)
15. Bobrovskiy, V. I., Kozachenko, D. N., & Vernigora, R. V. (2014). Functional simulation of railway stations on the basis of finite-state automata. *Transport problems* 9(3), 57-65. (in English)
16. Gorbova, O. V. (2015). Modeling work of sorting station using uml. *Science and Transport Progress*, 1(55), 129-138. doi:10.15802/stp2015/38260 (in English)
17. Harel, D. (1987). Statecharts: a visual formalism for complex systems. *Science of Computer Programming*, 8(3), 231–274. doi:10.1016/0167-6423(87)90035-9 (in English)
18. Harel, D. (1988). Statecharts: A visual formalisms. *Communications of the ACM*, 31(5), 514-530.
19. Silva, M., Colom, J.-M., Julvez, J., Mahulea, C., Schuppen, J. H. van, Su, R. ... Darondeau, P. (2007). *On Modeling of Hierarchical and Distributed Discrete-Event Systems*. The DISC Project Perspective. (in English)
20. Zimmermann, A., & Trowitzsch, J. Eine Quantitative Untersuchung des European Train Control System mit UML State Machines. Retrieved from <https://cutt.ly/HeZxV5r> (in German)

Надійшла до редколегії: 27.05.2019

Прийнята до друку: 24.09.2019

## UDC 004.7.032.26:656.222.3

V. M. PAKHOMOVA<sup>1\*</sup>, Y. S. MANDYBURA<sup>2\*</sup><sup>1\*</sup>Dep. «Electronic Computing Machines», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, 49010, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 373 15 89, e-mail viknikpakh@gmail.com, ORCID 0000-0002-0022-099X<sup>2\*</sup>Dep. «Electronic Computing Machines», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, 49010, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 373 15 89, e-mail mandybura1994@gmail.com, ORCID 0000-0002-7134-9416

## OPTIMAL ROUTE DEFINITION IN THE RAILWAY INFORMATION NETWORK USING NEURAL-FUZZY MODELS

**Purpose.** Modern algorithms for choosing the shortest route, for example, the Bellman-Ford and Dijkstra algorithms, which are currently widely used in existing routing protocols (RIP, OSPF), do not always lead to an effective result. Therefore, there is a need to study the possibility of organizing routing in the railway network of information and telecommunication system (ITS) using the methods of artificial intelligence. **Methodology.** On the basis of the simulation model created in the OPNET modeling system a fragment of the ITS railway network was considered and the following samples were formed: training, testing, and control one. For modeling a neural-fuzzy network (hybrid system) in the the MatLAB system the following parameters are input: packet length (three term sets), traffic intensity (five term sets), and the number of intermediate routers that make up the route (four term sets). As the resulting characteristic, the time spent by the packet in the routers along its route in the ITS network (four term sets) was taken. On the basis of a certain time of packet residence in the routers and queue delays on the routers making up different paths (with the same number of the routers) the optimal route was determined. **Findings.** For the railway ITS fragment under consideration, a forecast was made of the packet residence time in the routers along its route based on the neural-fuzzy network created in the MatLAB system. The authors conducted the study of the average error of the neural-fuzzy network's training with various membership functions and according to the different methods of training optimization. It was found that the smallest value of the average learning error is provided by the neuro-fuzzy network configuration 3–12–60–60–1 when using the symmetric Gaussian membership function according to the hybrid optimization method. **Originality.** According to the RIP and OSPF scenarios, the following characteristics were obtained on the simulation model created in the OPNET simulation system: average server load, average packet processing time by the router, average waiting time for packets in the queue, average number of lost packets, and network convergence time. It was determined that the best results are achieved by the simulation network model according to the OSPF scenario. The proposed integrated routing system in the ITS network of railway transport, which is based on the neural-fuzzy networks created, determines the optimal route in the network faster than the existing OSPF routing protocol. **Practical value.** An integrated routing system in the ITS system of railway transport will make it possible to determine the optimal route in the network with the same number of the routers that make up the packet path in real time.

**Keywords:** routing; OSPF protocol; simulation model; hybrid system; term; membership function; sample; error

## Introduction

At present, various scientists have been searching for a solution of the routing problem in the computer networks based on the use of neural networks [1, 3–4, 6, 14, 19]. The first such attempt was made by Hopfield to solve the traveling salesman problem [11]. Pavlenko M. A. analyzed the possibilities of some neural networks: multi-layer perceptron, Hopfield network, RBF network for organizing routing of five routers [6]. It has been established that the most promising way to

solve the routing problem is the Hopfield's network, which is able to operate in real time, but in the case of using it one needs to conduct additional studies of the transfer functions of neurons and the energy function of the neural network [4, 8, 11, 18].

In turn, fuzzy neural networks (hybrid systems) are designed to combine the benefits of neural networks and fuzzy inference systems [13, 17]. This makes it possible to develop and submit the systems models in the form of fuzzy product rules to construct which the capabilities of the neural

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

networks are used. For example, the Adaptive–Network–Based Fuzzy Inference System (ANFIS) implemented in the MatLAB Fuzzy Logic Toolbox application [9–10]. In the work [2], in particular, Kovalenko T. A. determined the route in the computer network based on the neural fuzzy network, to the input of which the following parameters are supplied: number of transitions, data transmission speed; as a resultant characteristic the time of the packet residence in the route was taken. But it is appropriate for the railway ITS network to consider a change in the traffic intensity rather than a data transmission speed that requires the construction of a neural network of another structure. In addition, based on the estimated packet transmission time in the network, it is advisable to determine the route itself, provided the same number of routers on the paths of the packet, which also requires the creation of additional neural network.

Previously, the authors of the works [7, 15–16, 20] have already presented the results of studies of the use of intellectual means in the railway ITS network: Hopfield network and multi-layer neural network, ant and genetic methods. In addition, the possibility of using the RIP protocol in the Prydniprovskia Railway network on a software model was investigated. But nowadays, new modeling systems have emerged that allow us to create simulation models of networks and conduct research on them. Among them, the OPNET Modeler system [5, 12], which combines analytical methods and simulation tools.

### Purpose

In our work, we envisage for the railway ITS network to develop a methodology for determining the optimal route based on the use of fuzzy neural networks. For their modeling to generate samples on a simulation model of the railway ITS network fragment created in the OPNET Modeler system.

### Methodology

**Problem statement.** Today, the railway transport ITS network, the fragment of which is presented in Fig. 1, is being constructed based on an optical transport network. Conceptually, to construct a single data network of Ukrzaliznytsia, Cisco network equipment was selected, which is

a single hardware and software complex. At the present stage in the railway ITS network, the router performs OSPF (Open Shortest Path First) protocol, as it is a common standard supported by various network equipment manufacturers and avoids closed loops during development of the data transmission networks at the railway transport of Ukraine.

Given that the packet transmission time on the network channel is much shorter, it is only advisable to consider the packet residence time on the routers that make up its path in the ITS network. Given that the packets are received by the router according to the Poisson law and the distribution of processing time is exponential, we have the M/M/1 model. Then the packet residence time on the router is calculated in the following way:

$$t_i = t_i^w + t_i^{pr}, \quad (1)$$

where  $t_i$  – package residence time on the  $i$ -th router,  $\mu$ s;  $t_i^w$  – packet waiting time in the queue on the  $i$ -th router,  $\mu$ s;  $t_i^{pr}$  – packet processing time by the  $i$ -th router,  $\mu$ s.

In turn, the processing time of packet by the  $i$ -th router can be calculated by the well-known formula:

$$t_i^{pr} = \frac{L^{pac}}{V}, \quad (2)$$

where  $L^{pac}$  – packet length, byte;  $V$  – the rate of data staging by the router, Mbps (in particular for Fast Ethernet 100 Mbps).

The number of packets processed by the  $i$ -th router will be:

$$\rho_i = \lambda_i \cdot t_i^{pr}, \quad (3)$$

where  $\lambda_i$  – the intensity of packets receipt to the  $i$ -th router, packet/s.

Then the calculation of the packet waiting time in the queue on the  $i$ -th router is calculated by the following formula:

$$t_i^w = \frac{\rho_i \cdot t_i^{pr}}{1 - \rho_i}. \quad (4)$$

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

It is necessary to determine the optimal route of packet in the railway ITS network provided that:

$$\sum_{i=1}^K t_i \rightarrow \min, \quad (5)$$

where  $K$  – is the number of intermediate routers that make up the packet path.

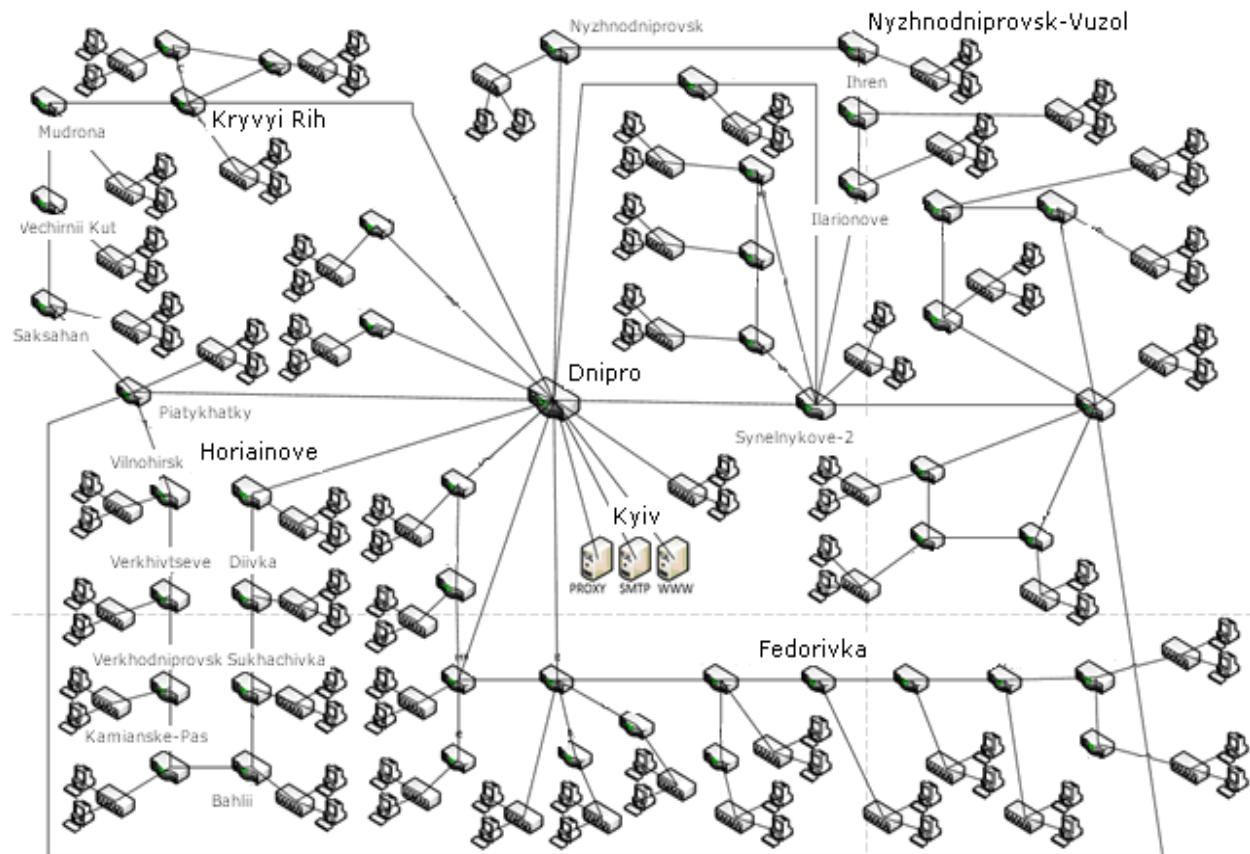


Fig. 1. The structure of the railway ITS network fragment under consideration:

 – router;  – switch;  – workstation;  – server

**Creating a simulation model.** In the OPNET Modeler simulation system a simulation model of the ITS railway network fragment was created, the structure of which is presented in Fig. 2, according to the structure of the ITS network (see Fig. 1).

Two scenarios have been created on the Fast Ethernet simulation model at the ITS of Prydniprovsk Railway: RIP and OSPF protocol. The study (within five minutes) of the following characteristics was performed: average load of the

server located in Kyiv; average packet processing time by the router in Dnipro; average waiting time for packets in the queue (Dnipro–Synelnykove section); average number of packets lost with the following parameters: packet length is 6000 bits, traffic intensity is 10 packets/sec. Some characteristics obtained (from 2 min 00 sec to 3 min 00 sec) on the simulation model of the network are shown in Fig. 3.

– router; – switch; – workstation

the higher the number of lost packets (Fig. 3, *b*).

**Determining the packet residence time on the routers based on the use of Neural Fuzzy Network (NN1).** The following variables are used as the input parameters:  $x_1$  – packet length ( $LM$ ,  $LC$ ,  $L$ );  $x_2$  – traffic intensity ( $\Lambda M$ ,  $\Lambda Mb$ ,  $\Lambda C$ ,  $\Lambda Cb$ ,  $\Lambda$ );  $x_3$  – number of transitions (number of intermediate routers that make up the packet route) ( $K1$ ,  $K2$ ,  $K3$ ,  $K4$ ). The packet residence time in the routers on the route of its transmission in the ITS network ( $T1$ ,  $T2$ ,  $T3$ ,  $T4$ ) is taken as the resultant characteristic  $y$ . The values of the term sets used for linguistic evaluation of input and output variables are summarized in Table 1.

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

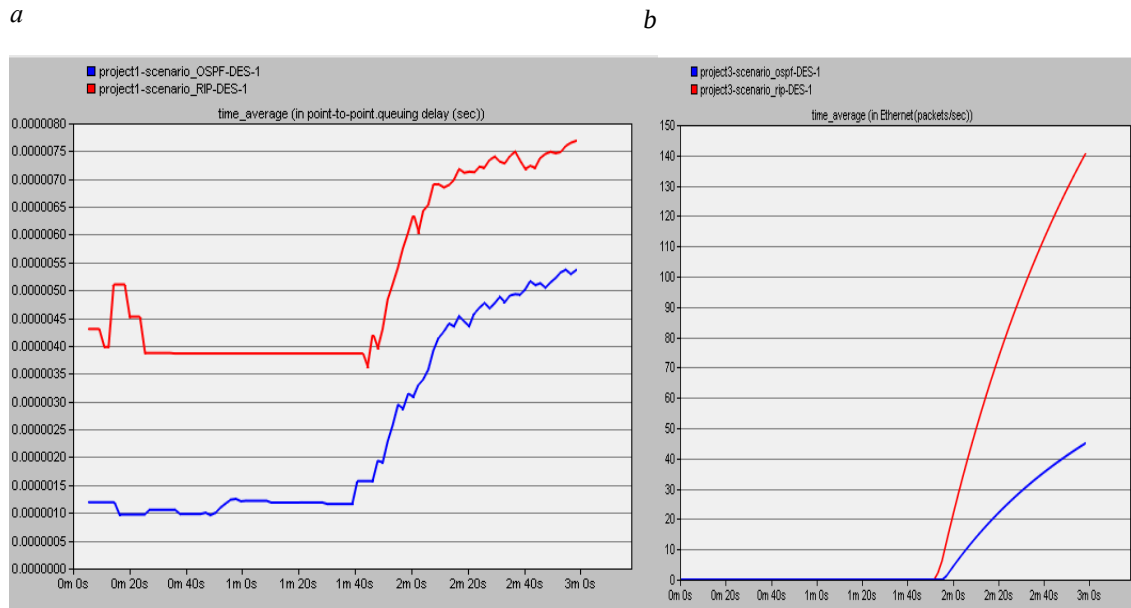


Fig. 3. The experiment results on a simulation model:

*a* – the average waiting time for packets in a queue; *b* – the average number of packets lost on the router

Table 1

## Linguistic evaluation of input and output variables for NN1

| Input variables      |                             |                       | Output variable                                            |
|----------------------|-----------------------------|-----------------------|------------------------------------------------------------|
| Packet length, bytes | Traffic intensity, packet/s | Number of transitions | Packet residence time on the routers on the route, $\mu$ s |
| $LM$ : 70 – 500      | $\Lambda M$ : 10 – 200      | $K1$ : 1              | $T1$ : 5,6 – 140                                           |
| $LC$ : 501 – 1 000   | $\Lambda Mb$ : 201 – 400    | $K2$ : 2              | $T2$ : 141 – 275                                           |
| $L$ : 1 001 – 1 500  | $\Lambda C$ : 401 – 600     | $K3$ : 3              | $T3$ : 276 – 410                                           |
|                      | $\Lambda Cb$ : 601 – 800    | $K4$ : 4              | $T4$ : 411 – 545                                           |
|                      | $\Lambda$ : 801 – 1 000     |                       |                                                            |

The number of fuzzy product rules depends on the number of input variables and the number of terms and is  $3 \cdot 5 \cdot 4 = 60$  rules. The rule base fragment is presented below:

if  $x_1 = LM$  I  $x_2 = \Lambda M$  I  $x_3 = K1$ , then  $y = T1$ ;  
 if  $x_1 = LM$  I  $x_2 = \Lambda M$  I  $x_3 = K2$ , then  $y = T3$ ;  
 if  $x_1 = LM$  I  $x_2 = \Lambda M$  I  $x_3 = K3$ , then  $y = T1$ ;  
 if  $x_1 = LM$  I  $x_2 = \Lambda M$  I  $x_3 = K4$ , then  $y = T4$ ;  
 if  $x_1 = LM$  I  $x_2 = \Lambda Mb$  I  $x_3 = K1$ , then  $y = T1$ ;  
 if  $x_1 = LM$  I  $x_2 = \Lambda Mb$  I  $x_3 = K2$ , then  $y = T3$ ;  
 if  $x_1 = LM$  I  $x_2 = \Lambda Mb$  I  $x_3 = K3$ , then  $y = T1$ ;  
 if  $x_1 = LM$  I  $x_2 = \Lambda Mb$  I  $x_3 = K4$ , then  $y = T4$ ;  
 if  $x_1 = LM$  I  $x_2 = \Lambda C$  I  $x_3 = K1$ , then  $y = T1$ .

The structure of the corresponding NN1 is shown in Fig. 4. Layer 1 contains neurons that represent membership functions of the input fuzzy variables and perform the operation of fuzzification (making fuzzy) of the input data. Layer 2 contains neurons that store the correct values for the rules that make up the knowledge base created by the model's training; these neurons may contain any variant of the realization of the  $t$ -norm operation, which is a fuzzy analogue of «AND» (logical operation «AND»). Neurons of the layer 3 contain the results of calculations of rules, taking into account the weight of each rule. Neurons of the layer 4 contain the final results of the rules' calculations,

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

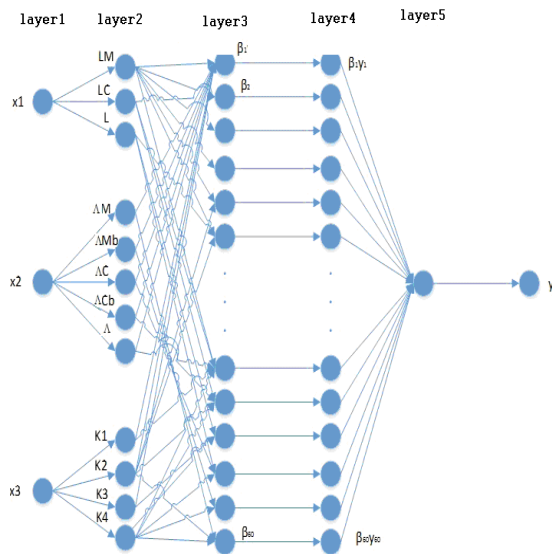


Fig. 4. NN1 structure

which are grouped into fuzzy classes. Layer 5 contains only one neuron that calculates the final model output by performing a defuzzification (making clear) by determining the centers of fuzzy classes.

**Formation of samples for the NN1.** The following samples for the NN1 were formed: a training sample of 60 examples (a fragment of which is given in Table 2), a test sample of 24 examples and a control sample of 12 examples (Table 3).

Table 2

Fragment of training sample for the NN1

| Packet length, bytes | Traffic intensity, packet/sec | Number of transitions | Packet time in the routers on the route, $\mu$ s | Packet length, bytes | Traffic intensity, packet/sec | Number of transitions | Package time in the routers on the route, $\mu$ s |
|----------------------|-------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------|
| 70                   | 10                            | 1                     | 5.6                                              | 70                   | 1 000                         | 1                     | 5,6                                               |
| 500                  | 10                            | 1                     | 40                                               | 500                  | 1 000                         | 1                     | 42                                                |
| 1 000                | 10                            | 1                     | 80                                               | 1 000                | 1 000                         | 1                     | 87                                                |
| 1 500                | 10                            | 1                     | 120                                              | 1 500                | 1 000                         | 1                     | 136                                               |
| 70                   | 10                            | 2                     | 11.2                                             | 70                   | 1 000                         | 2                     | 11                                                |
| 500                  | 10                            | 2                     | 80                                               | 500                  | 1 000                         | 2                     | 83                                                |
| 1 000                | 10                            | 2                     | 160                                              | 1 000                | 1 000                         | 2                     | 174                                               |
| 1 500                | 10                            | 2                     | 360                                              | 1 500                | 1 000                         | 2                     | 273                                               |
| 70                   | 10                            | 3                     | 16.8                                             | 70                   | 1 000                         | 3                     | 17                                                |
| 500                  | 10                            | 3                     | 120                                              | 500                  | 1 000                         | 3                     | 125                                               |
| 1 000                | 10                            | 3                     | 240                                              | 1 000                | 1 000                         | 3                     | 261                                               |
| 1 500                | 10                            | 3                     | 360                                              | 1 500                | 1 000                         | 3                     | 409                                               |
| 70                   | 10                            | 4                     | 22.4                                             | 70                   | 1 000                         | 4                     | 23                                                |
| 500                  | 10                            | 4                     | 160                                              | 500                  | 1 000                         | 4                     | 167                                               |
| 1 000                | 10                            | 4                     | 320                                              | 1 000                | 1 000                         | 4                     | 348                                               |
| 1 500                | 10                            | 4                     | 480                                              | 1 500                | 1 000                         | 4                     | 545                                               |

Table 3

**Test and control samples for the NN1**

| Test sample          |                               |                       |                                                   | Control sample       |                               |                       |                                                   |
|----------------------|-------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------|
| Packet length, bytes | Traffic intensity, packet/sec | Number of transitions | Package time in the routers on the route, $\mu$ s | Packet length, bytes | Traffic intensity, packet/sec | Number of transitions | Package time in the routers on the route, $\mu$ s |
| 500                  | 300                           | 1                     | 40                                                | 500                  | 500                           | 1                     | 41                                                |
| 1 000                | 300                           | 1                     | 82                                                | 1 000                | 500                           | 1                     | 83                                                |
| 1 500                | 300                           | 1                     | 124                                               | 1 500                | 500                           | 1                     | 128                                               |
| 500                  | 300                           | 2                     | 81                                                | 500                  | 500                           | 2                     | 82                                                |
| 1 000                | 300                           | 2                     | 163                                               | 1 000                | 500                           | 2                     | 167                                               |
| 1 500                | 300                           | 2                     | 373                                               | 1 500                | 500                           | 2                     | 255                                               |
| 500                  | 300                           | 3                     | 121                                               | 500                  | 500                           | 3                     | 122                                               |
| 1 000                | 300                           | 3                     | 245                                               | 1 000                | 500                           | 3                     | 250                                               |
| 1 500                | 300                           | 3                     | 373                                               | 1 500                | 500                           | 3                     | 383                                               |
| 500                  | 300                           | 4                     | 162                                               | 500                  | 500                           | 4                     | 163                                               |
| 1 000                | 300                           | 4                     | 328                                               | 1 000                | 500                           | 4                     | 333                                               |
| 1 500                | 300                           | 4                     | 498                                               | 1 500                | 500                           | 4                     | 511                                               |
| 500                  | 700                           | 1                     | 41                                                |                      |                               |                       |                                                   |
| 1 000                | 700                           | 1                     | 85                                                |                      |                               |                       |                                                   |
| 1 500                | 700                           | 1                     | 131                                               |                      |                               |                       |                                                   |
| 500                  | 700                           | 2                     | 82                                                |                      |                               |                       |                                                   |
| 1 000                | 700                           | 2                     | 169                                               |                      |                               |                       |                                                   |
| 1 500                | 700                           | 2                     | 393                                               |                      |                               |                       |                                                   |
| 500                  | 700                           | 3                     | 123                                               |                      |                               |                       |                                                   |
| 1 000                | 700                           | 3                     | 254                                               |                      |                               |                       |                                                   |
| 1 500                | 700                           | 3                     | 393                                               |                      |                               |                       |                                                   |
| 500                  | 700                           | 4                     | 165                                               |                      |                               |                       |                                                   |
| 1 000                | 700                           | 4                     | 339                                               |                      |                               |                       |                                                   |
| 1 500                | 700                           | 4                     | 524                                               |                      |                               |                       |                                                   |

**Training and testing the NN1.** The Neural Networks Toolbox, which is a part of MatLAB, has more than 160 different functions that make it possible to create, train, and research neural networks. In addition, the ANFIS for MatLAB supports almost complete automation of the NN crea-

tion process, which allows to construct the NN configuration 3–12–60–60–1, using the Sugeno algorithm. 100 cycles (Epochs) are set for NN1 training; the error of the NN1 training according to the hybrid method is  $8.4873 \cdot 10^{-10}$  sec.

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

On the network simulation model, constructed in the ORNET, with a packet length of 550 bytes, traffic intensity of 10 packets/sec and three transitions, the packet residence time on the routers in the ITS railway transport network is 0.000132 sec. To test the constructed NN1, let us run it with in-

put data that are not in any of the samples. The simulation is displayed in a graphical window (Fig. 5), where the path of the logical inference by each rule, the resultant fuzzy set are presented, and the defuzzification procedure is performed.

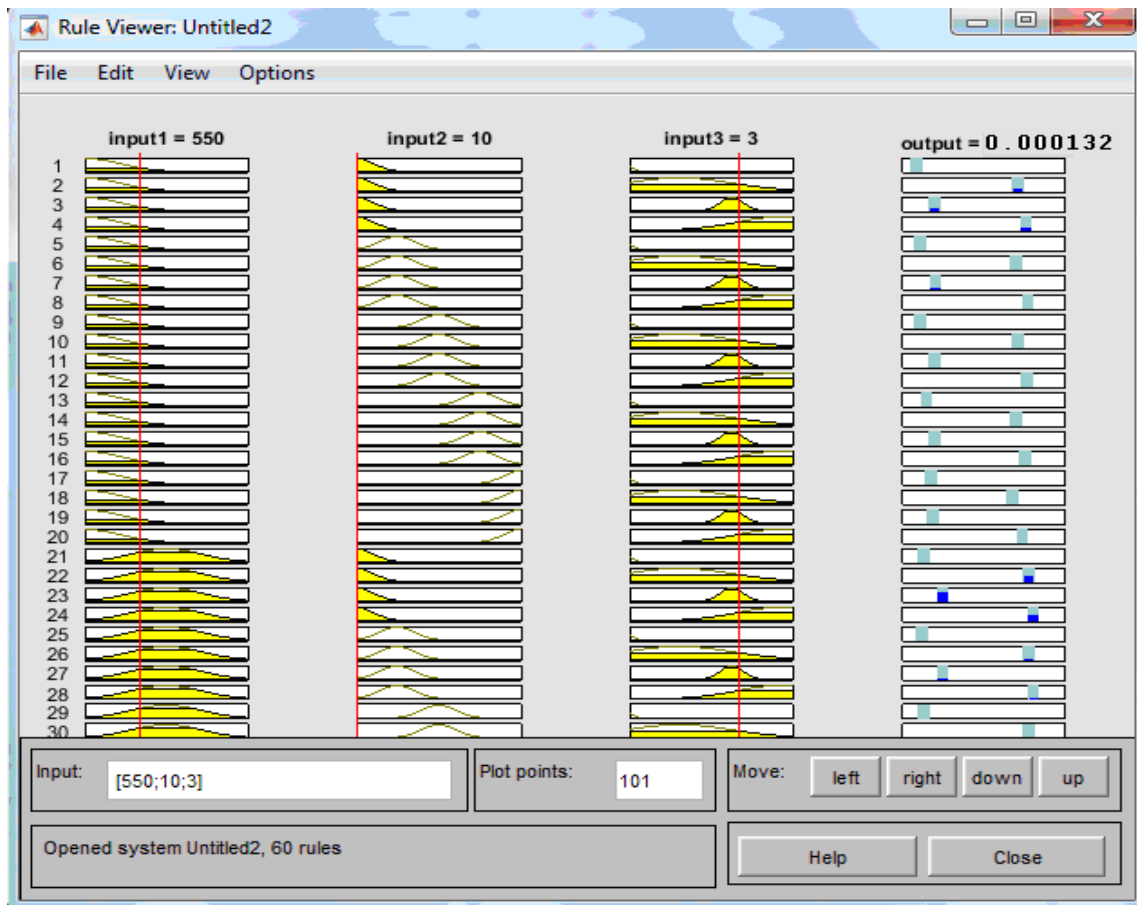


Fig. 5. System of fuzzy output NN1

Each rule of the knowledge base is represented as a sequence of horizontally arranged curves. The resulting fuzzy set is shown in the lower rectangle of the last column of the graphical window. In the same rectangle, the red vertical line corresponds to the clear value of the logical inference obtained from the defuzzification. According to the input data [550; 10; 3] the NN1 displays the packet residence time on the routers according to the path of its transmission, equal to 0.000132 s (Fig. 6). That is, NN1 is properly constructed and trained.

**Route definition based on the use of a neural fuzzy network (NN2).** The following variables are used as input parameters:  $x_1$  – is the packet residence time on the routers according to the packet transmission route ( $T_{min}$ ,  $T_{avg}$ ,  $T_{max}$ );  $x_2$  – is the total queue delay on the routers on the route A ( $Z_{Amin}$ ,  $Z_{Ama}$ ,  $Z_{Aavg}$ ,  $Z_{Aam}$ ,  $Z_{Amax}$ );  $x_3$  – is the total queue delay on the routers on the route B ( $Z_{Bmin}$ ,  $Z_{Bma}$ ,  $Z_{Bavg}$ ,  $Z_{Bam}$ ,  $Z_{Bmax}$ );  $y$  – is the optimal route: 1 (path A), 2 (path B). All values are summarized in Table 4.

Table 4

**Linguistic evaluation of input and output variables for NN2**

| Input variables                                                           |                                                                                                                 |                                                                                                                 | Output variable    |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Packet residence time in the routers on the route, $\mu$ s                | Total queue delay on the routers on the path $A$ , $\mu$ s                                                      | Total queue delay on the routers on the path $B$ , $\mu$ s                                                      | Route              |
| $T_{min}$ : 5,6 – 185;<br>$T_{avg}$ : 186 – 365;<br>$T_{max}$ : 366 – 545 | $ZA_{min}$ : 0 – 13;<br>$ZA_{ma}$ : 14 – 27; $ZA_{avg}$ : 28 – 41; $ZA_{am}$ : 42 – 55;<br>$ZA_{max}$ : 56 – 70 | $ZB_{min}$ : 0 – 13;<br>$ZB_{ma}$ : 14 – 27; $ZB_{avg}$ : 28 – 41; $ZB_{am}$ : 42 – 55;<br>$ZB_{max}$ : 56 – 70 | $A$ : 1<br>$B$ : 2 |

The number of fuzzy product rules depends on the number of input variables and the number of terms, this value is  $3 \cdot 5 \cdot 5 = 75$  rules. The rule base fragment is given below:

if  $x_1 = T_{min}$  I  $x_2 = ZA_{min}$  I  $x_3 = ZB_{min}$ , then  $y = B$ ;  
 if  $x_1 = T_{min}$  I  $x_2 = ZA_{min}$  I  $x_3 = ZB_{ma}$ , then  $y = B$ ;  
 if  $x_1 = T_{min}$  I  $x_2 = ZA_{min}$  I  $x_3 = ZB_{avg}$ , then  $y = B$ ;  
 if  $x_1 = T_{min}$  I  $x_2 = ZA_{min}$  I  $x_3 = ZB_{am}$ , then  $y = B$ ;  
 if  $x_1 = T_{min}$  I  $x_2 = ZA_{min}$  I  $x_3 = ZB_{max}$ , then  $y = B$ ;  
 if  $x_1 = T_{min}$  I  $x_2 = ZA_{ma}$  I  $x_3 = ZB_{min}$ , then  $y = A$ ;  
 if  $x_1 = T_{min}$  I  $x_2 = ZA_{ma}$  I  $x_3 = ZB_{ma}$ , then  $y = B$ ;  
 if  $x_1 = T_{min}$  I  $x_2 = ZA_{ma}$  I  $x_3 = ZB_{avg}$ , then  $y = B$ ;  
 if  $x_1 = T_{min}$  I  $x_2 = ZA_{ma}$  I  $x_3 = ZB_{am}$ , then  $y = B$ ;

The structure of the corresponding NN2 is shown in Fig. 6.

**Formation of the samples NN2.** The following samples were formed: a training sample of 75 examples, a test sample of 20 examples and a control of 10 examples (Table 5).

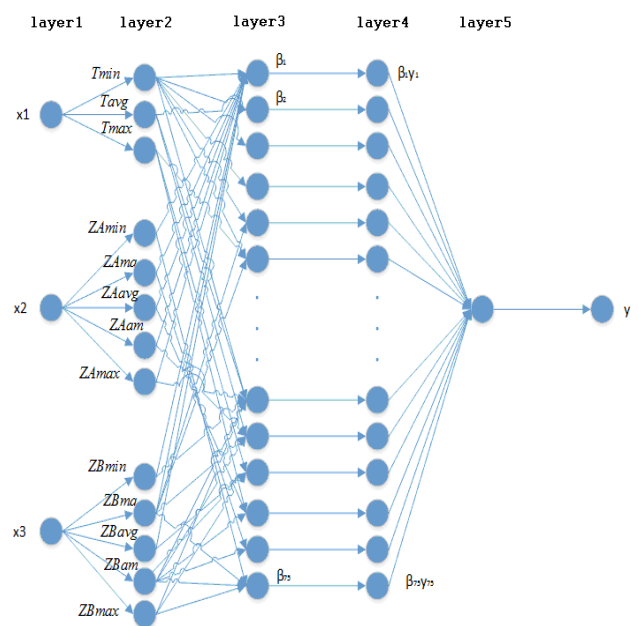


Fig. 6. NFN2 structure

Table 5

**Samples fragments for NN2**

| Training sample                               |                            |          |       | Test sample                                   |                            |          |       | Control sample                                |                            |          |       |
|-----------------------------------------------|----------------------------|----------|-------|-----------------------------------------------|----------------------------|----------|-------|-----------------------------------------------|----------------------------|----------|-------|
| Packet residence time on the routers, $\mu$ s | Total queue delay, $\mu$ s |          | Route | Packet residence time on the routers, $\mu$ s | Total queue delay, $\mu$ s |          | Route | Packet residence time on the routers, $\mu$ s | Total queue delay, $\mu$ s |          | Route |
|                                               | path $A$                   | path $B$ |       |                                               | path $A$                   | path $B$ |       |                                               | path $A$                   | path $B$ |       |
| 5.6                                           | 0                          | 14       | $A$   | 7                                             | 4                          | 20       | $A$   | 10                                            | 11                         | 69       | $A$   |
| 5.6                                           | 14                         | 0        | $B$   | 80                                            | 20                         | 4        | $B$   | 68                                            | 69                         | 11       | $B$   |
| 185                                           | 15                         | 29       | $A$   | 150                                           | 20                         | 38       | $A$   | 126                                           | 15                         | 50       | $A$   |
| 185                                           | 29                         | 15       | $B$   | 190                                           | 38                         | 20       | $B$   | 184                                           | 50                         | 15       | $B$   |
| 365                                           | 29                         | 44       | $A$   | 260                                           | 30                         | 50       | $A$   | 190                                           | 35                         | 55       | $A$   |

Continuation of Table 5

| Training sample                               |                            |               |          | Test sample                                   |                            |               |          | Control sample                                |                            |               |          |
|-----------------------------------------------|----------------------------|---------------|----------|-----------------------------------------------|----------------------------|---------------|----------|-----------------------------------------------|----------------------------|---------------|----------|
| Packet residence time on the routers, $\mu$ s | Total queue delay, $\mu$ s |               | Route    | Packet residence time on the routers, $\mu$ s | Total queue delay, $\mu$ s |               | Route    | Packet residence time on the routers, $\mu$ s | Total queue delay, $\mu$ s |               | Route    |
|                                               | path <i>A</i>              | path <i>B</i> |          |                                               | path <i>A</i>              | path <i>B</i> |          |                                               | path <i>A</i>              | path <i>B</i> |          |
| 365                                           | 44                         | 29            | <i>B</i> | 360                                           | 50                         | 30            | <i>B</i> | 225                                           | 55                         | 35            | <i>B</i> |
| 455                                           | 7                          | 63            | <i>A</i> | 370                                           | 45                         | 60            | <i>A</i> | 275                                           | 50                         | 65            | <i>A</i> |
| 455                                           | 63                         | 7             | <i>B</i> | 385                                           | 60                         | 45            | <i>B</i> | 300                                           | 65                         | 45            | <i>B</i> |
| 545                                           | 45                         | 65            | <i>A</i> | 470                                           | 56                         | 70            | <i>A</i> | 375                                           | 57                         | 68            | <i>A</i> |
| 545                                           | 65                         | 45            | <i>B</i> | 540                                           | 70                         | 56            | <i>B</i> | 460                                           | 68                         | 57            | <i>B</i> |
| ...                                           | ...                        | ...           | ...      | ...                                           | ...                        | ...           | ...      | ...                                           | ...                        | ...           | ...      |

### Findings

**Study of the average learning error of the NN1.** MatLAB's Fuzzy Logic Toolbox includes 11 built-in membership functions that use the following basic functions: piecewise linear one; Gaussian

distribution; sigmoid curve; quadratic and cubic curves. The values of the learning errors of NN1 for different membership functions are presented in Table 6. It can be seen from the table that the Gaussian membership function gives the smallest value of the NN1 error.

Table 6

Average error of NN1 according to different membership functions

| Membership function                                     | Designation | Average NFN error, $10^{-10}$ sec |
|---------------------------------------------------------|-------------|-----------------------------------|
| triangular                                              | trimf       | 8.75                              |
| trapezoidal                                             | trapmf      | 10.23                             |
| bell-shaped                                             | gbellmf     | 9.16                              |
| symmetric Gaussian                                      | gaussmf     | 8.49                              |
| two-sided Gaussian                                      | gauss2mf    | 10.03                             |
| the product of two sigmoid membership functions         | pimf        | 13.86                             |
| Curvilinear trapezoid membership function               | psigmf      | 10.32                             |
| the difference between two sigmoid membership functions | dsigmf      | 10.63                             |

The following methods of training optimization are implemented in ANFIS: backpropagation (method based on the ideas of the quickest descent method); hybrid (hybrid method that combines the backpropagation method with the least-squares method). When using the backpropagation method, the NN1 learning error is  $9.6501 \cdot 10^{-10}$  sec and the hybrid method –  $8.4873 \cdot 10^{-10}$  sec. That is, the error of learning the NN1 in the case of using the

hybrid method is about 13 % less than in the case of the backpropagation method.

**Evaluation of the work of the NN1.** The NN1 simulation was performed with the following parameters: packet length – 3 850 bytes; traffic intensity – 10 packet/sec; number of transitions – 3. The packet time on the route (from Fedorivka junction to Dnipro junction) received in the ORNET Modeler system on the Fast Ethernet simulation model in the ITS of Prydniprovska Railway under the

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

OSPFE protocol is 0.0010285 sec. (Fig. 7), and based on NN1 – 0.000924 sec. (Fig. 8). That is, the use of NN1 allows approximately 10 % faster determination of the route in the ITS network of

Prydniprovskaya Railway (for the fragment under consideration) as compared to the OSPF protocol on the simulation model.

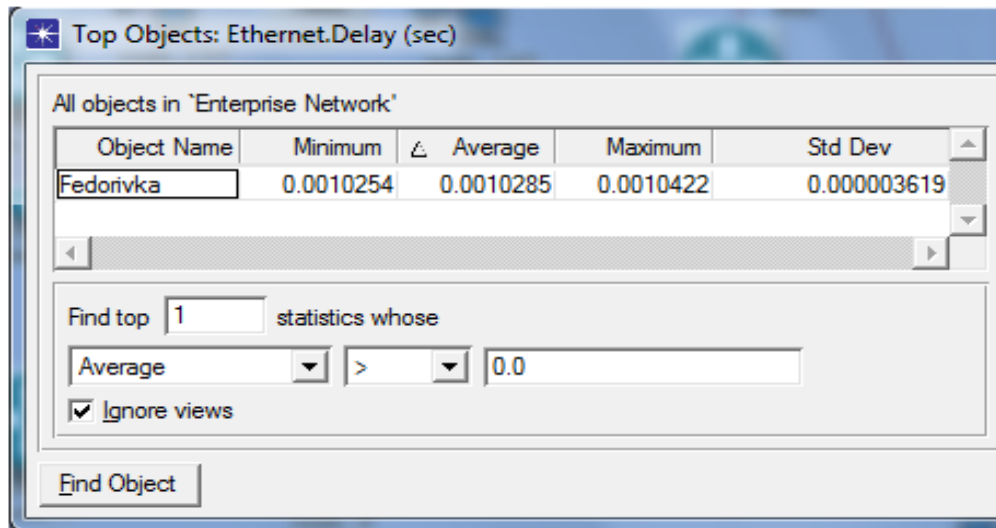


Fig. 7. Packet time on the route (from Fedorivka to Dnipro) obtained on the simulation model

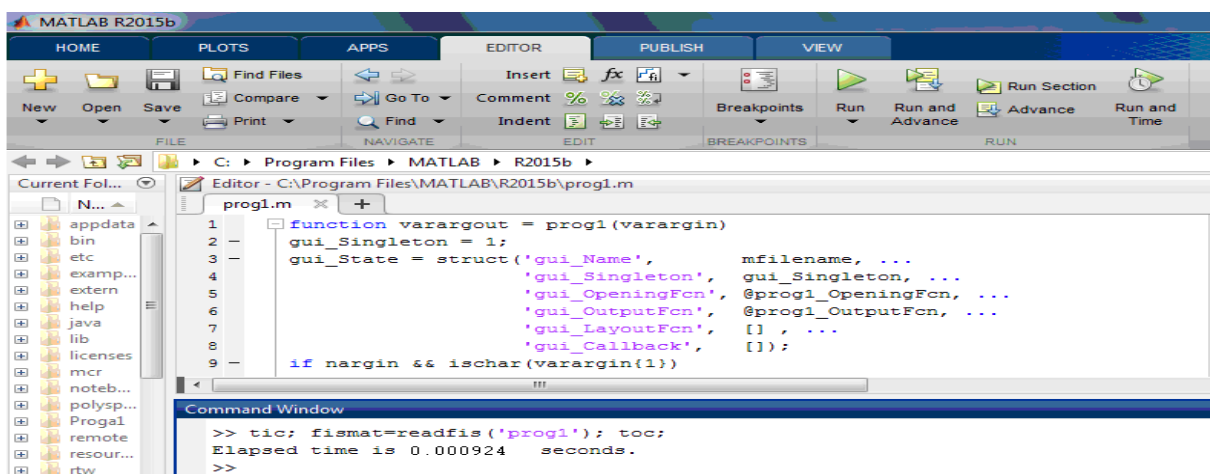


Fig. 8. Packet time on the route (from Fedorivka to Dnipro) obtained on the NN1

### Originality and practical value

The simulation model of Fast Ethernet network based on the OSPF scenario and the neural fuzzy networks (NN1, NN2) can be the basis for the integrated routing system in the ITS network of Prydniprovskaya Railway, the general structure of which is shown in Fig. 9 ( $L_{pac}$  – is the packet length;  $\Lambda$  – is the traffic intensity;  $K$  – is the number of intermediate routers that make up the path of

the packet;  $T_{pac}$  – the packet residence time in the routers according to its path in the network;  $Z_A$  – total queue delay in the routers on the path  $A$ ;  $Z_B$  – total queue delay in the routers on the path  $B$ ).

The operation of the integrated routing system is demonstrated for those fragments of the Fast Ethernet network in the ITS of Prydniprovskaya Railway, where it is possible to choose the route with the same number of intermediate routers on different paths (Table 7: path  $A$  – to the right).

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

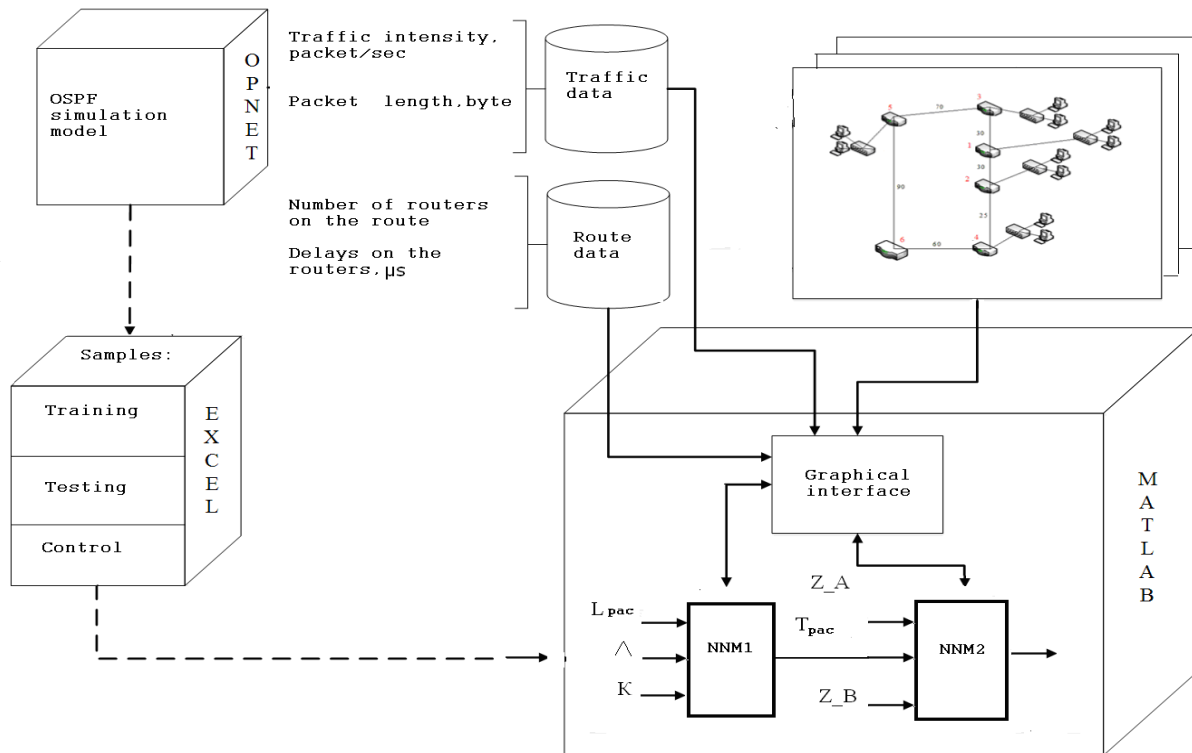


Fig. 9. General structure of the integrated routing system in the ITS network of railway transport:  
 ----- preparatory stage; ———— real time work

#### Nyzhnodniprovsk–Vuzol – Dnipro fragment.

A packet of 500 bytes, with a traffic intensity of 10 packets/sec and 2 transitions is transmitted from the node V1 (Ihren) to the node V6 (Dnipro). The packet residence time on the routers is predicted by NN1 and is 80  $\mu$ s. For example, depending on the values of the time received, the total queue delay in the routers on the path A (4  $\mu$ s) and the total queue delays in the routers on the path B (13  $\mu$ s) the optimal route is chosen based on NN2: path A. The graph showing the fragment «Nyzhnodniprovsk-Vuzol – Dnipro» shows this route in red: V1→V2→V4→V6.

**Horiainove fragment.** A packet of 1000 bytes, with an intensity of 10 packets/sec and 4 transitions, is transmitted from the node V1 (Kamianske-Pas) to the node V10 (Dnipro). The packet residence time in the routers is predicted by NN1, it is 320  $\mu$ s. Depending on the values of the time

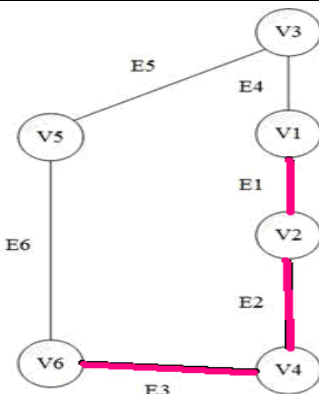
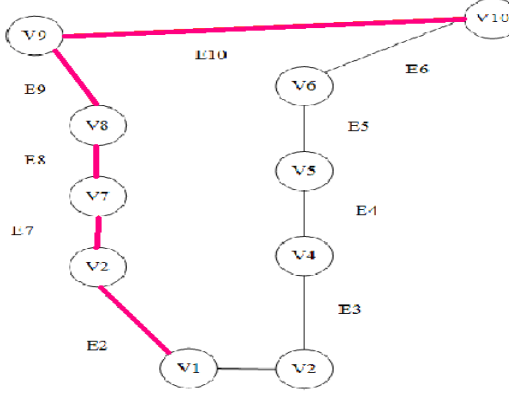
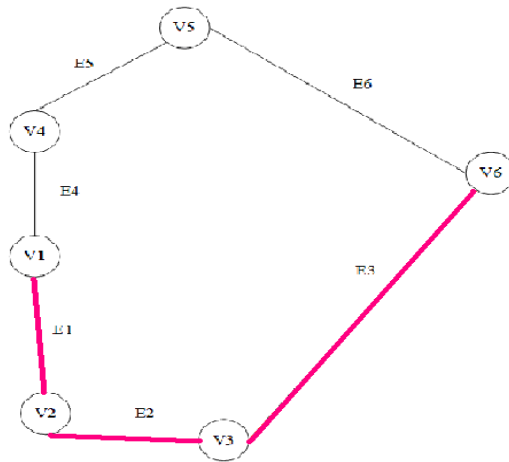
received, the total queue delay in the routers on the path A (29  $\mu$ s) and the total queue delay in the routers on the path route B (20  $\mu$ s) the optimal route is chosen based on NN2: path B. The graph showing the fragment «Horiainove» shows this route in red: V1→V2→V7→V8→V9→V10.

**Kryvyi Rih fragment.** A packet of 1500 byte, with an intensity of 10 packets/sec and 2 transitions, is transmitted from the node V1 (Vechirnyi Kut) to the node V6 (Dnipro). The packet residence time in the routers is predicted by NN1, it is 240  $\mu$ s. For example, depending on the values of the time received, the total queue delay in the routers on the path A (30  $\mu$ s) and the total queue delay in the routers on the path B (50  $\mu$ s) the optimal route is chosen based on NN2: path A. The graph showing the fragment «Nyzhnodniprovsk-Vuzol – Dnipro» shows this route in red: V1→V2→V3→V6.

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Table 7

## Consideration of the ITS fragments of Prydniprovsk Railway

|                                                | NN1                | NN2           | Fragment structure                                                                   | Designations                                                                                                                                                                                           |
|------------------------------------------------|--------------------|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Nyzhnodniprovsk–Vuzol – Dnipro fragment</b> |                    |               |                                                                                      |                                                                                                                                                                                                        |
| Input parameters                               | 500 bytes          | 80 $\mu$ s    |     | V1 – Ihren;<br>V2 – Ilarionove;<br>V3 – Nyzhnodniprovsk-Vuzol;<br>V4 – Synelnykove –2;<br>V5 – Nyzhnodniprovsk;<br>V6 – Dnipro                                                                         |
|                                                | 10 pack-<br>et/sec | 4 $\mu$ s     |                                                                                      |                                                                                                                                                                                                        |
|                                                | 2                  | 13 $\mu$ s    |                                                                                      |                                                                                                                                                                                                        |
| Result                                         | 80 $\mu$ s         | 1<br>(path A) |                                                                                      |                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Horiainove fragment</b>                     |                    |               |                                                                                      |                                                                                                                                                                                                        |
| Input parameters                               | 1000 bytes         | 320 $\mu$ s   |   | V1 – Kamianske–Pas;<br>V2 – Bahlui;<br>V3 – Verkhnod-niprovsk;<br>V4 – Sukhachivka;<br>V5 – Diivka;<br>V6 – Horiainove;<br>V7 – Verkhivtseve;<br>V8 – Vilnohirsk;<br>V9 – Piatykhatty;<br>V10 – Dnipro |
|                                                | 10 pack-<br>et/sec | 29 $\mu$ s    |                                                                                      |                                                                                                                                                                                                        |
|                                                | 4                  | 20 $\mu$ s    |                                                                                      |                                                                                                                                                                                                        |
| Result                                         | 320 $\mu$ s        | 2<br>(path B) |                                                                                      |                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Kryvyi Rih fragment</b>                     |                    |               |                                                                                      |                                                                                                                                                                                                        |
| Input parameters                               | 1500 bytes         | 240 $\mu$ s   |  | V1 – Vechirni Kut;<br>V2 – Saksahan;<br>V3 – Piatykhatty;<br>V4 – Mudrona;<br>V5 – Kryvyi Rih;<br>V6 – Dnipro                                                                                          |
|                                                | 10 pack-<br>et/sec | 30 $\mu$ s    |                                                                                      |                                                                                                                                                                                                        |
|                                                | 2                  | 50 $\mu$ s    |                                                                                      |                                                                                                                                                                                                        |
| Result                                         | 240 $\mu$ s        | 1<br>(path A) |                                                                                      |                                                                                                                                                                                                        |

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

**Conclusions**

1. According to the structure of the ITS network of Prydniprovsk Railway, a corresponding Fast Ethernet simulation model (according to the RIP and OSPF scenarios) was created in the ORNET Modeler system, which defines the following characteristics: average server load; the average time of packet processing by router; average waiting time for packets in the queue; the average number of lost packets. It is determined that the worst results are obtained by the simulation model according to the RIP scenario: server load increases rapidly (on average, about by 3 times per minute); packet processing time by router takes much longer (approximately by 0.5 times per minute); the waiting time for packets in the queue is always greater (about by 1.6 times per minute); packet losses increase rapidly (on average by 3.5 times per minute); the network convergence time is almost twice as large.

2. To determine the packet residence time in the routers on the route by its transmission in the ITS network of the Prydniprovsk Railway NN1 was created, to the input of which the following parameters are supplied: packet length (3 term sets); traffic intensity (5 term sets); the number of intermediate routers in the route (4 term sets). The following samples were formed on the simulation model of the ITS network of Prydniprovsk Railway: training (60 examples), test (24 examples) and control (12 examples). It has been estimated that for the considered fragment of the railway ITS network, in particular Prydniprovsk Railway, the

packet time on the route based on NN1 decreased by about 10% compared to the OSPF protocol on the simulation model.

3. On the created NN1 the study of the average error of its training for different membership functions was performed: triangular; trapezoidal; bell-shaped; symmetric and two-sided Gaussian and by different methods of training optimization (hybrid and backpropagation). It is determined that the lowest value of the average error  $8.4873 \cdot 10^{-10}$  sec NN1 gives in the case of using the symmetric Gaussian membership function according to the hybrid optimization method.

4. To determine the packet path in the ITS network of Prydniprovsk Railway (provided the same number of routers that make up the path), the NN2 was created, to the input of which the following parameters are supplied: the packet time in the routers on the path of its transition, the total queue delay in the routers on the path *A*; the total queue delay in the routers on the path *B*. Using the simulation model of the ITS network of railway transport the following samples were formed: training (75 examples), test (20 examples) and control (10 examples).

5. Based on the created Fast Ethernet simulation model and neural fuzzy networks (NN1 and NN2), an integrated routing system was proposed in the ITS of Prydniprovsk Railway was proposed. Using this system, for example, the optimal route for the fragment «Nyzhnodniprovsk-Vuzol – Dnipro» is determined: path A (Ihren, Ilarionove, Synelnykove–2, Dnipro)».

**LIST OF REFERENCE LINKS**

1. Асланов, А. М. Исследование интеллектуального подхода в маршрутизации компьютерных сетей / А. М. Асланов, М. С. Солодовник // Электротехнические и компьютерные системы. – 2014. – № 16 (92). – С. 93–100.
2. Коваленко, Т. А. Разработка и исследование интегрированной системы маршрутизации в компьютерных сетях : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.15 / Коваленко Татьяна Анатольевна ; СГУ. – Самара, 2012. – 16 с.
3. Колесніков, К. В. Аналіз результатів дослідження реалізації задачі маршрутизації на основі нейронних мереж та генетичних алгоритмів / К. В. Колесніков, А. Р. Карапетян, В. Ю. Баган // Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. Серія: Технічні науки : зб. наук. пр. – Черкаси, 2016. – № 1. – С. 28–34.
4. Кутыркин, А. В. Использование нейронной сети Хопфилда для решения оптимизационных задач маршрутизации : метод. указания / А. В. Кутыркин, А. В. Семин. – Москва : Изд-во Моск. гос. ун-та путей сообщения, 2007. – 15 с.
5. Никитченко, В. В. Утилиты моделирующей системы Opnet Modeler / В. В. Никитченко. – Одесса : Одес. нац. акад. связи им. А. С. Попова, 2010. – 128 с.

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

6. Павленко, М. А. Анализ возможностей искусственных нейронных сетей для решения задач однопутевой маршрутизации в ТКС [Electronic resource] / М. А. Павленко // Проблемы телекоммуникаций. – 2011. – № 2 (4). – Available at: <http://pt.journal.kh.ua/index/0-139> – Title from the screen. – Accessed : 26.09.2019.
7. Пахомова, В. М. Дослідження інформаційно-телекомунікаційної системи залізничного транспорту з використанням штучного інтелекту : монографія / В. М. Пахомова. – Дніпро : Стандарт-Сервіс, 2018. – 220 с.
8. Реалізація задачі вибору оптимального авіамаршруту нейронною мережею Хопфілда / А. М. Бриндас, П. І. Рожак, Н. О. Семенишин, Р. Р. Курка // Наук. вісн. НЛТУ України : зб. наук.-техн. пр. – Львів, 2016. – Вип. 26.1. – С. 357–363.
9. Тарасян, В. С. Пакет Fuzzy Logic Toolbox for MatLAB : учебное пособие / В. С. Тарасян. – Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2013. – 112 с.
10. Штовба, С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MatLAB / С. Д. Штовба. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.
11. Hopfield, J. J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities / J. J. Hopfield // Proceedings of National Academy of Sciences. – 1982. – Vol. 79. – Iss. 8. – P. 2554–2558. doi: 10.1073/pnas.79.8.2554
12. Iqbal, A. Performance Evaluation of Real Time Applications for RIP, OSPF and EIGRP for flapping links using OPNET Modeler [Electronic resource] // A. Iqbal, S. L. Ali Khan / International Journal of Computer Networks and Communications Security. – 2015. – Vol. 3, No. 1. – Available at: [http://www.ijcnscs.org/published/volume3/issue1/p4\\_3-1.pdf](http://www.ijcnscs.org/published/volume3/issue1/p4_3-1.pdf) – Title from the screen. – Accessed : 26.09.2019
13. Kumar, M. V. Soft Computing: Fuzzy Logic Approach in Wireless Sensors Networks / M. V. Kumar, Dr. T. Lalitha // Circuits and Systems. – 2016. – Vol. 07. – Iss. 08. – P. 1242–1249. doi: <https://doi.org/10.4236/cs.2016.78108>
14. New algorithm for packet routing in mobile ad-hoc networks / N. S. Kojić, M. B. Zajecanović-Ivančić, I. S. Reljin, B. D. Reljin // Journal of Automatic Control. – 2010. – Vol. 20. – Iss. 1. – P. 9–16. doi: 10.2298/JAC1001009K
15. Pakhomova, V. M. Intelligent routing in the network of information and telecommunication system of railway transport / V. M. Pakhomova, T. I. Skaballanovich, V. S. Bondareva // Наука та прогрес транспорту. – 2019. – № 2 (80). – P. 77–90. doi: 10.15802/stp2019/166092
16. Pakhomova, V. M. Optimal route definition in the network based on the multilayer neural model / V. M. Pakhomova, I. D. Tsykalo // Наука та прогрес транспорту. – 2018. – № 6 (78). – P. 126–142. doi: 10.15802/stp2018/154443
17. Sasikala, K. A neuro fuzzy based conditional shortest path routing protocol for wireless mesh network / K. Sasikala, V. Rajamani // International Journal of Enhanced Research in Management & Computer Applications. – 2013. – Vol. 2. – Iss. 5. – P. 1–10.
18. Schuler, W. H. A novel hybrid training method for hopfield neural networks applied to routing in communications networks / W. H. Schuler, C. J. A. Bastos-Filho, A. L. I. Oliveira // International Journal of Hybrid Intelligent Systems. – 2009. – Vol. 6. – Iss. 1. – P. 27–39. doi: 10.3233/his-2009-0074
19. Towards QoS-aware routing for DASH utilizing MPTCP over SDN / K. Herguner, R. S. Kalan, C. Cetinkaya, M. Sayit // IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Networks (NFV-SDN) (6–8 Nov. 2017). – Berlin, Germany, 2017. – P. 1–6. doi: 10.1109/nfv-sdn.2017.8169844
20. Zhukovyts'kyi, I. Research of Token Ring network options in automation system of marshalling yard / I. Zhukovyts'kyi, V. Pakhomova // Transport Problems. – 2018. – Vol. 13. – Iss. 2. – P. 149–158.

В. М. ПАХОМОВА<sup>1\*</sup>, Є. С. МАНДИБУРА<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Електронні обчислювальні машини», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта [viknikpakh@gmail.com](mailto:viknikpakh@gmail.com), ORCID 0000-0002-0022-099X

<sup>2\*</sup>Каф. «Електронні обчислювальні машини», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта [mandybura1994@gmail.com](mailto:mandybura1994@gmail.com), ORCID 0000-0002-7134-9416

## ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТУ В ІНФОРМАЦІЙНІЙ МЕРЕЖІ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОНЕЧІТКИХ МОДЕЛЕЙ

**Мета.** Сучасні алгоритми вибору найкоротшого маршруту, наприклад, алгоритми Беллмана–Форда й Дейкстри, які в даний час широко використовують у протоколах маршрутизації (RIP, OSPF), не завжди призводять до ефективного результату. Тому виникає необхідність дослідження можливості організації маршрутизації в мережі інформаційно-телекомунікаційної системи (ІТС) залізничного транспорту за допомогою методів штучного інтелекту. **Методика.** На основі створеної в моделювальній системі OPNET імітаційної моделі розглянуто фрагмент мережі ІТС залізничного транспорту й сформовано наступні вибірки: навчальну; тестувальну; контрольну. Для моделювання в системі MatLAB нейронечіткої мережі (гібридної системи) на вхід подають наступні параметри: довжина пакета (3 терм-множини); інтенсивність трафіка (5 терм-множин); кількість проміжних маршрутизаторів, що складають маршрут (4 терм-множини). За результуючу характеристику взято час перебування пакета в маршрутизаторах за маршрутом його проходження в мережі ІТС (4 терм-множини). На основі визначеного часу перебування пакета в маршрутизаторах і затримок у черзі на маршрутизаторах, що складають різні шляхи (з однаковою кількістю маршрутизаторів) визначено оптимальний маршрут. **Результати.** Для розглянутого фрагмента ІТС залізничного транспорту здійснено прогноз часу перебування пакета в маршрутизаторах за маршрутом його проходження на основі нейронечіткої мережі, що створена в системі MatLAB. Проведено дослідження середньої похибки навчання нейронечіткої мережі за різних функцій належності й за різними методами оптимізації навчання. Виявлено, що найменше значення середньої похибки навчання надає нейронечітка мережа конфігурації 3–12–60–60–1 в разі використання симетричної Гаусівської функції належності за гібридним методом оптимізації. **Наукова новизна.** За сценаріями RIP та OSPF на створеній в моделювальній системі OPNET імітаційній моделі отримані наступні характеристики: середнє навантаження сервера; середній час обробки пакетів маршрутизатором; середній час очікування пакетів у черзі; середня кількість втрачених пакетів; час конвергенції мережі. Визначено, що найкращі результати надає імітаційна модель мережі за сценарієм OSPF. Запропонована інтегрована система маршрутизації в мережі ІТС залізничного транспорту, в основу якої покладено створені нейронечіткі мережі, визначає оптимальний маршрут у мережі швидше порівняно з наявним протоколом маршрутизації OSPF. **Практична значимість.** Інтегрована система маршрутизації в ІТС залізничного транспорту дозволить у реальному часі визначити оптимальний маршрут у мережі за однаковою кількістю маршрутизаторів, що складають шлях проходження пакета.

**Ключові слова:** маршрутизація; протокол OSPF; імітаційна модель; гібридна система; терм; функція належності; вибірка; похибка

В. Н. ПАХОМОВА<sup>1\*</sup>, Е. С. МАНДЫБУРА<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Електронні вичислительні машини», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта viknikpakh@gmail.com, ORCID 0000-0002-0022-099X

<sup>2\*</sup>Каф. «Електронні вичислительні машини», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта mandybura1994@gmail.com, ORCID 0000-0002-7134-9416

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТА В ИНФОРМАЦИОННОЙ СЕТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОНЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ

**Цель.** Современные алгоритмы выбора кратчайшего маршрута, например, алгоритмы Беллмана–Форда и Дейкстры, которые в настоящее время широко используют в протоколах маршрутизации (RIP, OSPF), не всегда приводят к эффективному результату. Поэтому возникает необходимость исследования возможности организации маршрутизации в сети информационно-телекоммуникационной системы (ИТС) железнодорожного транспорта.

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

ного транспорту з допомогою методів штучного інтелекту. **Методика.** На основі створеної в моделюючій системі OPNET імітаційної моделі розглянуто фрагмент мережі ІТС залізничного транспорту і сформовані наступні вибірки: навчальна; тестувальна; контрольна. Для моделювання в системі MatLAB нейронної мережі (гібридної системи) на вхід подають наступні параметри: довжина пакета (3 терм-множеств); інтенсивність трафіку (5 терм-множеств); кількість проміжних маршрутизаторів, що входять до маршруту (4 терм-множеств). Як результатуючу характеристику прийнято час перебування пакета в маршрутизаторах по маршруту його проходження в мережі ІТС (4 терм-множеств). На основі отриманого часу перебування пакета в маршрутизаторах і затримок в черзі в маршрутизаторах, що входять до різних шляхів (з однаковою кількістю маршрутизаторів) визначено оптимальний маршрут. **Результати.** Для розглянутого фрагмента ІТС залізничного транспорту здійснено прогноз часу перебування пакета в маршрутизаторах по маршруту його проходження на основі нейронної мережі, створеної в системі MatLAB. Проведено дослідження середньої похибки навчання нейронної мережі при різних функціях належності і різних методах оптимізації навчання. Виявлено, що найменше значення середньої похибки навчання надає нейронна мережа конфігурації 3–12–60–60–1 при використанні симетричної Гауссової функції належності з гібридним методом оптимізації. **Наукова новизна.** По сценаріям RIP і OSPF на створеної в моделюючій системі OPNET імітаційної моделі отримані наступні характеристики: середня навантаження сервера; середній час обробки пакетів маршрутизатором; середній час очікування пакетів в черзі; середній кількість втрачених пакетів; час конвергенції мережі. Визначено, що найкращі результати дає імітаційна модель мережі по сценарію OSPF. Представлена інтегрована система маршрутизації в мережі ІТС залізничного транспорту, в основу якої покладено створені нейронні моделі, визначають оптимальний маршрут в мережі швидше за порівнянням з існуючим протоколом маршрутизації OSPF. **Практична значимість.** Інтегрована система маршрутизації в ІТС залізничного транспорту дозволить в реальному часі визначити оптимальний маршрут в мережі з однаковою кількістю маршрутизаторів, що входять до шляху проходження пакета.

**Ключові слова:** маршрутизація; протокол OSPF; імітаційна модель; гібридна система; терм; функція належності; вибірка; похибка

## REFERENCES

1. Aslanov, A. M., & Solodovnik, M. S. (2014). Issledovanie intellektualnogo podkhoda v marshrutizatsii kompyuternykh setey. *Elektrotekhnicheskie i kompyuternye sistemy*, 16(92), 93-100. (in Russian)
2. Kovalenko, T. A. (2012). *Razrabotka i issledovanie integrirovannoy sistemy marshrutizatsii v kompyuter-nykh setyakh*. (Avtoreferat dysertatsii kandydata tekhnichnykh nauk). SGU, Samara. (in Russian)
3. Kolesnikov, K. V., Karapetian, A. R., & Bahan, V. Y. (2016). Analiz rezul'tativ doslidzhennia realizatsii zadachi marshrutyzatsii na osnovi neironnykh merezh ta henetychnykh alhorytmiv. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu. Seria: Tekhnichni nauky*, 1, 28-34. (in Ukrainian)
4. Kutyrkin, A. V., & Semin, A. V. (2007). *Ispolzovanie neyronnoy seti Khopfilda dlya resheniya optimizatsionnykh zadach marshrutizatsii: Metodicheskie ukazaniya*. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. (in Russian)
5. Nikitchenko, V. V. (2010). *Utility modeliruyushchey sistemy Opnet Modeler*. Odessa: Odesskaya natsionalnaya akademiya svyazi im. A. S. Popova. (in Russian)
6. Pavlenko, M. A. (2011). Analysis opportunities of artificial neural networks for solving single-path routing in telecommunication network. *Problemy telekommunikatsii*, 2(4). Retrieved from <http://pt.journal.kh.ua/index/0-139> (in Russian)
7. Pakhomova, V. M. (2018). *Doslidzhennia informatsiino-telekomunikatsiinoi systemy zaliznychnoho transportu z vykorystanniam shtuchnogo intelektu: monohrafiia*. Dnipro: Standart-Servis. (in Ukrainian)
8. Bryndas, A. M., Rozhak, P. I., Semenishin, N. O., & Kurka, R. R. (2016). Implementing of the Problem of Choosing the Optimal Flight Rout by a Hopfield Neural Network. *The Scientific Bulletin of UNFU*, 26.1, 357-363. (in Ukrainian)
9. Tarasyan, V. S. *Paket Fuzzy Logic Toolbox for MatLAB: uchebnoe posobie*. (2013) Yekaterinburg: Izdatel'stvo: UrGUPS. (in Russian)
10. Shtovba, S. D. (2007). *Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MatLAB*. Moscow: Goryachaya liniya–Telekom. (in Russian)

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

11. Hopfield, J. J. (1982). Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proceedings of National Academy of Sciences*, 79(8), 2554-2558. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.79.8.2554> (in English)
12. Iqbal, A., & Ali Khan, S. L. (2015). Performance Evaluation of Real Time Applications for RIP, OSPF and EIGRP for flapping links using OPNET Modeler. *International Journal of Computer Networks and Communications Security*, 3(1). Retrieved from: [http://www.ijcnscs.org/published/volume3/issue1/p4\\_3-1.pdf](http://www.ijcnscs.org/published/volume3/issue1/p4_3-1.pdf) (in English)
13. Kumar, M. V., & Lalitha, Dr. T. (2016). Soft Computing: Fuzzy Logic Approach in Wireless Sensors Networks. *Circuits and Systems*, 07(08), 1242–1249. doi: <https://doi.org/10.4236/cs.2016.78108> (in English)
14. Kojić, N. S., Zajeganović-Ivančić, M. B., Reljin, I. S., & Reljin B. D. (2010). New algorithm for packet routing in mobile ad-hoc networks. *Journal of Automatic Control*, 20(1), 9-16. doi: <https://doi.org/10.2298/jac1001009k> (in English)
15. Pakhomova, V. M., Skaballanovich, T. I., & Bondareva, V. S. (2019). Intelligent routing in the network of information and telecommunication system of railway transport. *Science and Transport Progress*, 2(80), 77-90. doi: <https://doi.org/10.15802/stp2019/166092> (in English)
16. Pakhomova, V. M. & Tsykalo, I. D. (2018). Optimal route definition in the network based on the multilayer neural model. *Science and Transport Progress*, 6(78), 126-142. doi: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154443> (in English)
17. Sasikala, K. & Rajamani, V. (2013). A neuro fuzzy based conditional shortest path routing protocol for wireless mesh network. *International Journal of Enhanced Research in Management & Computer Applications*, 2(5), 1-10. (in English)
18. Schuler, W. H., Bastos-Filho, C. J. A., & Oliveira, A. L. I. (2009). A novel hybrid training method for hopfield neural networks applied to routing in communications networks. *International Journal of Hybrid Intelligent Systems*, 6(1), 27-39. doi: <https://doi.org/10.3233/his-2009-0074> (in English)
19. Herguner, K., Kalan, R. S., Cetinkaya, C., & Sayit, M. (2017). Towards QoS-aware routing for DASH utilizing MPTCP over SDN. *2017 IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Networks (NFV-SDN)*. doi: <https://doi.org/10.1109/nfv-sdn.2017.8169844> (in English)
20. Zhukovyts'kyy, I. & Pakhomova, V. (2018). Research of Token Ring network options in automation system of marshalling yard. *Transport Problems*, 13(2), 145-154. (in English)

Received: May 15, 2019

Accepted: September 12, 2019

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 656.2.08:657.6

А. М. ОКороков<sup>1\*</sup>, М. О. Булах<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 70, ел. пошта andrew.okorokoff@gmail.com, ORCID 0000-0002-3111-5519

<sup>2\*</sup>Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 70, ел. пошта bulah\_marina@mail.ru, ORCID 0000-0003-4264-2303

### ІНТЕГРАЛЬНА ОЦІНКА СТАНУ БЕЗПЕКИ РУХУ ПОЇЗДІВ НА ЗАЛІЗНИЦІ ПІД ЧАС ТЕХНІЧНОГО АУДИТУ

**Мета.** Дослідження спрямовано на розробку інтегральної оцінки стану безпеки руху поїздів на залізниці під час проведення технічного аудиту. **Методика.** Для розробки інтегральної оцінки стану безпеки руху поїздів на залізниці під час проведення технічного аудиту запропоновано використовувати вагові коефіцієнти, які пропорційні впливу негативних наслідків катастроф, аварій, інцидентів, що характеризують стан порушення безпеки руху. Також запропоновано орієнтування на основні показники безпеки руху поїздів АТ «Українська залізниця», до яких віднесено: матеріальний збиток, кількість порушень безпеки руху та відмов технічних засобів. **Результати.** Автори розробили інтегральну оцінку стану безпеки руху поїздів в умовах АТ «Українська залізниця», яка являє собою комплексну величину, призначену для оцінювання загального рівня безпеки руху під час проведення технічного аудиту. Також сформували моделі для інтегральної оцінки безпеки руху поїздів в АТ «Українська залізниця» з ваговими коефіцієнтами, що дозволяють більш адекватно відображати стан безпеки. Ці моделі можна використати під час проведення технічного аудиту всієї залізниці чи її окремого підприємства для з'ясування реальних загроз і ризиків, які вже виникли і на які необхідно звернути увагу для гарантування вищого рівня безпеки руху поїздів. **Наукова новизна.** Автори вперше запропонували під час проведення технічного аудиту використовувати розроблені моделі для інтегральної оцінки безпеки руху поїздів АТ «Українська залізниця» з ваговими коефіцієнтами, які дозволяють виконувати оцінювання загального рівня безпеки руху та встановлювати у процесі аудиту реальні загрози й ризики. **Практична значимість.** На основі отриманих моделей для інтегральної оцінки безпеки руху поїздів можна провести технічний аудит усієї залізниці чи її окремого підрозділу із запропонованням реалізації відповідних заходів впливу на наявні джерела небезпеки з метою зниження ризиків й підвищення локального чи загального рівня безпеки руху поїздів.

**Ключові слова:** безпека руху поїздів; технічний аудит; інтегральна оцінка; ризики; транспортні події; залізничний транспорт

#### Вступ

Після здобуття незалежності Україна, одна з небагатьох країн колишнього Радянського Союзу, отримала у спадок добре розвинену залізничну інфраструктуру та відносно непогане матеріально-технічне оснащення залізниць.

Будучи однією з базових галузей економіки України, залізничний транспорт забезпечує її

внутрішні та зовнішні транспортно-економічні зв'язки й потреби населення у перевезеннях. Ефективність його діяльності значною мірою впливає на функціонування всіх галузей суспільного виробництва, соціальний та економічний розвиток і зміцнення обороноздатності держави, а також на міжнародне співробітництво.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Взаємодіючи з іншими видами транспорту, підприємства залізниці забезпечують своєчасність і якість перевезення пасажирів і вантажів, розвиток сфери транспортного обслуговування й безпеку руху. Саме безпечність є одним із головних принципів функціонування залізничного транспорту в Україні [10–13]. Норми чинного в галузі залізничного транспорту законодавства безпеку руху визначають як комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безаварійної роботи й утримання в постійній справності залізничних споруд, колій, рухомого складу, обладнання, механізмів і пристроїв [7, 12]. З огляду на обраний Україною курс до євроінтеграції, із врахуванням реформаційних змін, які зараз відбуваються в галузі залізничного транспорту, виникає необхідність впровадження нових підходів до гарантування безпеки руху, а також нових підходів до оцінки безпеки руху поїздів.

Згідно з чинним Положенням про систему управління безпекою руху поїздів на залізницях України [6, 7] для оцінки стану безпеки руху поїздів застосовують абсолютні й питомі показники. Як абсолютні під час проведення щорічного аналізу стану безпеки руху в структурі АТ «Українська залізниця» використовують статистичні показники, а саме: кількість транспортних подій та кількість постраждалих осіб, що загинули або були травмовані.

Оскільки наявна методика не забезпечує комплексного підходу в оцінці рівня безпеки руху поїздів, тема розробки методів, моделей та підходів до оцінки стану безпеки, які дозволять виявити рівень фактичної та прогнозованої безпеки, набуває все більшої актуальності. Новий комплексний підхід до оцінки рівня безпеки руху поїздів на залізницях можна застосувати під час проведення технічного аудиту, який набув широкого застосування в інших галузях народного господарства [3, 4, 8, 9, 12].

### Мета

Ураховуючи вищезгадане, метою роботи є розробка інтегральної оцінки стану безпеки руху поїздів на залізниці під час проведення технічного аудиту.

### Методика

Стан безпеки руху на залізницях України прийнято оцінювати числом транспортних подій. Відповідно до класифікації 2017 року, до таких належать катастрофи, аварії, інциденти.

На основі використання класифікації транспортних подій як порушення безпеки руху поїздів можна надати оцінку загального стану її рівня з розробленням та впровадженням заходів, направлених на усунення можливих передумов чи зменшення ризику їх виникнення для транспортних подій, що вже відбулися.

Інтегральну оцінку ризиків або рівня безпеки руху поїздів можна здійснити в разі використання вагових коефіцієнтів до кожного виду транспортної події, а також у разі використання даних про кількість наявних порушень безпеки руху поїздів відповідно до встановленої класифікації та їх сукупних показників, наприклад, величини матеріальних збитків залізниці, кількості жертв або постраждалих, кількості відмов, нанесення шкоди навколишньому середовищу. Оскільки транспортні події на залізничному транспорті, які класифіковано на катастрофи, аварії, інциденти, є нерівноцінними як за ступенем небезпеки, так і тяжкістю можливих наслідків, то їх звичайне додавання показує загальну кількість транспортних подій і не подає загальної картини стану безпеки руху поїздів на залізницях. Тому для представлення адекватної картини про стан безпеки руху поїздів необхідно для кожного виду транспортної події використовувати вагові коефіцієнти, які будуть пропорційними впливу негативних наслідків катастроф, аварій, інцидентів. Подамо це твердження у вигляді наступного виразу, що буде являти собою інтегральну оцінку безпеки руху поїздів на залізницях:

$$I = \alpha_k N_k + \alpha_a N_a + \alpha_i N_i, \quad (1)$$

де  $\alpha_k, \alpha_a, \alpha_i$  – вагові коефіцієнти транспортних подій: катастроф, аварій, інцидентів відповідно;  $N_k, N_a, N_i$  – кількість транспортних подій – катастроф, аварій, інцидентів відповідно.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

## Результати

Визначення вагових коефіцієнтів можна запропонувати, виходячи з матеріальних збитків унаслідок порушення безпеки руху поїздів на залізницях. Відповідно до статистичних даних, середня вартість збитків від однієї транспортної події АТ «Українська залізниця» за 2015–2017 рр., згідно з [1], складає: інциденту 7,01 тис. грн, аварії – 122,43 тис. грн, катастрофи – 3 060,6 тис. грн.

Тоді, узявши за одиницю середнє значення матеріальних збитків для інцидентів ( $\alpha_i = 1$ ), знайдемо інші вагові коефіцієнти  $\alpha_k, \alpha_a$ , які, виходячи з цього, будуть мати такі значення:  $\alpha_k = 436,6; \alpha_a = 17,46$ .

Вираз (1) для наведених значень вагових коефіцієнтів набуде наступного вигляду:

$$I = 436,6N_k + 17,46N_a + N_i. \quad (2)$$

Наведемо на рис. 1 загальну кількість транспортних подій за 2015–2017 рр. та інтегральну оцінку безпеки руху поїздів АТ «Українська залізниця», що розрахована за виразом (2).

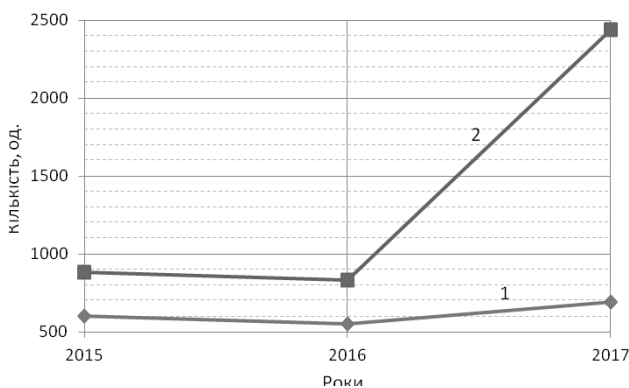


Рис. 1. Стан безпеки руху поїздів АТ «Українська залізниця» у 2015–2017 рр.:

- 1 – за загальною кількістю транспортних подій;  
2 – інтегральна оцінка безпеки руху поїздів, що розрахована за виразом (2)

Fig. 1. Train safety condition of Ukrzaliznytsia JSC in 2015–2017:

- 1 – by the total number of transport accidents;  
2 – integral assessment of train traffic calculated by expression (2)

З наведеного рис. 1 можемо бачити, що інтегральна оцінка безпеки руху поїздів АТ «Українська залізниця» у 2015–2017 рр. складає вищі значення порівняно із загальною кількістю транспортних подій, тобто розроблена інтегральна оцінка з ваговими коефіцієнтами більш адекватно відображає стан безпеки руху поїздів на залізницях. Таким чином, вираз (2) можна використати під час виконання технічного аудиту окремого підприємства чи АТ «Українська залізниця» загалом для з'ясування реальних загроз і ризиків, які вже виникли і на які необхідно звернути увагу для гарантування вищого рівня безпеки руху поїздів.

Технічний аудит не може відбуватися без комплексної оцінки рівня безпеки руху або ризику, що супроводжується також розвитком у системі обліку й аналізу загального рівня безпеки руху. У наш час під час проведення технічного аудиту кількісну оцінку безпеки руху поїздів можна характеризувати числом або питомим показником транспортних подій, віднесених до одиниці виконаної залізничним транспортом роботи. Однак під час технічного аудиту така оцінка не дає можливості виконувати облік усіх категорій показників, що характеризують рівень безпеки руху поїздів. Так, наприклад, не враховані кількість відмов, порушення технологічного процесу виконання робіт, людського фактора під час управління рухом поїздів, що є першопричиною виникнення транспортних подій – аварій і катастроф. Крім того, у комплексній оцінці безпеки руху поїздів повинні бути враховані фінансові втрати в разі настання транспортних подій, такі як матеріальні збитки, що виникають під час порушень безпеки руху.

Формування такої комплексної оцінки можливе на основі методів непараметричної статистики, за допомогою якої деякі характерні різноманітні показники зводяться до однієї одиниці виміру, щоб надати інтегральну оцінку ризиків або стану безпеки руху поїздів.

Вихідні дані показників безпеки руху поїздів АТ «Українська залізниця» за 2006–2016 рр. для визначення інтегральної оцінки наведені в табл. 1.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Таблиця 1

**Вихідні показники безпеки руху поїздів АТ «Українська залізниця» за 2006–2016 рр.**

Table 1

**Initial train safety indicators of Ukrzaliznytsia JSC for 2006–2016**

| Рік  | Матеріальний збиток від порушень безпеки руху поїздів, тис. грн | Кількість порушень безпеки руху поїздів | Кількість відмов технічних засобів, од/млн ткм |
|------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------|
|      | $x_1$                                                           | $x_2$                                   | $x_3$                                          |
| 2006 | 1 229,58                                                        | 891                                     | 30                                             |
| 2007 | 11 601                                                          | 882                                     | 28                                             |
| 2008 | 1 011                                                           | 852                                     | 28                                             |
| 2009 | 2 534                                                           | 820                                     | 34                                             |
| 2010 | 1 650                                                           | 818                                     | 31                                             |
| 2011 | 1 412                                                           | 766                                     | 26                                             |
| 2012 | 2 152                                                           | 764                                     | 27                                             |
| 2013 | 2 015                                                           | 718                                     | 27                                             |
| 2014 | 6 025                                                           | 673                                     | 28                                             |
| 2015 | 3 264                                                           | 602                                     | 23                                             |
| 2016 | 24 649                                                          | 550                                     | 22                                             |

Оскільки аналізуємо стан безпеки руху за декілька років, то виконаємо визначення кількості рівнів із використанням формули Стерджеса [2, 5]:

$$n = 1 + 3,22 \lg T, \quad (3)$$

де  $T$  – аналізований період часу,

$$n = 1 + 3,22 \lg 11 = 4,3.$$

Кількість рівнів округляємо й приймаємо  $n = 4$ . Для всіх наведених показників у табл. 1 період часу однаковий, у зв'язку з чим кількість груп також буде однаковою.

Визначимо діапазон потрібного інтервалу відповідно до [2]:

$$h_i = \frac{x_i^{\max} - x_i^{\min}}{n}, \quad (4)$$

де  $x_i^{\max}, x_i^{\min}$  – максимальне і мінімальне значення  $i$ -го показника стану безпеки руху поїздів відповідно.

На основі наведеної формули (4) виконаємо розрахунок діапазонів усіх інтервалів досліджуваних показників безпеки руху поїздів, а результати наведемо в табл. 2.

Таблиця 2

**Діапазони інтервалів досліджуваних показників безпеки руху поїздів**

Table 2

**Ranges of intervals of the studied train safety indicators**

| $x_1$   | $x_2$ | $x_3$ |
|---------|-------|-------|
| 5 909,5 | 85,25 | 3     |

На підставі діапазонів інтервалів досліджуваних показників безпеки руху поїздів побудуємо залежність збитку за роками з розподіленням за рівнями. Результати наведені на рис. 2.

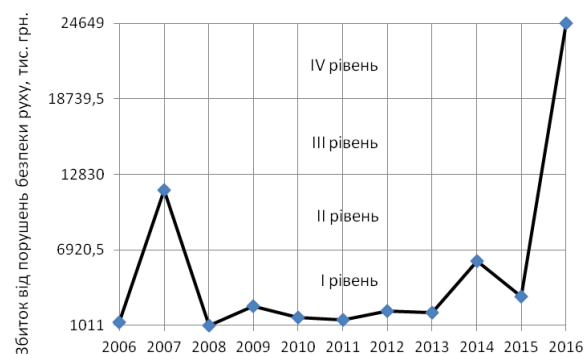


Рис. 2. Залежність матеріального збитку від порушень безпеки руху поїздів АТ «Українська залізниця» за роками з розподіленням за рівнями

Fig. 2. Dependence of material damage on violations of train traffic safety of Ukrzaliznytsia JSC by years with distribution by levels

Також побудуємо залежність кількості порушень безпеки руху поїздів за роками з розподіленням за рівнями, результати якої наведемо на рис. 3, і залежність кількості відмов технічних засобів (рис. 4).

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

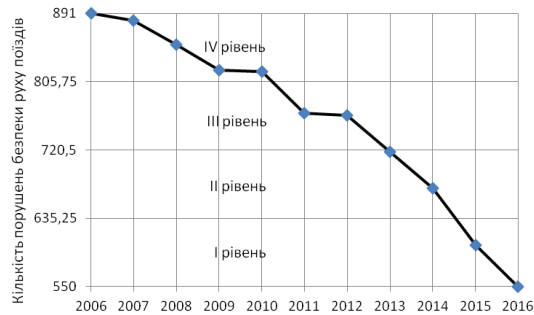


Рис. 3. Залежність кількості порушень безпеки руху поїздів АТ «Українська залізниця» за роками з розподіленням за рівнями

Fig. 3. Dependence of number of train safety violations of Ukrzaliznytsia JSC by years with distribution by levels

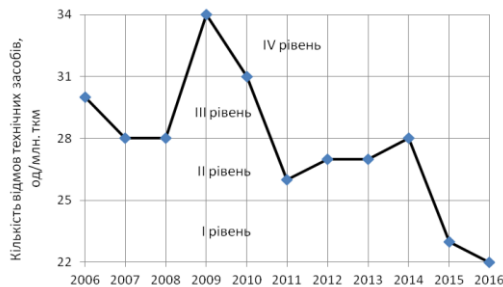


Рис. 4. Залежність кількості відмов технічних засобів АТ «Українська залізниця» за роками з розподіленням за рівнями

Fig. 4. Dependence of the failure number of technical means in Ukrzaliznytsia JSC by years with distribution by levels

Для встановлення єдиного значення показника безпеки руху поїздів АТ «Українська залізниця» використовуємо принцип критерію мінімуму його дисперсії, урахувавши при цьому коефіцієнти ваги для всіх, наведених у табл. 2, показників для виконання інтегральної оцінки під час проведення технічного аудиту. Прийнято вважати [5], що інтегральному показнику характерна деяка лінійна комбінація відповідних встановлених рівнів показників безпеки руху поїздів, яку можна записати наступним чином:

$$I_p = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n = \sum_{i=1}^n \beta_i x_i, \quad (5)$$

де  $\beta_i$  – вагові коефіцієнти рівня для відповідного  $i$ -го показника безпеки руху поїздів, при-

чому  $\sum_{i=1}^n \beta_i = 1$ ;  $n$  – кількість досліджуваних показників безпеки руху поїздів.

Кожний показник  $x_i$  характеризується відповідною оцінкою значущості, яку визначають ранжуванням за спаданням (для прийнятих і розглянутих показників  $x_1 > x_2 > x_3$ , із наступним визначенням вагових коефіцієнтів  $\beta_i$ ).

Вагові коефіцієнти  $\beta_i$  можуть бути визначені за допомогою шкали Фішберна [5]:

$$\beta_i = \frac{2(n-i+1)}{n(n+1)}. \quad (6)$$

Тоді, відповідно до наведеного виразу (6), вагові коефіцієнти для обмежених рівнів трьох параметрів дорівнюватимуть:  $\beta_1 = 0,5$ ;  $\beta_2 = 0,33$ ;  $\beta_3 = 0,17$ .

За отриманими даними про рівні досліджуваних показників безпеки руху поїздів АТ «Українська залізниця» (рис. 2–4) і розрахованими значеннями вагових коефіцієнтів виконаємо обчислення інтегральної оцінки ризику або комплексного показника стану безпеки руху поїздів із використанням формули (5). Результати порівняно із загальною кількістю транспортних подій АТ «Українська залізниця» наведено на рис. 5.

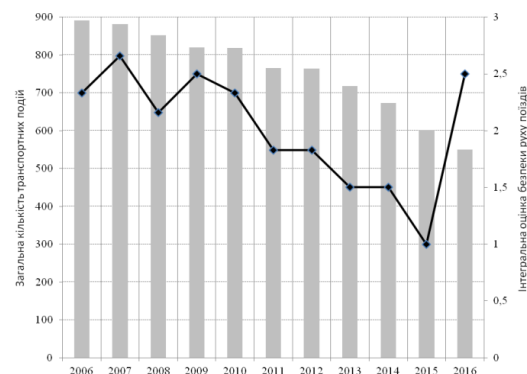


Рис. 5. Залежність інтегральної оцінки комплексного показника стану безпеки руху поїздів порівняно із загальною кількістю транспортних подій АТ «Українська залізниця»

Fig. 5. Dependence of the integral assessment of complex indicator of the train safety state in comparison with the total number of transport accidents of Ukrzaliznytsia JSC

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Із рис. 5 видно, що інтегральна оцінка комплексного показника стану безпеки руху поїздів відрізняється від загальної кількості транспортних подій АТ «Українська залізниця», особливо у 2016 році, оскільки матеріальні збитки від порушень безпеки руху поїздів набули найбільшого значення.

Крім того, слід відзначити більш точне й узагальнене відображення стану безпеки руху поїздів на основі інтегральної оцінки.

### Наукова новизна та практична значимість

Автори цієї роботи вперше запропонували під час проведення технічного аудиту використовувати розроблені моделі для інтегральної оцінки безпеки руху поїздів АТ «Українська залізниця» з ваговими коефіцієнтами, які дозволяють виконувати оцінювання загального рівня безпеки руху та встановлювати в процесі аудиту реальні загрози й ризики.

### Висновки

Інтегральна оцінка стану безпеки руху поїздів в умовах АТ «Українська залізниця» являє собою комплексну величину, яка призначена

для оцінювання загального рівня безпеки руху під час проведення технічного аудиту.

Розроблені моделі для інтегральної оцінки безпеки руху поїздів АТ «Українська залізниця» з ваговими коефіцієнтами дозволяють більш адекватно відображати стан безпеки. Їх можна використати під час проведення технічного аудиту всієї залізниці, її окремого підприємства чи організації для з'ясування реальних загроз і ризиків, які вже виникли і на які необхідно звернути увагу для гарантування вищого рівня безпеки руху поїздів.

У разі орієнтування на основні показники безпеки руху поїздів АТ «Українська залізниця», до яких у роботі віднесені матеріальний збиток, кількість порушень безпеки руху та відмов технічних засобів, можна робити певні висновки під час проведення технічного аудиту і, за необхідності, пропонувати до розробки й реалізації відповідні заходи впливу на наявні джерела небезпеки у відповідних структурних підрозділах залізниць із метою зниження ризиків та підвищення локального чи загального рівня безпеки руху поїздів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кацман, М. Д. Методологічні засади організації управління екологічною безпекою під час ліквідування наслідків аварійних ситуацій на залізничному транспорті : дис. ... д-ра техн. наук : 21.06.01 / Кацман Михайло Давидович ; Нац. авіац. ун-т. – Київ, 2018. – 420 с.
2. Лисенков, В. М. Статистическая теория безопасности движения поездов / В. М. Лисенков. – Москва : ВИНТИ РАН, 1999. – 330 с.
3. Огороков, А. М. Розширення цілей практичного застосування технічного аудиту на підприємствах залізничного транспорту / А. М. Огороков, М. О. Булах // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 6 (72). – С. 30–39. doi 10.15802/stp2017/117551
4. Погорелов, І. М. Методика проведення технологічного аудиту інноваційної діяльності / І. М. Погорелов, М. І. Погорелов // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ» (економічні науки). – Харків, 2016. – № 47 (1219). – С. 54–63.
5. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности / С. А. Айван, В. М. Бухштабер, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. – Москва : Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
6. Рачинська, А. В. Класифікація ризиків на залізничному транспорті як основа формування системи економічної безпеки його функціонування / А. В. Рачинська // Економіка і суспільство. – 2016. – № 6. – С. 81–87.
7. Розсоха, О. В. Аналіз і особливості існуючих наукових підходів щодо визначення рівня безпеки / О. В. Розсоха, Ю. В. Смачило // Зб. наук. пр. Держ. екон.-технол. ун-ту трансп. Серія: Транспортні системи і технології. – Київ, 2016. – Вип. 28. – С. 202–214.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

8. Determination of Integrated Indicator for Analysis of the Traffic Safety Condition for Traction Rolling Stock / B. Bodnar, Ya. Bolzhelarskyi, O. Ochkasov, T. Hryshechka, L. Černiauskaitė // *Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2018) : The 12th International Scientific Conference*, April 26–27, 2018, Panevėžys / Kaunas University of Technology. – Panevėžys, 2018. – P. 5–54.
9. Grushevska, K. Institutional rail reform: The case of Ukrainian Railways / K. Grushevska, Th. Notteboom, A. Shkliar // *Transport Policy*. – 2016. – Vol. 46. – P. 7–19. doi: 10.1016/j.tranpol.2015.11.001
10. Okorokov, A. M. Proposals for improving the process of forming programs of reforming the railway transport industry / A. M. Okorokov, M. O. Bulakh // *Наука та прогрес транспорту*. – 2018. – № 2 (74). – С. 57–66. doi: 10.15802/stp2018/130463
11. Ozkan, T. Railway Transport Liberalization: A Case Study of Various Countries in the World / T. Ozkan, G. Yanginlar, S. Kalayci // *Journal of Management and Sustainability*. – 2016. – Vol. 6. – Iss. 4. – P. 140–149. doi: 10.5539/jms.v6n4p140
12. Pittman, R. Railways restructuring and Ukrainian Economic Reform / R. Pittman // *Man and the Economy. The Journal of The Coase Society*. – 2015. – Vol. 2. – Iss. 1. – P. 87–107. doi: 10.1515/me-2015-0006.
13. Safety Performance Analysis of the Movement and Operation of Locomotives / B. Bodnar, O. Ochkasov, Ye. Bodnar, T. Hryshechka, R. Keršys // *Transport Means : Proc. of 22<sup>st</sup> Intern. Scientific Conf.* – Kaunas, 2018. – P. 839–843.

A. M. ОКОРОКОВ<sup>1\*</sup>, М. А. БУЛАХ<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Управление эксплуатационной работой», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 70, эл. почта andrew.okorokoff@gmail.com, ORCID 0000-0002-3111-5519

<sup>2\*</sup>Каф. «Управление эксплуатационной работой», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 70, эл. почта bulah\_marina@mail.ru, ORCID 0000-0003-4264-2303

## ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ ПРИ ТЕХНИЧЕСКОМ АУДИТЕ

**Цель.** Исследование направлено на разработку интегральной оценки состояния безопасности движения поездов на железной дороге при проведении технического аудита. **Методика.** Для разработки интегральной оценки состояния безопасности движения поездов на железной дороге при проведении технического аудита предложено использовать весовые коэффициенты, пропорциональные влиянию негативных последствий катастроф, аварий, инцидентов, которые характеризуют состояние нарушения безопасности движения. Также предложено ориентирование на основные показатели безопасности движения поездов АО «Украинская железная дорога», к которым отнесены: материальный ущерб, количество нарушений безопасности движения и отказов технических средств. **Результаты.** Авторы разработали интегральную оценку состояния безопасности движения поездов в условиях АО «Украинская железная дорога», которая представляет собой комплексную величину, предназначенную для оценки общего уровня безопасности движения во время проведения технического аудита. Также сформировали модели для интегральной оценки безопасности движения поездов АО «Украинская железная дорога» с весовыми коэффициентами, позволяющие более адекватно отражать состояние безопасности. Эти модели можно использовать при проведении технического аудита всей железной дороги или её отдельного предприятия для выяснения реальных угроз и рисков, которые уже возникли и на которые необходимо обратить внимание для обеспечения более высокого уровня безопасности движения поездов. **Научная новизна.** Авторы впервые предложили при проведении технического аудита использовать разработанные модели для интегральной оценки безопасности движения поездов АО «Украинская железная дорога» с весовыми коэффициентами, которые позволяют выполнять оценку общего уровня безопасности движения и устанавливать в процессе аудита реальные угрозы и риски. **Практическая значимость.** На основе полученных моделей для интегральной оценки безопасности движения поездов можно провести технический аудит всей железной дороги или её отдельного подразделения

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

с предложением реализации соответствующих мер воздействия на существующие источники опасности с целью снижения рисков и повышения локального или общего уровня безопасности движения поездов.

**Ключевые слова:** безопасность движения поездов; технический аудит; интегральная оценка; риски; транспортные происшествия; железнодорожный транспорт

A. M. OKOROKOV<sup>1\*</sup>, M. O. BULAKH<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Management of Operational Work», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician

V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, e-mail andrew.okorokoff@gmail.com, ORCID 0000-0002-3111-5519

<sup>2\*</sup>Dep. «Management of Operational Work», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician

V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, e-mail bulah\_marina@mail.ru, ORCID 0000-0003-4264-2303

## INTEGRAL ASSESSMENT OF THE STATE OF RAILWAY TRAIN SAFETY DURING TECHNICAL AUDIT

**Purpose.** The research aims at developing an integrated assessment of the state of train safety at the railway during technical audit. **Methodology.** To develop an integrated assessment of the safety condition of train traffic at the railway during technical audit, it was proposed to use weight coefficients proportional to the impact of the negative consequences of catastrophes, accidents, incidents that characterize the state of train traffic safety violations at the railways. It was also suggested an orientation to the main indicators of train traffic safety in Ukrzaliznytsia JSC, which include: material damage, the number of traffic safety violations and technical equipment failures. **Findings.** The authors have developed an integrated assessment of the train safety state in the conditions of Ukrzaliznytsia JSC, which is a complex value designed to assess the overall level of traffic safety during technical audit. The authors also obtained models for the integrated assessment of train safety in Ukrzaliznytsia JSC with weight coefficients that allow more adequately reflecting the state of safety. These models can be used during technical audit of the entire railway, its individual enterprise or organization to find out the real threats and risks that have already arisen, and which need to be paid more attention to ensure a higher level of train safety. **Originality.** The authors firstly proposed, when conducting a technical audit, to use the developed models for an integrated assessment of train safety in Ukrzaliznytsia JSC with weight coefficients that allow us to assess the overall level of traffic safety and establish real threats and risks. **Practical value.** Based on the obtained models, for an integral assessment of train safety, technical audit of the entire railway or its separate unit can be performed with the proposal to implement appropriate measures to influence existing sources of danger in order to reduce risks and increase the local or general level of train traffic safety.

**Keywords:** train safety; technical audit; integrated assessment; risks; traffic accidents; railway transport

## REFERENCES

1. Katsman, M. D. (2018) *Metodolohichni zasady orhanizatsii upravlinnia ekolohichnoiu bezpekoiu pid chas likviduvannia naslidkiv avariinykh sytuatsii na zaliznychnomu transporti*. (Dysertatsiia doktora tekhnichnykh nauk). Natsionalnyi aviatsiinyi universytet, Kyiv. (in Ukrainian)
2. Lisenkov, V. M. (1999). *Statisticheskaya teoriya bezopasnosti dvizheniya poezdov*. Moskva: VINITI RAN. (in Russian)
3. Okorokov, A. M. & Bulakh, M. O. (2017). Expansion of objectives of the practical application of technical audit at railway transport enterprises. *Science and Transport Progress*, 6 (72), 30-39. doi 10.15802/stp2017/117551. (in Ukrainian)
4. Pohorielov, I. M. & Pohorielov, M. I. (2016). Metodyka provedennia tekhnolohichnoho audytu innovatsiinoi diialnosti. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut» (ekonomichni nauky)*, 47 (1219), 54-63. (in Ukrainian)
5. Ajvan, S. A., Buxshtaber, V. M., Enyukov, I. S., & Meshalkin, L. D. (1989). *Prikladnaya statistika: Klassifikatsiya i snizhenie razmernosti*. Moskva: Finansy i statistika. (in Russian)
6. Rachynska, A.V. (2016). Klasyfikatsiia ryzykiv na zaliznychnomu transporti yak osnova formuvannia systemy ekonomichnoi bezpeky yoho funktsionuvannia. *Ekonomika i suspilstvo*, 6, 81-87. (in Ukrainian)

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

7. Rozsoha, A. V., & Smachilo, Y. V. (2016). Analysis and features of existing scientific approaches to determining the level of traffic safety. *Proceedings of the State Economic and Technological University of Transport series «Transport Systems and Technologies»*, 28, 202-214. (in Ukrainian)
8. Bodnar, B. Determination of Integrated Indicator for Analysis of the Traffic Safety Condition for Traction Rolling Stock / B. Bodnar, Ya. Bolzhelarskyi, O. Ochkasov, T. Hryshechkina, L. Černiauskaitė // *Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2018): The 12th International Scientific Conference, April 26–27, 2018, Panevėžys, Kaunas University of Technology, Panevėžys*, 45-54.
9. Grushevska, K., Notteboom, T., & Skhliar, A. (2016). Institutional rail reform: The case of Ukrainian Railways. *Transport Policy*, 46, 7-19. doi: 10.1016/j.tranpol.2015.11.001. (in English)
10. Okorokov, A. M., & Bulakh M. O. (2018). Proposals for improving the process of forming programs of reforming the railway transport industry. *Science and Transport Progress*, 2(74), 57-66. doi: 10.15802/stp2018/130463. (in Ukrainian)
11. Ozkan, T., Yanginlar, G., & Kalayci, S. (2016). Railway Transport Liberalization: A Case Study of Various Countries in the World. *Journal of Management and Sustainability*, 6, 140-149. doi: 10.5539/jms.v6n4p140. (in English)
12. Pittman, R. (2015). Railways restructuring and Ukrainian Economic Reform. Man and the Economy. *The Journal of The Coase Society*, 2, 87-107. doi: 10.1515/me-2015-0006. (in English)
13. Bodnar, B. Ochkasov, O., Bodnar, Ye., Hryshechkina, T., & Keršys, R. (2018). Safety Performance Analysis of the Movement and Operation of Locomotives. *Proceedings of 22st International Conference on Transport Means 2018, Lithuania*, 2,839-843. (in English)

Надійшла до редколегії: 22.05.2019

Прийнята до друку: 25.09.2019

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.463.027.27-048.35

В. Г. РАВЛЮК<sup>1\*</sup><sup>1\*</sup>Каф. «Вагони», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта ravvg@ukr.net, ORCID 0000-0003-4818-9482

## МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕЛЕМЕНТІВ ГАЛЬМОВОЇ ВАЖІЛЬНОЇ ПЕРЕДАЧІ ВІЗКІВ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ

**Мета.** Це дослідження спрямоване на модернізацію елементів гальмової важільної передачі візків вантажних вагонів. **Методика.** Виконано теоретичні та експлуатаційні дослідження, які стосуються конструктивних обмежень появи ненормативного зносу на гальмових колодках важільних передач вантажних вагонів. Використано аналітичний підхід до обґрунтування технічного й технологічного способу вдосконалення наявної конструкції гальмової важільної передачі. Наведено рекомендації щодо модернізації розпірок триангелів вантажних вагонів. **Результати.** Установлено недостатню ефективність роботи наявних гальмових важільних передач, що пов'язано з нахилом і притискуванням верхніх окрайок колодок до поверхонь кочення коліс під час руху поїздів без гальмування. Шкідливе тертя з утворенням подвійного фрикційного зносу робочого тіла призводить до стану, коли за рахунок ексцентричної дії динамічних навантажень до 95 % загальної кількості колодок знаходяться у пошкодженному стані. Запропоновані рішення, щодо відновлення наявних конструкцій триангелів. Вибрана простота способу ремонтних робіт полягає в тому, що місце розташування технологічного отвору в розпірках триангелів переносять у раціональне місце. Запропонований у роботі спосіб модернізації зводиться до того, що за спеціальними розрахунками в наявній розпірці триангеля під час її відновлення виконують мінімальну кількість ремонтних операцій. **Наукова новизна.** Теоретично доведено, що в триангелі утворюється шкідливий крутий момент від динамічних сил, який є причиною ненормативного зносу гальмових колодок. Розрахунковим силовим аналізом з урахуванням зазначених факторів виявлено вказаний головний недолік і визначено можливість його ліквідації. Уперше розроблено модель зменшення ненормативного зносу гальмових колодок за рахунок раціонального способу модернізації розпірки триангеля. Адаптовано математичні розрахунки до формулювання силових навантажень елементів гальмових важільних передач, що нахиляють триангель до впирання верхніми окрайками колодок у поверхні кочення коліс. **Практична значимість.** Результати проведених досліджень апробовано на рухомому складі. Сформульовано практичні рекомендації, які доцільно використовувати під час проектування, модернізації й експлуатації гальмових систем як експлуатаційного парку, так і трьохелементних візків нового покоління.

*Ключові слова:* ненормативний знос; гальмова колодка; гальмова важільна передача (ГВП); розпірка; триангель; вагон; момент сили; динамічні сили; раціональний спосіб; модернізація

### Вступ

Експериментально-теоретичні дослідження останніх років спрямовано на раціональне конструювання гальм вантажних вагонів залізничного транспорту, а саме на модернізацію розпірки триангеля колодкового гальма, що працює в режимах значних силових навантажень і вібрацій.

Серед причин відмов тут переважають природна вразливість елементів систем гальмування з підвищенням вантажності й швидкості руху сучасних вантажних поїздів і триботехнічний знос механічних деталей гальмових важільних передач (ГВП). Експлуатаційні дані

щодо зносу гальмових колодок різних типів вантажних вагонів свідчать, що у них виникає ненормативний знос – клиноподібний і/або дуальний. Це відбувається під впливом багатьох факторів, що мають як детермінований, так і стохастичний характер [2, 8]. У цьому зв'язку за останні десятиріччя стан гальмового обладнання рухомого складу вантажних вагонів в АТ «Укрзалізниця» істотно погіршився й став суттєвим макроекономічним фактором, який стримує збільшення обсягів вантажних перевезень на залізницях і підвищує їх собівартість.

Таким чином, стає вкрай актуальним завдання пошуку шляхів підвищення надійності й працездатності гальм вантажних поїздів, зок-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

рема гальмових колодок, уточнювання функціональних залежностей між пробігами, навантаженням і середньою швидкістю руху вагонів, що важливо для своєчасного ремонту й безпечної експлуатації. Нехтування цими обставинами може призвести до аварій і катастроф. Поміж цим у разі достовірного визнання термінів працездатності колодок, дотримання правил експлуатації й ремонту, а також за раціонального конструювання ГВП можна подовжити їх безпечне використання.

Слід зазначити, що загалом у візках вантажних вагонів застосовують більше ніж 1,0 млн триангелів, яким потрібно виконати ремонт або модернізацію розпірки, тобто здійснити перенесення технологічного отвору на задану відстань у раціональне місце. Це дасть можливість зекономити сотні мільйонів гривень на матеріалах для виготовлення нових триангелів, а також майже вдвічі подовжити термін служби гальмових колодок за рахунок здійснення згаданої модернізації.

Простіший загальновідомий спосіб запобігання нерівномірного зносу деталей ГВП – це «заміна зношених елементів на нові» з досягненням потрібної врівноваженості триангеля. Однак це потребує виконання складних ремонтних робіт, пов'язаних не тільки із заміною колодок чи інших зношених елементів ГВП на нові або на заздалегідь відремонтовані. Тому, на наш погляд, з точки зору ремонтної придатності, безпеки та економії доцільно розробляти шляхи створення нових конструкцій триангеля ГВП, про що йдеться у [12]. Запропонована конструкція має спеціальну скобу, що верхньою частиною навішується на розпірку триангеля в замку, а нижньою частиною охоплює розпірку й утримує її разом із вертикальним важелем у виваженому стані. Така модернізація на деякий час збільшує довговічність, надійність і безпечність гальмової системи вантажних вагонів.

Проте цей спосіб під час виконання деяких ремонтних операцій з модернізації має деякі недоліки. Пристрій у вигляді скоби потребує спеціального виготовлення нових деталей до триангеля, які приєднуються до нього. Як показала практика, такий спосіб модернізації забезпечує лише нетривалу довговічність і надійність гальмової системи вагонів. Це пояснюється

тим, що під час руху вагона виникають значні вібраційні навантаження, які негативно впливають на навішену скобу й розпірку, де внаслідок динаміки руху з'являється місцевий знос розпірки. Тому виникають залишкові деформації вищевказаної скоби, а саме: за довжиною її розміри збільшуються, і вона перестав виконувати свою основну функцію – забезпечувати рівномірний знос колодок.

Цей недолік частково можна усунути за допомогою використання пристрою для рівномірного відведення гальмових колодок [10], який має два жорсткі, закріплені з одного кінця стрижні, які проходять в отвори кронштейнів, приварених до триангеля. В отвори кронштейнів встановлюють зносостійкі полімерні втулки. Для утримання від випадання на кожний стрижень установлюють скоби, які підгинають до їх головок.

Однак у цьому рішенні є причини, які перешкоджають отриманню бажаного технічного результату. Тут, як і раніше, панує традиційний спосіб «заміни зношених елементів на нові». Крім того, модернізований таким чином пристрій має два жорсткі стрижні, які проходять через вісім отворів у чотирьох кронштейнах, приварених до триангелів, що являє собою складну конструкцію. До того ж в отворах кронштейнів виникають знакозмінні поздовжні пересування стрижнів, що викликає інтенсивне тертя й деформацію кронштейнів із передчасним виходом із ладу гальмової системи.

Одним із варіантів вирішення проблеми, є пристрій для рівномірного зносу колодок [5, 6]. Функція цього пристрою – це співпадіння осей шарнірного з'єднання вертикальних важелів і розпірок триангелів із вісями цапф, на яких підвішені гальмові башмаки з колодками. Конструктивне виконання цього пристрою дає змогу в декілька разів підвищити довговічність й надійність роботи гальмової системи вантажних вагонів. Для цього розпірки триангелів виконують зі зміщенням технологічних отворів в інше (більш «придатне») місце, що дозволяє зменшити дію дисбалансу неуврівноваженості триангеля та чітко фіксувати його розташування у поупущеному стані гальма (рис. 1). Також досягається бажане відведення й утримання гальмових колодок без шкідливого спирання їх на колеса.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

*Конструктивний вигляд пристрою.* На рис. 1 зображено пристрій, який призначений для рівномірного зносу гальмових колодок. Він складається з вертикальних важелів 10, які навішують через циліндричні шарніри 11 на модернізовані розпірки з перенесеним технологічним отвором 19 триангелів 14 таким чином, щоб центр шарніра 11 на модернізованій розпірці 1 триангелів 14 розташовувався на одній прямій умовній лінії підвішування (на рис. 1, б показано осьовою лінією *A–A*) центрів нижніх шарнірів підвіски 12, гальмових башмаків 16, розташованих на протилежних кінцях обох підвісок 13 кожного триангеля 14.

Між парою триангелів 14 у середніх їх частинах розташовано напрямний криволінійний стрижень 15, кінці якого входять у циліндричні ковзуни 17, жорстко приєднанні уздовж до розпірок 1 симетрично відносно технологічного отвору 19 розпірки циліндричного шарніра 11. Величина ексцентриситету  $\epsilon$  повинна бути не менше ніж максимально допустиме зміщення вниз надресорної балки 18 залежно від завантаження вантажного вагона, а частини стрижня, вигнуті вертикально вниз, розташовують біля торців циліндричних ковзунів 17.

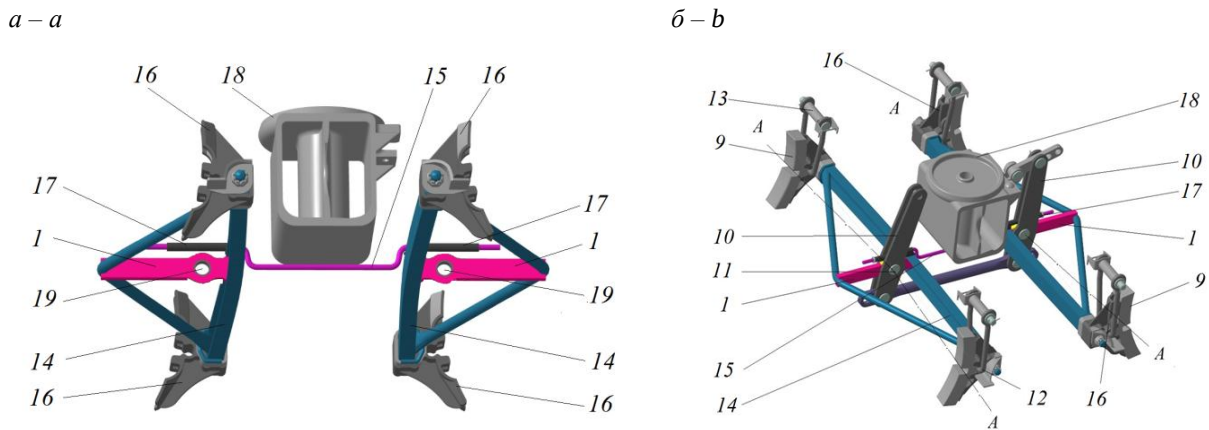


Рис. 1. Вигляд збоку (а) і зверху (б) пристрою для рівномірного зносу гальмових колодок

Fig. 1. Side view (a) and top (b) of the device for uniform wear of the brake pads

У розпірці відповідно до такого рішення змінено за спеціальними підрахунками розташування технологічного отвору для встановлення циліндричного шарніра, який з'єднує вертикальний важіль із розпіркою триангеля так, що центр вказаного шарніра розташовується на одній прямій із центрами шарнірів підвісок гальмових башмаків та впроваджується напрямний криволінійний стрижень, кінці якого шарнірно закріплені в циліндричних ковзунах. Ковзуни жорстко приєднані уздовж до розпірок двох суміжних триангелів симетрично відносно циліндричного шарніра, який приєднує вертикальні важелі. Для недопущення деформації від завантаженості вагона у криволінійному стрижні виконані радіуси згину колін таким чином, що величина ексцентриситету  $\epsilon$  дорівнює величині максимально можливого зміщення вниз

надресорної балки візка, а вертикальні його частини розташовані безпосередньо біля торців циліндричних ковзунів. За рахунок таких особливостей криволінійний стрижень утримується від поздовжнього зсуву та випадання під час руху вагона.

Цей пристрій у наш час застосовують як дослідницький зразок на візках вантажних вагонів. І хоча це дає попередні позитивні результати, проте потребує значних коштів: по-перше, для цього потрібно виготовити його на вагонобудівному заводі з подальшим транспортуванням на вагоноремонтні підприємства для заміни під час виконання ремонтних робіт у трюхелементних візках вантажних вагонів; по-друге, потрібна чітка організація системи технічного обслуговування та ремонту в умовах експлуатації.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Серед аналогічних конструкцій у праці [11] запропоновано пристрій для відведення колодок у візках вантажних вагонів з автоматичним корегуванням їх взаємного положення відносно поверхонь кочення коліс. Але такий пристрій ускладнює ГВП й потребує в умовах експлуатації непередбачених трудомістких регулювань, через це його застосування стало недоцільним.

У праці [15] проаналізовано динамічні зусилля, що діють на несучу конструкцію кузовів вантажних вагонів і пов'язані з гарантуванням безпеки руху під час експлуатації в міжнародному сполученні, але при цьому динаміку гальмової системи трьохелементних візків не розглянуто.

З інформації про конструкцію візка китайського виробництва (мод. ZK1) [13] можна зазначити, що зміна кріплення триангеля спираючим на спеціально відлиті в бокових рамах візка напрямні кронштейни має суттєві недоліки. Вони пов'язані з істотним втручанням у конструкцію найбільш важливих несучих частин візка – литих бокових рам. До того ж надійність указаних прилитих кронштейнів за умов динаміки навантажень у невіднесених частинах візка, що діють від гальмової системи, буде зниженою порівняно із загальною надійністю бокових рам. У місцях контакту шипа триангеля з боковою рамою можуть виникати втомні тріщини, що також створює загрозу безпеці руху. Крім того, у процесі експлуатації можна прогнозувати підвищений знос гумових втулок і зменшення їх ресурсу. Таке кріплення ГВП у візку загрожує відривом і падінням триангелів на колію.

Заходи щодо забезпечення безпеки руху комбінованих транспортних засобів запропоновані в праці [3]. Однак при цьому завдання з удосконалення ГВП, яка є однією з найвідповідальніших вузлів від надійності якої залежить безпека руху на залізничному транспорті, в роботі не вивчалися.

Автори у роботі [1] визначають основні характеристики гальма вантажного вагона нового покоління, які оцінюють його гальмову ефективність. Проте питання, пов'язані зі збільшенням гальмового шляху за зменшення площі контакту гальмових колодок у результаті неправиль-

ної роботи пристроїв для рівномірного зносу колодок через їх шкідливий верхній знос під час руху без гальмувань в роботі не розглядалися.

У проаналізованих закордонних роботах надана перевага експериментальним підходам, які базуються на дослідженнях триботехнічних і температурних показників працездатності елементів гальмових систем рухомого складу [16, 19], а деякі зосереджені на використанні спеціальних чавунних гальмових колодок [17].

У роботі [14] виконано аналіз напружень, що виникають у гальмовій колодці, і термічний аналіз із використанням програмного забезпечення SolidWorks, а також запропоновано альтернативне рішення щодо удосконалення матеріалу гальмових колодок і збільшення їх ресурсу.

Автори статті [18] наводять різноманітні фрикційні гальмові пристрої, які використовують під час механічного гальмування. Зазначено, що фрикційні гальмові механізми, у яких використовують гальмові колодки, негативно впливають на поверхню кочення коліс, оскільки виникають високі температури в зоні тертя «колодка–колесо», тому перевагу надають дисковим гальмам.

З аналізу закордонних літературних джерел видно, що проблемам експлуатації гальмових систем трьохелементних візків, у яких відбувається ненормативний знос гальмових колодок, уваги приділено не було.

### Мета

Це дослідження спрямоване на актуалізацію модернізації пристрою для підвищення довговічності й надійності механічної частини гальмової системи всього експлуатаційного парку вантажних вагонів шляхом поновлення розпірки триангеля.

Для досягнення зазначеної мети необхідно вирішити такі завдання:

- виконати дослідження причин виникнення ненормативного зносу гальмових колодок у процесі експлуатації вантажних вагонів;
- запобігти явищу виникнення ненормативного зносу гальмових колодок на увесь регламентований термін експлуатації візка вантажних вагонів за рахунок урівноважених деталей

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

і виконання дій, пов'язаних із балансуванням триангеля в осях його з'єднань;

– запропонувати найбільш простий, доступний для вагоноремонтних підприємств спосіб модернізації розпірки триангеля на наявній технологічній елементній базі з ремонту механічної частини гальмової системи вантажних вагонів, який суттєво дозволить зекономити десятки тисяч гривень.

**Методика**

Відомо, що типові ГВП вантажних вагонів як головні робочі елементи мають триангелі з додатковими деталями, які врівноважено підвішені на бокових рамах візків. Конструктивне виконання ГВП з триангелями передбачає рівномірне відведення гальмових колодок від поверхонь кочення коліс за попушеного стану гальма та їх утримання на нормативній відстані під час руху поїзда. Останнє, серед інших вимог, має забезпечити довговічну та безвідмовну роботу гальмових пристроїв, а також дотримання нормативного зносу елементів ГВП [2, 4].

Унаслідок конструкційно-технологічних особливостей експлуатації триангелів та приєднаних до них через розпірки складових елементів статична врівноваженість ГВП кожного візка може порушуватися. Дійсно, як видно з рис. 2, а, під час руху вагона, у разі проходження колісних пар по нерівностях рейкової колії («стик рейок»), на центр тяжіння (С), який знаходиться на розпірці триангеля, діє вертикальна сила ( $P+P_{\text{дин}}$ ), що складається з ваги деталей

триангеля ( $P$ ) й динамічного додатку ( $P_{\text{дин}}$ ), який обумовлений вертикальним прискоренням візка ( $\ddot{z}$ ) за умови найждання на вказану нерівність. Тобто з їх дією на плечі  $l_0$  (рис 2, а) виникає шкідливий крутний момент  $M_{\text{кр}}$ , що порушує врівноваженість. При цьому триангель (на рис. 2, б його умовно зображено як стрижень штрихпунктирною лінією) зміщується до колеса впритул і стає шарнірно нерухомою опорою з можливістю повертання, як показано на рис. 2, а. У подальших чисельних розрахунках цим повертанням можна знехтувати.

Зі схеми навантаження правої частини ГВП (рис. 2, б) під час гальмування маємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} T_0 + \delta T - N_1 \sin \varphi_1 - T_1 \cos \varphi_1 = 0; \\ N_1 \cos \varphi_1 - T_1 \sin \varphi_1 - P_{\text{дин}} = 0; \\ T_0 \cdot l_{B_1 C_1} \cdot \sin \beta + \delta T \cdot l_{B_1 C_1} \cdot \sin \beta - M_0 = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де  $M_0$  – момент, що утворюється під час натискання колодки на колесо, його визначають за виразом  $M_0 = T_0 \cdot l_{AC_1} \cdot \sin \beta$ ;  $P_{\text{дин}}$  – сила інерції, що виникає в ГВП під час наїзду колеса на нерівність типу «стик рейок» і притискає триангель із колодками до колеса. Згідно з орієнтовними розрахунками, її беремо з коефіцієнтом динамічності 2,  $P_{\text{дин}} = 1 \text{ кН}$ .

Геометричні параметри ланцюгової системи ГВП наведено в табл. 1.

Перетворюємо систему рівнянь (1) у векторний вигляд (2):

$$G = \begin{bmatrix} -\sin \varphi_1 & -\cos \varphi_1 & 1 \\ \cos \varphi_1 & -\sin \varphi_1 & 0 \\ 0 & 0 & l_{B_1 C_1} \cdot \sin \beta \end{bmatrix}; \quad R = \begin{bmatrix} -T_0 \\ P_{\text{дин}} \\ T_0 \cdot (l_{AC_1} - l_{B_1 C_1}) \cdot \sin \beta \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Тоді розв'язок рівняння можна виконати за формулами Крамера:

$$N_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta}; \quad T_1 = \frac{\Delta_2}{\Delta}; \quad \delta T = \frac{\Delta_3}{\Delta}, \quad (3)$$

де  $G = G(N_1, T_1, \delta T)$  – вектор невідомих зусиль;  $R$  – вектор-стовпчик правих частин;  $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$  – визначники матриць, у яких згідно з індексом стовпчика матриці системи замінено стовпчиком правої частини.

Fig. 2. Diagram of the effect of forces on the brake beam to determine the rational location of the opening in the strut in order to eliminate the torque, which causes abnormal wear of the brake pads:

Таблица 1

## Table 1

| Позначення    | Значення, мм | Значення, м | Відповідність кресленню                                                                               |
|---------------|--------------|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $l_1$         | 320          | 0.32        | Відстань від лінії дії сили $T_1$ до т. $O_1$ і $O_2$                                                 |
| $l_2$         | 434.1        | 0.4341      | Відстань від лінії дії сили $T_2$ до т. $O_1$ і $O_2$                                                 |
| $l_3$         | 680          | 0.68        | Відстань між точками $O_1$ і $O_2$ є плечем для проєкцій $Z_1$ і $Z_2$ , відносно точок $O_1$ і $O_2$ |
| $l_4$         | 612          | 0.0612      | Відстань від лінії дії сили $T_0$ до т. $O_1$ і $O_2$                                                 |
| $l_5$         | 450          | 0.45        | Відстань від лінії дії сили $\delta T_1$ до т. $O_1$                                                  |
| $l_6$         | 480          | 0.48        | Відстань від лінії дії сили $\delta T_2$ до т. $O_2$                                                  |
| $l_{B_{C_1}}$ | 160          | 0.16        | Відстань від лінії дії сили $\delta T$ до т. $B$                                                      |

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Продовження таблиці 1

Continuation of Table 1

| Позначення  | Значення, мм               | Значення, м             | Відповідність кресленню               |
|-------------|----------------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| $\varphi_1$ | $10^\circ$                 | $\cos\varphi_1 = 0.984$ | $\sin\varphi_1 = 0.1736$              |
| $\varphi_2$ | $10^\circ$                 | $\cos\varphi_2 = 0.984$ | $\sin\varphi_2 = 0.1736$              |
| $\varphi_3$ | $10^\circ$                 | $\cos\varphi_3 = 0.984$ | $\sin\varphi_3 = 0.1736$              |
| $\varphi_4$ | $10^\circ$                 | $\cos\varphi_4 = 0.984$ | $\sin\varphi_4 = 0.1736$              |
| $\varphi_5$ | $3^\circ 58' = 3.97^\circ$ | $\cos\varphi_5 = 0.997$ | Кут нахилу сили $\delta T_1$ до осі x |
| $\varphi_6$ | $3^\circ 58' = 3.97^\circ$ | $\cos\varphi_6 = 0.997$ | Кут нахилу сили $\delta T_2$ до осі x |

Визначені зусилля треба обчислювати за відповідними формулами мінімум для двох моментів часу, наприклад, для моменту часу, коли динамічні зусилля довантажують і розвантажують елементи ГВП.

Вектор невідомих зусиль  $\Delta = (N_1, T_1, \delta T)$ , щодо матриці системи  $G$ , з вектором-стовпчиком правої частини рівнянь має вигляд:

$$G = \begin{bmatrix} \cos(90^\circ - \varphi_1) & \cos\varphi_1 & 1 \\ \sin(90^\circ - \varphi_1) & \sin\varphi_1 & 0 \\ 0 & 0 & l_{B_1C_1} \cdot \sin\beta \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} -T_0 \\ 0 \\ T_0 \cdot (l_{AC_1} - l_{B_1C_1}) \cdot \sin\beta \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Другий розрахунок виконують для зворотної хвилі дії динамічної сили, із направленням у протилежну сторону (інший варіант прискорення центра мас триангеля). Формули та розрахунки ідентичні. Усі результати для зручності порівняльного аналізу зведено до табл. 2.

**Контрольний приклад.** Розглядаємо останній кадр анімаційного плану положень

ГВП під час гальмування (у заключній фазі) візка вантажного вагона мод. 18–100. Усі необхідні вихідні дані для отриманих рішень наведено в табл. 1. Користуючись програмним забезпеченням MathCad, визначаємо силові фактори, які діють у складових елементах ГВП трьохелементних візків (табл. 2).

Таблиця 2

## Порівняння визначених зусиль, які діють в елементах ГВП

Table 2

## Comparison of the identified efforts in the brake lever transmission elements

| Схема, для якої виконують розрахунок | Зусилля, які визначають |            |            |            |
|--------------------------------------|-------------------------|------------|------------|------------|
|                                      | $T_1$ , кН              | $T_2$ , кН | $N_1$ , кН | $N_2$ , кН |
| Типова                               | 46,0                    | 46,0       | –          | –          |
| Гібридна                             | 45,53                   | 45,53      | 8,03       | 8,03       |

Продовження таблиці 2

Continuation of Table 2

| Схема, для якої виконують розрахунок | Зусилля, які визначають |            |            |            |
|--------------------------------------|-------------------------|------------|------------|------------|
|                                      | $T_1$ , кН              | $T_2$ , кН | $N_1$ , кН | $N_2$ , кН |
| Гібридна з динамікою, варіант 1      | 45,93                   | 45,93      | 9,119      | 9,119      |
| Гібридна з динамікою, варіант 2      | 46,278                  | 46,278     | 7,148      | 7,148      |

Примітка:  $T_0 = 13\,400\text{ Н}$  і  $P_{\text{дин}} = 1000\text{ Н}$  задано орієнтовно з міркувань коефіцієнта динамічності, який дорівнює двом одиницям

### Результати

На підставі проведених досліджень встановлено, що спирання колодок на колеса під час гальмування здійснюється верхніми крайками в зоні їх зіткнення з колесами, що супроводжується дією реакції  $R$  (рис. 2, а), яка починає виконувати функцію моменту опору сили як у режимі тяги, так і вибігу. У результаті цього відбувається інтенсивне тертя і знос верхніх кінців гальмових колодок (за статистикою, має місце у більше ніж у 80 % вагонів експлуатаційного парку вантажних поїздів). А на кінцевих частинах робочих майданчиків гальмових колодок інтенсивно зростає місцева стертість і виникає осередок їх ненормативного (дуального або клиноподібного) зносу. Унаслідок цього утворюється ще більша невідповідність тріангеля, що суттєво впливає (зменшує) нормативний термін експлуатації гальмової системи в цілому. Таке становище не сприяє надійності й довговічності експлуатації гальмових систем, а з точки зору недотримання безпеки руху на залізничному транспорті взагалі недопустиме. Крім цього, істотно збільшуються сумарні експлуатаційні витрати залізничної інфраструктури на вантажні перевезення [8, 9].

Суть нового пристрою для підвищення довговічності й надійності механічної частини ГВП вантажних вагонів пояснюється схемами, які наведені на рис. 3 [7].

Принцип розв'язання поставлених завдань базується на спеціальних розрахунках пошуку

раціонального місця розташування отвору для шарнірного з'єднання розпірки тріангеля з вертикальним важелем ГВП. Тобто для модернізації механічної гальмової частини вантажних вагонів у контексті сформульованих завдань необхідні ремонтні роботи, які потрібно виконати на наявних ГВП. Ці роботи полягають у тому, що місця розташування вказаних отворів у технологічно-раціональний спосіб зміщуються в тих же розпірках тріангелів у найбільш придатне місце, як знаходять відповідно до розрахунків.

Технологічні міркування щодо модернізації розпірки тріангеля. Запропонований у роботі спосіб модернізації полягає в тому, що за спеціальними розрахунками в наявній типовій розпірці тріангеля, під час її модернізації, виконують такі ремонтні операції (рис. 3): по-перше, вирізають серединний фрагмент розпірки з наявним технологічним отвором, що посилений «бобишкою»; по-друге, вирізаний фрагмент розпірки повертають на  $180^\circ$  у вертикальній або горизонтальній площині та встановлюють поміж тих частин розрізаної розпірки, що залишилися; по-третє, у цьому стані серединний фрагмент розпірки приварюють до лівої та правої частин по перерізах ліній шва, знайдених у розрахунковий спосіб. Геометрію ліній перерізу ліворуч і праворуч від отвору розташовують таким чином, що після повертання вирізаного фрагмента і його приварювання технологічний отвір займає раціональне місце на розпірці тріангеля.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

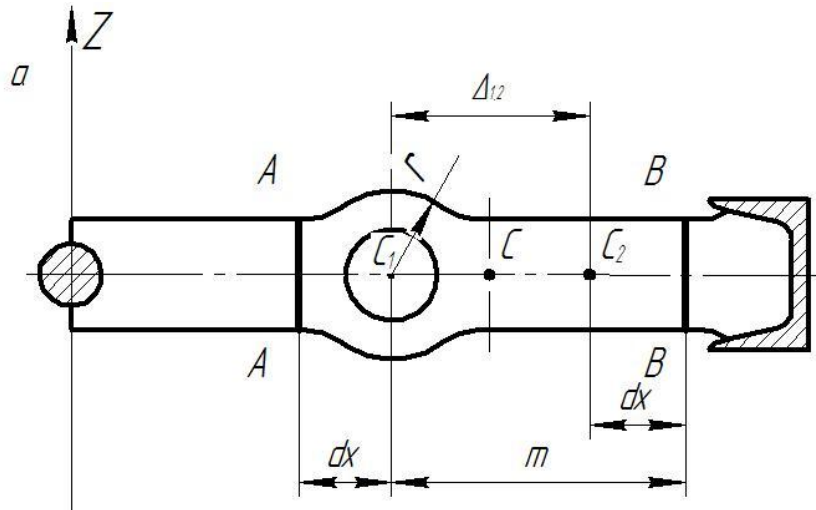
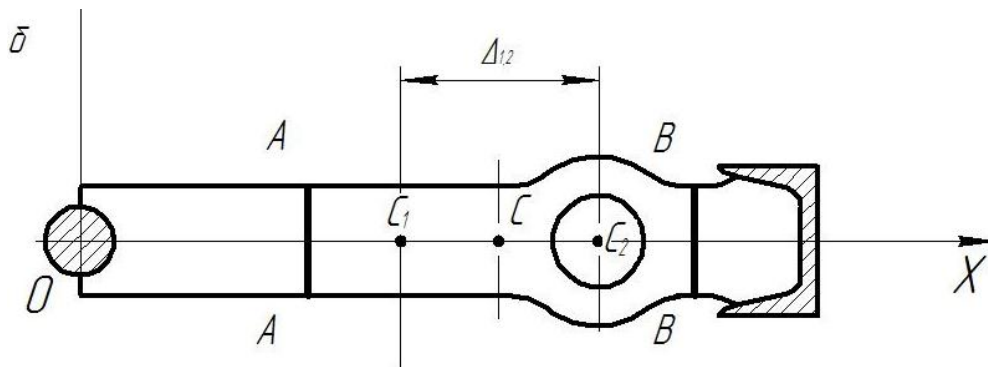
*a – a**б – б*

Рис. 3. Схема розпірки триангеля гальмової важільної передачі:  
*a* – до модернізації; *б* – після модернізації

Fig. 3. Diagram of the brake strut:  
*a* – before modernization; *b* – after modernization

Розрахунки способу запропонованої модернізації. Для реалізації запропонованого способу (рис. 3) під час «перенесення» отвору в найбільш придатне місце на розпірці триангеля визначають такі місця виконання поперечних перерізів *A–A* і *B–B* (рис. 3, *a*), щоб вирізаний за цими лініями серединний фрагмент розпірки з отвором, після повертання відносно вертикальної або горизонтальної осі на 180°, дозволив переміститися технологічному отвору з точки  $C_1$  у точку  $C_2$  на визначену розрахунками відстань:

$$\Delta_{1,2} = OC_2 - OC_1, \quad (5)$$

де  $OC_2$  – відстань від початку координат  $O$  до центра модернізованого отвору розпірки  $C_2$ ;  $OC_1$  – відстань від початку координат  $O$  до центра наявного отвору розпірки  $C_1$ .

Таке зміщення забезпечить переміщення центра повертання триангеля з розпіркою до осі підвіски всього триангеля в цілому.

Якщо визначати потрібне місце розташування технологічного отвору на розпірці триангеля з центром в точці  $C_2$ , яка повинна знаходитися на відстані  $OC_2$  за віссю  $OX$  від початку

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

координат  $O$ , то за нескладними математичними діями можна знайти геометрію та розміри розпірки відносно розташування перерізів  $A-A$  і  $B-B$ , що забезпечуватимуть можливість перенесення центра наявного технологічного отвору з точки  $C_1$  на потрібне (визначене) місце з центром у точці  $C_2$  з повертанням вирізаного серединного фрагмента на  $180^\circ$ . Цей розмір знаходимо за виразом:

$$dx = m - \Delta_{1,2}, \quad (6)$$

де  $dx$  – відстань від центра перенесеного отвору  $C_1$  розпірки до перерізу  $A-A$ ;  $m$  – відстань від центра наявного отвору  $C_1$  розпірки до перерізу  $B-B$ ;  $\Delta_{1,2}$  – відстань, на яку переносять центр отвору розпірки.

Для того, щоб вирізаний серединний фрагмент розпірки за цими розрахунками забезпечив (після його повертання на  $180^\circ$ ) перенесення технологічного отвору в зазначене місце з центром  $C_2$ , потрібно спочатку визначити розмір  $dx$  і відповідно до схеми (рис. 3, *а*) зробити на розпірці перший переріз  $A-A$ . Рациональна величина розміру  $dx$  у нашому випадку залежить від відстані між місцем розташування перенесеного технологічного отвору з центром  $C$  серединного фрагмента розпірки як частки швелерної балки. Ця відстань невелика, тому величину  $dx$  потрібно взяти якомога меншою. Але, виходячи з обмежень за міцністю розпірки, розмір  $dx$  повинен бути не менше ніж величина розміру  $r$  – радіуса бобишки (тобто  $dx \geq r$ ).

Знайдений за математичними розрахунками розмір  $dx$  (рис. 3, *б*) слід відкласти від точки  $C_2$  у бік швелера, тоді отримаємо місце розташування другого перерізу  $B-B$ , який за виконаними математичними розрахунками забезпечуватиме перенесення технологічного отвору розпірки з бобишкою у відповідне місце, після повертання на  $180^\circ$  вирізаного серединного фрагмента та його з'єднання (зварюванням) за місцем розташування перерізів  $A-A$  і  $B-B$ .

*Робота розробленого пристрою.* Пристрій працює таким чином (рис. 1). Під час відпуску гальм триангелі 14 із гальмовими башмаками 16 і колодками 9 рухаються під дією гравітаційних сил на підвісках 13 так, що відводять гальмові колодки від поверхні кочення коліс. Завдяки врівноваженості гальмової системи відносно

шарнірів підвісок 13, гальмові колодки 9 відходять від коліс рівномірно. У випадку появи випадкових зусиль від коливань та нахилів вагона під час руху працює криволінійний стрижень 15, який за рахунок знаходження його кінців у циліндричних ковзунах 17 не дає можливості нахилитися триангелю 14, а значить, і гальмовим колодкам 9 до спирання верхньою або нижньою частиною на колеса. У ковзунах 17 у цей час створюються реактивні сили, які завдяки симетричному розташуванню ковзунів відносно отвору шарніра 11 урівноважуються на тих частинах криволінійного стрижня, які знаходяться в ковзунах. А розпірка 1 триангеля 14 запобігає накопиченню втомлених напружень, що подовжує термін експлуатації усієї конструкції триангеля в цілому. Частини стрижнів, що вигнуті вертикально вниз і розташовані біля торців циліндричних ковзунів 17, утримують стрижень від поздовжнього зсуву й випадання від дії на нього поздовжніх сил під час гальмувань і дії випадкових зусиль від коливань і нахилів кузова вагона.

### Наукова новизна та практична значимість

Теоретично доведено, що в триангелі утворюється шкідливий крутий момент від динамічних сил, який є причиною ненормативного зносу гальмових колодок. Розрахунковим силовим аналізом з урахуванням зазначених факторів виявлено вказаний головний недолік і визначено можливість його ліквідації. Уперше розроблено модель для зменшення ненормативного зносу гальмових колодок за рахунок рационального способу модернізації розпірки триангеля. Адаптовано математичні розрахунки до формулювання силових навантажень елементів гальмових важільних передач, що нахилиють триангель до впирання верхніми окрайками колодок у поверхні кочення коліс. Результати проведених досліджень апробовано на рухомому складі. Сформульовано практичні рекомендації, які доцільно використовувати під час проектування, модернізації й експлуатації гальмових систем як експлуатаційного парку, так і трюхелементних візків нового покоління.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

**Висновки**

1. Доведено, що основною причиною ненормативного зносу гальмових колодок вантажних вагонів стає неврівноваженість конструкції триангеля з приєднаним вертикальним важелем відносно маятникового підвішування, через що під час попускання гальм відбувається нахилання триангеля до впирання й тертя верхівками гальмових колодок об поверхні кочення коліс.

2. Аналітично визначено раціональне місце розташування отвору приєднання вертикального важеля до розпірки триангеля, де можна досягти врівноваженості мас деталей відносно маятникового підвішування й знешкодити крутний момент сил на триангелі. Це використано для модернізації гальмової важільної передачі трьохелементного візка вантажного вагона.

3. Теоретично доведено, що довговічність елементів триангелів, які знаходяться в експлуатації, підвищується до 1,3 раза, а ремонтпридатність – до 100 %.

4. Здійснено конструктивне перенесення технологічного отвору розпірки триангеля в конкретному випадку технічно доступним та економічно доцільним способом в умовах вагоно-ремонтного підприємства на наявній елементній базі з ремонту механічної частини гальмових систем вантажних вагонів, що не потребує капітальних вкладень.

5. Розв'язано завдання запобігання ненормативному зносу гальмових колодок у візках вантажних вагонів на увесь регламентований термін експлуатації візка за рахунок урівноваження триангеля в осях підвішування, з фіксацією його розташування у попущеному стані гальма, з рівномірним відведенням колодок без неконтрольованого їх спирання на колеса.

6. Пат. 87764 Україна, МПК В61Н 15/00, В61Н 13/00. Пристрій для рівномірного зносу колодок в гальмівній системі візків вантажного вагона / Нечволода С. І., Нечволода К. С., Кутішенко О. В., Романюха М. О. ; заявник та патентовласник Укр. держ. акад. залізн. трансп. ; заявл. 02.01.2008 ; опубл. 10.08.2009, Бюл. № 15.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Бабаев, А. М. Влияние размещения тормозных колодок на колесе грузового вагона на эффективность его торможения / А. М. Бабаев, П. Д. Даныш // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вып. 22. – С. 7–9.
2. Інструкція з експлуатації гальм рухомого складу на залізницях України : ЦТ-ЦВ-ЦЛ-0015 : затв. наказом Укрзалізничці від 28 жовтня 1997 р. № 264-Ц. – Київ, 2004. – 146 с.
3. Ловська, А. О. Визначення стійкості контейнера-цистерни відносно рами вагона-платформи при перевезенні на залізничному поромі // Наука та прогрес транспорту. – 2019. – № 1 (79). – С. 139–150. doi.: 10.15802/stp2019/160182
4. Моделирование рабочих процессов трения в колодочном колесном тормозе шахтных локомотивов : монография / А. Н. Коптовец, Л. Н. Ширин, Э. М. Шляхов, А. В. Денищенко, В. В. Зиль, В. В. Яворская. – Днепро : Гос. высш. учеб. завед. «Нац. горный ун-т», 2017. – 258 с.
5. Пат. 87764 Україна, МПК В61Н 15/00, В61Н 13/00. Пристрій для рівномірного зносу колодок в гальмівній системі візків вантажного вагона / Нечволода С. І., Нечволода К. С., Кутішенко О. В., Романюха М. О. ; заявник та патентовласник Укр. держ. акад. залізн. трансп. ; заявл. 02.01.2008 ; опубл. 10.08.2009, Бюл. № 15.
6. Пат. 121889 Україна, МПК51 В60Т 1/02 (2006.01), В61Н 15/00, В61Н 13/00. Підсилюючий пристрій до паралельного відведення колодок від коліс у гальмівній системі візків вантажних вагонів / Равлюк В. Г., Нечволода С. І. ; заявник та патентовласник Укр. держ. акад. залізн. трансп. ; заявл. 24.04.17 ; опубл. 26.12.17, Бюл. № 24.
7. Пат. 118624 Україна, МПК В61Н 15/00, В61Н 13/36 (2006.01), В61Н 13/22 (2006.01). Спосіб і пристрій для підвищення довговічності та надійності механічної частини гальмівної системи вантажних вагонів / Равлюк В. Г., Нечволода С. І. ; заявник та патентовласник Равлюк В. Г., Нечволода С. І., ; заявл. 19.07.17 ; опубл. 11.02.19, Бюл. № 3.
8. Равлюк, В. Г. Дефініція особливостей дуального зносу гальмових колодок вантажних вагонів / В. Г. Равлюк // 36. наук. пр. Укр. держ. ун-ту залізн. трансп. – Харків, 2019. – Вип. 183. – С. 46–59. doi.: 10.18664/1994-7852.183.2019. 169643
9. Равлюк, В. Г. Дослідження особливостей дуального зносу колодок у гальмовій системі вантажних вагонів / В. Г. Равлюк // Наука та прогрес транспорту. – 2019. – № 2 (80). – С. 111–126. doi: 10.15802 / stp2019 / 166114.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

10. Равлюк, В. Г. Спрощений кінетостатичний аналіз гальмової важільної передачі візків вантажних вагонів / В. Г. Равлюк // 36. наук. пр. Держ. ун-ту інфраструктури та технологій. Серія: Транспортні системи і технології. – Київ, 2018. – Вип. 32 (1). – С. 55–70.
11. Радзиховский, А. А. Устройство отвода тормозных колодок / А. А. Радзиховский, И. А. Омеляненко, Л. А. Тимошина // Вагонный парк. – 2009. – № 11/12. – С. 18–21.
12. Тележка двухосная. Руководство по эксплуатации 578.00.000 РЭ; ФГУП «ПО Уралвагонзавод». – Нижний Тагил, 2004. – 56 с.
13. Тележки ZK1 полувагонов, построенных в КНР / Е. П. Блохин, К. Т. Алпысбаев, В. Я. Панасенко [и др.] // Вагонный парк. – 2012. – № 9 (66). – С. 12–14.
14. Ambikaprased, O. Chaubey. Failure Analysis of Brake Shoe in Indian Railway Wagon / O. Chaubey Ambikaprased, A. Raut Abhijeet // IPASJ International Journal of Mechanical Engineering. – 2015. – Vol. 3. – Iss. 12. – P. 37–41.
15. Improvement of the bearing structure of the wagon-platform of the articulated type to ensure the reliability of the fixing on the deck of the railway ferry [Електронний ресурс] / A. Lovskaya, J. Gerlici, O. Fomin, K. Kravchenko, P. Prokopenko, T. Lack // MATEC Web of Conferences. – 2019. – Vol. 254. – Режим доступа: <https://clck.ru/FrMs9> – Назва з екрана. – Перевірено : 15.10.2019. doi: 10.1051/mateconf/201925402035
16. Non-uniformity in braking in coaching and freight stock in Indian Railways and associated causes / K. P. Vineesh, M. R. K. Vakkalagadda, A. K. Tripathi, A. Mishra, V. Racherla // Engineering Failure Analysis. – 2016. – Vol. 59. – P. 493–508. doi: 10.1016/j.engfailanal.2015.11.023
17. Performance analyses of brake blocks used by Indian Railways / M. R. K. Vakkalagadda, D. K. Srivastava, A. Mishra, V. Racherla // Wear. – 2015. – Vol. 328–329. – P. 64–76. doi: 10.1016/j.wear.2015.01.044
18. Sharma, R. C. Braking systems in railway vehicles / R. C. Sharma, M. Dhingra, R. K. Pathak // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) – 2015. – Vol. 4. – P. 206–211.
19. Vernersson, T. Thermally induced roughness of tread-braked railway wheels : Part 1: brake rig experiments / T. Vernersson // Wear. – 1999. – Vol. 236. – Iss. 1/2. – P. 96–105. doi: 10.1016/s0043-1648(99)00261-6

В. Г. РАВЛЮК<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Вагоны», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61500, тел. +38 (057) 730 10 35, эл. почта ravvg@ukr.net, ORCID 0000-0003-4818-9482

## МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТОРМОЗНОЙ РЫЧАЖНОЙ ПЕРЕДАЧИ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

**Цель.** Данное исследование направлено на модернизацию элементов тормозной рычажной передачи тележек грузовых вагонов. **Методика.** Выполнены теоретические и эксплуатационные исследования, касающиеся конструктивных ограничений появления ненормативного износа на тормозных колодках рычажных передач грузовых вагонов. Использован аналитический подход к обоснованию технического и технологического способа усовершенствования существующей конструкции тормозной рычажной передачи. Приведены рекомендации по модернизации распорок триангелей грузовых вагонов. **Результаты.** Установлена недостаточная эффективность работы существующих тормозных рычажных передач, что связано с наклоном и нажатием верхних кромок колодок на поверхности катания колес во время движения поездов без торможения. Вредное трение с образованием двойного фрикционного износа рабочего тела приводит к состоянию, когда за счет эксцентричного действия динамических нагрузок до 95 % общей численности колодок находятся в поврежденном состоянии. Предложены решения по восстановлению существующих конструкций триангелей. Избранная простота способа ремонтных работ заключается в том, что место расположения технологического отверстия в распорках триангелей переносят в рациональное место. Предложенный в работе способ модернизации сводится к тому, что по специальным расчетам в существующей распорке триангеля при его восстановлении выполняют минимальное количество ремонтных операций. **Научная новизна.** Теоретически доказано, что в триангеле образуется вредный крутящий момент от динамических сил, который является причиной ненормативного износа тормозных колодок. Расчетным силовым анализом с учетом указанных факторов выявлен главный недостаток и определена возможность его ликви-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

дании. Впервые разработана модель уменьшения ненормативного износа тормозных колодок за счет рационального способа модернизации распорки триангеля. Адаптированы математические расчеты к определению силовых нагрузок элементов тормозных рычажных передач, которые наклоняют триангель до упирания верхними кромками колодок в поверхность катания колес. **Практическая значимость.** Результаты проведенных исследований апробированы на подвижном составе. Сформулированы практические рекомендации, которые целесообразно использовать при проектировании, модернизации и эксплуатации тормозных систем как эксплуатационного парка, так и трехэлементных тележек нового поколения.

**Ключевые слова:** ненормативный износ; тормозная колодка; тормозная рычажная передача (ТРП); распорка; триангель; вагон; момент силы; динамические силы; рациональный способ; модернизация

V. G. RAVLYUK<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Cars», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61500, tel. +38 (057) 730 10 35, e-mail ravvg@ukr.net, ORCID 0000-0003-4818-9482

## THE MODERNIZATION OF THE ELEMENTS OF THE BRAKE LEVER TRANSMISSION OF FREIGHT CARS BOGIES

**Purpose.** This study seeks to identify a rational way to modernize the brake lever transmission elements of freight car bogies. **Methodology.** Theoretical and operational studies concerning the structural limitations of the appearance of abnormal wear on the brake pads of the lever transmission of freight cars have been performed. The analytical approach to the justification of the technical and technological way of improving the existing design of the brake lever transmission is used. The recommendations of the modernization of the brake struts of the freight cars are given. **Findings.** Existing performance of existing brake lever transmissions has been found to be inefficient due to the inclination and pressing of the upper edges of the pads on the rolling surfaces of the wheels while running of trains without braking. Harmful friction with the formation of double friction wear of the working fluid leads to a condition where, due to the eccentric action of dynamic loads, up to 95% of the total number of pads are in a damaged state. The solutions for the restoration of existing brake beams designs were proposed. The chosen simplicity of the method of repair work is that the location of the service opening in the brake struts is transferred to a rational place. The method of modernization offered in the work is reduced to the fact that according to special calculations in the existing brake strut, at its restoration the minimum number of repair operations is performed. **Originality.** It is theoretically proved that in a brake beam a harmful torque from dynamic forces is formed, which causes abnormal wear of the brake pads. Calculated force analysis, taking into account these factors, identified the main disadvantage and identified the possibility of its elimination. A model was developed for the first time to reduce the non-normative wear of the brake pads due to the rational way of upgrading the brake strut. Mathematical calculations have been adapted to the formulation of the force loads of the elements of the brake levers, which tilt the brake beam to rest against the upper edges of the pads at the rolling surface of the wheels. **Practical value.** The results of the research were tested on real rolling stock and received practical recommendations, which should be used in the design, modernization and operation of brake systems of both operating fleet and three-element bogies of the new generation.

**Keywords:** abnormal wear; brake pad; brake lever transmission (BLT); strut; brake beam; car; moment of force; dynamic forces; rational way; modernization

## REFERENCES

1. Babaev, A. M., & Danysh, P. D. (2008). Vliyanie razmeshcheniya tormoznykh kolodok na kolese gruzovogo vagona na effektivnost ego tormozheniya. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 22, 7-9. (in Russian)
2. *Instruktsiia z ekspluatatsii halm rukhomoho skladu na zaliznytsiakh Ukrainy: TsT-TsV-TsL-0015*, No. 264-Ts. (2004). Kyiv. (in Ukrainian)
3. Lovska, A. O. (2019). Determination of the tank container stability relative to the frame of a flat car during train ferry transportation. *Science and Transport Progress*, 1(79), 139-150. doi.: 10.15802/stp2019/160182. (in Ukrainian)

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

4. Koptovec, A. N., Shirin, L. N., Shlyahov, E. M., Denishchenko, A. V., Zil, V. V., & Yavorskaya, V. V. (2017). *Modelirovanie rabochnykh processov treniya v kolodochnom kolesnom tormoze shahtnykh lokomotivov : Monografiya*. Dnipro: Gosudarstvennoe vysshee uchebnoe zavedenie «Natsionalnyy gornyy universitet» (in Russian)
5. Nechvoloda, S. I., Nechvoloda, K. S., Kutishenko, O. V., & Romaniukha, M. O. (2009). *UA Patent № 87764* Ukrainskyi instytut intelektualnoi vlasnosti (Ukrpatent).
6. Ravlyuk, V. G., & Nechvoloda S. I. (2017). *UA Patent № 121889* Ukrainskyi instytut intelektualnoi vlasnosti (Ukrpatent).
7. Ravlyuk, V. G., & Nechvoloda S. I. (2019). *UA Patent № 118624* Ukrainskyi instytut intelektualnoi vlasnosti (Ukrpatent).
8. Ravlyuk, V. G. (2019). Definition of the dual wear features of the brake shoes of freight cars. *Zbirnyk naukovykh prats USURT*. 183, 46-59. (in Ukrainian)
9. Ravlyuk, V. G. (2019). Investigation of features of dual wear of pads in brake system of freight cars. *Science and Transport Progress*, 2(80), 11-126. doi.: 10.15802 / stp2019 / 166114 (in Ukrainian)
10. Ravlyuk, V. G. (2018). Simultaneous kinetostatic analysis of brake immediate transmission of freight wagons. *Zbirnyk naukovykh prats DUIT. Seriya: Transportni systemy i tekhnolohii*, 32(1), 55-70. (in Ukrainian)
11. Radzikhovskiy, A. A., Omelyanenko, I. A., & Timoshina, L. A. (2009). Ustroystvo otvoda tormoznykh kolodok. *Vagonnyy park*, 11-12, 18-21. (in Russian)
12. Telezhka dvuhosnaya. Rukovodstvo po ekspluatatsii 578.00.000 RE (2004). *FGUP «PO Uralvagonzavod»*. Nyzhnyi Tahyl. (in Russian)
13. Blokhin, Y. P., Alpysbaev, K. T., & Panasenko, V. Y. (2012). Telezhki ZK1 poluvagonov, postroennykh v KNR. *Vagonnyy park*, 9(66), 12-14. (in Russian)
14. Ambikaprasad, O. Chaubey, & Abhijeet, A. Raut. (2015). Failure Analysis of Brake Shoe in Indian Railway Wagon. *IPASJ International Journal of Mechanical Engineering*. 3 (12) 37-41. (in English)
15. Lovskaya, A., Gerlici, J., Fomin, O., Kravchenko, K., Prokopenko, P., & Lack, T. (2019). Improvement of the bearing structure of the wagon-platform of the articulated type to ensure the reliability of the fixing on the deck of the railway ferry. *MATEC Web of Conferences*, 254. Retrieved from <https://clck.ru/FrMs9> doi: 10.1051/mateconf/201925402035 (in English)
16. Vineesh, K. P., Vakkalagadda, M. R. K., Tripath, A. K., Mishra, A., & Racherla, V. (2016). Non-uniformity in braking in coaching and freight stock in Indian. Railways and associated causes. *Engineering Failure Analysis*, 59, 493-508. doi: 10.1016/j.engfailanal.2015.11.023 (in English)
17. Vakkalagadda, M. R. K., Srivastava, D. K., Mishra, A., & Racherla, V. (2015). Performance analyses of brake blocks used by Indian Railways. *Wear*, 328-329, 64-76. doi: 10.1016/j.wear.2015.01.044 (in English)
18. Sharma, R. C., Dhingra, M., Pathak, R. K. (2015). Braking systems in railway vehicles. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 4 206-211. (in English)
19. Vernersson, T. (1999). Thermally induced roughness of tread-braked railway wheels: Part 1: brake rig experiments. *Wear*, 236(1-2), 96-105. doi: 10.1016/s0043-1648(99)00261-6 (in English)

Надійшла до редколегії: 07.05.2019

Прийнята до друку: 11.09.2019

## ЗМІСТ

### **ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА**

**Л. В. АМЕЛІНА, О. В. БЕРЛОВ, М. Г. МАЛЮГІН,  
З. М. ЯКУБОВСЬКА**  
РОЗРАХУНОК ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ЗОН У РАЗІ  
АВАРІЙНОЇ ЕМІСІЇ АМІАКУ ..... 7

**М. М. БІЛЯЄВ, І. О. БОНДАРЕНКО, Т. І. РУСАКОВА,  
В. І. ШИНКАРЕНКО, В. О. ГАБРІНЕЦЬ**  
ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ  
В РАЗІ ВИКИДІВ З ОСНОВНИХ ШАХТНИХ  
ВЕНТИЛЯТОРІВ..... 16

**В. В. БІЛЯЄВА, П. С. КІРІЧЕНКО, О. Ю. ГУНЬКО,  
І. О. БОНДАРЕНКО, П. Б. МАШИХІНА,  
З. М. ЯКУБОВСЬКА**  
КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЕНТИЛЯЦІЇ  
ШАХТНОЇ ВИЇМКИ..... 26

**В. А. КОЗАЧИНА, В. І. ШИНКАРЕНКО,  
І. О. БОНДАРЕНКО, В. О. ГАБРІНЕЦЬ,  
В. М. ГОРЯЧКІН**  
МОДЕЛЮВАННЯ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ  
У ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ ВІДСТІЙНИКУ ..... 36

### **ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ**

**Д. В. ЛОМОТЬКО, Г. О. ПРИМАЧЕНКО,  
Є. І. ГРИГОРОВА**  
РОЛЬ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ УКРАЇНИ  
В СУЧАСНИХ ЛОГІСТИЧНИХ ПРОЦЕСАХ ..... 43

### **ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ**

**М. Б. КУРГАН, В. Г. ВЕРБИЦЬКИЙ, Д. М. КУРГАН**  
ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДМІННОСТЕЙ УКРАЇНСЬКОЇ  
ТА ЄВРОПЕЙСЬКОЇ ЗАЛІЗНИЧНОЇ  
ІНФРАСТРУКТУРИ ..... 52

### **ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ**

**О. В. ГОРБОВА**  
ФОРМАЛІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ  
ЗАЛІЗНИЧНИХ СТАНЦІЙ НА ОСНОВІ ПОЕТАПНОГО  
МОДЕЛЮВАННЯ..... 71

**В. М. ПАХОМОВА, Є. С. МАНДИБУРА**  
ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТУ  
В ІНФОРМАЦІЙНІЙ МЕРЕЖІ ЗАЛІЗНИЧНОГО  
ТРАНСПОРТУ З ВИКОРИСТАННЯМ  
НЕЙРОНЕЧІТКИХ МОДЕЛЕЙ ..... 81

### **РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ**

**А. М. ОКОРОКОВ, М. О. БУЛАХ**  
ІНТЕГРАЛЬНА ОЦІНКА СТАНУ БЕЗПЕКИ РУХУ  
ПОЇЗДІВ НА ЗАЛІЗНИЦІ ПІД ЧАС ТЕХНІЧНОГО  
АУДИТУ ..... 99

### **В. Г. РАВЛЮК**

МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕЛЕМЕНТІВ ГАЛЬМОВОЇ  
ВАЖІЛЬНОЇ ПЕРЕДАЧІ ВІЗКІВ ВАНТАЖНИХ  
ВАГОНІВ ..... 108

## СОДЕРЖАНИЕ

### **ЭКОЛОГИЯ И ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

**Л. В. АМЕЛИНА, А. В. БЕРЛОВ, М. Г. МАЛЮГИН,  
З. М. ЯКУБОВСКАЯ**  
РАСЧЕТ ВЗРЫВООПАСНЫХ ЗОН ПРИ АВАРИЙНОЙ  
ЭМИССИИ АММИАКА..... 7

**Н. Н. БЕЛЯЕВ, И. А. БОНДАРЕНКО,  
Т. И. РУСАКОВА, В. И. ШИНКАРЕНКО,  
В. А. ГАБРИНЕЦ**  
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ  
В СЛУЧАЕ ВЫБРОСОВ ИЗ ОСНОВНЫХ ШАХТНЫХ  
ВЕНТИЛЯТОРОВ ..... 16

**В. В. БЕЛЯЕВА, П. С. КИРИЧЕНКО, Е. Ю. ГУНЬКО,  
И. А. БОНДАРЕНКО, П. Б. МАШИХИНА,  
З. М. ЯКУБОВСКАЯ**  
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЯЦИИ  
ШАХТНОЙ ВЫЕМКИ ..... 26

**В. А. КОЗАЧИНА, В. И. ШИНКАРЕНКО,  
И. А. БОНДАРЕНКО, В. А. ГАБРИНЕЦ,  
В. Н. ГОРЯЧКИН**  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЧИСТКИ ВОДЫ  
В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ОТСТОЙНИКЕ ..... 36

### **ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА**

**Д. В. ЛОМОТЬКО, А. А. ПРИМАЧЕНКО,  
Е. И. ГРИГОРОВА**  
РОЛЬ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА  
УКРАИНЫ В СОВРЕМЕННЫХ ЛОГИСТИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССАХ ..... 43

### **ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И АВТОМОБИЛЬНЫЕ ДОРОГИ**

**Н. Б. КУРГАН, В. Г. ВЕРБИЦКИЙ, Д. Н. КУРГАН**  
ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗЛИЧИЙ УКРАИНСКОЙ  
И ЕВРОПЕЙСКОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ  
ИНФРАСТРУКТУРЫ ..... 52

### **ИНФОРМАЦИОННО- КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

**А. В. ГОРБОВА**  
ФОРМАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ НА ОСНОВЕ  
ПОЭТАПНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ..... 71

**В. Н. ПАХОМОВА, Е. С. МАНДЫБУРА**  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТА  
В ИНФОРМАЦИОННОЙ СЕТИ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОНЕЧЕТКИХ  
МОДЕЛЕЙ ..... 81

### **ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА ПОЕЗДОВ**

**А. М. ОКороков, М. А. Булах**  
ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ  
БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ  
НА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ ПРИ ТЕХНИЧЕСКОМ  
АУДИТЕ ..... 99

**В. Г. РАВЛЮК**  
МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТОРМОЗНОЙ  
РЫЧАЖНОЙ ПЕРЕДАЧИ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ  
ВАГОНОВ ..... 108

# CONTENTS

## **ECOLOGY AND INDUSTRIAL SAFETY**

**L. V. AMELINA, O. V. BERLOV, M. H. MALIUHIN,  
Z. M. YAKUBOVSKA**  
CALCULATION OF EXPLOSIVE ZONES IN  
EMERGENCY EMISSION OF AMMONIA..... 7

**M. M. BILIAIEV, I. O. BONDARENKO,  
T. I. RUSAKOVA, V. I. SHYNKARENKO,  
V. A. GABRINET**  
PREDICTION OF ATMOSPHERE POLLUTION IN CASE  
OF EMISSIONS FROM MAIN MINE FANS..... 16

**V. V. BILIAIEVA, P. S. KIRICHENKO, E. Y. GUNKO,  
I. O. BONDARENKO, P. B. MASHYKHINA,  
Z. M. YAKUBOVSKA**  
COMPUTER SIMULATION OF DEAD-END MINE  
WORKING VENTILATION ..... 26

**V. A. KOZACHYNA, V. I. SHYNKARENKO,  
I. O. BONDARENKO, V. A. GABRINET,  
V. M. HORIACHKIN**  
WATER CLEANING MODELING IN A HORIZONTAL  
SETTLER..... 36

## **OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS**

**D. V. LOMOTKO, H. O. PRYMACHENKO,  
Y. I. HRYHOROVA**  
THE ROLE OF UKRAINIAN RAILWAY TRANSPORT  
IN MODERN LOGISTIC PROCESSES..... 43

## **RAILROAD AND ROADWAY NETWORK**

**M. B. KURHAN, V. G. VERBITSKII, D. M. KURHAN**  
DIFFERENCE RESEARCH OF UKRAINIAN  
AND EUROPEAN RAILWAY INFRASTRUCTURE ..... 52

## **INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL MODELLING**

**A. V. GORBOVA**  
FORMALIZATION OF THE TECHNOLOGICAL  
PROCESSES AT RAILWAY STATIONS BASED  
ON THE STEP-BY-STEP MODELING..... 71

**V. M. PAKHOMOVA, Y. S. MANDYBURA**  
OPTIMAL ROUTE DEFINITION IN THE RAILWAY  
INFORMATION NETWORK USING NEURAL-FUZZY  
MODELS ..... 81

## **ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION**

**A. M. OKOROKOV, M. O. BULAKH**  
INTEGRAL ASSESSMENT OF THE STATE  
OF RAILWAY TRAIN SAFETY DURING  
TECHNICAL AUDIT ..... 99

## **V. G. RAVLYUK**

THE MODERNIZATION OF THE ELEMENTS  
OF THE BRAKE LEVER TRANSMISSION  
OF FREIGHT CARS BOGIES.....108

## ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

До публікації в журналі приймаються статті українською, російською або англійською мовами проблемного, узагальнюючого, методичного характеру, оригінальні наукові, практичні дослідження, які раніше ніде не видавалися.

Матеріали необхідно надавати в друкованому та електронному вигляді у програмі Microsoft Word. Для набору формул використовується MathType.

Наукова стаття повинна відповідати вимогам п. 3 Постанови ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 року.

Матеріали рецензуються членами редакційної колегії журналу та сторонніми незалежними експертами, виходячи з принципу об'єктивності та з позицій вищих міжнародних академічних стандартів якості, та редагуються. Редакція залишає за собою право на стилістичну правку рукопису.

### **Вимоги щодо обсягу наукових статей, повідомлень, відгуків та рецензій:**

- оглядові та проблемні статті – до 45 000 знаків з пробілами (7–10 с.);
- загальні статті за рубриками видання – до 30 000 знаків з пробілами (5–7 с.);
- наукове повідомлення – до 8 000 знаків з пробілами (до 2,5 с.);
- відгук або рецензія – до 6 000 знаків з пробілами (до 2 с.).

Матеріал надається у форматі A4, враховуючи таблиці, ілюстрації, список використаних джерел. Статті, більші за обсягом, можуть бути прийняті до розгляду на підставі рішення редколегії.

### **Для здачі статті до друку авторам необхідно надати наступні документи:**

- 1) файл зі статтею та друкований примірник рукопису з підписами всіх співавторів на останньому аркуші роботи;
- 2) оригінал Ліцензійного договору з підписами всіх співавторів;
- 3) файл з відомостями про кожного з авторів – прізвище, ім'я, по-батькові повністю, посада, місце роботи, наукове звання, науковий ступінь, контактна інформація (телефон, адреса електронної пошти), код ORCID. Відомості про авторів подаються трьома мовами – українською, російською та англійською;
- 4) Оригінал експертного висновку.

**Увага! Згідно з міжнародними стандартами якості наукових публікацій необхідним є:** наявність авторських розширених (250-300 слів) і структурованих резюме (рефератів – abstracts), у т.ч. англійською мовою, рецензій, присланих списків літератури в романському алфавіті тощо.

### **Виклад основного матеріалу статті повинен мати такі елементи:**

- **вступ:** постановка проблеми, аналіз останніх досліджень;
- **мету;**
- **методику:** виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Докладно описують загальну методику дослідження, щоб його результати могли бути відтворені: описується послідовність виконання дослідження, обґрунтовується вибір використовуваних і викладається суть запропонованих методів і моделей, змістовно визначається, що саме досліджувалося кожним методом;
- **результати:** містять експериментальні чи теоретичні дані, отримані в роботі, для демонстрації того, що отримано нове рішення проблеми, і що робота є значним кроком вперед у порівнянні з попередніми дослідженнями. Дані подаються у формі таблиць, графіків, діаграм, рівнянь, фотографій, рисунків, статистичними оцінками. Результати повинні бути викладені коротко і чітко, при цьому містити досить інформації для оцінки зроблених висновків, також має бути очевидно, чому для аналізу обрані саме ці дані;
- **наукову новизну та практичну значимість.** Наукова новизна отриманих результатів викладається аргументовано, коротко і чітко. До наукової новизни не можна відносити прикладні результати (способи, пристрої, методики, схеми, алгоритми). Практичне значення отриманих результатів становлять відомості про використання результатів досліджень або рекомендації з їх використання;
- **висновки:** необхідно навести досягнуті кількісні та якісні показники дослідження, викласти рекомендації з їх використання.

### **З усіх питань звертайтеся до редакції журналу за адресою:**

Науково-технічна бібліотека (ауд. 166),  
Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,  
вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна,  
49010  
e-mail: visnik@diit.edu.ua

Сайт журналу: <http://stp.diit.edu.ua/>

Наукове видання

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

№5 (83) 2019

(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. 14,65. Тираж 100 пр. Зам. №02/05

**Дніпровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна**

*Адреса редакції, видавця:*

вул. Лазаряна, 2, кім. 267, м. Дніпро, 49010, Україна

*Тел.:* +38 (056) 371-51-05

*E-mail:* lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

*Друк:*

Видавництво «Герда», 49000, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 60

Свідцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 397 від 03.04.2001 р.



Научное издание

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

№ 5 (83) 2019

(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. 14,65. Тираж 100 экз. Зак. №02/05

**Дніпровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна**

*Адрес редакції, 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. Днипро, 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. 5 (83) 2019

(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 14,65. Circulation 100. Order no. 02/05

**Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan**

Address of editor and editorial office

Lazaryan St., 2, r. 267, Dnipro, 49010, Ukraine

*Tel.:* +38 (056) 371-51-05

*E-mail:* lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

*Printing*

Publishing house «Gerda», 49000, Dnipro, Yavornitsky av., 60

