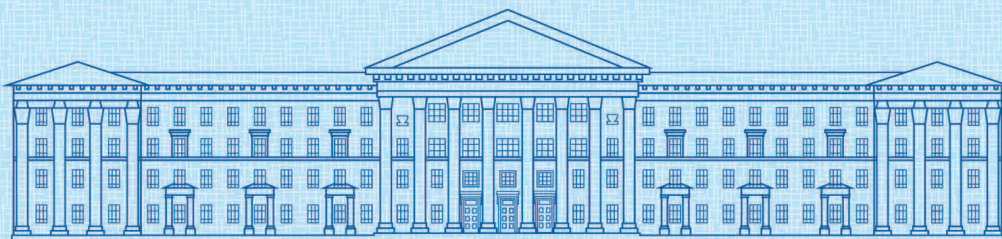




ISSN 2307-3489 (Print)  
ISSN 2307-6666 (Online)



---

# НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ  
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

№ 2 (80)

---

.. 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

№ 2 (80) 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

Пішінко О. М., доктор технічних наук  
Пічугов 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); Богдявічус М., Вільнюський технічний університет імені Гедимінаса (Литва); Бондар Б. Є., ДНУЗТ (Україна); Бондаренко І. О., ДНУЗТ (Україна); Вакуленко І. О., ДНУЗТ (Україна); Головкова Л. С., ДНУЗТ (Україна); Єфременко В. Г., Приазовський держаний 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., ДНУЗТ (Україна); Марущак П. О., Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (Україна); Піттман Р., Антимонопольний відділ Департаменту юстиції (США); Ракша С. В., ДНУЗТ (Україна); Сладковські 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 06.05.2019 р., протокол № 10

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

Видання публікується з 1936 р.:

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

№ 2 (80) 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); Бондар Б. Е., ДНУЖТ (Украина); Бондаренко И. А., ДНУЖТ (Украина); Вакуленко И. А., ДНУЖТ (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., ДНУЖТ (Украина); 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 06.05.2019 г., протокол № 10

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 NACIONAL'NOGO UNÌVERSITETU**  
**ZALÌZNIČNOGO TRANSPORTU**  
=  
**SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS**

**Scientific journal**

**No. 2 (80) 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., DNURT (Ukraine); 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); Śladowski A., Politechnika Śląska w Gliwicach (Poland); Tiutkin O. L., DNURT (Ukraine); Vakulenko I. O., DNURT (Ukraine); Zhukovitskiy I. V., DNURT (Ukraine)

Journal was registered by the State Registration Service of the Ministry of Justice of Ukraine.  
Certificate of Registration KB no.19609-9409PR from 29.12.2012  
Edition is included in the list of scientific professional publications of Ukraine by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine 29.12.2014 г. no. 1528 (technical sciences).  
Journal is registered: in the International Catalogue of periodicals Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; research and metric systems Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, etc.  
Published according to the Academic Council decision of the University from 06.05.2019, Protocol no. 10

Publisher Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (Dnipro)  
Certificate of Publisher ДК no. 1315 from 31.03.2003

Address of Founder St. Lazaryana, 2, room 267, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.: +38 (056) 371-51-05;  
e-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua; journal site: <http://stp.diit.edu.ua/>

Edition is being published since 1936:

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



## АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

УДК 656.256:[621.316.91:621.373.7]

К. І. ЯЩУК<sup>1\*</sup>, А. Ю. ЖУРАВЛЬОВ<sup>2\*</sup>, В. І. ЩЕКА<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Автоматика й телекомунікації», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта k.i.yaschuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-8606-5790

<sup>2\*</sup>Каф. «Автоматика й телекомунікації», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта anton.zhuravlev@gmail.com, ORCID 0000-0001-6885-5177

<sup>3\*</sup>Каф. «Автоматика й телекомунікації», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта v.i.shcheka@gmail.com, ORCID 0000-0002-2184-2827

## ПАРАМЕТРИЧНИЙ ГЕНЕРАТОР ЧАСТОТИ НА НЕКОЛІНЕАРНИХ МАГНІТНИХ ПОЛЯХ

**Мета.** У статті необхідно провести дослідження параметричного генератора частоти на неколінеарних магнітних полях, який виконує функції стабілізованого джерела живлення та засобу захисту від впливу потужних імпульсних завад у вигляді комутаційних перенапруг і розрядів блискавки. **Методика.** Для проведення експериментальних досліджень було виготовлено макетний зразок параметричного генератора. Проведено низку досліджень із визначення оптимальних параметрів кіл накачки та контуру пристрою, за яких досягаються найкращі енергетичні характеристики та максимальна вихідна потужність із забезпеченням стійкої генерації в системі. **Результати.** Автори довели необхідність розробки засобу захисту апаратури сигналізації, централізації та блокування від впливу потужних імпульсних завад. Розроблена конструкція пристрою повністю виключає трансформацію енергії, тобто проникнення перешкоди із входу на вихід. У результаті проведених експериментальних досліджень визначено оптимальні параметри кіл генератора, що забезпечують його найкращі енергетичні характеристики. **Наукова новизна.** Удосконалено пристрій параметричного генератора, який має у своїй конструкції енергоємні елементи, що значно поліпшує енергетичні характеристики і властивості. Із метою підвищення надійності систем автоблокування подальший розвиток отримали способи захисту апаратури залізничної автоматики й телемеханіки від впливу потужних імпульсних завад і високих рівнів тягових струмів. **Практична значимість.** На основі отриманих результатів можна впровадити у виробництво досліджений пристрій і застосовувати його для організації стабілізованого вторинного джерела живлення колійних пристроїв залізничної автоматики, а також для захисту апаратури від дії потужних імпульсних завад, створених грозовими розрядами й блискавками або комутаційними перенапруженнями. Результати роботи також можуть бути використані під час переобладнання перегонів новими системами залізничної автоматики та підготовки проектної документації на рейкові кола, станційні системи й системи автоблокування. Результати дослідження використовують під час вивчення дисциплін «Спеціальні вимірювання на залізничному транспорті» й «Електроживлення пристроїв автоматики», організації науково-практичних семінарів, курсів підвищення кваліфікації тощо.

**Ключові слова:** параметричний генератор частоти; неколінеарні магнітні поля; потужні імпульсні завади; захисний засіб; грозові розряди; блискавки; стабілізоване джерело живлення

## АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

**Вступ**

Електронна апаратура систем залізничної автоматики й телемеханіки (ЗАТ) під час роботи перебуває в досить складній електромагнітній обстановці [5, 10], адже на неї здійснюють вплив потужні імпульсні завади (ПЗ), які, з одного боку, виражаються грозовими розрядами й блискавками, а з іншого – комутаційними перенапруженнями й короткими замиканнями тягової мережі. Сьогодні майже не існує пристроїв, які повністю захищають апаратуру ЗАТ від дії грозових розрядів і блискавок [3]. У кабелях до релейної шафи і щитових установок систем сигналізації, централізації та блокування (СЦБ) під час ударів блискавки може бути присутня амплітуда струму й напруги завади 8 кА, 4,5 кВ із фронтом імпульсу 2 мкс і тривалістю 210 мкс. Енергія потужної імпульсної завади ( $\int i^2 dt$  інтеграл Джоуля) перевищує 30 кДж. При цьому розрядник РВНШ-250, який наразі застосовують у пристроях СЦБ як захисний засіб, має інтеграл Джоуля 2,5 кДж. Якщо порівняти ці два показники, то стає зрозумілою необхідність упровадження пристрою захисту апаратури ЗАТ від дії ПЗ і дослідження його роботи.

**Мета**

Ураховуючи вище наведене, автори ставлять за мету дослідження і вдосконалення засобу захисту пристроїв СЦБ від впливу грозових розрядів і комутаційних перенапруг тягової мережі.

**Методика**

Прототипом досліджуваного пристрою є перетворювач частоти ПЧ 50:25 і похідний від нього ПЧ 50:50-300, який, на відміну від ПЧ 50:25, не має постійної складової робочого струму, що підмагнічувала і, як наслідок, нагрівала магнітопроводи силових трансформаторів поста централізації, створюючи тим самим негативний вплив на їх роботу.

Параметричний генератор частоти з ортогональними (колінеарними) полями ПЧ 50:25 представляє собою дільник частоти з паралельними полями та є суттєво нелінійним пристроєм. Він складається з магнітопроводу, викона-

ного у вигляді прямокутного паралелепіпеда з наскрізними вікнами, розташованими на діагоналях його граней.

Для збудження електричних коливань обов'язковою умовою є наявність у контурі енергетичного параметра (індуктивності або ємності), що періодично змінюється [4]. До того ж параметричне збільшення комбінацій може мати місце тільки за умов, коли зміна параметра призводить до збільшення енергії коливань, які спочатку виникали у контурі внаслідок несиметрії магнітних характеристик осердя або за рахунок незначних змін земного магнітного поля. Такі невеликі коливання струму створюють напругу на конденсаторі контура, що змінюється за законом, наближеним до синусоїдального.

У нашому випадку для збудження коливань змінюватимемо індуктивність контура пристрою зовнішнім джерелом енергії. Цей процес відбуватиметься за наступним законом: у ті моменти часу, коли струм у контурі досягає максимуму ( $i_k = \pm I_{\max}$ ), індуктивність досить швидко зменшується від значення  $L_2$  до значення  $L_1$ , а коли струм проходить через нуль, – повертається до свого колишнього значення (рис. 1). У разі зменшення індуктивності (моменти  $t_0, t_2 \dots$ ) зовнішнє джерело буде здійснювати роботу проти сил магнітного поля, й енергія, яку витрачає джерело, дорівнюватиме приросту електромагнітної енергії контура:

$$0,5(L_2 - L_1) \cdot I^2 = 0,5 \cdot W_k \cdot \Phi_k \cdot \Delta i_{k1} = \Delta A_1.$$

Беручи до уваги незмінність магнітного потоку під час зміни індуктивності, енергія контура збільшуватиметься за рахунок стрибкоподібного збільшення струму контура приблизно на величину:

$$\Delta i_{k1} = I_{km} \cdot \frac{\Delta L}{L_{cp}}.$$

Після отримання контуром приросту енергії струм в індуктивності зменшується, а електромагнітна енергія, що накопичена в ній, буде переходити в електростатичну енергію конденсатора [1, 2]. Повернення індуктивності до попереднього значення, що відбувається через чверть періоду частоти контура, не супрово-

## АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

джується зміною запасу енергії контура, що зосереджена в конденсаторі, тому що цей процес відбувається в моменти  $t_1, t_3 \dots$ , коли струм  $I_{km}$  а, відповідно, й електромагнітна енергія контура дорівнює нулю. При цьому на зміну індуктивності зовнішніх джерел енергія не витрачається [5]. У третій чверті періоду, коли

напрямок струму індуктивності змінюється на протилежний, а значення індуктивності знову зменшуватиметься, енергія контура збільшиться на деяку величину  $\Delta A_2 > \Delta A_1$ , оскільки струм контура за першу половину періоду зріс на величину  $\Delta i_{k1}$ .

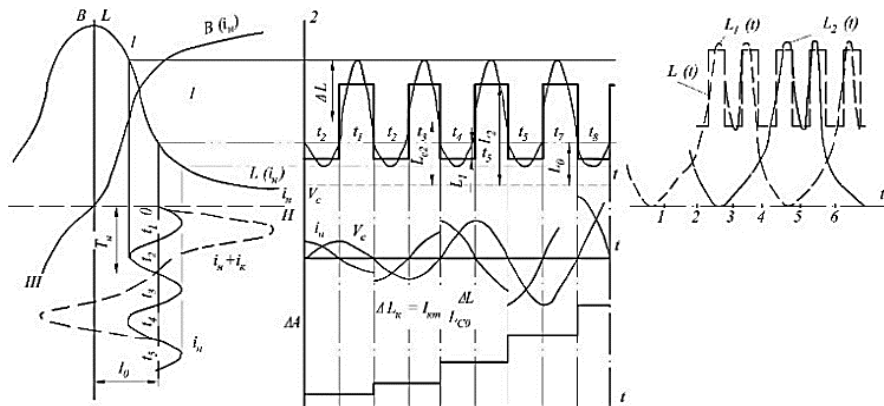


Рис. 1. Графіки зміни параметрів перетворювача частоти в процесі параметричного збудження

Fig. 1. Graphs of changing the parameters of the frequency converter in the process of parametric excitation

Поняття «накачування» означає компенсацію втрат енергії системи впродовж роботи, здійснюваної під час зміни індуктивності джерелом накачування. Відповідно до цього надалі використано терміни «струм накачування» й «напруга накачування» замість терміна «напруга мережі».

Згідно з рис. 1 можна виділити наступні особливості параметричного збудження коливань:

1. Найефективнішим режимом збудження коливань є такий, за якого зміна параметра контура відбувається з частотою накачування, що вдвічі перевищує частоту власних коливань у системі (рис. 1).

2. Зміщення моменту зменшення  $L$  на відмітку часу, коли  $|i_k| < |I_{km}|$ , тобто на  $\Delta t$  за часом  $t$  або на  $2\omega\Delta t$  за фазою, призведе до зменшення енергії, яка поступає в контур; зростання значення індуктивності відбуватиметься за  $U \neq 0$ , а тому буде супроводжуватися витратою енергії контура. Якщо ж змістити моменти часу зміни індуктивності на  $\Delta t = \frac{T_H}{4}$ , то індуктив-

ність буде зменшуватися ( $i_H \approx 0$ ) і збільшуватися ( $|i_k| = I_{km}$ ), тобто енергія у контур взагалі не буде надходити, і її втрати при цьому виявляються найбільшими. Така зміна  $L$  призведе до збільшення згасання струму контура.

До конструкційних недоліків іншого аналога розробленого пристрою, ПГ 50-50-300, належить наявність обмотки зворотного зв'язку, що створює ймовірність потрапляння ПЗ у вихідну контурну обмотку. У такому випадку захисні властивості повністю анулюються. Виникає необхідність у розробці пристрою захисту апаратури від дії грозових розрядів і комутаційних перенапруг, який би не володів вище наведеними недоліками [9].

У вдосконаленому пристрої виключена обмотка зворотного зв'язку, і конструкція магнітопроводу передбачає неколінеарність магнітних кіл. Змінний струм у розміщених ортогонально обмотках накачування створює магнітний потік, силові лінії якого не перетинають контурну обмотку. Таке конструкційне рішення дозволяє повністю уникнути трансформації енергії з кола накачування в контур навіть за част-



## АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

кового замикання витків обмотки накачування. Крім того, за таких умов можна уникнути неправильної роботи фазочутливого колійного реле.

Отже, усі вище перераховані властивості, особливості й характеристики були використані для створення такого параметричного генератора (ПГ), який можна використати і як стабілізоване вторинне джерело живлення, і як пристрій захисту від дії імпульсних завад.

Для виготовлення дослідного зразка параметричного генератора частоти й дослідження його характеристик було розраховано всі конструктивні й електричні параметри, але вони потребували подальшого уточнення експериментом. Осердя виконано з холоднокатаної тонколистової ізотропної електротехнічної сталі 2412, що володіє хорошими магнітними властивостями.

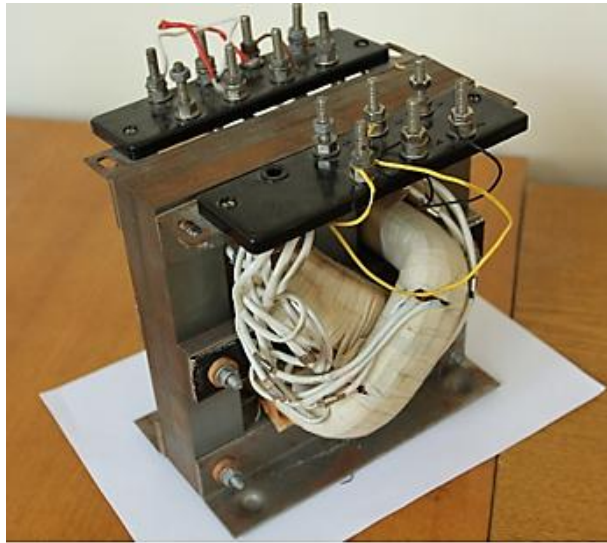


Рис. 2. Макетний зразок ПГ 50:50-150

Fig. 2. A parametric generator 50:50-150 prototype

Зсув фаз  $90^\circ$  між входною та вихідною напругами забезпечують обмотки ПГ, розміщені ортогонально (рис. 2).

Дослідний зразок перетворювача потужністю 150 Вт на неколінеарних магнітних полях має наступні параметри: об'єм сталі магнітопроводу  $V = 1,3 \cdot 10^{-6}$ ; середня лінія  $l_{cp} = 0,34$  м; штамп сталі Ш-33-50-198, ємність кола накачування  $C_H = 40$  мкФ, ємність контура  $C_K = 40$  мкФ, витки обмотки накачування

$W_H = 300$ ,  $W_{H0} = 300$ , витки контурної обмотки  $W_K = 300$  [64].

Дослідження проведені за схемою, що зображена на рис. 3.

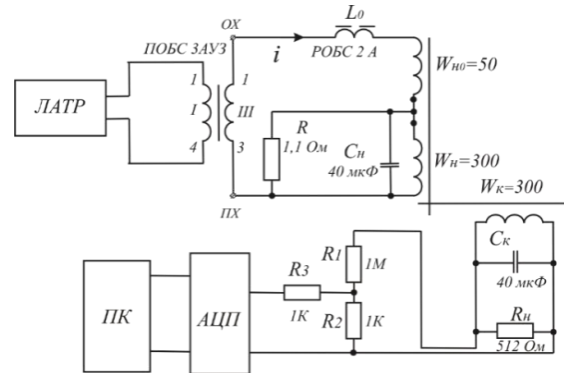


Рис. 3. Схема для дослідження характеристик параметричного генератора частоти

Fig. 3. A scheme for studying the characteristics of a parametric frequency generator

Елементи входного кола генератора містять послідовний контур  $L_0 - C_0$ , де можливий лінійний резонанс напруг, та паралельне коло  $L_H - C_H$  з нелінійною індуктивністю обмотки накачування, де можливий ферорезонанс струмів.

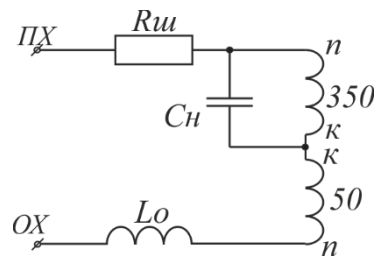


Рис. 4. Схема входного кола ПГ з зустрічним увімкненням витків обмотки накачки 300 та 50

Fig. 4. Scheme of the input circuit of parametric generator with the inclusion of the pumping winding 300 and 50

У результаті розрахунків характеристик елементів входного кола генератора знайдено значення ємності (30...40 мкФ), яке за заданих параметрів ПГ забезпечує в обмотці накачування необхідну індукцію і створює режим коливань у вихідному параметричному колі без досягнення режимів насичення сталі осердя генератора. За знайденої ємності конденсатора

## АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

струм у контурі  $L_0 - C_H$  не перевищує 2,5 А. Це саме та ємність, за якої проявляється ферорезонанс, унаслідок чого відбувається стрибок струму. Насправді обрана для проведення експериментальних досліджень ємність є трохи меншою за розрахункову, оскільки режим повного резонансу струму під час роботи перетворювача не бажаний із точки зору обмеження струму намагнічування обмотки накачування.

На рис. 4 зображені послідовно включені елементи вхідного кола ПГ  $(L_0 + L_{H0}) - C_H$ , що створюють передумову для виникнення лінійного резонансу напруг (індуктивність  $L_{H0}$  менша від  $L_{H0}$ ). За резонансу напруг, як відомо, фаза струму в колі збігається з фазою електрорушійної сили. У цьому випадку вхідний опір схеми є активним, а струм на вході – максимальним. Напруга на індуктивності обмотки накачування  $W_H$  досягне величини  $U_L = QU_I$ ,

де  $Q = \frac{\omega_0 \cdot (L_0 + L_{H0})}{R}$  – добротність резонансного контура;  $\omega_0$  – власна частота вхідного контура ПГ. Генератор допускає відхилення  $\omega_0$  від частоти живильної мережі в межах 40 %. Для роботи дослідного зразка обрані параметри елементів вхідної схеми, за яких резонанс напруг може розвиватися лише на 20...30 % від максимальної добротності контура.

У роботі проведено пошук оптимальних параметрів кола накачування й контура ПГ, які забезпечують потрібні енергетичні показники й вихідну потужність. Виникла необхідність здійснити уточнення кількості зустрічно увімкнених витків, величини ємності накачування та ін.

Індуктивність  $L_0$  застосовують у колі накачування не тільки для організації резонансу напруг. Для аргументації введення  $L_0$  скористаємося осцилограмою вхідної напруги й вихідного струму без  $L_0$  у схемі (рис. 5). Вихідний струм, як видно з рис. 5, має характерну несинусоїдальність, адже на нього здійснює вплив нелінійність контура, що створює третю гармоніку, яка має амплітуду близьку до першої. Тому для подавлення третьої гармоніки було введено лінійну індуктивність  $L_0$ . За повного ви-

ключення  $L_0$  зі схеми накачування генерація не настає навіть у разі вхідної напруги до 220 В. Таким чином, наявність у схемі додаткової лінійної індуктивності  $L_0$  позитивно впливає на добротність вхідного кола.

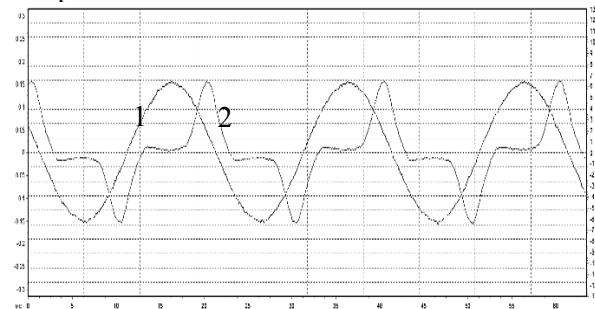


Рис. 5. Осцилограма вхідної напруги й вихідного струму:  
1 – вхідна напруга; 2 – вихідний струм

Fig. 5. Oscillogram of input voltage and output current:  
1 – input voltage, 2 – output current

Під час проведення експериментальних досліджень було застосовано багато варіантів увімкнення витків обмоток і варіювання їхньої кількості, а також різних номіналів ємностей [6, 8]. Здійснено розрахунки вихідної потужності й коефіцієнта корисної дії (ККД) генератора. Проведені дослідження свідчать, що найбільш ефективною є схема із зустрічно увімкненими витками  $W_{H0} = 50$  і  $W_H = 300$  і ємністю в колі накачування 40 мкФ. У разі таких параметрів схеми генерація настає при напруги  $U_{ген} = 180 В$  (рис. 6).

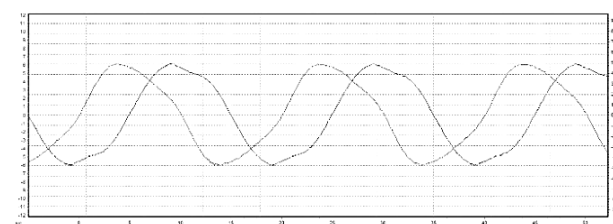


Рис. 6. Осцилограма вхідної та вихідної напруг у режимі генерації

Fig. 6. Oscillogram of input and output voltages in generation mode

Результати вимірювань наведені в табл. 1.

## АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

Таблиця 1  
Результати експериментальних досліджень

Table 1

Results of experimental studies

$U_{\text{мережі}}, \text{В}$	$U_{\text{н}}, \text{В}$	$U_{\text{к}}, \text{В}$	$i_{\text{рн}}, \text{А}$
180	242	262	1,5
210	256	260	1,5
220	267	257	1,5
230	279	252	1,5
255	295	240	1,4

У разі досягнення  $U_{\text{ген}} = 180 \text{ В}$  зсув фаз між напругою вхідного та вихідного контурів дорівнює  $90^\circ$  [11], що відображає роботу ПГ (рис. 7).

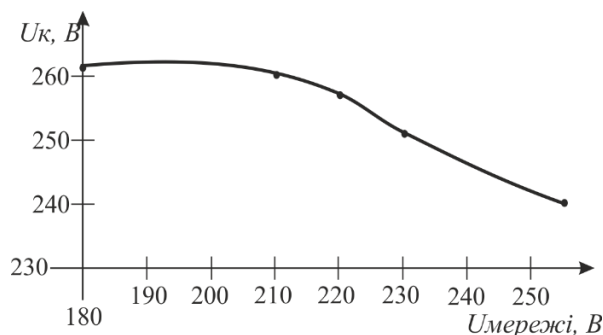


Рис. 7. Нелінійна залежність вихідної напруги контура від напруги живлення

Fig. 7. Nonlinear dependence of the output voltage of the circuit on the supply voltage

За отриманими експериментальними даними було побудовано залежність величини вихідної напруги контура від напруги живильної мережі. Як видно на рис. 6, вихідна напруга є стабілізованою, її пульсації не перевищують 8 %, що є прийнятним згідно з ТУ. Для цього схемного рішення ККД  $\eta = 0,7$ .

Зважаючи на отримані осцилограми й виміряні напруги, ПГ 50:50-150 можна успішно застосовувати як стабілізоване вторинне джерело живлення.

На стадії розробки пристрою ПГ 50:50-150 було заплановано використовувати і як засіб захисту від дії грозових розрядів і блискавок, тому проведено дослідження і в цьому напрямі.

Сертифікована лабораторія випробувань технічних засобів залізничної автоматики й телемеханіки провела випробування ПГ 50:50-150 на електромагнітну сумісність. У результаті на виході генератора спостерігалася напруга перешкоди амплітудою 5–7 В під час подачі на вхід пристрою напруги 3,5 кВ тривалістю до 100 мкс.

### Результати

На основі проведених досліджень макетного зразка ПГ 50:50-150 було уточнено параметри елементів кіл накачування та контура, зокрема схему ввімкнення витків накачування, їх кількість, наявність у схемі лінійної індуктивності. Побудовано залежність напруги контура від напруги мережі, отримано осцилограми вихідного струму, вхідної та вихідної напруг у режимі генерації. Проведено дослідження захисних властивостей пристрою. Розроблено діючий зразок ПГ, який дозволить вирішити важливу практичну задачу – організувати ефективний захист апаратури систем залізничної автоматики від дії потужних імпульсних завад, створених грозовими розрядами, блискавками й комутаційними перенапругами тягової мережі залізниць.

### Наукова новизна та практична значимість

Удосконалено пристрій параметричного генератора, який має у своїй конструкції енергоємні елементи, що значно поліпшує його енергетичні характеристики і властивості. Задля підвищення надійності систем автоблокування подальший розвиток отримали способи захисту апаратури залізничної автоматики й телемеханіки від впливу потужних імпульсних завад і високих рівнів тягових струмів.

На основі отриманих результатів можна впровадити у виробництво досліджений пристрій і застосовувати його в системах залізничної автоматики для організації стабілізованого вторинного джерела живлення, а також для захисту апаратури від дії потужних імпульсних завад, створених грозовими розрядами і блискавками або комутаційними перенапруженнями. Отримані в роботі результати також можуть бути використані під час переобладнання пере-



## АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

гонів новими системами залізничної автоматики й підготовки проектної документації на рейкові кола, станційні системи й системи автоблокування. Результати дослідження використовують під час вивчення дисциплін «Спеціальні вимірювання на залізничному транспорті» й «Електроживлення пристроїв автоматики», організації науково-практичних семінарів, курсів підвищення кваліфікації тощо.

## Висновки

Параметричний генератор частоти на неколінеарних магнітних полях ПГ 50:50 можна успішно застосовувати на залізницях України як стабілізоване вторинне джерело живлення й пристрій захисту від впливу грозових імпульсів і блискавок. Уніфікованість конструкції і стабільність характеристик дозволяє використовувати параметричний генератор в інших галузях промисловості й медицини як стабілізоване джерело живлення.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабичев, Ю. Е. Электротехника, электроника и схемотехника ЭВМ. Анализ линейных электрических цепей : учеб.-метод. пособие / Ю. Е. Бабичев. – Москва : МИСиС, 2017. – 72 с.
2. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник для электротехн., энергет., приборостроит. спец. вузов / Л. А. Бессонов. – 9-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высш. шк., 1996. – 638 с.
3. Манаков, А. Д. Концепция защиты устройств железнодорожной автоматики и телемеханики от перенапряжений / А. Д. Манаков // Промышленный транспорт Урала. – 2007. – № 9. – С. 35–37.
4. Параметрический резонанс : учеб.-метод. пособие / сост. Н. И. Федяйнова. – Томск : Изд. Дом Томского гос. ун-та, 2016. – 14 с.
5. Разгонов, А. П. Оцінка впливу асиметрії тягового струму на роботу перегінних рейкових кіл / А. П. Разгонов, К. І. Ящук // Безпека та електромагнітна сумісність на залізн. трансп. (S&EMC) : тези VII Міжнар. наук.-практ. конф. / Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпро, 2016. – С. 60–61.
6. Hasan, A. N. Impulse Noise Detection in OFDM Communication System Using Machine Learning Ensemble Algorithms / A. N. Hasan, T. Shongwe // International Joint Conference SOCO'16-CISIS'16-ICEUTE'16 (San Sebastián, Spain, October 19th–21st, 2016). – Cham : Springer, 2016. – P. 85–91. doi: 10.1007/978-3-319-47364-2\_9
7. Non-collinear generation of angularly isolated circularly polarized high harmonics / D. D. Hickstein, F. J. Dollar, P. Grychtol [et al.] // Nature Photonics. – 2015. – Vol. 9. – Iss. 11. – P. 743–750. doi: 10.1038/nphoton.2015.181
8. Shongwe, T. A study on Impulse Noise and Its Models / T. Shongwe, A. J. H. Vinck, H. C. Ferreira // SAIEE Africa Research Journal. – 2015. – Vol. 106. – Iss. 3. – P. 119–131. doi: 10.23919/saiee.2015.8531938
9. Parametric generator : Patent 8699124, USA, WO2011/157990 / M. H. Dunn ; University Court of The University of St Andrews Filed. – № PCT/GB2011/000899 ; App. Date June 16, 2011 ; Pub. Date December 22, 2011.
10. Yashchuk, K. I. Potentials railwise propagation study / K. I. Yashchuk // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 4 (70). – С. 7–15. doi: 10.15802/stp2017/109519
11. Zong, Z. A 60 GHz frequency generator based on a 20 GHz oscillator and an implicit multiplier / Z. Zong, M. Babaie, R. B. Staszewski // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2016. – Vol. 51. – Iss. 5. – P. 1261–1273. doi: 10.1109/jssc.2016.2528997

К. И. ЯЩУК<sup>1\*</sup>, А. Ю. ЖУРАВЛЕВ<sup>2\*</sup>, В. И. ЩЕКА<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Автоматика и телекоммуникации», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, эл. почта k.i.yaschuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-8606-5790

<sup>2\*</sup>Каф. «Автоматика и телекоммуникации», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, эл. почта anton.zhuravlev@gmail.com, ORCID 0000-0001-6885-5177

<sup>3\*</sup>Каф. «Автоматика и телекоммуникации», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, эл. почта v.i.shcheka@gmail.com, ORCID 0000-0002-2184-2827

## ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР ЧАСТОТЫ НА НЕКОЛЛИНЕАРНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

**Цель.** В статье необходимо провести исследование параметрического генератора частоты на неколлинеарных магнитных полях, который выполняет функции стабилизированного источника питания и средства защиты от воздействия мощных импульсных помех в виде коммутационных перенапряжений и разрядов молнии. **Методика.** Для проведения экспериментальных исследований был изготовлен макетный образец параметрического генератора. Проведен ряд исследований по определению оптимальных параметров цепей накачки и контура устройства, при которых достигаются лучшие энергетические характеристики и максимальная выходная мощность с обеспечением устойчивой генерации в системе. **Результаты.** Авторы доказали необходимость разработки средства защиты аппаратуры сигнализации, централизации и блокировки от воздействия мощных импульсных помех. Разработанная конструкция устройства полностью исключает трансформацию энергии, то есть проникновение помехи со входа на выход. В результате проведенных экспериментальных исследований определены оптимальные параметры цепей генератора, которые обеспечивают его лучшие энергетические характеристики. **Научная новизна.** Усовершенствовано устройство параметрического генератора, который имеет в своей конструкции энергоемкие элементы, что значительно улучшает энергетические характеристики и свойства. С целью повышения надежности систем автоблокировки дальнейшее развитие получили способы защиты аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики от воздействия мощных импульсных помех и высоких уровней тяговых токов. **Практическая значимость.** На основании полученных результатов можно внедрить в производство исследованное устройство и применять его для организации стабилизированного вторичного источника питания путевых устройств железнодорожной автоматики, а также для защиты аппаратуры от воздействия мощных импульсных помех, созданных грозовыми разрядами и молниями или коммутационными перенапряжениями. Результаты работы также могут быть использованы при переоборудовании перегонов новыми системами железнодорожной автоматики и при подготовке проектной документации на рельсовые цепи, станционные системы и системы автоблокировки. Результаты исследования используют при изучении дисциплин «Специальные измерения на железнодорожном транспорте» и «Электропитание устройств автоматики», организации научно-практических семинаров, курсов повышения квалификации и т. под.

**Ключевые слова:** параметрический генератор частоты; неколлинеарные магнитные поля; мощные импульсные помехи; защитное средство; грозовые разряды; молнии; стабилизированный источник питания

K. I. YASHCHUK<sup>1\*</sup>, A. Y. ZHURAVLEV<sup>2\*</sup>, V. I. SHCHEKA<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Automation and Telecommunications», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail k.i.yaschuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-8606-5790

<sup>2\*</sup>Dep. «Automation and Telecommunications», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail anton.zhuravlev@gmail.com, ORCID 0000-0001-6885-5177

<sup>3\*</sup>Dep. «Automation and Telecommunications», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail v.i.shcheka@gmail.com, ORCID 0000-0002-2184-2827

## PARAMETRIC FREQUENCY GENERATOR ON NONCOLLINEAR MAGNETIC FIELDS

**Purpose.** The article is aimed to study a parametric frequency generator on noncollinear magnetic fields, which performs the functions of a stabilized power source and means of protection against the effects of powerful impulse noises in the form of switching overvoltages and lightning discharges. **Methodology.** To carry out experimental studies, a prototype model of a parametric generator was fabricated. A number of studies were carried out to determine the optimal parameters of the pump circuits and the circuit of the device, in which the best energy characteristics and maximum output power are achieved with stable generation in the system. **Findings.** The authors proved the importance to develop a means of protecting signaling equipment, centralization and blocking from the effects of powerful impulse noises. The developed construction of the device completely eliminates the transformation of energy, it means the penetration of noise from the input to the output. As a result of the experimental studies, the optimal parameters of the generator circuits, which provide its best energy characteristics, were determined. **Originality.** The device of the parametric generator, which has energy-consuming elements in its design, has been improved, this significantly improves the energy characteristics and properties. In order to improve the reliability of automatic blocking systems, the methods for protecting railway automation equipment and telemechanics from the effects of high-power impulse noises and high levels of traction currents were further developed. **Practical value.** Based on the obtained results, the device under investigation can be introduced into production and used in railway automation systems to organize a stabilized secondary power source for railway automation track equipment, as well as to protect equipment from the effects of powerful impulse noises created by lightning discharges and lightning or switching overvoltages. The results of work can also be used in re-equipment of the hauls with new railway automation systems and in the preparation of design documentation for track circuits, station systems and automatic blocking systems. The results are used during the studying of the subjects: «Special Measurements at Railway Transport» and «Automatic Devices Power Supply»; the organization of scientific workshops, training courses etc.

**Keywords:** parametric frequency generator; noncollinear magnetic fields; powerful impulse noises; protective device; lightning discharges; lightning; stabilized power supply

### REFERENCES

1. Babichev, Y. Y. (2017). *Elektrotehnika, elektronika i skhemotekhnika EVM. Analiz lineynykh elektricheskikh tsepey: uchebno-metodicheskoe posobie*. Moscow: MISiS. (in Russian)
2. Bessonov, L. A. (1996). *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Elektricheskie tsepi: uchebnik*. Moscow: Vysshaya shkola. (in Russian)
3. Manakov, A. D. (2007). Kontseptsiya zashchity ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki ot perenapryazheniy. *Promyshlennyiy transport Urala*, 9, 35-37. (in Russian)
4. Fedyaynova, N. I. (Ed). (2016). *Parametricheskii rezonans: uchebno-metodicheskoe posobie*. Tomsk: Izdatelskiy Dom Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. (in Russian)
5. Razgonov, A. P., & Yashchuk, K. I. (2016). *Otsinka vplyvu asymetrii tiahovoho strumu na robotu perehinnykh reikovykh kil, Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference «Safety and Electromagnetic Compatibility on Railway Transport, S&EMC*. Dnipro: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. (in Ukrainian)
6. Hasan, A. N., & Shongwe, T. (2016). *Impulse Noise Detection in OFDM Communication System Using Machine Learning Ensemble Algorithms, International Joint Conference SOCO'16-CISIS'16-ICEUTE'16*. Cham: Springer. doi: 10.1007/978-3-319-47364-2\_9 (in English)
7. Hickstein, D. D., Dollar, F. J., Grychtol, P., Ellis, J. L., Knut, R., Hernández-García, C., ... Durfee, C. G. (2015). Non-collinear generation of angularly isolated circularly polarized high harmonics. *Nature Photonics*, 9(11), 743-750. doi: 10.1038/nphoton.2015.181 (in English)
8. Shongwe, T., Vinck, A. J. H., & Ferreira, H. C. (2015). A Study on Impulse Noise and Its Models. *SAIEE Africa Research Journal*, 106(3), 119-131. doi: 10.23919/saiee.2015.8531938 (in English)
9. Dunn, M. H. (2011). US Patent No. 8699124. St Andrews: University Court of The University of St Andrews Filed. (in English)
10. Yashchuk, K. I. (2017). Potentials railwise propagation study. *Science and Transport Progress*, 4(70), 7-15. doi: 10.15802/stp2017/109519 (in English)



АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

---

11. Zong, Z., Babaie, M., & Staszewski, R. B. (2016). A 60 GHz Frequency Generator Based on a 20 GHz Oscillator and an Implicit Multiplier. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 51(5), 1261-1273. doi: 10.1109/jssc.2016.2528997 (in English)

Надійшла до редколегії: 17.12.2018

Прийнята до друку: 02.04.2019

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

UDC 504.5:[502.3:625.7:614.8]

M. M. BILIAIEV<sup>1\*</sup>, T. I. RUSAKOVA<sup>2\*</sup>, V. I. SHYNKARENKO<sup>3</sup>

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

<sup>2\*</sup>Dep. «Aerohydrodynamics and Energy Mass-transfer», Oles Honchar Dnipro National University, Kazakov St., 18, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 776 82 05, e-mail rusakovati1977@gmail.com, OCID 0000-0001-5526-3578

<sup>3</sup>Dep. «Computer and Information Technologies», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail shinkarenko\_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225

### MINIMIZATION OF THE CHEMICAL POLLUTION LEVEL AT THE WORKING ZONES IN OPEN AREAS USING SCREENS

**Purpose.** The scientific work aims to develop a new method for assessing the level of chemical air pollution in working zones located in open areas near highways using screens of different heights. **Methodology.** The analytical method for calculating the airflow velocity field near protective screens is based on the mathematical apparatus of the theory of complex variable functions, which allows obtaining the value of the velocity potential and the flow function, to calculate the velocity value at any point of the plane with a screen of different height. The obtained velocity field is used to calculate the level of carbon monoxide concentration in the numerical solution of the two-dimensional mass transfer equation. **Findings.** The developed program of numerical calculation allows conducting computational experiments on the effectiveness of the use of protective screens, taking into account changes in their geometry and meteorological conditions. The developed method based on the obtained concentration field makes it possible to carry out an assessment of the risk of chronic intoxication for the employees of the take-out trade, who are within the zone of the emission source (highway) for a long time. **Originality.** The regularities of changes in the concentration of carbon monoxide are established depending on the distance to the emission source at a height of 2 m from the ground in the presence of a screen of a certain height and in its absence. A risk assessment of chronic carbon monoxide intoxication has been carried out for take-out trade workers near the highway. It is shown that the presence of the screen reduces the risk of chronic CO intoxication by 10% as compared to its absence. Increasing the screen height to 1.8 m reduces the risk of chronic intoxication by 6% relatively to the situation when the screen height is 1.2 m. **Practical value.** The developed numerical-analytical method for calculating the level of chemical pollution in working zones in open areas and the program «Screen» created on its basis allow us to carry out a prompt forecast of atmospheric air pollution level with carbon monoxide taking into account the effectiveness of the screens. Quantitative results are necessary at the planning stage of trading places near highways, during the architectural-planned reorganization of adjacent developments.

**Keywords:** highway; complex potential; dispersion of impurities; functional area; risk of disease

#### Introduction

A large number of studies were conducted on the impact of roads on the state of atmospheric air. These studies have found that near main streets the level of air pollution by chemicals and harmful compounds significantly exceeds the maximum permissible values. The concentration of harmful

impurities in the air of working zones in open areas along highways depends on the characteristics of traffic on the road, the density of traffic flow and environmental parameters, as well as the location of buildings and structures, the presence of green spaces.

The size of the contaminated zone is influenced by a number of factors that can be divided into groups [3–4, 8–10]:

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

– anthropogenic factors – traffic intensity, traffic flow composition, fuel type and its quality, road condition;

– natural factors – meteorological factors of the natural environment, the direction and speed of air;

– architectural-planned factors – the characteristics of the adjacent buildings.

The highest level of pollution is observed on the roads of citywide value with a regulated traffic and with great intensity. A large contribution to the general air pollution is also made by industrial enterprises, which are located in the vicinity of working zones in open areas near the highway [7, 13]. The most unfavorable sections of the road are places with a forced stop of vehicles – at intersections, in places with low traffic capacity, near public transport stops. In these places, the concentration of pollutants reaches peak values [5]. In this regard, drivers and employees of open trade, whose jobs are located in these areas, receive more pronounced loads on their body. Studies have also shown that the organization of continuous movement of vehicles with the highest possible speed leads to a decrease in pollutant emissions [2]. It has been established that on the places of forced stopping of vehicles the concentration of carbon monoxide is 2.5–4 times higher than in the areas of continuous traffic.

One of the most effective ways to protect working places that are located in open areas or in buildings near highways is the use of protective engineering structures (screens) [12, 14]. The advantages of using screens in comparison with green areas include constant efficiency, which comes from the moment they were installed, regardless of the season and the density of the leaves.

An extremely important task is to minimize the level of chemical pollution at working zones in open areas.



Fig. 1. Placing the screen along the motorway

Creative Commons Attribution 4.0 International

doi: 10.15802/stp2019/164923

One of the effective means is to use screens (Fig. 1). The screens allow changing the trajectory of the pollution particles and reducing locally chemical pollution in the working area.

The efficiency of the screens is influenced by: meteorological conditions (wind speed and direction), the intensity of emission of pollutants on the highway, the presence of local obstacles and so on.

An extremely important task is to fulfill the forecast of the effectiveness of the screens at the design stage, as well as future plans for the implementation of protective measures. Screen effect is used for specific local conditions. Abroad the Navier-Stokes equation is used to solve this problem, but the implementation of such developments requires a considerable amount of time to obtain results. The calculation time can be several days, so it is very important to have effective scientifically-based methods that allow you to quickly assess the use of screens.

### Purpose

The main purpose of this study is to develop a new method for assessing the level of chemical air pollution in working zones located in open areas near highways using screens of different heights.

### Methodology

To solve the problem, it is necessary to conduct research in two stages:

– determine the irregular air velocity field in working areas with screens;

– determine the concentration field of the chemical substance, which is formed under the influence of the air flow rate and atmospheric diffusion.

This method allows predicting the level of chemical pollution in working zones in open areas using screens of different heights. A feature of this method is that the irregular velocity field of the air flow in the presence of a screen is determined on the basis of an exact analytical solution of the aerodynamic problem. The mathematical apparatus of the functions of a complex variable is used for solving this problem. This method is used to calculate currents, which are described by the Laplace equation for a potential flow (1):

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

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

The formulation of the boundary problem for airflow around the screen is considered in [6, p. 267-271].

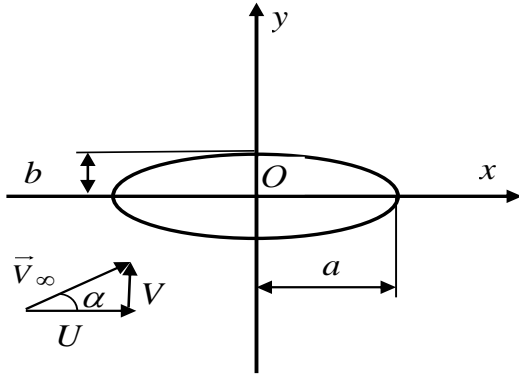


Fig. 2. Airflow around the ellipse

When using the theory of functions of a complex variable, we use the following approach to solve the problem. We consider an ellipse (Fig. 2), which is covered by the flow with speed  $\vec{V}_\infty$ . As it is known, the ellipse equation has the form:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad a > b, \quad (2)$$

where  $a, b$  – larger and smaller axis of the ellipse (Fig. 2). If the velocity at infinity  $\vec{V}_\infty$  makes a certain angle  $\alpha$  with the longitudinal axis of the ellipse [6], then the vector  $\vec{V}_\infty$  can be decomposed into components  $\vec{V}_\infty = U + iV$ .

We will consider oblique flow as a result of the addition of longitudinal and transverse flow with velocities  $U$  and  $V$  at infinitely distant points. Then the complex potential of such a resultant flow can be represented as the sum of the corresponding complex potentials (3) and (4):

$$W(z) = \frac{U}{a-b} (az - b\sqrt{z^2 - c^2}), \quad (3)$$

$$W(z) = \frac{Vi}{a-b} (bz - a\sqrt{z^2 - c^2}). \quad (4)$$

As a result of the linearity of the Laplace equation (1), which satisfies the complex potential  $W(z) = \varphi + i\psi$ , it is possible to obtain the potential of the form:

$$W(z) = \frac{1}{a-b} \left[ (az - b\sqrt{z^2 - c^2}) \cdot U + i(bz - a\sqrt{z^2 - c^2}) \cdot V \right], \quad (5)$$

where  $W(z) = \varphi + i\psi$  – air velocity potential,  $W(z) = \varphi + i\psi$  – current function.

Assuming  $c = a$ ,  $U = 0$ ,  $b = 0$ , we get the following expression for the complex potential:

$$W(z) = \frac{1}{a} \left[ az \cdot U + i(-a)\sqrt{z^2 - a^2} \cdot V \right] = -i\sqrt{z^2 - a^2} \cdot V. \quad (6)$$

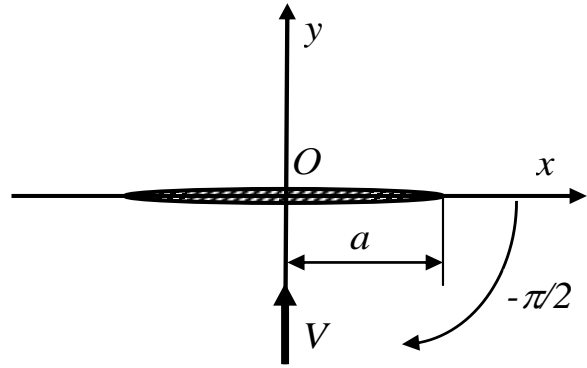


Fig. 3. Airflow around a flat plate

Potential (6) corresponds to the process of wrapping around an infinitely flat strip width  $2a$  (Fig. 3).

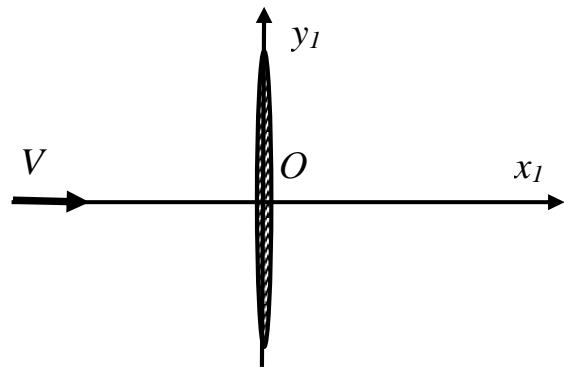


Fig. 4. Airflow in a coordinate system wrap around a flat plate  $x_1Oy_1$

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

In the complex plane  $xOy$ ,  $z = x + iy$ , by making a turn through an angle  $-\frac{\pi}{2}$  (Fig. 3), we get the system  $x_1Oy_1$ , where  $z_1 = x_1 + iy_1$  (Fig. 4),

$$\begin{aligned} z_1 &= (x + iy)e^{i(-\frac{\pi}{2})} = \\ &= (x + iy) \cdot \left( \cos \frac{\pi}{2} - i \sin \frac{\pi}{2} \right) = \\ &= (x + iy) \cdot (-i) = -xi + y. \end{aligned} \quad (7)$$

We introduce new notations  $x_1 = y$ ,  $y_1 = -x$ , then  $z_1 = ze^{-i\frac{\pi}{2}}$ ,  $z = z_1 e^{i\frac{\pi}{2}} = z_1 i$ . The complex potential with respect to the variable  $z_1$  takes the following form:

$$\begin{aligned} W(z_1) &= -iV\sqrt{(z_1 i)^2 - a^2} = \\ &= -iV\sqrt{-(z_1^2 + a^2)} = \\ &= -iV\sqrt{-1} \cdot \sqrt{z_1^2 + a^2} = V\sqrt{z_1^2 + a^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Since

$$\begin{aligned} W(z_1) &= V\sqrt{z_1^2 + a^2} = \varphi + i\psi = \\ &= V\sqrt{(z_1 - ia)(z_1 + ia)} = \\ &= V\sqrt{\rho_1 e^{i\theta_1} \cdot \rho_2 e^{i\theta_2}} = \\ &= V\sqrt{\rho_1 \rho_2} \cdot e^{\frac{i(\theta_1 + \theta_2)}{2}} = \\ &= V\sqrt{\rho_1 \rho_2} \left( \cos \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} + i \sin \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

From relation (9), we obtain the dependences for the potential of velocity  $\varphi$  and the current function  $\psi$ :

$$\varphi = V\sqrt{\rho_1 \rho_2} \cos \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}, \quad (10)$$

$$\psi = iV\sqrt{\rho_1 \rho_2} \sin \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}. \quad (11)$$

In order to get an expression for the coupled speed  $\frac{dW}{dz_1} = V_x - iV_y$ , take the derivative using expression (9):

$$\begin{aligned} \frac{dW}{dz_1} &= \frac{Vz_1}{\sqrt{z_1^2 + a^2}} = \\ &= \frac{V(x_1 + iy_1)}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \cdot e^{\frac{-i(\theta_1 - \theta_2)}{2}} = \\ &= \frac{V(x_1 + iy_1)}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \left( \cos \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} - i \sin \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) = \\ &= \frac{V}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \left[ \left( x_1 \cos \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} + y_1 \sin \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) + \right. \\ &\quad \left. + i \left( y_1 \cos \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} - x_1 \sin \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

From relation (12), we obtain the expressions for the components of the airflow velocity vector:

$$\begin{cases} V_x = \frac{V}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \left( x_1 \cos \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} + y_1 \sin \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right); \\ V_y = \frac{V}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \left( y_1 \cos \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} - x_1 \sin \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right). \end{cases} \quad (13)$$

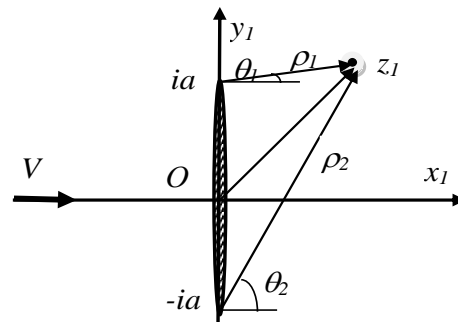


Fig. 5. Determining the parameters of the air flow rate at an arbitrary point

According to Fig. 5 we obtain the following expressions for the modules of the radius vectors and angles that determine the position of a point on the plane.

$$\theta_2 = \arctg \frac{y_1 + a}{x_1},$$

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

$$z_1 - ia = x_1 + iy_1 - ia = x_1 + i(y_1 - a), \quad (14)$$

$$\rho_1 = \sqrt{x_1^2 + (y_1 - a)^2}, \quad (15)$$

$$z_1 + ia = x_1 + iy_1 + ia = x_1 + i(y_1 + a), \quad (16)$$

$$\rho_2 = \sqrt{x_1^2 + (y_1 + a)^2}, \quad (17)$$

$$\theta_1 = \arctg \frac{y_1 - a}{x_1}, \quad (18)$$

The obtained dependences (13) – (18) are the basic formulas for calculating the air flow velocity field in the working zones with a screen. Note that in practical use of the obtained analytical dependences for calculating the components of the velocity vector near the screen with height  $H$ , it is necessary to take into account that  $a=H/2$ .

Using the obtained analytical relations (13) – (18), it is possible to calculate the components of the air flow rate  $u$ ,  $v$ , to use this information to model the dispersion of chemical pollution in working zone.

A two-dimensional mass transfer equation is used to predict the level of air pollution in working areas:

$$\frac{\partial[CO]}{\partial t} + \frac{\partial u[CO]}{\partial x} + \frac{\partial v[CO]}{\partial y} = \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad}[CO]) + \sum_{i=1}^n Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i). \quad (19)$$

where  $Q_{CO}$  – emission rate of  $CO$ ,  $u$ ,  $v$  – wind velocity vector components;  $\mu = (\mu_x, \mu_y)$  – turbulent diffusion coefficients;  $x, y$  – coordinates of the emission source;  $\delta(x - x_0) \delta(y - y_0)$  – Dirac delta function, which simulates the release of pollutant. The values of the diffusion coefficients is calculated by the formulas:  $\mu_x = (0,1 \div 1) \cdot U$ ,  $\mu_y = (0,1 \div 1) \cdot U$ , where  $U$  – wind speed [11].

At the border, where the flow enters the calculated area, the concentration of pollution is known  $C_{\Gamma_1} = C_s$ . If pollution from outside is not taken into account, then  $C_{\Gamma_1} = 0$ . At the border, where the air masses flow out of the computational area,

the diffusive transfer is neglected with respect to the convective one, namely,  $\frac{\partial C}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = 0$ . Every- where on solid surfaces, a condition of impermeability is set  $\frac{\partial C}{\partial n} = 0$ .

Initial condition for the equation (19)  $C|_{t=0} = 0$  or  $C|_{t=0} = C_0$ .

### Findings

The developed prediction method was used to solve the problem of assessing the level of pollution in working zones in open areas with an emission source, with the presence of a screen of various heights and its absence. A calculation program «Screen» was created. The scheme of the calculated area is shown in Fig. 6. The calculations were performed with the following data: air flow rate 5 m/s, average emission intensity  $CO$  – 0.058 g/s, geometrical dimensions – 8 m on axis  $Ox$  and 6 m on axis  $Oy$ .

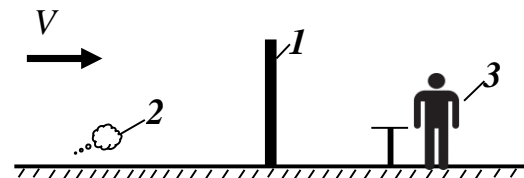


Fig. 6. The computational area:  
1 – screen, 2 – emission source of  $CO$ ,  
3 – employee in working area

Three scenarios were considered: in the absence of a screen (Fig. 7 a), with screen height  $H=1.2$  m (Fig. 7 b) and  $H=1.8$  m (Fig. 7 c). Below are the zones of pollution that are formed for each scen  $x_0, y_0$  ario.

As can be seen from Fig. 7, the screen causes deformation of the contaminated zone; the greatest concentration gradient is formed at the emission source. The presence of the screen causes a reversal of the pollution zone, which leads to its decrease and decrease in the  $CO$  concentration in the working zone.



## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

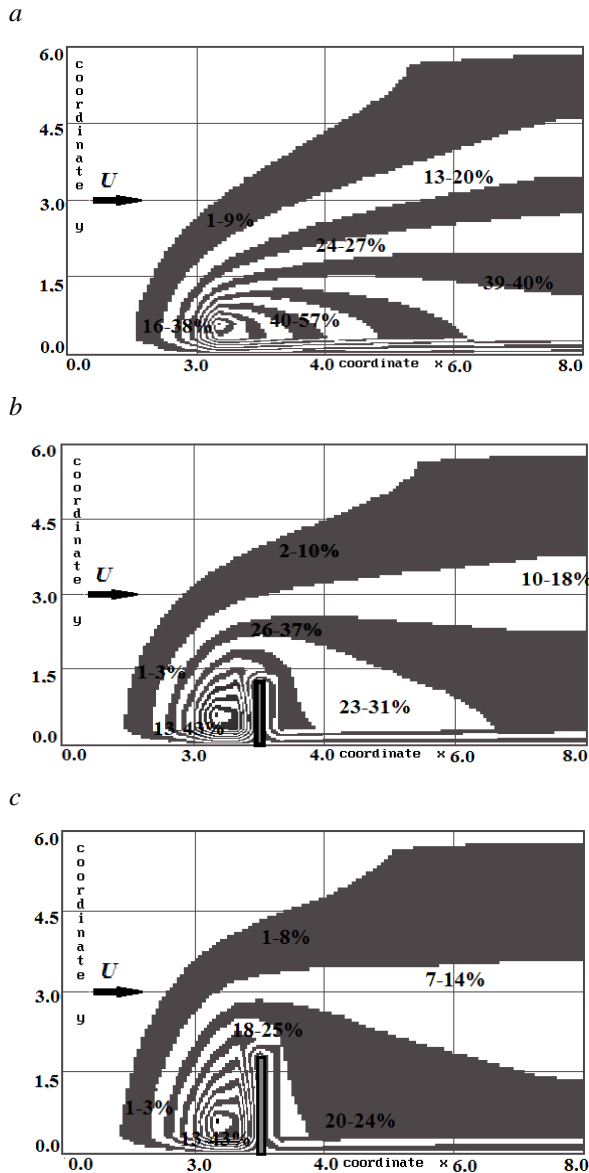


Fig. 7. Concentration field distribution  $CO$   $t=9$  s:  
 a – with no screen; b – with screen height  $H=1.2$  m;  
 c – with screen height  $H=1.8$  m

In Fig. 8 the distribution of  $CO$  concentrations at different distances from the emission source at a height  $H=2$  m from the surface of the earth is shown.

At the installation site of the screen, the concentration values increase as the flow decelerates, but behind the screen the concentration value slowly decreases and, compared to the absence of screen, the concentration decreases by 11% at a screen height of 1.2 m and by 15% at a screen height of 1.8 m, i.e. increasing the height of the screen leads to a decrease in the concentration of pollution.

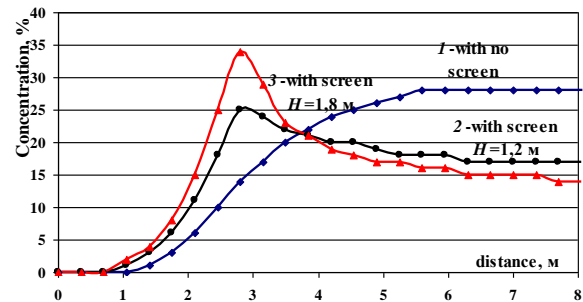


Fig. 8. Concentration distribution of  $CO$  at height 2 m:

1 – with no screen; 2 – with screen  $H=1.2$  m;  
 3 – with screen  $H=1.8$  m

Thus, the use of the screen leads to a decrease in the level of air pollution in the working areas, which reduces the risk of chronic diseases among the employees of the take-out trade near the road (Fig. 9).

In Fig. 9 the change in the risk of chronic  $CO$  intoxication over 10 years is shown at a distance of 2 m from the source of pollution and at a height from the ground  $H=1.2$  m (human respiratory organs) [1, 7].

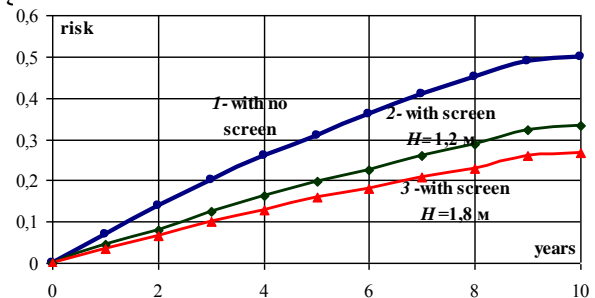


Fig. 9. Changing of the risk of chronic carbon monoxide intoxication:

1 – with no screen; 2 – with screen height  $H=1.2$  m;  
 3 – with screen height  $H=1.8$  m

After five years, the risk of chronic diseases in the absence of a screen is 31 %, in the presence of a screen 1.2 m high, this value is 21 %, with a screen in height of 1.8 m is 15 %. Thus, the presence of the screen reduces the risk of chronic  $CO$  intoxication by 10%, increasing the screen height to 1.8 m reduces the risk by 6% relatively to the situation when the screen height is  $H=1.2$  m.

### Originality and practical value

1. A numerical-analytical method for evaluating the effectiveness of screen application for reducing the level of chemical air pollution in working areas in open areas is proposed.

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

2. The authors obtained the distribution of the carbon monoxide concentration field in the working area near the highway for three scenarios: in the absence of a screen, in the presence of a screen in height  $H=1.2$  m and  $H=1.8$  m.

3. The regularities of changes in the concentration of carbon monoxide are established depending on the distance to the emission source at a height from the surface of the earth  $H=2$  m.

4. An assessment of the risk of chronic carbon monoxide intoxication has been carried out for open trade workers near the highway.

The fulfillment of the forecast regarding the level of atmospheric air pollution with carbon monoxide, taking into account the effectiveness of the screens, is a necessary step in the planned organization of trading places near highways.

### Conclusions

As a result of research, the following results were obtained:

– an analytical method was proposed for calculating the airflow velocity field near protective

screens based on the theory of functions of a complex variable;

– the method allows to obtain the value of the velocity potential and the current function, to calculate the velocity value at any point of the plane with a screen of different heights;

– the resulting velocity field is necessary to calculate the carbon monoxide concentration level;

– the developed program of numerical calculation allows a number of computational experiments on the effectiveness of the use of protective screens, taking into account changes in their geometry and meteorological conditions;

– the developed method based on the obtained concentration field allows to carry out an assessment of the risk of chronic intoxication for employees of the open trade, who were within the zone of the emission source (highway) for a long time.

The perspective of development of this direction is the creation of a methodology that allows performing risk assessment for workers of the main industrial trade within small architectural buildings.

### LIST OF REFERENCE LINKS

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. Безкровна, О. В. Організація моніторингового дослідження забруднення повітря автотранспортом у Деснянському районі м. Києва / О. В. Безкровна, В. П. Скопенко // Гігієна населених місць : зб. наук. пр. – Київ, 2011. – Вип. 57. – С. 72–76.
3. Беляев, Н. Н. Численные модели для прогноза загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта / Н. Н. Беляев, Е. С. Славинская, Р. В. Кириченко // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 6 (66). – С. 25–32. doi: 10.15802/stp2016/90457
4. Внукова, Н. В. Вибір екологічно значимих параметрів автотранспортних систем для оцінки екологічної небезпеки придорожнього простору / Н. В. Внукова, Г. М. Желновач // Екологічна безпека. – 2011. – № 2/2011 (12). – С. 119–123.
5. Вплив транспортних чинників на екологічний стан великих міст / В. Ф. Бабій, В. М. Худова, О. Є. Кондратенко, А. М. Пономаренко // Гігієна населених місць : зб. наук. пр. – Київ, 2011. – Вип. 58. – С. 57–60.
6. Кочин, Н. Е. Теоретическая гидромеханика : учебник : в 2 ч. / Н. Е. Кочин, И. А. Кибель, Н. В. Розе. – Москва : Физматлит, 1963. – Ч. 1. – 583 с.
7. Особливості формування канцерогенного ризику для населення, що проживає в зоні впливу автомагістралі / І. О. Черниченко, Я. В. Першегуба, О. М. Литвиненко, О. В. Швагер // Гігієна населених місць : зб. наук. пр. – Київ, 2010. – Вип. 56. – С. 159–167.
8. Прищепов, О. Ф. Особливості розсіювання шкідливих речовин викидів автотранспорту у повітрі в умовах міста / О. Ф. Прищепов, О. С. Левицька // Наукові праці [Чорноморського державного університету імені Петра Могили комплексу «Києво-Могилянська академія»]. Серія: Техногенна безпека. Радіобіологія. – 2009. – Т. 111, вип. 98. – С. 139–146.
9. Прищепов, О. Ф. Оцінка стану забруднення атмосферного повітря оксидом вуглецю на автомагістралях міста Миколаєва / О. Ф. Прищепов, О. С. Левицька // Наукові праці [Чорноморського державного

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

- університету імені Петра Могили комплексу «Києво-Могилянська академія»]. Серія: Техногенна безпека. Радіобіологія. – 2008. – Т. 77, вип. 64. – С. 70–74.
10. Русакова, Т. И. Оценка экологической ситуации при авариях на дорогах города / Т. И. Русакова // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 2 (56). – С. 65–76. doi: 10.15802/stp2015/42171
  11. 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.
  12. Hajrudin Dzafo, Ejub Dzaferovic (2017). Numerical Simulation of Air-Water Two Phase Flow Over Coanda-Effect Screen Structure. In book: *Advanced Technologies, Systems, and Applications, point 20*, 1-7. doi: DOI: 10.1007/978-3-319-47295-9\_20 (in English)
  13. Determination of areas of atmospheric air pollution by sulfur oxide emissions from mining and metallurgical and energy generating enterprises / M. M. Biliaiev, T. I. Rusakova, V. Y. Kolesnik, A. V. Pavlichenko // *Наук. вісник НГУ*. – 2017. – № 3. – С. 100–106.
  14. Se-Woon Hong, I.-B. Lee, Il-hwan Seo (2015). Modelling and predicting wind velocity patterns for windbreak fence design. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 142, 53-64. doi: 10.1016/j.jweia.2015.03.007 (in English)

М. М. БІЛЯЄВ<sup>1\*</sup>, Т. І. РУСАКОВА<sup>2\*</sup>, В. І. ШИНКАРЕНКО<sup>3</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. «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>3</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

## МІНІМІЗАЦІЯ РІВНЯ ХІМІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ В РОБОЧИХ ЗОНАХ НА ВІДКРИТІЙ МІСЦЕВОСТІ ЗА ДОПОМОГОЮ ЕКРАНІВ

**Мета.** Наукова робота має на меті розробку нового методу оцінки рівня хімічного забруднення повітря в робочих зонах, розташованих на відкритій місцевості біля автомагістралей, у разі використання екранів різної висоти. **Методика.** Аналітичний метод розрахунку поля швидкості повітряного потоку біля захисних екранів ґрунтується на математичному апараті – теорії функцій комплексної змінної, яка дозволяє отримати значення потенціалу швидкості й функції потоку, обчислити значення швидкості в будь-якій точці площини за наявності екрана різної висоти. Отримане поле швидкості використовують для розрахунку рівня концентрації оксиду вуглецю (CO) під час чисельного розв'язання двовимірного рівняння масопереносу. **Результати.** Запропонована програма чисельного розрахунку дозволяє проводити обчислювальні експерименти з ефективності застосування захисних екранів з урахуванням зміни їх геометрії і метеорологічних умов. Розроблений метод, на основі отриманого поля концентрації, дає можливість виконувати оцінку ризику хронічної інтоксикації для працівників виносної торгівлі, які тривалий час перебувають у зоні дії джерела емісії (автомагістралі). **Наукова новизна.** Установлено закономірності зміни концентрації оксиду вуглецю залежно від відстані до джерела емісії на висоті від поверхні землі 2 м за наявності екрана певної висоти і за його відсутності. Виконано оцінку ризику хронічної інтоксикації оксидом вуглецю для працівників виносної торгівлі біля автомагістралі. Показано, що присутність екрана знижує ризик хронічної інтоксикації CO на 10 % порівняно з його відсутністю. Збільшення висоти екрана до 1,8 м призводить до зменшення ризику хронічної інтоксикації на 6 % відносно ситуації, коли висота екрана складає 1,2 м. **Практична значимість.** Розроблений чисельно-аналітичний метод розрахунку рівня хімічного забруднення в робочих зонах на відкритій місцевості та створена на його основі програма «Screen» дозволяють оператив-но виконувати прогноз рівня забруднення атмосферного повітря оксидом вуглецю з урахуванням ефективності дії екранів. Кількісні результати є необхідними на етапі планування місць торгівлі біля автомагістралей, під час архітектурно-планової реорганізації прилеглих забудов.

**Ключові слова:** автомагістраль; комплексний потенціал; розсіювання домішки; робоча зона; ризик захворювання

Н. Н. БЕЛЯЕВ<sup>1\*</sup>, Т. И. РУСАКОВА<sup>2\*</sup>, В. И. ШИНКАРЕНКО<sup>3</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. «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>3</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

## МИНИМИЗАЦИЯ УРОВНЯ ХИМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В РАБОЧИХ ЗОНАХ НА ОТКРЫТОЙ МЕСТНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ЭКРАНОВ

**Цель.** Научная работа своей целью имеет разработку нового метода оценки уровня химического загрязнения воздуха в рабочих зонах, расположенных на открытой местности возле автомагистралей, при использовании экранов разной высоты. **Методика.** Аналитический метод расчета поля скорости воздушного потока возле защитных экранов основывается на математическом аппарате – теории функций комплексного переменного, которая позволяет получить значение потенциала скорости и функции потока, вычислить значение скорости в любой точке плоскости при наличии экрана различной высоты. Полученное поле скорости используют для расчета уровня концентрации оксида углерода (CO) при численном решении двумерного уравнения массопереноса. **Результаты.** Предложенная программа численного расчета позволяет проводить вычислительные эксперименты по эффективности применения защитных экранов с учетом изменения их геометрии и метеорологических условий. Разработанный метод, на основе полученного поля концентрации, дает возможность выполнять оценку риска хронической интоксикации для работников выносной торговли, которые длительное время находятся в зоне действия источника эмиссии (автомагистрали). **Научная новизна.** Установлены закономерности изменения концентрации оксида углерода в зависимости от расстояния до источника эмиссии на высоте от поверхности земли 2 м при наличии экрана определенной высоты и при его отсутствии. Выполнена оценка риска хронической интоксикации оксидом углерода для работников выносной торговли возле автомагистрали. Показано, что присутствие экрана снижает риск хронической интоксикации CO на 10 % по сравнению с его отсутствием. Увеличение высоты экрана до 1,8 м приводит к уменьшению риска хронической интоксикации на 6 % по отношению к ситуации, когда высота экрана составляет 1,2 м. **Практическая значимость.** Разработанный численно-аналитический метод расчета уровня химического загрязнения в рабочих зонах на открытой местности и созданная на его основе программа «Screen» позволяют оперативно выполнять прогноз уровня загрязнения атмосферного воздуха оксидом углерода с учетом эффективности действия экранов. Количественные результаты являются необходимыми на этапе планирования мест торговли возле автомагистралей, при архитектурно-плановой реорганизации прилегающих застроек.

**Ключевые слова:** автомагистраль; комплексный потенциал; рассеивание примеси; рабочая зона; риск заболевания

### REFERENCES

1. Alymov, V. T., & Tarasova, N. P. (2004). *Tekhnogennyy risk. Analiz i otsenka: uchebnoye posobie dlya vuzov*. Moscow: Akademkniga. (in Russian)
2. Beskrovnaya, E. V., & Skopenko, V. P. (2011). Monitoring study of atmosphere pollution by vehicles in desnyanskiy region Kyiv city. *Hihiena naselenykh mist*, 57, 72-76. (in Ukrainian)
3. Biliaiev, M. M., Slavinska, O. S., & Kyrychenko, R. V. (2016). Numerical prediction models for air pollution by motor vehicle emissions. *Science and Transport Progress*, 6(66), 25-32. doi: 10.15802/stp2016/90457 (in Russian)
4. Vnukova, N. V., & Zhelnovach, G. M. (2011). Selection of autotransport systems environmentally significant parameters to assess environmental hazard of roadside area. *Ecological Safety*, 2/2011(12), 119-123. (in Ukrainian)

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

5. Babii, V. F., Khudova, V. N., Kondratenko, Y. Y., & Ponomarenko, A. N. (2011). Impact of transport factors on the ecological state in large cities. *Hihii-ena naselenykh misty*, 58, 57-60. (in Ukrainian)
6. Kochin, N. Y., Kibel, I. A., & Roze, N. V. (1963). *Teoreticheskaya Gidromekhanika* (Vol. 1-2). Moscow: Fizmatlit. (in Russian)
7. Chernychenko, I. O., Pershehuba, Y. V., Lytvynenko, O. M., & Shvaher, O. V. (2010). Osoblyvosti formuvannya kantserohennoho ryzyku dlia naselennia, shcho prozhyvaie v zoni vplyvu avtomahistrali. *Hihii-ena naselenykh misty*, 56, 159-167. (in Ukrainian)
8. Pryshchepov, O. F., & Levytska, O. S. (2009). Osoblyvosti rozsuiuvannia shkidlyvykh rehovyn vykydiv avtotransportu u povitri v umovakh mista. *Naukovi pratsi [Chornomorskoho derzhavnoho universytetu imeni Petra Mohyly kompleksu «Kyievo-Mohylianska akademiia»]. Serii: Tekhnohenna bezpeka. Radiobiolohiia*, 111(98), 139-146. (in Ukrainian)
9. Pryshchepov, O. F., & Levytska, O. S. (2008). Otsinka stanu zabrudnennia atmosferного povitria oksydom vuhletsiu na avtomahistraliakh mista Mykolaieva. *Naukovi pratsi [Chornomorskoho derzhavnoho universytetu imeni Petra Mohyly kompleksu «Kyievo-Mohylianska akademiia»]. Serii: Tekhnohenna bezpeka. Radiobiolohiia*, 77(64), 70-74. (in Ukrainian)
10. Rusakova, T. I. (2015). Evaluation of ecological situation in case of accidents on township roads. *Science and Transport Progress*, 2(56), 65-76. doi: 10.15802/stp2015/421 (in Russian)
11. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Belyaev, N. N. (1997). *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
12. Biliaiev, M. M., Rusakova, T. I., Kolesnik, V. Y., & Pavlichenko, A. V. (2017). Determination of areas of atmospheric air pollution by sulfur oxide emissions from mining and metallurgical and energy generating enterprises. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 3, 100-106. (in English)
13. Bruno, L., Fransos, D., & Lo Giudice, A. (2018). Solid barriers for windblown sand mitigation: Aerodynamic behavior and conceptual design guidelines. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 173, 79-90. doi: 10.1016/j.jweia.2017.12.005 (in English)
14. Li, B., & Sherman, D. J. (2015). Aerodynamics and morphodynamics of sand fences: A review. *Aeolian Research*, 17, 33-48. doi: 10.1016/j.aeolia.2014.11.005 (in English)

Received: Nov. 06, 2018

Accepted: March 15, 2019

## УДК 628.4.043

Л. Ф. ДОЛИНА<sup>1\*</sup>, О. П. САВИНА<sup>2\*</sup>, Д. А. ДОЛИНА<sup>3\*</sup>

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

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

<sup>3\*</sup>Главное управление Государственной фискальной службы (ГФС) Украины, ул. Шолуденко, 33, Киев, Украина, 04116, тел. +38 (050) 164 22 32, эл. почта aogni06@gmail.com, ORCID 0000-0002-2962-2722

## ОЧИСТКА ВОД ОТ ПЛАСТИКА

**Цель.** Основная цель статьи – проанализировать наличие в воде Украины и мира пластика, а также на основании мирового и собственного опыта предложить методы очистки вод от пластика. **Методика.** Исследования выполнены на основании анализа научных зарубежных и отечественных литературных источников о наличии пластика в воде Украины, европейских стран, США (1999–2018 гг.). **Результаты.** Изученные источники свидетельствуют, что одной из основных экологических угроз мирового масштаба является наличие пластика в питьевой и сточных водах. Очистные сооружения мира недостаточно приспособлены для обнаружения и улавливания пластика. Авторы представляют результаты комплексного рассмотрения вопросов, связанных с определением наличия пластика в различных водах, его размерами и концентрациями, материалами для его изготовления. Были проведены исследования по определению содержания пластика в питьевой водопроводной воде городов Днепра и Запорожья. Например, в питьевой воде из-под крана содержится от 4 до 10 частиц пластика на литр воды, размер которых превышал 100 микрон, то есть среднюю толщину человеческого волоса. А в бутилированной воде известных торговых марок «Моршинская» и «Buvette» содержится от 49 до 102 частиц пластика на литр воды. **Научная новизна.** В работе обобщены имеющиеся и представлены новые методы и технологии очистки воды от пластика, такие как: процеживание на различных сооружениях (механические методы), флотационные, мембранные и обратноосмотические системы, мембранные биореакторы (физико-химические и комбинированные методы). Как второй путь снижения количества пластика в воде предложено запрещение его изготовления или создание биоразлагаемого пластика. **Практическая значимость.** Учитывая распространенность потребления бутилированной воды по всему миру, результаты этого исследования подтверждают необходимость дальнейших исследований воздействия микро- и нанопластов на здоровье человека.

**Ключевые слова:** загрязнение вод пластиком; бутилированная вода; загрязнение океана; методы очистки вод от пластика

## Введение

*В чем суть вопроса?* Пластмасса на сегодняшний день является наиболее распространенным материалом в мире [11]. Она представляет собой материал на основе природных или синтетических полимеров, которые могут приобретать заданную форму при нагревании и под давлением устойчиво сохранять ее после охлаждения [1].

Пластик состоит из структурных повторяющихся звеньев под названием мономеры. Они связаны в длинные цепочки – полимеры. Химические ингредиенты с содержанием пластика более 50 % классифицируют как опасные [16]. Ежегодно производят и выбрасывают около 300 млн т пластика [5]. Среднестатистический

человек в Северной Америке и Западной Европе за год использует 100 кг пластика, в основном в виде упаковки. Ежегодно в океаны попадает от 10 до 20 млн т пластика. Согласно оценочным данным, поверхность всех океанов на Земле содержит 245 тыс. т пластика [там же].

Около 80 % микропластика в сточных водах – это синтетические волокна, попадающие в стоки после стирки одежды. В 2013 году было произведено около 55 млн т одежды и текстильных изделий из синтетического волокна. Некоторые частицы микропластика (вероятно, и нанопластика, хотя никакие исследования не производили) попадают в реки и океаны, минуя очистные сооружения [5]. В то же время частицы, которые



## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

были уловлены, в конечном счете попадают на сушу, но уже в качестве шлама.

В Северной Америке на сельскохозяйственные поля ежегодно попадает от 44 до 300 тыс. т микропластика. В Европе эта цифра составляет от 63 до 430 тыс. т. Если потребление пластика останется на том же уровне, то к 2050 г. его на планете образуется еще 33 млрд т [5].

Согласно статистическим данным, в Украине производится в среднем 300 млн т отходов в год, около 10–15 % из них приходится на пластик [18]. Отходы (промышленные и мусор) занимают 7 % территории Украины (2017 г.). И если в развитых странах, таких как Германия и Швейцария, перерабатывают до 97 % всего произведенного пластикового мусора, то в Украине эта цифра колеблется от 4 до 10 %, в зависимости от региона.

Более того, специалисты из Миннесотского университета недавно поделились результатами исследований, в которых пришли к выводу, что микрочастицы пластика можно найти в воде практически в любой точке мира [13]. Они провели тщательный анализ 159 образцов воды из различных регионов Земли, включая США, Европу, Индонезию, Уганду, Бейрут, Индию и Эквадор. В 83 % исследованных проб нашли пластик; ни одна страна не может похвастаться тем, что ее водоемы полностью чистые.

### Цель

Качество питьевой воды является мировой проблемой, важной для всех людей независимо от регионов, в которых они проживают. Сегодня идет интенсивное загрязнение Земли пластмассой. В ходе исследований последних лет было найдено большое количество пластика во многих экосистемах земного шара, Мирового океана и даже в таких далеких местностях, как Антарктида и Арктика.

На наш взгляд, если не принимать серьезных мер, то вред от пластика может превзойти его пользу. Необходимо прекратить выпуск неразлагаемого пластика, как это сделали в Сингапуре, Бангладеш и на о. Тайвань, запретив использование пластиковых пакетов. Нужно переходить на выпуск биоразлагаемого пластика, производить сортировку отходов, их переработку, утилизацию и т. д.

Учитывая все это, целью нашей статьи является анализ наличия пластика в воде Украины и мира, его количества и размеров; влияния его на окружающую среду, здоровье людей, земных и морских животных, рыб, а также предложения по внедрению разработанных нами методов очистки питьевых и сточных вод от пластика.

### Методика

Для получения полной информации о масштабах загрязнения воды пластиком был проведен анализ научных источников и лабораторных отчетов как украинских, так и зарубежных изданий. Таким образом, теоретической базой исследований стали новейшие научные разработки (1989–2018 гг.), в которых отражено, какой пластик, в какой форме и количестве присутствует в питьевой и бутилированной воде, а также в сточных водах.

### Результаты

*Проблемы бутилированной воды.* Употребляя бутилированную воду, люди, пусть и не умышленно, сами же загрязняют воду, которую они пьют.

Украинцы за последние 10 лет начали пить в 5 раз больше бутилированной воды, это почти 42 литра в год на одного человека. Один европеец в среднем выпивает 103 литра бутилированной воды в год [14]. Насколько этот тренд безопасен для здоровья, окружающей среды, мы попытаемся разобраться в этой статье.

В 2016 г. средний американец использовал 167 одноразовых бутылок с водой, из которых было переработано 38 шт. При этом средний

россиянин использует 120 одноразовых бутылок в год, а перерабатывает из них только 5 шт. [18, 19].

Сотрудники из Университета штата Нью-Йорк провели исследование бутилированной воды на ее качество, соответствующему термину «безопасная» [18, 19]. Проверили и ужаснулись. Замеры показали, что на каждый литр того, что попадает в организм человека из пластиковых бутылок, приходится 325 частиц микропластика. Размеры частиц от 6,5 до 100 микрометров (1 микрометр =  $10^{-6}$  м, нанометр = 0,001 мкм), что приблизительно соответствует

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

толщине человеческого волоса. Эта группа ученых показала, что водопроводная вода содержит в 2 раза меньше примесей. Во время эксперимента химики проанализировали состав содержимого 259 отдельных бутылок из 27 разных партий 11 самых известных брендов в мире. Образцы для тестирования закупили в 9 странах Европы, Америки, Африки и Азии. Воду проверяли при помощи спектроскопического анализа FTIR.

Результаты показали, что из всех проверенных бутылок (259 шт.) лишь 17 не содержали следов микропластика. В процентном соотношении это выглядит еще более устрашающе – всего 7 % бутилированной воды. Остальные 93 % содержали 325 частиц пластика на каждый литр [10].

Большая часть микропластика (54 %) оказалась полипропиленом (PP), 11 % – полистиролом (PS), 16 % – нейлоном (NYLON), 10 % – полиэтиленом (PE), 6 % – смесь полиэфира и полиэтилентерефталата (PEST), 3 % – другие включения (азлон, полиакрилаты и сополимеры) [14, 15].

Проведенный авторами данной статьи анализ водопроводной воды городов Приднестровья показал, что она содержит до 4 частиц пластика (иногда и меньше), а бутилированная вода известных украинских брендов содержит свыше 10 микрочастиц пластика.

*Загрязнение Мирового океана пластиком.* Степень загрязнения Мирового океана постепенно возрастает [10–19]. Способность воды к самоочищению зачастую оказывается недостаточной, чтобы справиться со сбрасываемыми отходами, количество которых постоянно увеличивается.

Роль Мирового океана в жизни человека значительна. Он выполняет средообразующую, промысловую, сырьевую, транспортную и другие функции. Учитывая неограниченные богатства Мирового океана, ученые называют его седьмой экономикой мира сразу после США, Китая, Японии, Германии, Франции и Великобритании. Общую стоимость его ресурсов оценивают в 24 млрд долларов. Но 2/3 океанской экономики зависит от состояния самого океана.

С богатством Мирового океана человечество обращается небрежно и расточительно. Еже-

годно в него сбрасывают более 30 тыс. различных химических соединений, общая масса которых составляет 1,2 млрд т. Но загрязнение его вод пластиковым мусором приобретает катастрофический характер.

Пластмасса является наиболее распространенным элементом, который находится в океане. Это вредно для окружающей среды, поскольку пластмассу морские животные рассматривают как пищу.

Известно, что в отличие от других загрязнителей, пластик не тонет и почти не разлагается, его легко захватывают воды мощнейших течений Земли. Вследствие этого в окрестностях таких течений возникают своеобразные пластиковые свалки – «острова», самой большой из которых является Большое мусорное пятно в северной части Тихого океана. По различным оценкам, общая площадь этого пятна составляет от 700 тыс. до 1,5 млн км<sup>2</sup>, в нем сосредоточено более 100 млн т мусора.

Юный изобретатель из г. Кропивницкого (Украина) Руслан Коптев разработал и сконструировал роботизированную систему для сбора пластикового мусора из водоемов. Фактически робот был создан из подручных материалов и оснащен солнечной батареей, GPS и камерой с датчиком. Проведенные пилотные испытания установки показали ее высокую эффективность. За один день работы роботизированная система может собрать до 20 кг пластикового мусора с поверхности водоема. Сейчас разработчик и его команда пытаются найти средства для налаживания серийного выпуска своего изобретения [9].

По мнению ученых, удалить микропластик из Мирового океана не представляется возможным. Наличие в океане огромной массы микропластика – это новая, малоизвестная угроза для морских экосистем и человеческого организма. В процессе распада пластика получается своего рода суспензия. Многие морские животные и птицы поглощают пластик как часть пищи. Люди легко заражаются, потребляя загрязненные морепродукты, которые могут вызывать серьезные проблемы со здоровьем – от повреждения иммунной системы до рака. Поэтому самым эффективным решением данной проблемы является сокращение пластмассовых отходов.

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Разные страны решают ее по-своему. Например, в Сингапуре, Бангладеш, о. Тайвань запретили использование пластиковых пакетов. Евросоюз предполагает к 2030 г. запретить одноразовую пластиковую упаковку. Правительства многих стран вводят налоги, мотивируя свое население отказаться от производства и использования пластика. В Украине до настоящего времени проблему загрязнения природных вод пластиком не рассматривали ни на официальном, ни на академическом уровнях.

Несмотря на все усилия законодателей, неправительственных организаций, в океан по-прежнему попадают тысячи пластмассовых отходов [8, 10].

*Влияние пластика на здоровье современных потребителей.* С появлением одноразовой пластиковой посуды люди стали ее активными пользователями. Проведенные в последние годы исследования показали, что некоторые виды пластика являются опасными, имеют непосредственное пагубное влияние на здоровье потребителей. Прежде чем купить пластиковую посуду, необходимо тщательно изучить значение зашифрованных символов и знаков на ее маркировке.

Пластик – полимерный материал. Самые распространенные полимерные материалы, из которых производят как технический, так и пищевой пластик, – поливинилхлорид (ПВХ), полипропилен, полиэтилен, полистирол, полиэтилентерефталат, поликарбонат. Пластик, который используют для производства изделий, контактирующих с пищей, в первую очередь детского ассортимента, в обязательном порядке исследуют на соответствие санитарно-гигиеническим нормам и сертифицируют. Производитель обязан маркировать свою продукцию.

*Маркировка пластиковой посуды и расшифровка маркеров.* Значок «рюмка – вилка» – самый главный маркер, свидетельствующий о пригодности пластиковой посуды к контакту с пищевыми продуктами. Если такой значок перечеркнут или отсутствует, пластиковые изделия не предназначены для хранения, использования и употребления из них продуктов питания. Треугольник из трех стрелок – знак вторичной переработки сырья, символизирующий замкнутый цикл: создание → применение →

утилизация. Посуда или упаковка, маркированная данным знаком, пригодна для последующей переработки.

Цифры внутри треугольника говорят о типе переработанного материала: 1–19 – пластик, 20–39 – бумага и картон, 40–49 – металл, 50–59 – древесина, 60–69 – ткани и текстиль, 70–79 – стекло [7, 8].

Выделяют следующие группы пластиков (табл. 1):

1. PET или PETE (ПЭТ) – полиэтилентерефталат. Его используют для изготовления упаковок (бутылок, коробок, банок) для разлива прохладительных напитков, соков, воды. Также этот материал встречается на упаковках для порошков, сыпучих пищевых продуктов.

2. HDPE (ПНД) – полиэтилен высокой плотности низкого давления. Его применяют для изготовления изделий, контактирующих с пищевыми продуктами, игрушек. Этот материал является безопасным для пищевого использования и хранения еды.

3. PVC (ПВХ) – поливинилхлорид. Используют для труб, трубок, садовой мебели, в напольных покрытиях, для оконных профилей, жалюзи, бутылок моющих средств и клеенки. Материал является потенциально опасным для пищевого применения, так как может содержать диоксины, бисфенол А, ртуть, кадмий и другие.

4. LDPE (ПВД) – полиэтилен низкой плотности высокого давления. Из него производят полиэтиленовые пакеты, гнущиеся пластиковые упаковки, изделия для упаковки и укупорки лекарственных средств.

5. PP (ПП) – полипропилен. Его применяют в автомобильной промышленности (оборудование, бамперы), при изготовлении игрушек, в пищевой промышленности, в основном при производстве упаковок. Полипропилен выдерживает высокие температуры, поэтому посуду можно использовать для горячей еды и напитков. Контакт с алкоголем возможен, но нежелателен. Пластиковые одноразовые стаканчики, которые делают из полипропилена, к горячим жидкостям «равнодушны», поэтому вредных веществ при нагревании не выделяют. Но они обладают другим свойством: при контакте с алкоголем или газированными напитками (с любыми сложными химическими соединениями) могут выделять формальдегид или фенол. Из этого следует, что

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

воду пить из такого стакана можно, а вот водку – не стоит. Формальдегид имеет ярко выраженные мутагенные свойства, обладает аллергенным и раздражающим действием. Контакт человеческого организма со средой, содержащей это вещество, может привести к появлению рака дыхательных путей и многих других тяжелейших заболеваний вплоть до лейкоза. К признакам, характерным для отравления формальдегидом через его вдыхание, относят конъюнктивит и прогрессирующий отек легких. Попадание данного вещества в организм через желудочно-кишечный тракт может стать причиной его химического ожога, эрозии, язвы.

6. PS (ПС) – полистирол. Используют при изготовлении плит теплоизоляции зданий, пищевых упаковок, столовых приборов и чашек, другой одноразовой посуды, коробок CD, пеноматериалов, игрушек, ручек. Посуда из полистирола пригодна исключительно для холодных пищевых продуктов и прохладительных напитков, так как при нагревании или контакте с горячим выделяет стирол – высокотоксичное вещество, относящееся к III классу опасности. Стирол служит основой для изготовления полимеризационных пластиков (полистиролов), стеклопластиков, синтетических каучуков, полиэфирных смол. Посуду нельзя применять для горячих продуктов, для разогрева еды в микроволновой печи, а также в качестве емкостей для алкогольных напитков. Например, если налить в стаканчик горячий напиток или положить горячее блюдо в такую пластиковую посуду, их уже нельзя называть безопасными. Тарелки из полистирола часто используют в летних кафе под шашлык, горячий суп и другие продукты. Практически все реакции, которым подвергаются стирол и его гомологи, несут потенциальную угрозу здоровью и жизни людей. Вдыхание его паров грозит многочисленными острыми и хроническими заболеваниями. Длительное попадание стирола в организм человека может приводить к поражению дыхательных путей, раздражению кожи и слизистых оболочек, поражению печени, почек, кровеносной и нервной систем.

7. OTHER или O – прочие. К этой группе относят любой другой пластик без буквенного кода, который не может быть включен

в предыдущие группы. Служит как многослойная упаковка или комбинированный пластик. Например, поликарбонат, который не является токсичным для окружающей среды [15].

Таблица 1

## Тайный код пластмасс

Table 1

## The secret code of plastics

Тайный код пластмасс			
№ и буквенное обозначение	Название пластмассы	Для чего используют	Что может выделять
 PET	Полиэтилентерфталат	Одноразовые бутылки для воды, газировок, пива, растительных масел	Абсолютно запрещено повторное использование - выделяют фталаты
 HDPE	Полиэтилен высокой плотности	Упаковки для молока	Может выделять канцерогенный формальдегид
 PVC	Полвинилхлорид	Пленка для заворачивания продуктов	При контакте с горячими или жирными продуктами выделяет канцероген винилхлорид и фталаты
 LDPE	Полиэтилен низкой плотности	Пакеты и пленка для заворачивания продуктов	Может выделять канцерогенный формальдегид
 PP	Полипропилен	Стаканы, контейнеры и баночки для продуктов, могут быть белыми, цветными или прозрачными, но слегка мутноватыми	Может выделять канцерогенный формальдегид
 PS	Полистирол	Лотки, стаканы для чая и кофе, предметы, похожие на пенопласт (пенополистирол), и баночки для молочных продуктов (невспененный полистирол), контейнеры для еды, вилки, ложки	Может выделять в пищу стирол - канцероген и химический аэрозоль, негативно влияющий на плодотворность
 OTHER	Другие и разные пластмассы, но чаще всего поликарбонат (PC)	Детские бутылки, некоторые бутылки для воды многократного использования	Поликарбонат может выделять бисфенол А. При повторном использовании или при высокой температуре его выделения больше

Посуда из меламина может содержать асбест, который запрещен даже в строительстве.

Согласно некоторым исследованиям последних лет, многократное использование пластиковой посуды или бутылок способствует развитию сердечно-сосудистых заболеваний. Это больше всего относится к поликарбонату. Диэтилгексилфталат и бисфенол А, найденные в пластиковых бутылках и канистрах, могут быть поглощены с едой и вызывать аллергические заболевания, бронхиальную астму, бесплодие, рак молочных желез, предстательной железы, заболевания сердечно-сосудистой системы, нарушение обмена веществ [2, 15].

Одноразовую упаковку нужно использовать только один раз. Нет сведений о том, как реагирует пластик на ингредиенты, для которых он не предназначен. Это относится к жирам и кислотам. Считают, что продукты с большим содержанием сахара и жиры нельзя готовить в пластиковой посуде. Они нагреваются до температуры плавления и деформирования пластмассы. Нужно готовить их в специальной посуде, выдерживающей нагревание до 140, 180 и более градусов. При повторном использова-

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

нии одноразовой пластиковой посуды повреждается ее внешний защитный слой, и начинают выделяться канцерогенные вещества – формальдегид, фенол, кадмий, свинец. Не стоит пить из одноразовых пластиковых стаканов спиртное. В любом пластике содержатся токсичные вещества, которые в обычных холодных напитках не растворяются, но не выдерживают химической атаки алкоголя. В домашних условиях целесообразно сразу снимать с продуктов упаковочную пленку, срезать верхний слой с продуктов, хранящихся в пластиковой упаковке. Недопустимо использовать одноразовую упаковку для хранения продуктов, нужно держать еду в стеклянной и керамической посуде, покупать детское питание только в стеклянной или картонной упаковке. Важно не использовать для детского питания пластиковую посуду. Не следует разогревать в микроволновой печи пищу в пластиковой посуде и держать подолгу воду в кувшинных фильтрах. Помутневший пластиковый кувшин для воды необходимо выбрасывать. Также одноразовая упаковка не предназначена для мытья, так как результат может быть непредсказуем. Вместо пластиковой посуды целесообразно использовать посуду из бумаги, которая экологически безопасна и безвредна для организма [15].

Пластиковые бутылки и прочую тару создают по заданным параметрам и для определенных ситуаций при использовании (рис. 1). К примеру, в бутылку из-под молока лучше не заливать соки, тем более спиртные напитки. Большую роль в производстве пластика играет порядочность его производителя, который может экономить на качестве и экологичности, а также на температурном режиме.

При нагревании и контакте с водой пластик выделяет различные вредные токсичные соединения, которые, попадая в организм человека, подтачивают его здоровье, накапливаются и вызывают различные заболевания.

Исследования показали, что 80 % вредных веществ пластика в организме человека попадают:

- из строительных и отделочных материалов (гидроизоляции, обоев, утеплителей, предметов быта и др.);
- из пластиковых окон, мебели, бытовой техники;
- из пластиковой посуды – больше всего.

Особенно вредно использование ставших сейчас модными пластиковых контейнеров, так как в них зачастую хранят и разогревают пищу в микроволновых печах. Именно при таком использовании – нагревании и контакте с водой и пищей – идет образование и выделение токсичных веществ и ядов, которые попадают в организм.

Технический и пищевой пластик производят из поливинилхлорида (ПВХ), полипропилена, полиэтилена, полистирола и поликарбоната. Все пластмассовые изделия со временем стареют (изменяются), выделяя продукты разрушения. Например, ПВХ со временем начинает выделять вредное канцерогенное вещество – винилхлорид.

Вредное вещество из ПВХ начинает выделяться через неделю после того, как в пластиковую посуду залили содержимое. Через месяц в минеральной воде скапливается несколько миллиграммов винилхлорида (онкологи считают, что это очень много).

Австралийские ученые провели эксперимент и обнаружили бисфенол А у 95 % обследуемых добровольцев. Причем среди подопытных были дети и беременные женщины. Попало данное вещество в мочу, скорее всего, именно из бутилированной воды. При нагревании даже немного выше комнатной температуры начинается активное перемещение токсических молекул из пластиковой бутылки в жидкость, которой она наполнена. Понятно, что в жару более 30° такая вода становится отравленной, в том числе и бисфенолом А. Этот компонент отрицательно влияет на щитовидную железу, ЦНС, провоцирует неспособность иметь детей, гипертонию, ожирение и диабет [8, 10].

В нашей стране есть еще одна существенная опасность – повторное использование баклажек. Из PVC-бутылок выделяется токсичный хлорвинил. Эксперты считают, что бутылочный пластик сохраняет нейтральность только в отсутствие кислорода, пока вода сохраняет свой первоначальный химический состав. Как только бутылку открывают, вода и пластик быстро меняют свои свойства.

Пользоваться посудой из меламина (формальдегида) крайне опасно. Для прочности посуды в нее добавляют асбест, который запрещен даже в строительстве, не то что в изготовлении

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

посуды. Формальдегид и асбест очень вредны и могут вызвать рак. Рисунок на такой тарелке тоже вреден. На меламин нельзя нанести безвредный краситель – держаться не будет. Поэтому используют краски, содержащие тяжелые металлы, например, свинец. Всего несколько раз разогрев в такой посуде супчик, можно заработать раковую опухоль [8, 10].

Производители продуктов быстрого приготовления также часто пользуются полистирольной упаковкой (стаканчик, пакетик, миска). Лотки с замороженными готовыми блюдами, в которых их можно разогревать, могут потерять необходимую термостойкость после того, как подверглись глубокому охлаждению.

В пластмассовых емкостях нельзя хранить кислые продукты, капусту, солить огурцы и другие овощи. Мыть их горячей водой – тоже.



Рис. 1. Маркировка биоразлагаемых пластиков

Fig. 1. Marking of biodegradable plastics

Политика в области управления пластиковыми отходами устарела и угрожает здоровью людей и живой природе, как сообщают эксперты Челси М. Рокман, Марк Энтони Брауни и др. [16].

Большая часть пластика опасна сама по себе в химическом контексте – она может быть токсичной в определенных условиях либо сама адсорбировать вредные вещества. Но в США, Европе, Австрии, Японии, а также в Украине пластиковые отходы все еще классифицируют как ТБО, и поэтому с ними обращаются, как с пищевыми отходами или, например, как со скошенной травой.

Мы верим: если страны классифицируют пластиковые отходы как опасные, агентства по охране окружающей среды сумеют восстановить ареалы обитания и предотвратить накопленные опасных отходов [3, 17, 19]. В конечном итоге, подобный шаг может подхлестнуть исследования в области новых полимеров и заменить пластик более безопасными материалами.

С загрязнениями окружающей среды, в частности воды, борются по-разному. Некоторые вводят запрет на продажу бутилированной воды на законодательном уровне, например, в г. Банденун (Австралия) или г. Конкорд (США) [18].

Швейцария отправляет на повторную переработку практически 100 % отходов [19]. Система сортировки мусора здесь доведена до абсолюта, а некоторым может показаться, что даже до абсурда. При этом такая система не знает исключения – все обязаны раскладывать мусор по разным контейнерам. Кто не согласен – платит штраф. В Швейцарии существует так называемая экологическая полиция, которая с помощью современных технологий отслеживает и штрафует нарушителей.

В Украине тоже принята система сортировки мусора, но для этого не созданы условия: нет контейнеров для разных отходов, никто не ведет мониторинг сортировки отходов; не перерабатывают отходы, а если и перерабатывают, то не более 4–10 % в зависимости от региона и т. д.

Среднестатистический взрослый человек использует девять продуктов в день, содержащих 126 различных химических веществ [5]. Мытье рук, купание, душ, стирка, мытье посуды, использование туалета – независимо от того, с какой целью мы используем воду, она несет загрязняющие вещества в слив. Если эта вода поступает в муниципальную систему очистки сточных вод, она в конечном итоге оказывается в водоеме (реке, озере и т. д.), который, как правило, является источником питьевой воды.

«Это закон жизни: практически всегда вода, стекающая в канализацию, содержит загрязняющие вещества (в том числе и пластик. –Примечание наше), которые в конце концов попадают в чью-то питьевую воду», – говорит Питер С. Картрайт [4]. Он является обладателем



## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

двух наград, в том числе от Ассоциации качества воды США, техническим консультантом Канадской ассоциации качества воды. Что можно предложить? «Индивидуальная практика. Очевидно, что все мы можем (и должны) стать персональными управляющими нашей окружающей среды», – говорит далее Питер Картрайт [4]. Это уделение большого внимания тому, что мы бросаем в канализацию, а также нашему общему использованию воды. Есть свидетельства того, что люди становятся более осведомленными относительно отходов в целом и более внимательными, например, утилизации пластика и фармацевтических продуктов. Все больше потребителей выбрасывают их в мусор, а не в туалет. И этот процесс набирает обороты, хотя и очень медленно. В производственной и сельскохозяйственной отраслях происходит постепенная смена парадигмы: тенденции к экономии воды, а также к восстановлению и повторному использованию сточных вод.

«Для питья и приготовления пищи мы на самом деле потребляем только один процент того, что входит в наш дом. Если этикетки производителей бутилированной воды подтверждают, что продукт прошел обратноосмотическую или дистилляционную очистку, этот продукт должен быть приемлемым. Но не забывайте, что использование при производстве тары для бутилированной воды БФА- и БФС-пластика создает проблемы», – продолжает Питер Картрайт [4].

### Научная новизна и практическая значимость

В работе обобщены имеющиеся и представлены новые методы и технологии очистки воды от пластика, такие как: процеживание на различных сооружениях (механические методы), флотационные, мембранные и обратноосмотические системы, мембранные биореакторы (физико-химические и комбинированные методы). Как второй путь снижения количества пластика в воде предложено запрещение его изготовления или создание био-разлагаемого пластика.

Для решения проблемы – очистки воды от пластика – есть много путей, но они сводятся в основном к двум: первый – это создание новых видов пластмасс и материалов, разлагающихся в природе и невредных для всего живого;

второй – совершенствование действующих и создание новых эффективных методов и технологий для очистки воды от пластика.

На телеканалах Украины стали часто обсуждать вопросы, связанные с запретом на выпуск пластиковых пакетов. Для Европы и США в последнее время более характерен гражданский тренд – добровольный отказ покупателей от бутилированной воды и переход на фильтрованную воду в собственных бутылках многократного использования. Фильтрованная водопроводная вода (доочищенная) с развитием технологий перестала уступать бутилированной, очищенной на производстве, в качестве, но обладает более низкой стоимостью. Денежный фактор, как обычно, решает многое [4, 18].

Для очистки воды от пластика мы предлагаем механические и физико-химические методы, а также их комбинации (рис. 2).

Физический метод дистилляции возможен для небольших расходов воды. Процеживание на канализационных станциях Украины и других стран осуществляют на решетках с прозорами не более 16 мм (согласно СНиП) со стержнями прямоугольной или другой формы. Такой прозор на решетках не позволяет улавливать пластик размером в человеческий волос, поэтому мы перешли на более мелкую величину прозора – 10 мм и менее.

Для улавливания тонких частиц пластика мы предлагаем осуществлять процеживание на вибрационных грохотах, на которых устанавливают щелевидные сита (рис. 3) с размерами отверстий 0,25–0,1 мм. Такие грохоты широко применяют в горнорудной и угольной промышленности для обезвоживания концентрата на обогатительных фабриках. Для повышения эффективности извлечения пластика можно устанавливать многоступенчатое процеживание (2 и более ступени) на грохотах. Оно позволяет улавливать частицы пластика с размерами от 0,1 мм до 30 мкм и меньше. Фильтрация, но уже как доочистка, может быть осуществлена через слой разработанного нами специального зернистого материала. Он позволяет задерживать загрязнения в воде, в том числе и пластик с размерами меньше 30–40 мкм.

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

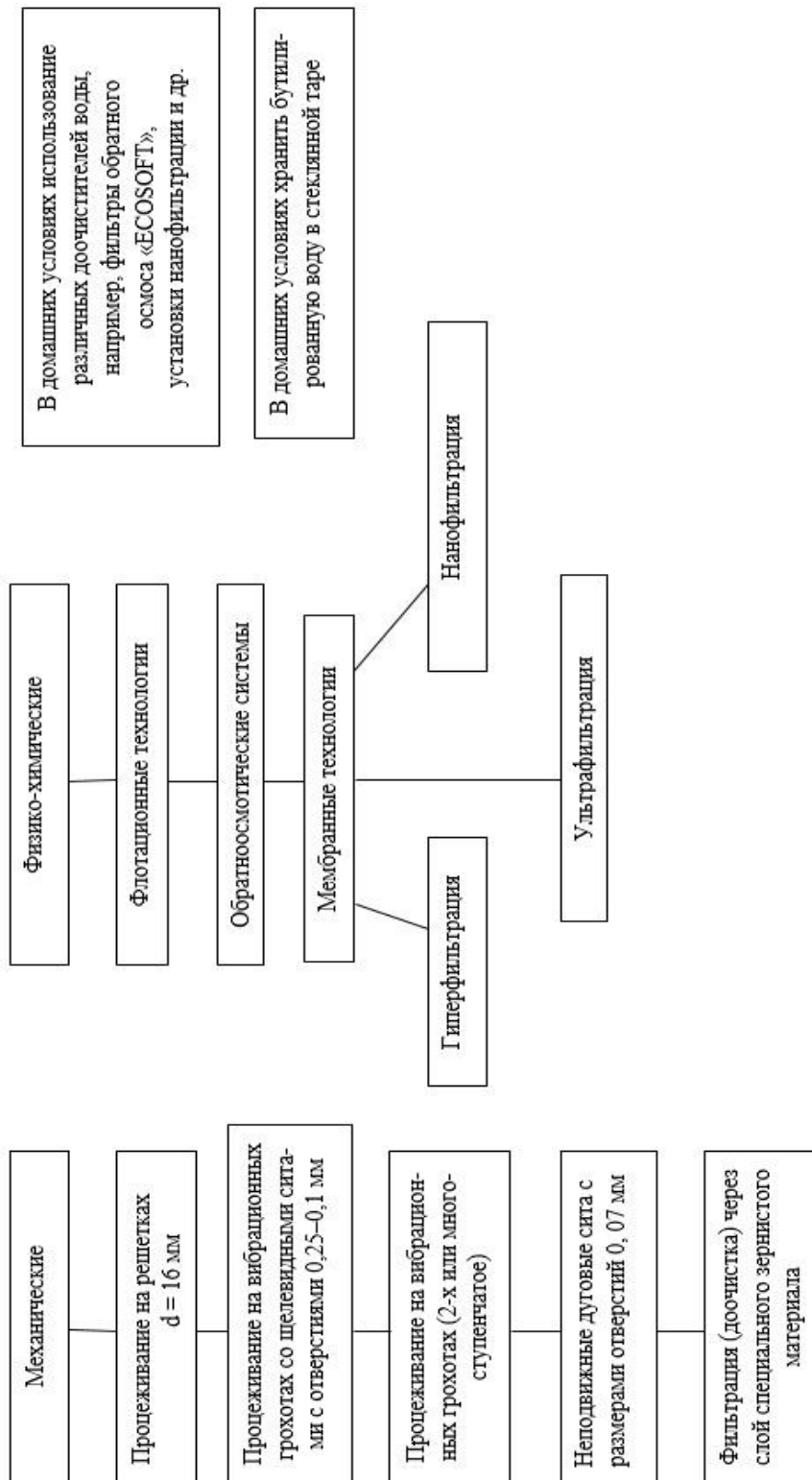


Рис. 2. Методы очистки воды от пластика, разработанные в Днепропетровском национальном университете железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна

Fig. 2. The methods of water cleaning from plastic developed at the Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Обратный осмос становится возможным при использовании полупроницаемых мембран, которые свободно пропускают воду, и в тоже время задерживают 90–99 % всех растворенных неорганических соединений, 95–99 % органических веществ и 100 % мельчайших коллоидных и пластиковых примесей, бактерий, вирусов и т. д.

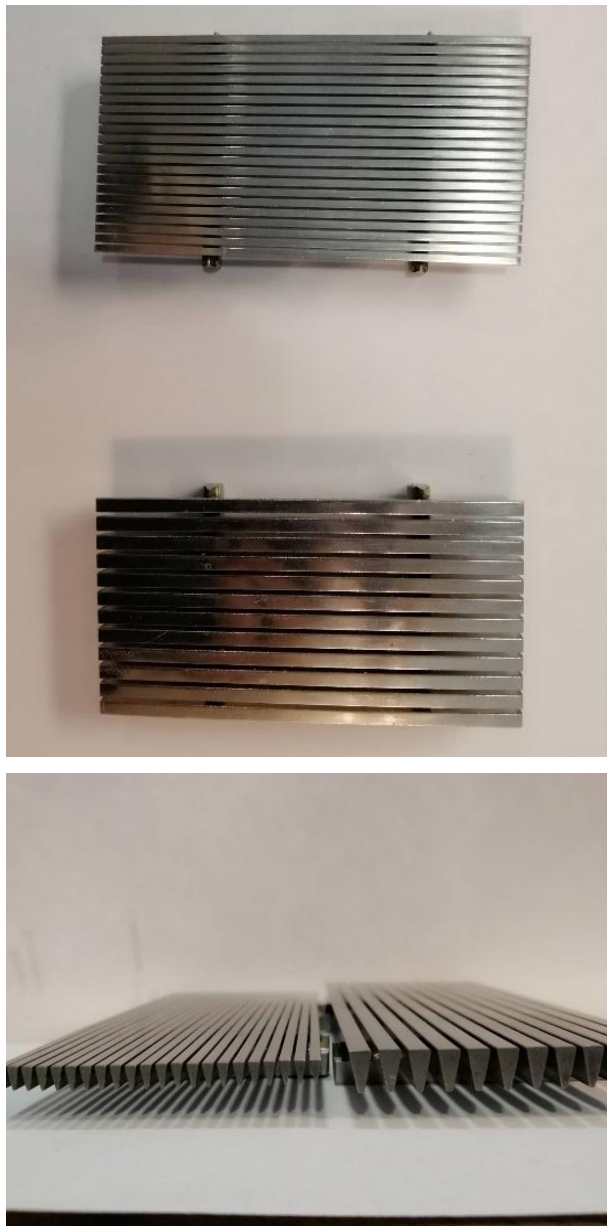


Рис. 3. Щелевидные сита

Fig. 3. Slotted screens

Нанофильтрация – это баромембранный процесс разделения веществ (рабочее давление – 1–2 МПа) с молекулярной массой до 300–500 Да. Нанофильтрационные мембраны имеют отверстия нанометрического диаметра (1–3 нм). Они задерживают электролиты (NaCl на 40–60 %) и практически полностью (98–99,9 %) органические соединения (спирты, сахар, пестициды, пластик и др.). Микрофильтрация – это барометрический процесс, который применяют для отделения из раствора взвешенных и коллоидных частиц размером 0,1–10 мкм, в том числе и пластмассовых частиц (рабочее давление 0,01–0,05 МПа).

Ультрафильтрация – это процесс баромембранного разделения, а также концентрирования и фракционирования растворов высокомолекулярных соединений (рабочее давление 0,05–0,5 МПа). Этот процесс, в отличие от обратного осмоса, применяют для разделения систем, в которых молекулярная масса растворенных компонентов намного больше, чем молекулярная масса растворяемого (воды). На практике ультрафильтрацию используют тогда, когда хотя бы один из компонентов раствора имеет молекулярную массу свыше 500 Да (пластик и др.).

Флотация основывается на разной степени смачиваемости водой различных веществ. Суть процесса состоит в том, что частицы пластика прилипают к пузырькам воздуха (газа) и который выносит их на поверхность аппарата, где они образуют пену. Оптимальные размеры частиц пены –  $10^{-5}$ – $10^{-3}$  м.

### Выводы

Как видим из анализа исследований последний лет, многие экосистемы земного шара загрязнены большим количеством пластмассовых изделий.

Для уменьшения загрязнения вод и окружающей среды в Украине нужны комплексные решения:

- прекращение выпуска неразлагаемого пластика;
- переход на биоразлагаемый пластик;
- сортировка твердых бытовых отходов и их переработка;

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

- сокращение пластмассовых отходов;
- переход на новые методы утилизации пластика;
- ввод налога на пластик, как это делают правительства многих стран, мотивируя свое население отказаться от производства и использования пластика.

Резюмирующие выводы по водному хозяйству Украины:

- необходима экономия воды;
- реконструкция предприятий по производству питьевой воды с использованием методов очистки от пластика и новых методов обеззараживания (озонирование, УФ-обеззараживание и др.);
- переход на многоразовую стеклянную тару для питьевой воды;
- увеличение объема используемой воды из альтернативных источников – шахт, морей и др.;

- реконструкция станций очистки сточных вод;
- восстановление и повторное использование сточных вод;
- использование дождевых и сточных вод для непищевых примесей;
- применение локальных систем везде, где это возможно, как для доочистки, так и для подготовки воды.

Сознательно не упоминаем два наиболее радикальных и правильных, но в тоже время утопических путей – совершенствование технологии централизованной водоподготовки и восстановление водопроводных сетей; изыскание финансирования и поиск отечественных и иностранных инвесторов для реконструкции и совершенствования предприятий водного хозяйства.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бортников, В. Г. Основы технологии и переработки пластических масс : учеб. пособие для вузов / В. Г. Бортников. – Ленинград : Химия, 1983. – 304 с.
2. Водные хроники: Научные новости // Вода и водные технологии. – 2017. – № 3 (85). – С. 40–41.
3. Долина, Л. Ф. Очистка вод от остатков лекарственных препаратов / Л. Ф. Долина, О. П. Савина // Наука та прогрес транспорту. – 2018. – № 3 (75). – С. 36–51. doi: 10.15802/stp2018/134675
4. Картрайт, П. С. Новые проблемы загрязнения питьевой воды / П. С. Картрайт // Вода и водоочистные технологии. – 2018. – № 1 (87). – С. 4–13.
5. Кузина, Л. В. Загрязнение мирового океана бытовым мусором / Л. В. Кузина, В. И. Тевризова // Сахаровские чтения 2018 года: экологические проблемы XXI века : материалы 18-й Междунар. науч. конф. (17–18 мая 2018 г., Минск, Республика Беларусь) : в 3 ч. / Междунар. гос. экол. ин-т им. А. Д. Сахарова Бел. гос. ун-та. – Минск, 2018. – Ч. 1. – С. 61–63.
6. Кунай, В. А. Пластик – угроза цивилизации / В. А. Кунай, В. В. Шумак // Научная дискуссия современной молодежи: актуальные вопросы, достижения и инновации : сб. ст. II Междунар. науч.-практ. конф. (Пенза, 17 дек. 2017 г.) : в 2 ч. – Пенза, 2017. – Ч. 1. – С. 13–16.
7. Масанов, А. Ю. Биоразлагаемые пластики: текущее состояние рынков и перспективы / А. Ю. Масанов // Вестник химической промышленности. – 2017. – № 3 (96). – С. 42–45.
8. Мийченко, И. П. Технология полуфабрикатов полимерных материалов / И. П. Мийченко. – Санкт-Петербург : НОТ, 2012. – 374 с.
9. Прокофьева, Е. С. Пластик и его влияние на здоровье современных потребителей / Е. С. Прокофьева, М. Н. Махонько, Н. В. Шкрובה // Бюллетень медицинских Интернет-конференций. – 2013. – Т. 3, вып. 11. – С. 1176–1178.
10. Светлейшая, Е. М. Вода в пластике и пластик в воде / Е. М. Светлейшая // Вода и водоочистные технологии. – 2017. – № 3 (85). – С. 4–8.
11. Accumulation of Microplastic on Shorelines Worldwide: Sources and Sinks / M. A. Browne, P. Crump, S. J. Niven, E. Teuten, A. Tonkin, T. Galloway, R. Thompson // Environmental Science & Technology. – 2011. – Vol. 45. – Iss. 21. – P. 9175–9179. doi: 10.1021/es201811s
12. Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water / D. Schymanskiab, C. Goldbecka, H.-U. Humpf, P. Fürst // Water Research. – 2018. – Vol. 129. – P. 154–162. doi: 10.1016/j.watres.2017.11.011

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

13. Ingested Microscopic Plastic Translocates to the Circulatory System of the Mussel, *Mytilus edulis* (L) / M. A. Browne, A. Dissanayake, T. S. Galloway, D. M. Lowe, R. C. Thompson // *Environmental Science & Technology*. – 2008. – Vol. 42. – Iss. 13. – P. 5026–5031. doi: 10.1021/es800249a
14. Lithner, D. Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition / D. Lithner, A. Larsson, G. Dave // *Science of the Total Environment*. – 2011. – Vol. 409. – Iss. 18. – P. 3309–3324. doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.04.038
15. Mason, S. A. Synthetic Polymer Contamination in Bottled Water [Електронний ресурс] / S. A. Mason, V. G. Welch, J. Neratko // *Frontiers in Chemistry*. – 2018. – Vol. 6. – Режим доступа: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fchem.2018.00407/full> – Загл. с экрана. – Проверено : 03.05.2019. doi: 10.3389/fchem.2018.00407
16. Policy: Classify plastic waste as hazardous / C. M. Rochman, M. A. Browne, B. S. Halpern, B. T. Hentschel, E. Hoh, H. K. Karapanagioti, L. M. Rios-Mendoza, H. Takada, S. Teh, R. C. Thompson // *Nature*. – 2013. – Vol. 494. – Iss. 7436. – P. 169–171. doi: 10.1038/494169a
17. Renner, G. Analytical methodologies for monitoring micro(nano)plastics: Which are fit for purpose? / G. Renner, T. C. Schmidt, J. Schram // *Current Opinion in Environmental Science & Health*. – 2018. – Vol. 1. – P. 55–61. doi: 10.1016/j.coesh.2017.11.001
18. Sharma, S. Microplastic pollution, a threat to marine ecosystem and human health: a short review / S. Sharma, S. Chatterjee // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2017. – Vol. 24. – Iss. 27. – P. 21530–21547. doi: 10.1007/s11356-017-9910-8
19. Water reality in Ukraine and worldwide / L. F. Dolina, P. B. Mashykhina, A. A. Karpo, A. A. Mishchenko // *Наука та прогрес транспорту*. – 2017. – № 5 (71). – С. 7–18. doi: 10.15802/stp2017/113695

Л. Ф. ДОЛІНА<sup>1\*</sup>, О. П. САВІНА<sup>2\*</sup>, Д. А. ДОЛІНА<sup>3\*</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](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCID 0000-0001-6082-7091

<sup>2\*</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 [savina.o.p@gmail.com](mailto:savina.o.p@gmail.com), ORCID 0000-0001-7872-6416

<sup>3\*</sup>Головне управління Державної фіскальної служби (ДФС) України, вул. Шолуденка, 33, Київ, Україна, 04116, тел. +38 (050) 164 22 32, ел. пошта [aogni06@gmail.com](mailto:aogni06@gmail.com), ORCID 0000-0002-2962-2722

## ОЧИЩЕННЯ ВОД ВІД ПЛАСТИКУ

**Мета.** Основна мета статті – проаналізувати наявність у воді України та світу пластику, а також на основі світового і власного досвіду запропонувати методи очищення вод від пластику. **Методика.** Дослідження виконані на підставі аналізу наукових зарубіжних і вітчизняних літературних джерел про наявність пластику у воді України, європейських країн, США (1999–2018 рр.). **Результати.** Вивчені джерела свідчать, що однією з основних екологічних загроз світового масштабу є наявність пластику в питній і стічних водах. Очисні споруди світу недостатньо пристосовані для виявлення й уловлювання пластику. Автори представляють результати комплексного розгляду питань, пов'язаних із визначенням наявності пластику в різних водах, його розмірами й концентраціями, матеріалами для його виготовлення. Були проведені дослідження з визначення вмісту пластика в питній водопровідній воді міст Дніпра і Запоріжжя. Наприклад, у питній воді з-під крана міститься від 4 до 10 часток пластику на літр води, розмір яких перевищував 100 мікрон, тобто середню товщину людської волосини. А в бутильованій воді відомих торгових марок «Моршинська» та «Buvette» міститься від 49 до 102 часток пластику на літр води. **Наукова новизна.** У роботі узагальнені наявні й представлені нові методи й технології очищення води від пластику, такі як: проціджування на різних спорудах (механічні методи), флотажні, мембранні й зворотноосмотичні системи, мембранні біореактори (фізико-хімічні й комбіновані методи). Як другий шлях зниження кількості пластику у воді запропоновано заборону його виготовлення або створення біорозкладаного пластику, здатного біологічно руйнуватися. **Практична значимість.** З огляду на поширеність споживання бутильованої води по всьому світу, результати дослідження підтверджують необхідність подальших досліджень впливу мікро- і нанопластів на здоров'я людини.

**Ключові слова:** забруднення вод пластиком; бутильована вода; забруднення океану; методи очищення вод від пластику

L. F. DOLINA<sup>1\*</sup>, O. P. SAVINA<sup>2\*</sup>, D. A. DOLINA<sup>3\*</sup><sup>1\*</sup>Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0001-6082-7091<sup>2\*</sup>Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail savina.o.p@gmail.com, ORCID 0000-0001-7872-6416<sup>3\*</sup>Main Department of the State Fiscal Service (SFS) in Ukraine, Sholudenko St., 33, Kyiv, Ukraine, 04116, tel. +38 (050) 164 22 32, e-mail aogni06@gmail.com, ORCID 0000-0002-2962-2722

## CLEANING WATER FROM PLASTIC

**Purpose.** The main purpose of the article is to analyze the presence of plastic in the water of Ukraine and the world, as well as to suggest the methods for purifying water from plastic on the basis of the world and personal experience. **Methodology.** The studies were carried out on the basis of the analysis of scholarly domestic and foreign literature sources on the presence of plastic in the water of Ukraine, European countries, and the USA (1999–2018). **Findings.** The analyzed sources indicate that one of the main environmental threats of global scale is the presence of plastic in drinking and waste waters. The wastewater treatment facilities of the world are not sufficiently adapted to detect and trap plastic. The authors present the results of a comprehensive consideration of the issues related to the determination of the presence of plastic in various waters, their size and concentrations, and manufacturing materials. Plastic, entering the body of people, especially children, animals, sea fish, etc., has a negative influence on their health. Studies have been conducted to determine the content of plastic in drinking tap water in the cities of Dnipro and Zaporozhye. For example, drinking water from the tap contains from 4 to 10 particles of plastic per liter of water, the size of which exceeded 100 microns, that is, the average thickness of a human hair. And in bottled water of well-known trademarks «Morshinska» and «Buvette» contains from 49 to 102 particles of plastic per liter of water. **Originality.** The paper summarizes the existing and presents new methods and technologies for cleaning water from plastic, such as: filtering on various facilities (mechanical methods), flotation, membranous and reverse-osmotic systems, membrane bioreactors (physical-chemical and combined methods). As a second way to reduce the amount of plastic in water, it is proposed to create biodegradable plastics or prohibit their manufacture. **Practical value.** Given the prevalence of bottled water consumption worldwide, the results of this study confirm the need for further research on the effects of micro and nanoplastics on human health.

**Keywords:** plastic water pollution; bottled water; ocean pollution; plastic water cleaning methods

## REFERENCES

1. Bortnikov, V. G. (1983). *Osnovy tekhnologii i pererabotki plasticheskikh mass: uchebnoe posobie dlya vuzov*. Leningrad: Khimiya. (in Russian)
2. Vodnye khroniki: Nauchnye novosti. *Voda i vodnye tekhnologii*, 3(85), 40-41. (in Russian)
3. Dolina, L. F., & Savina, O. P. (2018). Water cleaning from residues of medicinal preparations. *Science and Transport Progress*, 3(75), 36-51. doi: 10.15802/stp2018/134675 (in Russian)
4. Kartrayt, P. S. (2018). Novye problemy zagryazneniya pitevoy vody. *Voda i Vodoочистnye Tekhnologii*, 1(87), 4-13. (in Russian)
5. Kuzina, L., & Tevrizova, V. (2018). *Pollution of the world ocean by household waste. Sakharov readings 2018: environmental problems of the XXI century: Materialy 18-y mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (17–18 maya 2018 g., Minsk, Respublika Belarus)* (Vol. 1-3). Minsk: Mezhdunarodnyy gosudarstvennyy ekologicheskiy institut imeni A. D. Sakharova Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. (in Russian)
6. Kunay, V. A., & Shumak, V. V. (2017). *Plastik – ugroza tsivilizatsii. Nauchnaya diskussiya sovremennoy molodezhi: aktualnye voprosy, dostizheniya i innovatsii: sbornik statey II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Penza, 17 dekabrya 2017 g.)* (Vol. 1-2). Penza. (in Russian)
7. Masanov, A. Y. (2017). Biorazlagaemye plastiki: tekushchee sostoyanie rynkov i perspektivy. *Vestnik khimicheskoy promyshlennosti*, 3(96), 42-45. (in Russian)
8. Miychenko, I. P. (2012). *Tekhnologiya polufabrikatov polimernykh materialov*. St. Petersburg: NOT. (in Russian)
9. Prokofeva, Y. S., Makhonko, M. N., & Shkrobova, N. V. (2013). Plastik i ego vliyanie na zdorove sovremennykh potrebiteley. *Bulletin of medical internet conferences*, 3(11), 1176-1178. (in Russian)



## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

10. Svetleyshaya, Y. M. (2017). Voda v plastike i plastik v vode. *Voda i Vodoочистnye Tekhnologii*, 3(85), 4-8. (in Russian)
11. Browne, M. A., Crump, P., Niven, S. J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T., & Thompson, R. (2011). Accumulation of Microplastic on Shorelines Worldwide: Sources and Sinks. *Environmental Science & Technology*, 45(21), 9175–9179. doi: 10.1021/es201811s (in English)
12. Schymanski, D., Goldbeck, C., Humpf, H.-U., & Fürst, P. (2018). Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water. *Water Research*, 129, 154-162. doi: 10.1016/j.watres.2017.11.011 (in English)
13. Browne, M. A., Dissanayake, A., Galloway, T. S., Lowe, D. M., & Thompson, R. C. (2008). Ingested Microscopic Plastic Translocates to the Circulatory System of the Mussel, *Mytilus edulis* (L.). *Environmental Science & Technology*, 42(13), 5026-5031. doi: 10.1021/es800249a (in English)
14. Lithner, D., Larsson, Å., & Dave, G. (2011). Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition. *Science of the Total Environment*, 409(18), 3309-3324. doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.04.038 (in English)
15. Mason, S. A., Welch, V. G., & Neratko, J. (2018). Synthetic Polymer Contamination in Bottled Water. *Frontiers in Chemistry*, 6. Retrieved from <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fchem.2018.00407/full> doi: 10.3389/fchem.2018.00407 (in English)
16. Rochman, C. M., Browne, M. A., Halpern, B. S., Hentschel, B. T., Hoh, E., Karapanagioti, H. K., ... Thompson, R. C. (2013). Policy: Classify plastic waste as hazardous. *Nature*, 494(7436), 169-171. doi: 10.1038/494169a (in English)
17. Renner, G., Schmidt, T. C., & Schram, J. (2018). Analytical methodologies for monitoring micro(nano)plastics: Which are fit for purpose? *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 1, 55-61. doi: 10.1016/j.coesh.2017.11.001 (in English)
18. Sharma, S., & Chatterjee, S. (2017). Microplastic pollution, a threat to marine ecosystem and human health: a short review. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(27), 21530-21547. doi: 10.1007/s11356-017-9910-8 (in English)
19. Dolina, L. F., Mashykhina, P. B., Karpo, A. A., & Mishchenko, A. A. (2017). Water reality in ukraine and worldwide. *Science and Transport Progress*, 5(71), 7-18. doi: 10.15802/stp2017/113695 (in English)

Поступила в редколлегию: 14.11.2018

Принята к печати: 20.03.2019

## УДК 502.3:504.5

И. В. КАЛАШНИКОВ<sup>1\*</sup>, В. А. ГАБРИНЕЦ<sup>2</sup>, В. Н. ГОРЯЧКИН<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Харьковское отделение филиала «Проектно-изыскательный институт железнодорожного транспорта» акционерного общества «Українська залізниця», ул. Котляра, 7, Харьков, Украина, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, эл. почта uzpr38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

<sup>2</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

<sup>3</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, ORCID 0000-0002-8952-952X

КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ДЛЯ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ  
ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ

**Цель.** Работа предполагает разработку численных моделей для оценки уровня загрязнения воздушной среды в случае чрезвычайных ситуаций. **Методика.** Для описания процесса рассеивания в атмосфере химически опасных веществ, эмитированных при чрезвычайных ситуациях, использовано трехмерное уравнение массопереноса примеси в атмосферном воздухе. Для проведения экспресс-расчета используется двухмерное уравнение массопереноса. Уравнения учитывают поле скорости ветрового потока, атмосферную диффузию, интенсивность выброса химически опасного вещества в атмосферу. Для численного интегрирования уравнений массопереноса использованы неявные разностные схемы. Комплекс программ создан для решения задач прогноза уровня загрязнения атмосферы с учетом влияния зданий на формирование зон загрязнения. При этом выполнен расчет поля скорости ветрового потока на базе модели потенциального течения. Применение данной модели позволяет оперативно рассчитывать это поле при наличии препятствий. **Результаты.** Построенные математические модели составляют основу созданного комплекса программ и могут быть применены для проведения оперативных расчетов размеров, интенсивности зон загрязнения, которые формируются в атмосфере при выбросе химических веществ в случае чрезвычайных ситуаций на химически опасных объектах, транспорте. Разработанный комплекс программ может быть реализован на компьютерах малой и средней мощности, что позволяет широко использовать его для решения задач при разработке плана ликвидации аварийной ситуации (ПЛАС). Для практического применения разработанного комплекса программ необходима стандартная входная информация. **Научная новизна.** Предложен комплекс программ для оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха при выбросе в атмосферу химически опасных веществ. Этот комплекс может быть использован для оценки воздействия выбросов на риск химического поражения людей как на территории промышленного объекта, так и в селитебной зоне. Основой разработанного комплекса программ являются численные модели для расчета аэродинамики и массопереноса. **Практическая значимость.** Разработанный комплекс программ позволяет решать прикладные задачи, возникающие при разработке ПЛАСа для химически опасных объектов.

*Ключевые слова:* химическое загрязнение атмосферы; чрезвычайная ситуация; численное моделирование

## Введение

В настоящее время повышенный интерес в области промышленной безопасности привлекают задачи, связанные с оценкой воздействия выбросов химически опасных веществ на загрязнение воздушной среды и риска химического поражения людей [1–4, 7–14]. Основой такой оценки является расчет зон химического заражения, формирующихся при эмиссии химически опасных веществ. На основе такого

расчета можно оценить те области, которые попадают под влияние источника эмиссии. Расчет зон химического заражения составляет основу плана ликвидации аварийной ситуации (ПЛАС). Однако его можно выполнить, только используя метод математического моделирования.

Поэтому создание эффективных математических моделей и комплексов программ для оперативного расчета зон химического заражения является актуальной проблемой.

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Для расчета зон химического заражения наиболее часто используют модели Гаусса [4]. Реже в Украине используют методику ОНД-86. В ней не учтена реальная скорость ветра, а вместо этого параметра использован параметр, не имеющий физического смысла, называемый «опасная скорость ветра». Также в данной методике не учтена величина атмосферной диффузии, ее можно применить только для стационарной эмиссии химически опасного вещества. Методика прогноза последствий аварий на химически опасных объектах и транспорте также не учитывает атмосферную диффузию и влияние зданий на формирование зон заражения. Альтернативным подходом является метод CFD-моделирования [2, 3, 5, 11]. Однако известно, что применение такого метода требует использования очень мощных персональных компьютеров. Поэтому на практике важно иметь быстросчитающие комплексы программ, реализующие физически обоснованные математические модели.

**Цель**

Основной целью данной работы является разработка специализированного комплекса программ для расчета зон химического заражения при выбросе химически опасных веществ в атмосферу.

**Методика**

Для достижения цели использован метод численного моделирования, реализованный в виде комплекса программ.

Численное моделирование представляет собой применение специальных методов решения моделирующих уравнений. Поэтому сначала рассмотрим моделирующие уравнения.

Для расчета зон химического заражения используется уравнение Марчука Г. И. [2, 3, 5, 9]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s)C}{\partial z} + \sigma C = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \\ + \sum Q_i(t) \delta(x - x_i(t)) \delta(y - y_i(t)) \delta(z - z_i), \quad (1) \end{aligned}$$

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

Устойчивость атмосферы определяют значением коэффициентов атмосферной диффузии.

Для решения задач на этапе оперативного принятия решения используют двухмерное уравнение Марчука Г. И., осредненное по высоте переноса примеси [2, 3, 5]:

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

Следует подчеркнуть, что уравнения (1) и (2) учитывают два важных фактора: движение источника эмиссии химически опасного вещества и различную интенсивность его выброса с течением времени.

Отметим, что расчет зон химического заражения на базе уравнений (1) и (2) представляет собой кинематический подход к решению задачи. При этом поле скорости ветра известно (например, на основе метеорологического прогноза).

При необходимости учета влияния зданий на процесс формирования зон загрязнения следует выполнить расчет поля скорости ветра в условиях застройки. Для расчета поля скорости воздушного потока во время распространения химически опасного вещества при наличии застройки применяют модель потенциального течения. В этом случае моделирующее уравнение имеет вид:

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0, \quad (3)$$

где  $P$  – потенциал скорости.

Для расчета компонент вектора скорости ветра используют зависимости:

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

При проведении экспресс-расчета используют двухмерное уравнение для потенциала скорости:

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

Постановка краевых условий для моделирующих уравнений рассмотрена в [5].

При численном решении трехмерного уравнения для потенциала скорости применяют локально-одномерную разностную схему. Предварительно уравнение (1) расщепляют на уравнения вида:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2},$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial y^2},$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}.$$

Для аппроксимации каждого уравнения из данной системы будем использовать следующие разностные выражения:

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1/2} - P_{i,j,k}^n}{\Delta t} = \frac{P_{i-1,j,k}^{n+1/2} - P_{i,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x},$$

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1/2}}{\Delta t} = \frac{P_{i+1,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x},$$

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1/2} - P_{i,j,k}^n}{\Delta t} = \frac{P_{i,j-1,k}^{n+1/2} - P_{i,j,k}^{n+1/2}}{\Delta y},$$

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1/2}}{\Delta t} = \frac{P_{i,j+1,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y},$$

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1/2} - P_{i,j,k}^n}{\Delta t} = \frac{P_{i,j,k-1}^{n+1/2} - P_{i,j,k}^{n+1/2}}{\Delta z},$$

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1/2}}{\Delta t} = \frac{P_{i,j,k+1}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z}.$$

Для численного интегрирования трехмерного и двухмерного уравнений переноса примеси применяют неявную разностную схему расщепления [2, 5]. Исходное моделирующее уравнение расщепляют на три уравнения. Первое уравнение учитывает рассеивание примеси только за счет ветрового потока, второе – за счет атмосферной диффузии, третье учитывает влияние источника эмиссии на формирование зоны загрязнения.

При численном интегрировании двухмерного уравнения для потенциала скорости также используют локально-одномерную разностную схему. Уравнения расщепления имеют вид:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2},$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}.$$

Для аппроксимации каждого уравнения из данной системы будем использовать такие разностные выражения:

$$\frac{P_{i,j}^{n+1/2} - P_{i,j}^n}{\Delta t} = \frac{P_{i-1,j}^{n+1/2} - P_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta x},$$

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta t} = \frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x},$$

$$\frac{P_{i,j}^{n+1/2} - P_{i,j}^n}{\Delta t} = \frac{P_{i,j-1}^{n+1/2} - P_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta y},$$

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta t} = \frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y}.$$

Оценку уровня загрязнения воздушной среды осуществляют в следующей последовательности:

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

– вводять інформацію о регионе, для которого выполняют моделирование процесса загрязнения воздушной среды (расчетный участок на карте Google Map, размеры расчетной области, положение источника выброса);

– вводять інформацію о метеорологических условиях в регионе (скорость ветра, его направление, устойчивость атмосферы);

– вводять інформацію об источнике выброса (его координаты, режим эмиссии, является ли источник движущимся или нет);

– вводять, при необходимости, інформацію о положении зданий в расчетной области;

– выполняют расчет поля скорости ветра;

– выполняют расчет поля концентрации загрязняющего вещества для конкретного промежутка времени после начала эмиссии;

– осуществляют печать результатов математического моделирования.

Для кодирования разностных уравнений использован FORTRAN. Разработанный комплекс включает в себя следующие программы:

– программу расчета поля скорости ветрового потока на базе уравнений (3) или (4);

– программу расчета концентрации химически опасного вещества в расчетной области для конкретного промежутка времени (решение уравнений (1) или (2));

– программу расчета токсодозы для конкретной точки в расчетной области;

– программу печати результатов моделирования.

### Результаты

Комплекс программ был использован для решения следующей задачи. Рассмотрим гипотетическую аварию на химически опасном объекте, где хранится аммиак. Полагаем, что в результате аварии происходит эмиссия аммиака с интенсивностью  $2 \text{ кг/с}$ . Задача состоит в оценке интенсивности загрязнения воздушной среды после начала эмиссии.

На рис. 1 и 2 показаны изолинии концентрации аммиака для различных моментов времени. При расчете принято, что стабильность атмосферы соответствует классу D.

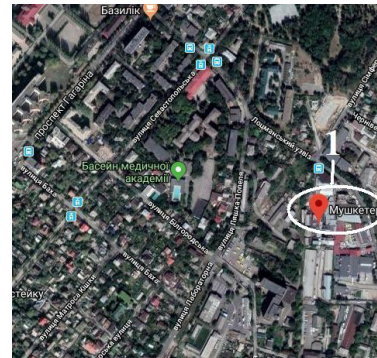


Рис. 1. Расчетная область:  
1 – положение химически опасного объекта

Fig. 1. Computational region:  
1 – position of the chemical enterprise

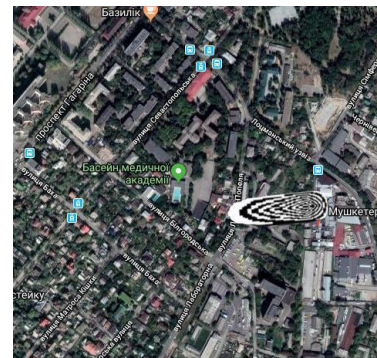


Рис. 2. Зона химического заражения через  $t = 7$  мин после начала эмиссии химически опасного вещества (сечение  $z = 7 \text{ м}$ )

Fig. 2. Zone of chemical contamination after emission of toxic chemical,  $t = 7 \text{ min}$  (section  $z = 7 \text{ m}$ )

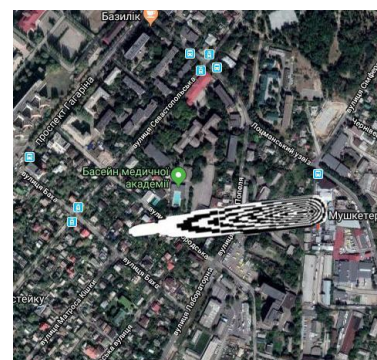


Рис. 3. Зона химического заражения через  $t = 15$  мин после начала эмиссии химически опасного вещества (сечение  $z = 7 \text{ м}$ )

Fig. 3. Zone of chemical contamination after emission of toxic chemical,  $t = 15 \text{ min}$  (section  $z = 7 \text{ m}$ )

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

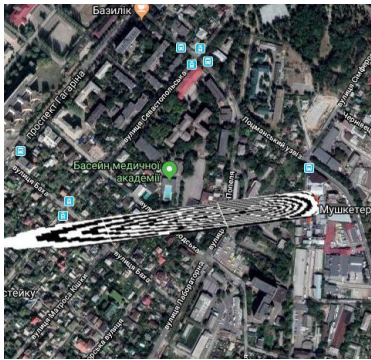


Рис. 4. Зона химического заражения через  $t = 24$  мин после начала эмиссии химически опасного вещества (сечение  $z = 7$  м)

Fig. 4. Zone of chemical contamination after emission of toxic chemical,  $t = 24$  min (section  $z = 7$  m)

Как видно из представленных рисунков, после аварии на химически опасном объекте быстро формируется значительная зона загрязнения атмосферного воздуха. Эта зона вытягивается в виде «языка» по направлению движения ветрового потока и накрывает селитебную зону.

На рис. 5 показано распределение концентрации аммиака на уровне  $Z = 2$  м для момента времени  $t = 27$  мин после начала эмиссии при аварии.

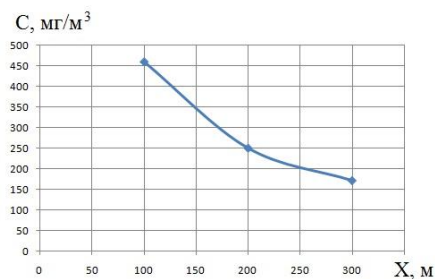


Рис. 5. Распределение концентрации химически опасного вещества на различном расстоянии от источника эмиссии

Fig. 5. Distribution of the concentration of a chemically hazardous substance at different distances from the source of emission

Из рис. 5 видно, что при аварии возле предприятия возникает зона, где существует риск токсичного поражения людей. Если принять во внимание, что предельно допустимая концентрация для аммиака составляет  $20 \text{ мг/м}^3$ , то видно, что вблизи данного промышленного объекта уровень загрязнения атмосферы будет значительно превышать эту величину. Ввиду быстрого формирования зоны загрязнения в атмосфере эвакуация людей из селитебной зоны практически невозможна.

Отметим, что время расчета составляет порядка 10 сек.

### Научная новизна и практическая значимость

В статье рассмотрен комплекс программ для оперативного расчета зон химического заражения атмосферы при аварийной эмиссии химически опасного вещества.

При применении предложенного комплекса программ можно использовать стандартную входную информацию (скорость и направление ветра, устойчивость атмосферы и т. д.). Особенностью комплекса программ является быстрота расчета.

### Выводы

В работе представлен комплекс программ, позволяющий выполнять 3D- или 2D-моделирование процесса загрязнения воздушной среды при эмиссии химически опасного вещества вследствие аварии. Основой комплекса программ является численное моделирование на базе уравнений массопереноса и аэродинамики. Дальнейшее совершенствование выбранного научного направления следует проводить в области создания 3D-модели для расчета загрязнения воздушной среды на базе уравнений, описывающих вязкое движение воздушного потока.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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



## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

3. 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.
4. Стоецкий, В. Ф. Оценка риска при авариях техногенного характера / В. Ф. Стоецкий, В. И. Голинько, Л. В. Дранишников // Наук. вісн. НГУ. – 2014. – № 3. – С. 117–124.
5. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – Киев : Наук. думка, 1997. – 368 с.
6. Bai, Y. Grey Mathematics Model for Atmospheric Pollution Based on Numerical Simulation / Y. Bai // Chemical Engineering Transactions. – 2018. – Vol. 71. – P. 679–684. doi: 10.3303/CET1871114
7. 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.
8. 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
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. Cefic Guidance on safety Risk Assessment for Chemical Transport Operations [Електронний ресурс] // Croner-i. – Режим доступа: <http://clc.am/OnkmUw> – Загл. с экрана. – Проверено : 29.03.2019.
11. Effect of barriers on the status of atmospheric pollution by mathematical modeling / Z. Naserzadeh, F. Atabi, F. Moattar, N. M. Nejad // Bioscience Biotechnology Research Communications. – 2017. – Vol. 10 (1). – P. 192–204.
12. Oyjinda, P. Numerical Simulation to Air Pollution Emission Control near an Industrial Zone [Електронний ресурс] / P. Oyjinda, N. Pochai // Advances in Mathematical Physics. – 2017. – Vol. 2017. – Режим доступа: <https://www.hindawi.com/journals/amp/2017/5287132/> – Загл. с экрана. – Проверено : 23.04.2019. doi: 10.1155/2017/5287132
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> – Загл. с экрана. – Проверено : 23.04.2019.
14. The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes [Електронний ресурс] / O. Zavila, P. Dobes, J. Dlabka, J. Bitta // The science for population protection. – 2015. – № 2. – Режим доступа: <http://www.population-protection.eu/prilohy/casopis/eng/22/112.pdf> – Загл. с экрана. – Проверено : 23.04.2019.

І. В. КАЛАШНИКОВ<sup>1\*</sup>, В. О. ГАБРИНЕЦЬ<sup>2</sup>, В. М. ГОРЯЧКІН<sup>3</sup>

1\*Харківське відділення філії «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту» акціонерного товариства «Укр-раїнська залізниця», вул. Котляра, 7, Харків, Україна, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, ел. пошта [uzp38@ukr.net](mailto:uzp38@ukr.net), ORCID 0000-0002-2814-380X

2Каф. «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](mailto:gabrin62@gmail.com), ORCID 0000-0002-6115-7162

3Каф. «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](mailto:vgora@ukr.net), ORCID 0000-0002-8952-952X

## КОМПЛЕКС ПРОГРАМ ДЛЯ ОЦІНКИ РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА

**Мета.** Робота передбачає розробку чисельних моделей для оцінки рівня забруднення повітряного середовища в разі надзвичайних ситуацій. **Методика.** Для опису процесу розсіювання в атмосфері хімічно небезпечних речовин, емітованих під час надзвичайних ситуацій, використано тривимірне рівняння масопереносу домішки в атмосферному повітрі. Для проведення експрес-розрахунку використано двовимірне рівняння масопереносу. Рівняння враховують поле швидкості вітрового потоку, атмосферну дифузію, інтенсивність викиду хімічно небезпечної речовини в атмосферу. Для чисельного інтегрування рівнянь масопереносу використано неявні різницеві схеми. Комплекс програм створений для розв'язання задач прогнозу рівня за-

Creative Commons Attribution 4.0 International

doi: 10.15802/stp2019/164949

© І. В. Калашников, В. А. Габрінець, В. Н. Горячкин, 2019



## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

бруднення атмосфери з урахуванням впливу будівель на формування зон забруднення. При цьому виконано розрахунок поля швидкості вітрового потоку на базі моделі потенціальної течії. Застосування цієї моделі дозволяє оперативно розраховувати це поле за наявності перешкод. **Результати.** Побудовані математичні моделі складають основу створеного комплексу програм і можуть бути застосовані для проведення оперативних розрахунків розмірів, інтенсивності зон забруднення, які формуються в атмосфері під час викиду хімічних речовин у разі надзвичайних ситуацій на хімічно небезпечних об'єктах, транспорті. Розроблений комплекс програм може бути реалізований на комп'ютерах малої і середньої потужності, що дозволяє широко використовувати його для розв'язання задач, що виникають під час розробки плану ліквідації аварійної ситуації (ПЛАС). Для практичного застосування розробленого комплексу програм необхідна стандартна вхідна інформація. **Наукова новизна.** Запропоновано комплекс програм для оцінки рівня забруднення атмосферного повітря під час викиду в атмосферу хімічно небезпечних речовин. Цей комплекс може бути використаний для оцінки впливу викидів на ризик хімічного ураження людей як на території промислового об'єкта, так і в селітебній зоні. Основою розробленого комплексу програм є чисельні моделі для розрахунку аеродинаміки й масопереносу. **Практична значимість.** Розроблений комплекс програм дозволяє вирішувати прикладні задачі, які виникають під час розробки ПЛАСу для хімічно небезпечних об'єктів.

*Ключові слова:* хімічне забруднення атмосфери; надзвичайна ситуація; чисельне моделювання

I. V. KALASHNIKOV<sup>1\*</sup>, V. O. GABRINET<sup>2</sup>, V. M. HORIACHKIN<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Kharkiv Branch Office «Design and Research Institute of Railway Transport» of the Public Joint Stock Company «Ukrainian Railway», Kotliar St., 7, Kharkiv, 61052, tel. +38 (057) 724 41 25, e-mail uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

<sup>2</sup>Dep. «Heat Engineering», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 87, e-mail gabrin62@gmail.com, ORCID 0000-0002-6115-7162

<sup>3</sup>Dep. «Heat Engineering», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 87, e-mail vgora@ukr.net, ORCID 0000-0002-8952-952X

## COMPLEX OF PROGRAMS FOR ASSESSMENT OF AIR ENVIRONMENT POLLUTION LEVEL

**Purpose.** The work involves the development of numerical models for assessing the level of air pollution in the case of emergencies. **Methodology.** To describe the process of dispersing in the atmosphere of chemically hazardous substances emitted in emergency situations, we use the three-dimensional equation of the mass transfer of pollutants in the atmospheric air. For the express calculation two-dimensional mass transfer equation is used. Equations of mass transfer take into account the field of wind speed, atmospheric diffusion, the intensity of release of chemically hazardous substances into the atmosphere. For numerical integration of the mass transfer equations, implicit difference schemes are used. The developed complex of programs was created for solving the problems of forecasting the level of atmospheric pollution taking into account the influence of buildings on the formation of pollution zones. In order to take into account the influence of buildings on the formation of pollution zones, the calculation of the velocity field of the wind stream is based on the model of potential flow. Application of this model makes it possible to quickly calculate this field in the presence of obstacles. **Findings.** The developed mathematical models form the basis of the programs complex and can be applied for carrying out operative calculations of the sizes, intensity of pollution zones, which are formed in the atmosphere during the release of chemical substances in the case of emergency situations on chemically dangerous objects and transport. The developed complex of programs can be realized on computers of small and average power, which allows it to be widely used for solving problems that arise during the development of PLES (plan for liquidation of emergency situations). For practical application of the developed complex of programs, standard input information is required. **Originality.** The complex of programs for the estimation of the level of air pollution during the release of chemically hazardous substances into the atmosphere is proposed. The program complex can be used to assess the impact of emissions on the risk of chemical damage to people both on the territory of the industrial facility and in the residential area. The basis of the developed complex of programs are numerical models for calculating aerodynamics and mass transfer. **Practical value.** The developed complex of programs makes it possible to solve the applied problems that arise during the development of PLES for chemically hazardous objects.

*Keywords:* chemical pollution of the atmosphere; emergency situation; numerical simulation

## REFERENCES

1. Alymov, V. T., & Tarasova, N. P. (2004). *Tekhnogennyy risk: Analiz i otsenka: Uchebnoe posobie dlya vuzov*. Moscow: Akademkniga. (in Russian)
2. Biliaiev, N. N., Gunko, E. Y., & Rostochilo, N. V. (2014). *Zashchita zdaniy ot proniknoveniya v nikh opasnykh veshchestv: Monografiya*. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (in Russian)
3. Biliaiev, N. N., Gunko, E. Y., Kirichenko, P. S., & Muntian, L. Y. (2017). *Otsenka tekhnogennogo riska pri emissii opasnykh veshchestv na zheleznodorozhnom transporte*. Krivoy Rog: Kozlov R. A. (in Russian)
4. Stoetsky, V. F., Golinko, V. I., & Dranishnikov, L. V. (2014). Risk assessment in man-caused accidents. *Scientific bulletin of National Mining University*, 3, 117-124. (in Russian)
5. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Biliaiev, N. N. (1997). *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
6. Bai, Y. (2017). Grey Mathematics Model for Atmospheric Pollution Based on Numerical Simulation. *Chemical Engineering Transactions*, 71, 679-684. doi: 10.3303/CET1871114 (in English)
7. Barret, A. M. (2009). *Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness*. (Doctoral dissertation). Carnegie Mellon University. Pittsburg. Pennsylvania. (in English)
8. 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)
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*. Dordrecht. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8\_15 (in English)
10. Cefic Guidance on safety Risk Assessment for Chemical Transport Operations. *Croner-i*. Retrieved from <http://clc.am/OnkmUw> (in English)
11. Naserzadeh, Z., Atabi, F., Moattar, F., & Nejad, N. M. (2017). Effect of barriers on the status of atmospheric pollution by mathematical modeling. *Bioscience Biotechnology Research Communications*, 10(1), 192-204. (in English)
12. Oyjinda, P., & Pochai, N. (2017). Numerical Simulation to Air Pollution Emission Control near an Industrial Zone. *Advances in Mathematical Physics*, 2017. Retrieved from <https://www.hindawi.com/journals/amp/2017/5287132/> doi: 10.1155/2017/5287132 (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. Retrieved 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. Retrieved from <http://www.population-protection.eu/prilohy/casopis/eng/22/112.pdf> (in English)

Поступила в редколлегию: 12.11.2018

Принята к печати: 11.03.2019

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

УДК 656.073:[334.716:674.23]

О. А. ХОДОСКИНА<sup>1\*</sup>, В. Д. АНАСОВИЧ<sup>2\*</sup>, А. И. ХИЛЬКЕВИЧ<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Экономика транспорта», Белорусский государственный университет транспорта, ул. Кирова, 34, Гомель, Республика Беларусь, 246653, тел. +37 (529) 730 35 91, эл. почта for\_diplomnic@mail.ru, ORCID 0000-0003-2254-9638

<sup>2\*</sup>Каф. «Экономика транспорта», Белорусский государственный университет транспорта, ул. Кирова, 34, Гомель, Республика Беларусь, 246653, тел. +37 (529) 931 88 07, эл. почта 3\_steamakk\_3@mail.ru, ORCID 0000-0002-9902-332X

<sup>3</sup>«Гомельжелдортранс», ул. Объездная, 30А, Гомель, Республика Беларусь, 246000, тел. +37 (544) 758 45 99, эл. почта hilkevich\_nastya@mail.ru, ORCID 0000-0002-4786-926X

### РОЛЬ ТРАНСПОРТНОЙ ЛОГИСТИКИ В ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

**Цель.** Транспортная логистика представляет для промышленного предприятия очень важную сферу деятельности. Поэтому целью статьи является определение роли транспортной логистики на современном этапе работы промышленного предприятия по производству мягкой мебели, а также рассмотрение основных логистических принципов и сферы их применения. **Методика.** В ходе исследования применены методы научного поиска, статистического анализа, синтеза, элементы теории моделирования систем для изучения роли транспортной логистики в работе предприятия. **Результаты.** В качестве объекта рассмотрения выбрано промышленное предприятие, основным видом деятельности которого является выпуск мягкой мебели. Разработана и проанализирована структура логистической системы предприятия, произведена оценка влияния транспортной логистики на функционирование логистической цепи. Предложен вариант использования инновационной системы сбыта, базирующейся на эффективном использовании транспортной логистики. Определены роль, место и актуальность транспортной логистики в качестве подсистемы логистической цепи этого промышленного предприятия. Существующие проблемы в транспортной логистике предприятий этой сферы в стране требуют решения в связи с постоянной необходимостью каналов снабжения сырьем и полуфабрикатами, а также распределения произведенной продукции. Наиболее важным вопросом при этом является принятие решения об определении пути движения товара (производимой мягкой мебели). Это самая острая проблема, с которой приходится сталкиваться при доставке продукции на рынок сбыта. **Научная новизна.** На методическом уровне сформулирована роль транспортной логистики в создании и функционировании макрологистической системы предприятий такого типа. Разработан целостный подход к управлению взаимоотношениями с поставщиками, который позволяет связать стратегию снабжения с ее реализацией, и усиливает участие поставщиков в работе предприятия. **Практическая значимость.** Подробное изучение и анализ возможных путей совершенствования транспортно-логистической деятельности открывает для предприятия пути повышения общей эффективности его производственно-хозяйственной деятельности, так как практически половина всех затрат на логистику приходится на транспортные издержки. И именно правильное использование транспортной логистики позволяет предприятию рационально распоряжаться имеющимися у него ресурсами.

**Ключевые слова:** сбыт; снабжение; логистические принципы; поставщики; логистическое моделирование сбыта

#### Введение

С момента становления логистики как самостоятельного вида деятельности был проведен ряд многочисленных исследований, целями ко-

торых являлось её изучение и развитие в различных направлениях.

Определено, что эффективность функционирования промышленного предприятия

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

напрямую зависит от эффективного контроля над затратами, важнейшей составляющей среди которых на сегодняшний день являются логистические затраты.

В современном мире логистика является частью национальной экономики, что соответственно определяет и факт влияния логистических затрат на эффективность управления предприятием. Между объемом логистических затрат и объемом продаж зависимость обратно пропорциональная – это подтверждает опыт высокоразвитых стран и показывает, что уменьшение на одну позицию величины логистических затрат приводит к десятикратному увеличению продаж предприятия [2, 7, 9, 11]. Из этого следует, что эффективное функционирование логистики находится в непосредственной взаимосвязи с положительными результатами деятельности предприятия [3].

Рассматривая логистику в рамках отраслей промышленности, отмечаем следующую тенденцию: логистика позволяет оптимизировать существующие производственные и дистрибуторские процессы на основе тех же ресурсов через методы управления для повышения эффективности и конкурентоспособности предприятий.

Обычно выделяют пять функциональных областей логистики: закупочную, производственную, распределительную, транспортную и информационную. Для промышленного предприятия (например, предприятие по производству мягкой мебели ОАО «Гомельская мебельная фабрика «Прогресс») их содержание можно выразить следующим образом:

**Закупочная логистика.** В процессе обеспечения предприятия сырьем и материалами решают задачи закупочной логистики. На этом этапе изучают и выбирают поставщиков, заключают договора и контролируют их исполнение, принимают меры в случае нарушения условий поставки.

**Производственная логистика.** В процессе управления материальным потоком внутри предприятия, создающего материальные блага или оказывающего материальные услуги, в основном решают задачи производственной логистики. Специфика этого этапа заключается в том, что основной объем работ по проведе-

нию потока выполняют в пределах территории одного предприятия. Участники логистического процесса при этом не вступают в товарно-денежные отношения. Поток идет не в результате заключенных договоров, а в результате решений, принимаемых системой управления предприятием.

**Распределительная логистика.** При управлении материальными потоками в процессе реализации готовой продукции решают задачи распределительной логистики. В сферу ее внимания материальный поток попадает, еще находясь в производственных цехах. Это означает, что вопросы тары и упаковки, размера изготавливаемой партии и времени, к которому эта партия должна быть изготовлена, а также много других существенных для процесса реализации вопросов, начинают решать на более ранних стадиях управления материальным потоком.

**Транспортная логистика.** При управлении материальными потоками на транспортных участках решают специфические задачи транспортной логистики. Совокупный объем транспортной работы, выполняемой в процессе доведения материального потока от первичного источника сырья до конечного потребителя, можно подразделить на две большие группы: работа, выполняемая арендуемым транспортом (железнодорожный транспорт общего пользования); работа, выполняемая собственным транспортом.

**Информационная логистика.** Результаты движения материальных потоков находятся в прямой связи с рациональностью организации движения информационных потоков. Высокая значимость информационной составляющей в логистических процессах стала причиной выделения специального раздела – информационной логистики. Объект исследования здесь – информационные системы, обеспечивающие управление материальными потоками, используемая микропроцессорная техника, информационные технологии и другие вопросы, связанные с организацией информационных потоков.

Конечно, среди других транспортной логистике принадлежит важнейшая роль – она носит объединяющий, связующий характер для всей производственной системы. Поэтому ключевым элементом логистической цепочки пред-

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

приятия является её транспортная система, которая объединяет отдельные виды его деятельности в единый механизм производства товара.

### Цель

Согласно статистике, расходы на транспортировку занимают треть от суммы затрат, связанных с функционированием логистической цепи. Это связано с тем, что транспортировка необходима на протяжении всего процесса производства продукции: поставка сырья, внутреннее распределение ресурсов, доставка товара потребителям и возврат товара. Только качественная координация всех звеньев логистической цепи принесёт максимум пользы. Поэтому целью данной работы является рассмотрение основных логистических принципов и сферы их применения на примере деятельности промышленного предприятия по производству мягкой мебели (ОАО «Гомельская мебельная фабрика «Прогресс»).

### Методика

В процессе исследования применены методы научного поиска, статистического анализа, синтеза, элементы теории моделирования систем для изучения роли транспортной логистики в работе предприятия.

### Результаты

Эффективность производственно-хозяйственной деятельности предприятия и, как следствие, объем получаемой им прибыли определяют в первую очередь показатели его сбытовой деятельности:

- применение набора инструментов транспортной логистики при осуществлении сбытовой деятельности позволяет объединить контрагентов, конкурентов и партнеров в систему взаимодополняющих друг друга элементов в транспортном процессе;

- логистические процессы в условиях рыночной экономики характеризуются высоким уровнем неопределенности. Предприятие, отправляющее грузы, пользуется услугами транспортных организаций, но в то же время эффективное управление макро- и микрологистическими процессами подразумевает, что переме-

щения грузов, предполагающие поставки продукции, заранее нужно планировать, как и выпуск продукции;

- транспортные предприятия становятся интегрированным звеном процесса управления выпуска и реализации продукции.

Таким образом, при внедрении инновационного подхода в сбытовой деятельности основное внимание нужно уделять транспортной логистике, так как управление транспортом дает возможность оптимизации распределения продукции [5].

Транспортные системы оказывают значительное влияние на производительность логистической системы. Транспортная логистика охватывает все виды деятельности по перемещению материальных ресурсов во времени и в пространстве. Функции логистики реализуются на всех стадиях производства и движения материальных ресурсов.

Микрологистические процессы, протекающие на предприятии, являются составной частью макрологистического процесса. Взятые в совокупности, они формируют стадии производства, соответственно которым протекает макрологистический процесс.

Рассмотрим типовую макрологистическую систему, характерную для деятельности промышленного предприятия, выпускающего продукцию массового производства (рис. 1).

Исходя из рис. 1, можно сделать вывод о том, что связи между отдельными микрологистическими системами возникают на базе товарно-денежных отношений и в данном случае являются гибкими, т. е. движение материального потока от производителя к потребителю, благодаря транспортной логистике, можно осуществлять как через посредников, так и напрямую.

В качестве примера была исследована логистическая система ОАО «Гомельская мебельная фабрика «Прогресс». Деятельность предприятия напрямую связана не только с производством, но и со снабженческо-сбытовой деятельностью. Отсюда вытекает наличие макро- и микрологистических систем и процессов. Для получения более полного представления о порядке организации логистической деятельности этого предприятия были изучены схемы его макро- и микрологистических систем.

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

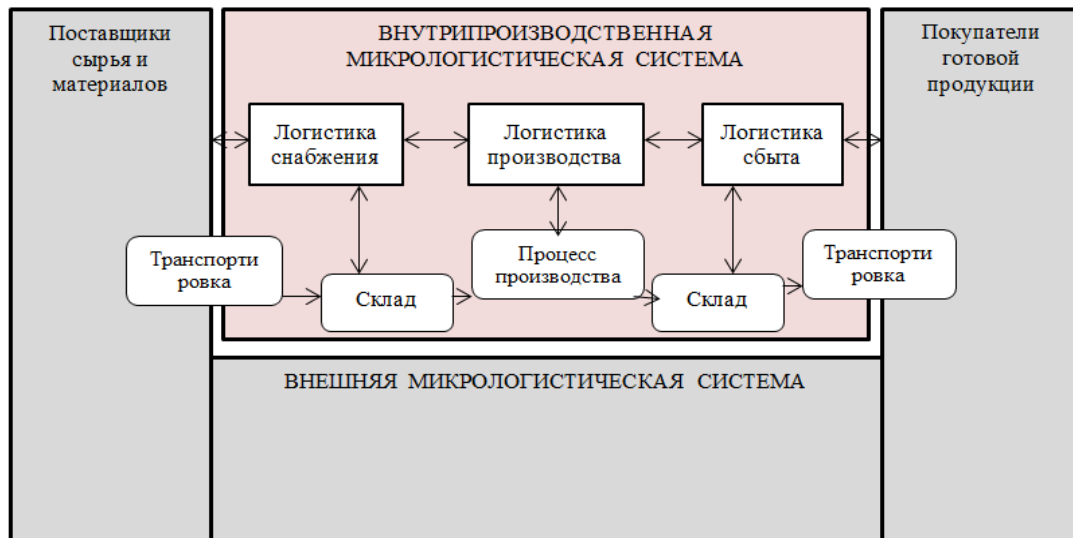


Рис. 1. Типовая макрологистическая система промышленного предприятия

Fig. 1. Typical macrologistical system of an industrial enterprise

Исследования показали, что микрологистические системы являются подсистемами, структурными составляющими макрологистических систем и представляют собой класс внутрипроизводственных логистических систем, в состав которых входят технологически связанные

производства, объединенные одной инфраструктурой [1, 4, 8, 10, 12].

Макрологистическая система ОАО «Гомельская мебельная фабрика «Прогресс» представлена на рис. 2.

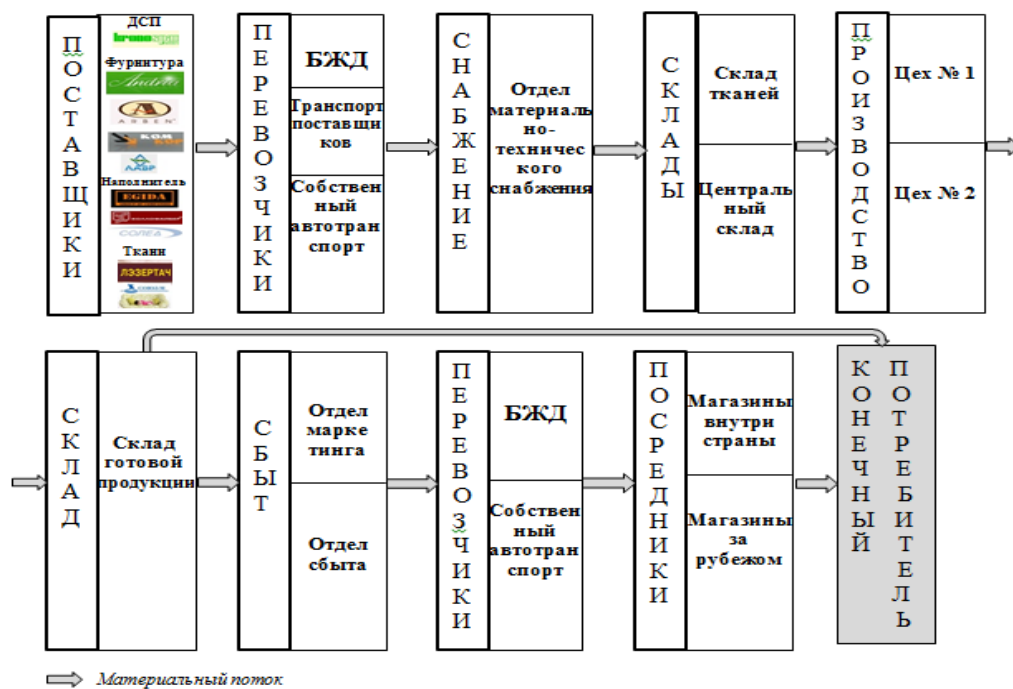


Рис. 2. Макрологистическая система ОАО «Гомельская мебельная фабрика «Прогресс»

Fig. 2. Macrologistical system of «Gomel Furniture Factory «Progress» OJSC

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

По данным рис. 2 можно проследить движение материального потока на предприятии:

- на первом этапе закупают средства производства. Они в виде материального потока поступают перевозчику, который в свою очередь доставляет их на предприятие. Отдел материально-технического снабжения распределяет исходное сырьё для производства, в зависимости от назначения, на склад тканей либо центральный склад;
- далее, в зависимости от потребности на производстве, исходное сырьё со складов попадает в цех № 1 и цех № 2;
- полученная после обработки исходного сырья продукция хранится на складе готовой продукции или же сразу поступает конечному

потребителю при оформлении индивидуально-го заказа. Отделы маркетинга и сбыта занимаются поставками готовой продукции, то есть распределяют материальный поток в магазины внутри страны и за рубежом. В зависимости от направления материального потока подбирают перевозчиков.

Исследование системы показывает, что материальный поток в виде готовой продукции попадает к конечному потребителю через посредников, а не напрямую от предприятия.

Далее детальному изучению была подвергнута непосредственно логистическая цепь предприятия. На рис. 3 изображена схема логистической цепи движения ресурсов.

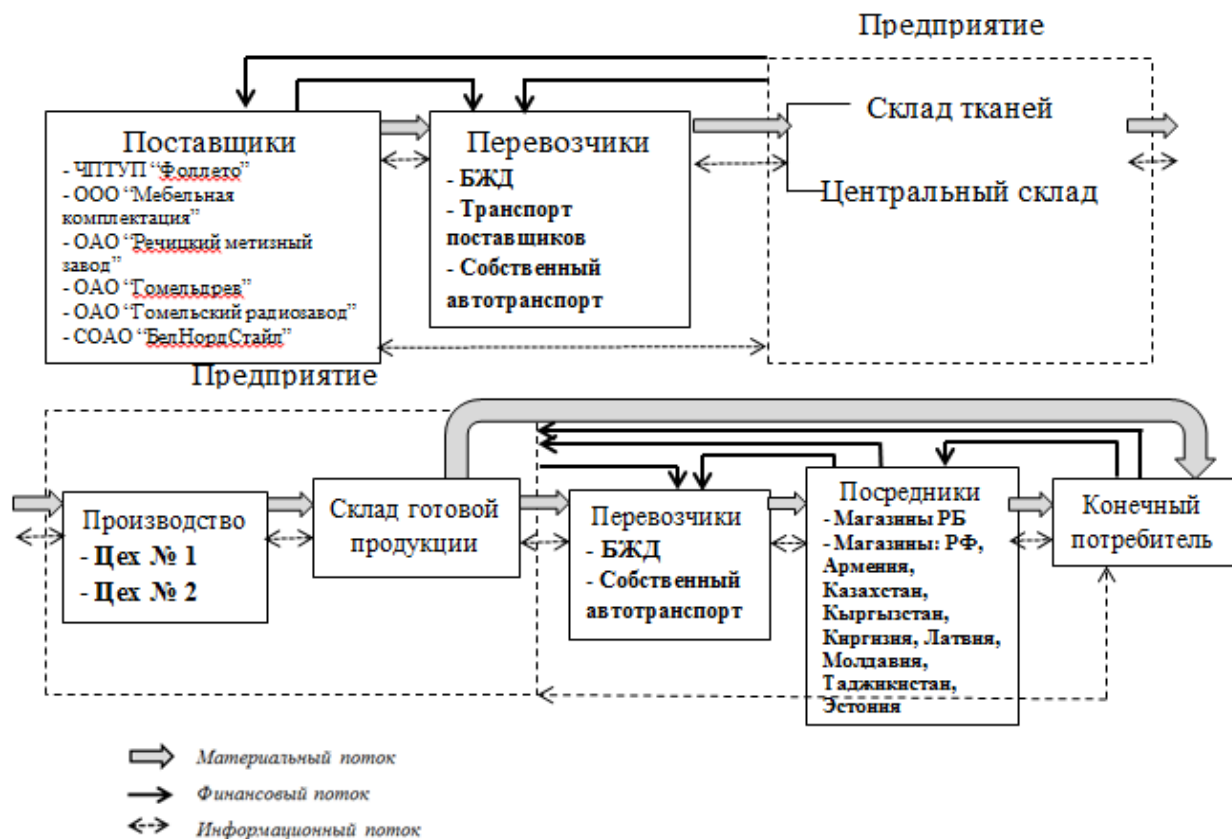


Рис. 3. Логистическая цепь ОАО «Гомельская мебельная фабрика «Прогресс»

Fig. 3. Logistic chain of «Gomel Furniture Factory «Progress» OJSC

В результате исследования установлено:

- основные поставщики исходного сырья: ЧПУП «Фоллето», ООО «Мебельная комплектация», ОАО «Речицкий метизный завод»,

ОАО «Гомельдрев», ОАО «Гомельский радиозавод», СОАО «БелНордСтайл»;

- основные перевозки осуществляют: Белорусская железная дорога, транспорт поставщи-



## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

ков, собственный автотранспорт, при этом выбор перевозчика зависит от условий поставки;

– производство состоит из цеха № 1 и цеха № 2, исходное сырье доставляют по мере необходимости в производственные цеха;

– готовую продукцию реализуют как на внутреннем рынке, так и за рубежом, в таких странах как Российская Федерация, Армения,

Казахстан, Кыргызстан, Латвия, Молдавия, Таджикистан, Эстония.

Исследования показали, что логистическая цепь состоит из двух каналов: канала материально-технического снабжения и канала сбыта. Логистический канал материально-технического снабжения ОАО «Гомельская мебельная фабрика «Прогресс» представлен на рис. 4.

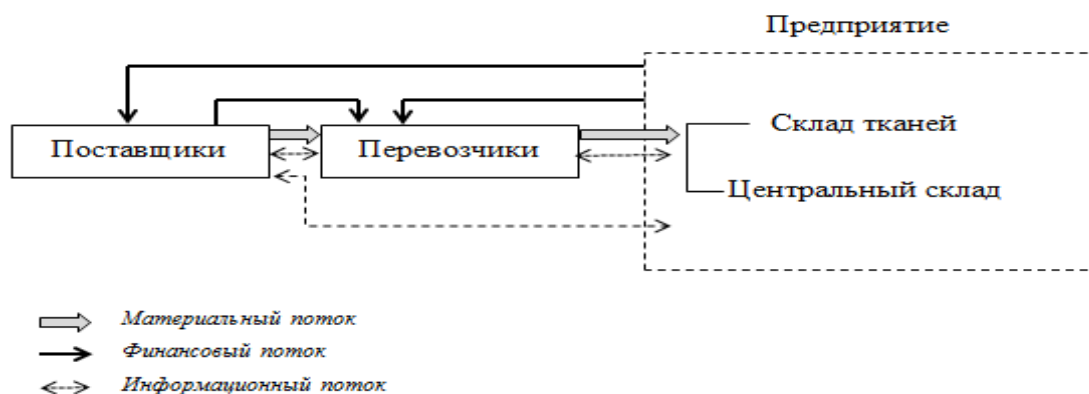


Рис. 4. Логистический канал материально-технического снабжения ОАО «Гомельская мебельная фабрика «Прогресс»

Fig. 4. Logistic channel of material and technical supply «Gomel Furniture Factory «Progress» OJSC

Как видно из рис. 4, движение различных потоков по материально-техническому снабжению осуществляется следующим образом:

– вначале предприятие ведет переговоры с поставщиками об условиях поставки, то есть происходит обмен информационным потоком;

– поставщик передает перевозчику материальный поток, а также происходит обмен информационным потоком;

– перевозчик в свою очередь доставляет материальный поток на предприятие, и также происходит обмен информационным потоком.

В зависимости от условий поставки, финансовый поток к перевозчику может исходить как от предприятия, так и от поставщика. Также от предприятия исходит финансовый поток к поставщику взамен на материальный поток.

Логистический канал сбыта ОАО «Гомельская мебельная фабрика «Прогресс» представлен на рис. 5.

Движение потоков внутри предприятия осуществляется следующим образом: от производства исходит материальный поток на склад

готовой продукции, и между ними осуществляется обмен информационными потоками. Движение потоков вне предприятия происходит по следующей схеме:

– со склада готовой продукции материальный поток поступает перевозчику, от перевозчика к посреднику, от посредника к конечному потребителю, также в этой цепочке происходит обмен информационными потоками;

– конечный потребитель может напрямую передать информационный поток на предприятие, и тогда со склада готовой продукции он получит напрямую материальный поток;

– предприятие передает информационный поток конечному потребителю в виде рекламы продукции в магазинах, каталога на сайте;

– в зависимости от условий поставки, перевозчик получает финансовый поток или от предприятия, или от посредника;

– конечный потребитель приобретает готовую продукцию у посредника либо напрямую у предприятия, и в зависимости от этого распределяется финансовый поток.

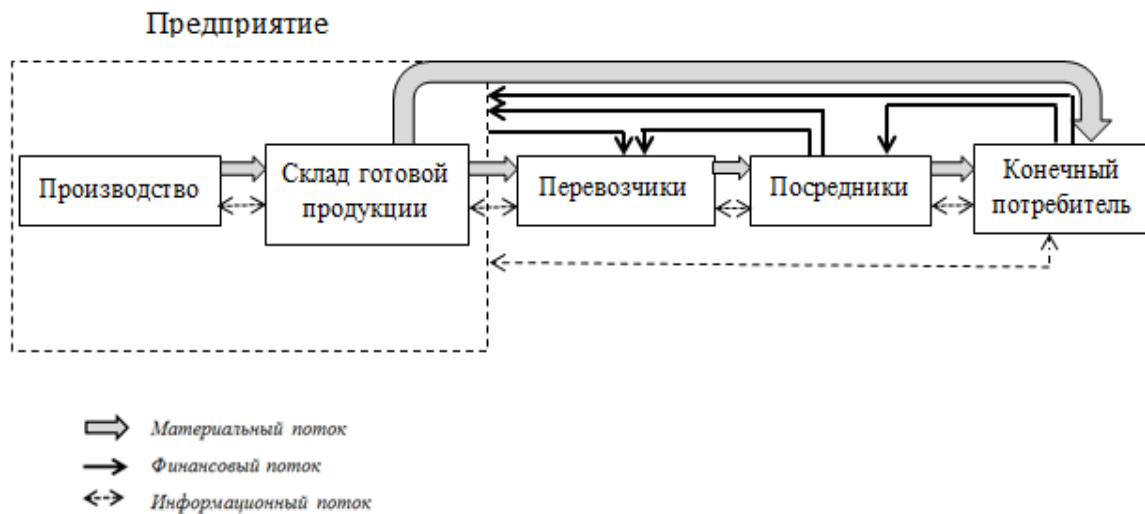


Рис. 5. Логистический канал сбыта ОАО «Гомельская мебельная фабрика «Прогресс»

Fig. 5. Logistic sale channel of «Gomel Furniture Factory «Progress» OJSC

Конечно, в рамках организации производственного процесса на предприятии транспортная логистика сталкивается с рядом проблем. В частности, с вопросами выбора каналов распределения, упаковки товаров, подготовки их к транспортировке и доставки получателю, а также с вопросами производства комплектующих и закупок материалов. Зачастую эти проблемы решают обособленно, не рассматривая их во взаимосвязи друг с другом [5].

Для построения логистической системы, обеспечивающей конкурентоспособность за счет оптимизации решений в распределении продукции, нашла применение и продолжает интенсивно развиваться маркетинговая логистическая концепция. Наиболее широкое распространение среди маркетинговых технологий получила система DDT или логистика, ориентированная на спрос, а также несколько вариантов реализации этой технологии. Среди них: технология быстрого реагирования – QR, суть которой состоит в оценке спроса в реальном масштабе времени и максимально полном и своевременном его удовлетворении с использованием современных информационных технологий; технология непрерывного пополнения запасов – CR, основанная на получении от розничных продавцов данных о продажах и определении потребностей в поставках им товарной продукции. В последние годы усложнение рыночных отношений, особенно усиление конкуренции,

сделало необходимым интенсификацию бизнес-процессов снабжения, производства и распределения [8].

Все шире применяют понятие инновационной системы сбыта. На взгляд авторов, применение такой инновационной системы сбыта имеет перспективы и для рассматриваемого предприятия, т. е. при производстве и реализации мебели. Использование такой системы на предприятии позволяет выявить скрытые резервы повышения эффективности. При формировании инновационной системы сбыта выделяют следующие факторы, определяющие результативность сбытовой деятельности предприятия:

- наличие и функционирование каналов сбыта;
- наличие инновационных преобразований в системе сбыта на предприятии;
- ориентация предприятия при выпуске продукции на потребности потребителя и рынка;
- наличие системы отбора и оценки управленческих решений в области сбыта с позиции инновационного подхода.

Для определения экономической эффективности функционирования инновационной системы сбыта, ориентированной на транспортную логистику, необходимо сопоставить расходы предприятия, которые возникают при существующей системе сбыта, и расходы, которые возникнут при внедрении инноваци-

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

онной системы. Соответственно, формулируем следующие основные направления совершенствования системы сбыта предприятия, характеризующие ее инновационность:

- разномановренность, подразумевающая работу не только с дилерами и дистрибьюторами, а также непосредственно с потребителями продукции;

- широкое использование информационных технологий при распределении продукции, предполагающих осуществление сбыта при помощи Интернет-ресурсов;

- выход на новые целевые рынки посредством участия предприятия в выставках, форумах и тематических ярмарках;

- работа с новыми потребителями посредством участия предприятия в системе государственных закупок и тендеров [5, 6].

Совершенствование снабженческой деятельности в рамках построения общей макрологистической системы предприятия наряду с эффективным использованием элементов транспортной логистики позволяет повысить рентабельность продаж предприятия более чем в 1,3 раза (на 2 % – за счет улучшения технологии продвижения своей продукции на рынке и на 1,1 % – за счет изменения схемы снабженческой деятельности) – с 13,6 % до 17,7 %.

### Научная новизна и практическая значимость

Следует отметить, что в современных условиях успешная реализация продукции зависит в первую очередь от организации сбытовой деятельности предприятия. Согласно схеме макрологистической системы предприятия транспортная логистика играет одну из решающих ролей в ходе производственного процесса. Стоит акцентировать внимание на том, что это именно транспортная логистика, а не просто транспортировка, так как транспортировать можно что угодно, когда угодно, сколько угодно и т. д. Но именно транспортная логистика позволяет предприятию рационально распоряжаться имеющимися ресурсами, оптимизировать их использование и организовать четко налаженные механизмы поставок, производства и сбыта продукции, что в итоге обуславливает эффективность работы предприятия. При этом методологически

предложено основываться на инновационной системе сбыта продукции, что открывает для предприятия скрытые резервы повышения общей эффективности его деятельности за счет применения транспортной логистики. Предлагаемый целостный логистический подход (не используемый на предприятиях такого типа в стране) к управлению взаимоотношениями с поставщиками позволяет связать стратегию снабжения с ее реализацией и усиливает участие поставщиков в работе предприятия. Это дает возможность предприятию рационально распоряжаться имеющимися у него ресурсами.

### Выводы

На основании вышесказанного можно сделать вывод о том, что транспортная логистика обладает активным интегрирующим потенциалом, способным связать воедино и улучшить взаимодействие между базисными функциональными сферами предприятия, такими как снабжение, производство, маркетинг, дистрибуция, организация продаж. Также она способствует уменьшению логистических (на 11 %) и общих затрат (порядка 2 %) и снижению цены на производимые и реализуемые товары. Предприятие ОАО «Гомельская мебельная фабрика «Прогресс», как и все предприятия промышленного комплекса Республики Беларусь, имеет свою уникальную, специфическую логистическую систему. Она характеризуется, прежде всего, наличием конкретных участников логистической цепи, сочетание которых характерно только для этого предприятия, которые взаимодействуют посредством материальных, финансовых и информационных потоков. Каждый из участников имеет свои функции, от своевременного и качественного выполнения которых зависит работа всей системы. Основная роль во всем процессе, конечно, принадлежит именно транспортной логистике. На протяжении всего производственного цикла, начиная от закупок и заканчивая сбытом готовой продукции, абсолютно каждый этап так или иначе сопровождается применением транспортной логистики. В противном случае не может идти речи об эффективном функционировании предприятия.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аминова, М. Т. Понятие и структура управления транспортной логистикой / М. Т. Аминова // Аллея науки. – 2018. – Т. 2, № 7 (23). – С. 478–483.
2. Асаева, Т. А. Построение системы транспортно-логистического обслуживания на основе теории массового обслуживания / Т. А. Асаева, А. И. Игнатьев, И. П. Соловьева // Современные тенденции в фундаментальных и прикладных исследованиях : сб. тр. второй Междунар. науч.-практ. конф. (Рязань, 30 апр. 2015 г.). – Рязань, 2015. – С. 64–68.
3. Гартунг, А. И. Логистика как основа эффективного управления транспортными потоками промышленного предприятия / А. И. Гартунг, И. П. Соловьева, А. И. Игнатьев // Новые технологии в учебном процессе и производстве : материалы XIV Межвуз. науч.-техн. конф., посв. 60-летию ин-та / под ред. А. А. Платонова, А. А. Бакулиной. – Рязань, 2016. – С. 387–390.
4. Демина, Е. А. Современная практика управления закупочной логистикой / Е. А. Демина // Синергия наук. – 2017. – Т. 1, № 17. – С. 184–190.
5. Дорожкина, О. К. Особенности инновационного развития логистических процессов промышленного предприятия / О. К. Дорожкина, И. Н. Дорожкин, И. А. Шинкевич // Инновации. – 2016. – № 8. – С. 35–40.
6. Киркин, А. П. Новые аналитические методы управления транспортными потоками на базе системных исследований в логистике / А. П. Киркин, В. И. Киркина, Т. Ю. Киркина // Вісн. Приазов. держ. техн. ун-ту. Серія: Технічні науки : зб. наук. пр. – Маріуполь, 2017. – Вип. 34. – С. 209–216.
7. Орлова, Н. А. Совершенствование логистической системы производственного предприятия / Н. А. Орлова, Т. А. Шиндина // Сибирский журнал науки и технологий. – 2018. – Т. 19, № 1. – С. 182–187.
8. Парунакян, В. Э. Формирование логистической концепции (технологии) системного управления процессом материалодвижения на металлургических предприятиях / В. Э. Парунакян // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2018. – Т. 8, № 2. – С. 4–21. doi: 10.18503/2222-9396-2018-8-2-4-21
9. Пожарнова, И. М. Транспортная логистика в организации / И. М. Пожарнова, Е. А. Иванова // Вопросы экономики и управления : материалы III Междунар. науч.-практ. конф. (Ростов-на-Дону, 30 нояб. 2016 г.). – Ростов-на-Дону, 2016. – С. 39–41.
10. Lukinskiy, V. Logistic Systems Efficiency Increase Based on the Supply Chains Integration / V. Lukinskiy, V. Lukinskiy, T. Shulzhenko // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 178. – P. 117–122. doi: 10.1016/j.proeng.2017.01.073
11. Straka, M. The position of distribution logistics in the logistic system of an enterprise / M. Straka // Acta logistica. – 2017. – Vol. 4. – Iss. 2. – P. 23–26. doi: 10.22306/al.v4i2.5
12. Tarasova, V. V. Logistic map with memory from economic model / V. V. Tarasova, V. E. Tarasov // Chaos, Solitons & Fractals. – 2017. – Vol. 95. – P. 84–91. doi: 10.1016/j.chaos.2016.12.012

О. А. ХОДОСКИНА<sup>1\*</sup>, В. Д. АНАСОВИЧ<sup>2\*</sup>, А. И. ХИЛЬКЕВИЧ<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Економіка транспорту», Білоруський державний університет транспорту, вул. Кірова, 34, Гомель, Республіка Білорусь, 246653, тел. +37 (529) 730 35 91, ел. пошта for\_diplomnic@mail.ru, ORCID 0000-0003-2254-9638

<sup>2\*</sup>Каф. «Економіка транспорту», Білоруський державний університет транспорту, вул. Кірова, 34, Гомель, Республіка Білорусь, 246653, тел. +37 (529) 931 88 07, ел. пошта 3\_steamakk\_3@mail.ru, ORCID 0000-0002-9902-332X

<sup>3</sup>«Гомельжелдортранс», вул. Об'їзна, 30А, Гомель, Республіка Білорусь, 246000, тел. +37 (544) 758 45 99, ел. пошта hilkevich\_nastya@mail.ru, ORCID 0000-0002-4786-926X

## РОЛЬ ТРАНСПОРТНОЇ ЛОГІСТИКИ В ДІЯЛЬНОСТІ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА

**Мета.** Транспортна логістика є для промислового підприємства дуже важливою сферою діяльності. Тому метою статті є визначення ролі транспортної логістики на сучасному етапі роботи промислового підприємства з виробництва м'яких меблів, а також розгляд основних логістичних принципів і сфери їх застосування. **Методика.** У ході дослідження застосовано методи наукового пошуку, статистичного аналізу, синтезу, елементи теорії моделювання систем для вивчення ролі транспортної логістики в роботі підприємства. **Результати.** Як

Creative Commons Attribution 4.0 International

doi: 10.15802/stp2019/164942

© О. А. Ходоскина, В. Д. Анасович, А. И. Хилькевич, 2019

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

об'єкт розгляду вибрано промислове підприємство, основним видом діяльності якого є випуск м'яких меблів. Розроблено й проаналізовано структуру логістичної системи підприємства, оцінено вплив транспортної логістики на функціонування логістичного ланцюга. Запропоновано варіант використання інноваційної системи збуту, що базується на ефективному використанні транспортної логістики. Визначено роль, місце й актуальність транспортної логістики як підсистеми логістичного ланцюга цього промислового підприємства. Наявні проблеми в транспортній логістиці підприємств цієї сфери в країні потребують вирішення у зв'язку з постійною необхідністю каналів постачання сировини та напівфабрикатів, а також розподілу виробленої продукції. Найбільш важливим питанням при цьому є прийняття рішення про визначення шляху руху товару (вироблених м'яких меблів). Це найгостріша проблема, з якою доводиться стикатися під час доставки продукції на ринок збуту. **Наукова новизна.** На методичному рівні сформульована роль транспортної логістики у створенні та функціонуванні макрологістичної системи підприємств такого типу. Розроблено цілісний підхід до управління взаємовідносинами з постачальниками, що дозволяє зв'язати стратегію постачання з її реалізацією та підсилює участь постачальників у роботі підприємства. **Практична значимість.** Докладне вивчення й аналіз можливих шляхів вдосконалення транспортно-логістичної діяльності відкриває для підприємства шляхи підвищення загальної ефективності його виробничо-господарської діяльності, бо практично половина всіх витрат на логістику припадає на транспортні витрати. І саме правильне використання транспортної логістики дозволяє підприємству раціонально розпоряджатися наявними у нього ресурсами.

*Ключові слова:* збут; постачання; логістичні принципи; постачальники; логістичне моделювання збуту

О. А. HODOSKINA<sup>1\*</sup>, V. D. ANASOVICH<sup>2\*</sup>, А. І. HILKEVICH<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Economy of Transport», Belarusian State University of Transport, Kirov St., 34, Republic of Belarus, Gomel, 246653, tel. +37 (529) 730 35 91, e-mail for\_diplomnic@mail.ru, ORCID 0000-0003-2254-9638

<sup>2\*</sup>Dep. «Economy of Transport», Belarusian State University of Transport, Kirov St., 34, Republic of Belarus, Gomel, 246653, tel. +37 (529) 931 88 07, e-mail 3\_steamakk\_3@mail.ru, ORCID 0000-0002-9902-332X

<sup>3</sup>«Gomelzheldortrans», Ozdezdnyaya St., 30A, Republic of Belarus, Gomel, 246000, tel. +37 (544)758 45 99, ORCID 0000-0002-4786-926X

## THE ROLE OF TRANSPORT LOGISTICS IN THE ACTIVITIES OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

**Purpose.** Transport logistics is a very important area of activity for an industrial enterprise. Therefore, the purpose of the article is to determine the role of transport logistics at the current stage of operation of an industrial enterprise for the production of upholstered furniture, as well as to consider the basic logistics principles and their scope. **Methodology.** In the course of the study, the methods of scientific search, statistical analysis, synthesis, elements of the theory of system modeling were used to study the role of transport logistics in the operation of the enterprise. **Findings.** As an object of consideration the authors selected an industrial enterprise, whose main activity is the production of upholstered furniture. The structure of the enterprise's logistics system was developed and analyzed; the impact of transport logistics on the operation of the logistics chain was assessed. The option of using an innovative sales system based on the efficient use of transport logistics is proposed. The role, place and relevance of transport logistics as a subsystem of the logistics chain of this industrial enterprise were determined. The existing problems in the transport logistics of enterprises in this sector in the country require solutions due to the constant need to supply the channels with raw materials and semi-finished products, as well as distribution of manufactured products. The most important issue is the decision to determine the way of goods movement (produced upholstered furniture). This is the most acute problem faced in the delivery of products to the market. **Originality.** At the methodological level the role of transport logistics in the creation and functioning of the macrologistical system of enterprises of this type is formulated. The holistic approach to supplier relationship control, which allows you to link the supply strategy with its implementation, and enhances the participation of suppliers in the enterprise operation was developed. **Practical value.** The detailed study and analysis of possible ways to improve the transport and logistics activity opens up ways for the company to increase the overall efficiency of its production and business activities, since almost half of all costs incurred in logistics are transportation costs. And it is the proper use of transport logistics that allows for an enterprise to rationally manage its resources.

*Keywords:* sales; supply; logistics principles; suppliers; logistic sales modelling

## REFERENCES

1. Aminova, M. T. (2018). Ponyatie i struktura upravleniya transportnoy logistikoy. *Alleya nauki*, 2/7(23), 478-483. (in Russian)
2. Asaeva, T. A., Ignatev, A. I., & Soloveva, I. P. (2015). *Postroenie sistemy transportno-logisticheskogo obsluzhivaniya na osnove teorii massovogo obsluzhivaniya, Sovremennye tendentsii v fundamentalnykh i prikladnykh issledovaniyakh: Sbornik trudov vtoroy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Ryazan. (in Russian)
3. Gartung, A. I., Soloveva, I. P., & Ignatev, A. I. (2016). *Logistika kak osnova effektivnogo upravleniya transportnymi potokami promyshlennogo predpriyatiya, Novye tekhnologii v uchebnom protsesse i proizvodstve: Materialy XIV Mezhvuzovskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 60-letiyu instituta*. Ryazan. (in Russian)
4. Demina, Y. A. (2017). Modern practice of purchasing logistics management. *Sinerhiya Nauk*, 1(17), 184-190. (in Russian)
5. Dorozhkina, O. K., Dorozhkin, I. N., & Shinkevich, I. A. (2016). Osobennosti innovatsionnogo razvitiya logisticheskikh protsessov promyshlennogo predpriyatiya. *Innovations*, 8, 35-40. (in Russian)
6. Kirkin, A. P., Kirkina, V. I., & Kirkina, T. Y. (2017). New analytical techniques for traffic management on the basis of system studies in logistics. *Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 34, 209-216. (in Russian)
7. Orlova, N. A., & Shindina, T. A. (2018). Improvement of the logistic system of a manufacturing company. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologiy*, 19(1), 182-187. (in Russian)
8. Parunakyan, V. (2018). A study on increasing the energy efficiency of buildings on rail transport. *Modern Problems of Russian Transport Complex*, 8(2), 4-21. doi: 10.18503/2222-9396-2018-8-2-4-21 (in Russian)
9. Pozharnova, I. M., & Ivanova, Y. A. (2016). *Transportnaya logistika v organizatsii, Voprosy ekonomiki i upravleniya: Materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Rostov-na-Donu, 30 noyabrya 2016 g.)*. Rostov-on-Don. (in Russian)
10. Lukinskiy, V., Lukinskiy, V., & Shulzhenko, T. (2017). Logistic Systems Efficiency Increase Based on the Supply Chains Integration. *Procedia Engineering*, 178, 117-122. doi: 10.1016/j.proeng.2017.01.073 (in English)
11. Straka, M. (2017). The position of distribution logistics in the logistic system of an enterprise. *Acta Logistica*, 4(2), 23-26. doi: 10.22306/al.v4i2.5 (in English)
12. Tarasova, V. V., & Tarasov, V. E. (2017). Logistic map with memory from economic model. *Chaos, Solitons & Fractals*, 95, 84-91. doi: 10.1016/j.chaos.2016.12.012 (in English)

Поступила в редколлегию: 11.12.2018

Принята к печати: 02.04.2019

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

UDC 625.143.46

A. NEMETH<sup>1\*</sup>, S. FISCHER<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Dep. «Transport Infrastructure and Water Resources Engineering», Szechenyi Istvan University, Egyetem Sq., 1, Gyor, Hungary, 9026, tel. + 36 (96) 613 544, e-mail fischersz@sze.hu, ORCID 0000-0001-7298-9960

### FIELD TESTS OF GLUED INSULATED RAIL JOINTS WITH USAGE OF SPECIAL PLASTIC AND STEEL FISHPLATES

**Purpose.** The aim was to compare behavior of polymer-composite fishplated and control steel fishplated (type GTI and MTH-P) glued insulated rail joints in railway track. **Methodology.** After laboratory tests (shear tests of glue materials, 3-point-bending tests, axial pull tests), as well as field inspections, trial polymer-composite and control (steel) fishplated glued insulated rail joints were built into railway tracks with (almost) the same border conditions (rail profiles, cross section parameters, track condition, etc.). The authors summarize in this paper the results of field tests related to polymer-composite, as well as control (steel) fishplated glued insulated rail joints between 2015 and 2018 considering measured data of track geometry recording car and straightness tests. **Findings.** The investigation and diagnostics of experimental (fiber-glass reinforced fishplate) and control (steel fishplate) rail joints (straightness tests, track geometry recording car measurements) are in progress. **Originality.** The goal of the research is to investigate the application of this new type of glued insulated rail joint where the fishplates are manufactured at high pressure, regulated temperature, glass-fiber reinforced polymer composite plastic material. The usage of this kind of glued insulated rail joints is able to eliminate the electric fishplate circuit and early fatigue deflection and it can ensure the isolation of rails' ends from each other by aspect of electric conductivity. **Practical value.** The polymer-composite fishplated glued-insulated rail joints and control steel fishplated rail joints were built into the No. 1 main railway line (Kelenföld-Hegyeshalom) in Hungary at three different railway stations. The accurate time could not be determined when the polymer-composite fishplated glued-insulated rail joints reach the end of their lifetime as the result of previous research. In this article the investigation of deterioration process of glued-insulated rail joints is demonstrated.

**Keywords:** polymer-composite; fishplate; rail joint; railway; field test

#### Purpose

In this paper the authors summarize the railway measurement results related to APATECH (Russian branded) glued insulated rail joints with special fibre-glass reinforced plastic (polymer-composite) fishplates.

According to railway maintenance experiences of Hungarian Railways (MÁV) and Raaberbahn, Győr-Sopron-Ebenfurth Railway (GYSEV in Hungarian abbreviation, or ROeEE in German abbreviation), glued insulated steel fishplated joints need a lot of maintenance source due to rail deformations (especially settlements). The next problem

is the false railway control signal due to rail end failures that results railway capacity restriction. Other problems are for example: glue material, endposts, rail ends, rail profile inner corner wear and plastic deformation.

In the international literature the researchers have been dealt with the following subtopics (the order does not mean the relevancy and the list was not made with the demand of fullness). In the following (in the literature review) the authors write only 'rail joints', but, of course, e.g. mechanical rail joints mainly differ from 'insulated rail joints', as well as from 'glued insulated rail joints':



## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

- standards and prescriptions related to design, dimensioning and structural configuration [15, 27]
- determination of general failures and failure patterns of rail joints and identification of the reason of breakdown [9, 10, 21, 24, 25, 26, 30, 37, 39, 40, 41, 46, 50, 54, 60, 66, 70],
- improvement (reinforcement) and development of rail joints (mechanical joints, insulated joints, as well as glued insulated joints) and elements of these rail joints [2, 12, 19, 21, 22, 23, 26, 28, 30, 32, 37, 40, 46, 53, 54, 58, 60, 70],
- analysis of the effect of different materials of rail endpost on carrying capacity (strength) and stiffness of rail joints [2, 16, 21, 22, 23, 26, 60],
- investigation of rail joints' in mechanical and electrical aspects [2, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 29, 30, 32, 33, 34, 37, 38, 39, 46, 50, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 60, 66, 69, 70],
- examination of deformation (mainly deflection) behavior of rail joints, as well as the stress distribution in the rail head and fishplates; examination of wheel-rail contact in the aspect of stress and/or strain distribution, as well as wear behavior [2, 8, 9, 10, 12, 13, 16, 18, 19, 23, 25, 28, 30, 33, 34, 37, 38, 46, 50, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 60, 69, 70],
- investigation of the effect of the arc shape at railhead edges on the stress distribution in the rail head [12, 57],
- analysis of sleeper settlement and stress distribution on the contact surface between sleepers and ballast bed, considering the usage of geosynthetic reinforcement solutions or without them [1, 9, 10, 19, 34, 36, 39, 46, 54, 58, 64],
- investigation of support properties of rail joints and rail tracks as well as ballast deformation [1, 35, 36, 37, 46, 60, 64],
- investigation of glue material quality adequacy related to glued insulated rail joints [52, 53, 66, 67],
- analysis of the quantity of glue material between fishplates and rail web due to assembly process, as well as the effect of the glue surface patterns on carrying capacity (strength) of rail joints [52, 53, 66, 67],
- investigation of epoxy de-bonding phenomena [52, 53, 66],
- examination of the effect of the angle between the rail longitudinal axis and rail joint cut

(endpost) (i.e. square and inclined rail joints) on the mechanical behavior of the rail joint [8, 11, 12, 13, 18, 37, 38, 58, 68],

- analysis of the effect of the size of the endpost [19, 21, 22, 23, 26, 57, 58],

- investigation of lipping (and/or ratchetting) at the contact lines between rail ends and endpost elements [25, 26, 28],

- analysis of electric arc burning at insulated rail joints in high-speed railway stations [17],

- investigation of dynamic effect in railway tracks due to railway vehicles with or without under sleeper pads [35],

- investigation of speed-dependency of stresses arising in rail joints' elements [39],

- analysis of detecting method of missing and/or loose screws in the rail joints [41],

- development of special measurement techniques for determination of faults (electrical and/or mechanical) in rail joints [2, 7, 13, 26, 41, 49, 55, 56, 59, 66],

- development of defect-based condition assessment methods [20],

- investigation of dynamic effects due to rail joints on railway vehicles and railway track elements [9, 10, 11, 24, 32, 33, 34, 41, 50, 51, 55, 60, 61, 62, 65, 69, 70],

- considering dynamic effects of railway vehicles on railway tracks as well as measurement of equivalent conicity [3, 4, 6],

- investigation of calculation and evaluation techniques of railway track geometry measurement data made by track geometry recording cars in the aspect of real chord values [5].

Foreign research teams worked the methodologies below:

- numerical analysis with finite element method (FEM), static and dynamic approaches [10, 12, 13, 16, 25, 30, 37, 38, 46, 50, 53, 54, 60, 69, 70],

- laboratory tests [2, 13, 21, 22, 23, 25, 26, 28, 40, 52, 54, 55, 56, 66, 67],

- field (in-situ) tests [2, 9, 10, 11, 18, 24, 32, 34, 35, 39, 41, 52, 53, 54, 55, 58, 59, 61],

- image analysis supplemented with Wavelet calculation method,

- calculations based on mathematical and physical theories, i.e. MATLAB [17],

- mathematical calculation of deterioration and maintenance theories [42, 43, 44, 45, 51],

- IoT (internet of things) techniques,

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

- electrical measurement methods [14, 29],
- signal processing for non-destructive testing of railway tracks [59],
- mathematical (statistical) regression analysis and artificial intelligence, as well as artificial neural networks [42, 43, 44, 45].

There are some interesting results from the international literature review:

- significant part of the rail joints' failure is related to reduced moment of inertia of the fishplate pair (compared to parent rail section) [54], as well as increased stress values in the rail head that can lead to plastic deformation, lipping in the rail steel material [25, 26, 28],
- the maintenance cost of rail joints is enormous, it is very significant aspect because the avoiding of insulated rail joints from the CWR tracks is very complicated [54],
- it is very important to choose adequate glue material for glued insulated rail joints [2, 16, 21, 22, 23, 26, 60], respectively the endposts' material and thickness [19, 21, 22, 23, 26, 57, 58],
- modified railhead geometry (longitudinal section, i.e. arch shape) is able to ensure reduced stresses and higher life-time for rail joints [12, 57],
- lipping phenomena in the rail head near the endpost can be hindered by higher rail steel grade or modified-treated steel materials in the rail head [26, 28, 40],
- external reinforcement methods are able to ensure higher bending stiffness for fishplated rail joints [54],
- the usage of inclined (30° and 45°) rail joints helps with reducing vertical displacement, noise and vibration compared to square ones [11, 12, 18],
- it has to be mentioned that the railway operation practice verified that inclined rail joints are not adequate (i.e. they are not better than square ones) [68],
- importance of glue patterns (as well as the quantity of glue material between fishplates and rail web) [52, 53, 66, 67],
- the support geometry influences the arising stress-strain state in the rail joint elements [35, 37, 46, 60],
- a lot of methods were developed that are adequate for detection faults and stress-strain state in the rail joints (i.e. for example: ultrasonic test, acousto-elastic method, neutron diffraction meth-

od, X-ray measurements, usage of optical fibre Bragg grating sensors) [2, 7, 13, 26, 41, 49, 55, 56, 59, 66],

– additional dynamic effect due to rail joints can lead to faster deterioration process [9, 10, 11, 24, 32, 33, 34, 41, 50, 51, 55, 58, 60, 61, 69, 70],

– the geometrical deterioration process of railway track as well as rail joints can be determined by up-to-date methods, e.g. analysis of measured data of railway track geometry recording cars using with artificial intelligence, artificial neural networks, etc. [42, 43, 44, 45],

– unequal elasticity of the subrail base as well as quasi-static calculation method can be considered during railway superstructure calculations [1, 36],

– dynamic effects of railway vehicles on railway tracks can be measured by railway track geometry recording car (e.g. type Plasser&Theurer EM 250, etc.), values of velocity, accelerations in different directions are able to be measured, derivatives of measures values can be calculated, in this way the occurrent geometrical problems of rail joints are able to be determined and localized [3, 4, 6, 62, 65].

The authors investigated and made diagnostics of experimental fibre-glass reinforced fishplated and designated for inspection control steel fishplated rail joints. The process of the railway investigation was the following:

– the locations designations where the polymer-composite fishplated glued insulated joints and the assigned steel fishplated insulated railway joints were built in railway track,

– analyzing of the track geometry recording car measurements (only evaluation of longitudinal settlement data),

– to performing the straightness tests, which were measured in the guiding edge and the running surface of railhead.

The aim is to compare behavior of polymer-composite fishplated and control steel fishplated (type GTI and MTH-P) glued insulated rail joints in railway track and determining the time course of the deterioration process. The authors' future task is to investigate and make diagnostics of experimental (fibre-glass reinforced fishplate) and control (steel fishplate) rail joints from straightness tests and track geometry recording car measurements and determine the state change of the joints.

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

**Methodology**

The prior field survey, the polymer-composite fishplated glued insulated rail joints for field tests were manufactured by ‘A’ type glue material (after laboratory shear tests of glue materials, 3-point-bending tests, axial pull tests). The polymer-composite joints and the assigned control joints (for comparison) were built-in the track in three different places, with three different rail profiles, in three different speeds [15, 27]. The three different places and those specifications where the polymer-composite fishplated glued insulated rail joints and the control steel fishplated glued insulated rail joints were built into the railway track are the followings.

Biatorbágy railway station:

– Polymer-composite fishplated experimental insulated rail joint: 60 rail system, left transitive main track in 296+42 section,  $V=140$  km/h. Installation date: 13-09-2016.

– Control GTI steel fishplated insulated rail joint: 60 rail system, left transitive main track in 295+36 section (between the No. 4 and No. 8 turnouts),  $V=140$  km/h. Installation date: 22-06-2016

Tatabánya railway station:

– Polymer-composite fishplated experimental glued insulated rail joint: 54 rail system, right transitive main track in 711+68 section,  $V=120$  km/h. Installation date: 30-08-2016

– Control MTH-P steel fishplated insulated rail joint: 54 rail system, right transitive main track in 702+80 section,  $V=120$  km/h. Installation date: 06-05-2016.

Lébény-Mosonszentmiklós railway station:

– Polymer-composite fishplated experimental insulated rail joint: 60 rail system, right transitive main track between the No. 2 and No. 8 turnouts in 1598+55.80 section,  $V=160$  km/h. Glued ballast bed, installation date: 26. 09 2016.

– Control MTH-P steel fishplated glued insulated rail joint: 60 rail system, left transitive main track between the No. 6 and No. 12 turnouts in 1598+97 section,  $V=160$  km/h. Glued ballast bed, installation date: 27-9-2016.

*Track geometry measurements (evaluation of longitudinal settlement data):*

– The railway track geometry data – which is measured by FMK-004 and FMK-007 geometry recording car – and the rolling stock data were given by MÁV Central Rail And Track Inspection Ltd. and MÁV Ltd. for the time period between years 2015-2018. All three locations are on the Kelenföld-Hegyeshalom railway line, which is part of the trans-European rail freight network. That is why the FMK-007 geometry recording car does measurements on this railway line with undistorted measurement result in D1 wavelength range. During the procedure the original chord measurements are calculated by the system, it does not include any characteristic features (distortion) of any wrap arrangement, it filters out the wavelength of less than 3 meter or more than 25 meter wavelengths. In order to evaluate the change of the condition of the track, the data of the longitudinal settlement were mainly taken into account for the evaluation of the track geometric data (glued-insulated rail joints were in a straight track, so the «direction» parameter can be neglected, and the twist parameter could have been examined for too short base lengths, so it is neglected, too.

In all sites where the polymer-composite fishplated and control steel fishplated rail joints were built into the track, the data per 25 centimeter have been filtered from the middle of the joints to 100-100 meters in both directions. After the measured values were represented along the sections for both rails in 200 meter length (between years 2015-2018) and shifting the measurement data line along the longitudinal section, which shown in Figure 1.

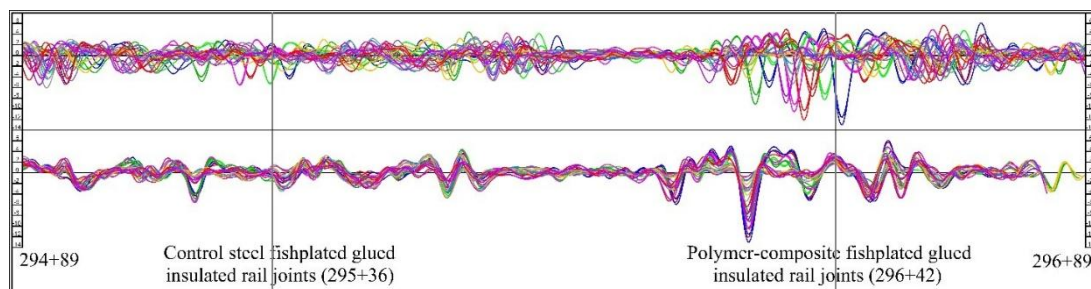


Fig. 1. The original and corrected settlement data at Biatorbágy railway station

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

The measurement data of 2017 December was selected for the reference point (each dataset was corrected according to the selected base measurement). It was necessary to offset the data along the length profile because the satellite positioning is not always turned on in the geometry recording car or the accuracy is not adequate, so the sections may slip (shown in Fig. 1 below picture). Then the shifted measurement data lines along the longitudinal section were narrowed down (decreased) to 30 meter length. In this way only the analysis of the surroundings of the joints is important, and the evaluation with a rating of 200 meters does not give a true picture of the change of state of the designated control rail joints and the polymer-composite fishplated rail joints. The percentage distribution of the number of errors were examined

in 30 meter long section for both of rails, separately, and the absolute value of average of the parameters regarding to both rails. The resulting values have been collected in at 15%, 50% and 85% by measurement intervals ( $i_{15\%}$ ,  $i_{50\%}$ ,  $i_{85\%}$  Vaszary status characteristic number with the following relation), and using the below formula a condition character can be determined [47, 48]:

$$I = i_{15\%}^2 + i_{50\%}^2 + i_{85\%}^2$$

These «I» condition characteristic numbers were represented in a graph (Fig 2.) which are shown the current condition parameters of polymer-composite fishplated glued insulated and control steel fishplated glued insulated rail joints.

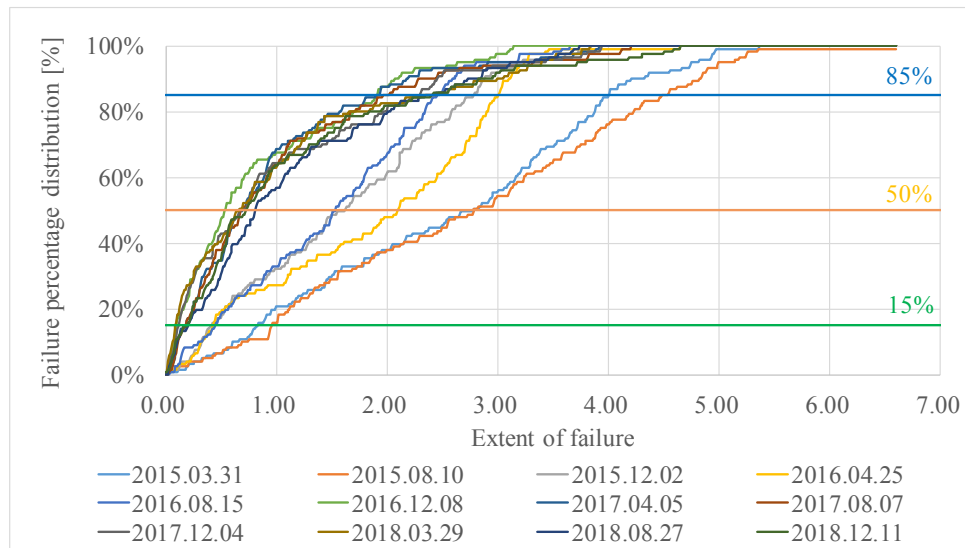


Fig. 2. The «I» condition characteristic numbers of polymer-composite fishplated glued insulated joint on left rail at Biatorbágy

### Straightness tests

The straightness tests were made by MÁV-THERMIT Ltd. During the straightness measurement the device is placed on the rail head, and it measured the roughness of the guiding edge and the running surface of railhead on 1.0-meter base length.

After measurement the results were calculated with the «Min-Max Absolute» value (this is the highest difference between the minimum and maximum values), the «Average» values and the «Deviation» values of the guiding edge and the running

surface of railhead, after it the change of data has been observed. Then the measurement results have been investigated related to the area below the curves (integer), and the areas have been compared and depicted in graph depending on the rolling gross tons.

### Findings

The authors conceive statements about the condition changes of the surroundings of the measured railway joints.

During the evaluation of longitudinal settlement values the data per 25 centimeter have been

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

filtered and were shifted along the longitudinal section to 30 meter basis length. The percentage distribution of the number of errors were examined in 30 meter long section for both of rails, separately, and the absolute value of average of the parameters regarding to both rails, and the calculated condition characteristic numbers were represented in a graph. The results obtained are as follows.

At Biatorbágy railway station: in both cases the values of condition parameters of fishplated rail joints were slightly increased since they were built into track, but this is not significant. This state change of polymer-composite fishplated joint is shown in Fig. 3.

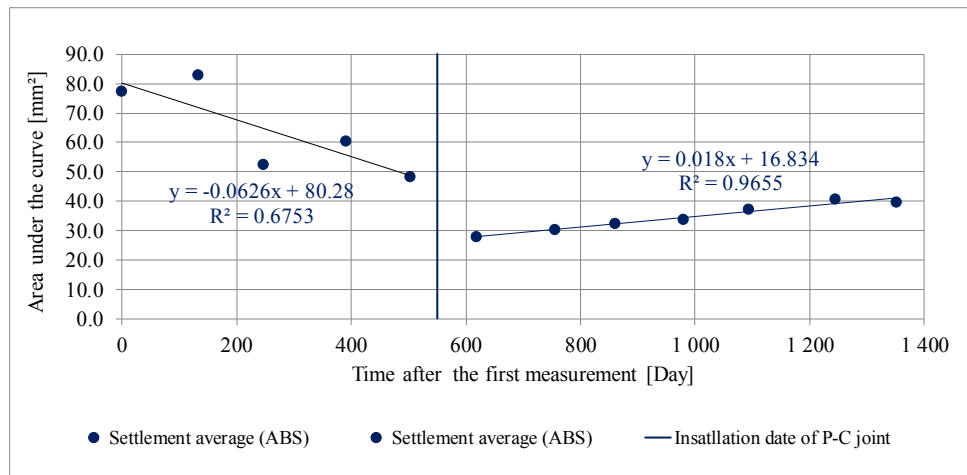


Fig. 3. Are under the curve on 30 meter (at Biatorbágy, Polymer-composite fishplated experimental insulated rail joint on left transitive main track).

At Tatabánya railway station: after the change, the condition of polymer-composite fishplated rail joint and the control fishplated rail joint were slightly deteriorated, the values of condition parameters «move» in parallel in both cases, but

there were tamping work with Mechanised Maintenance Train (MMT) in the track. The time interval is too short before the MMT, and therefore the deterioration of the track was not able to be determined precisely.

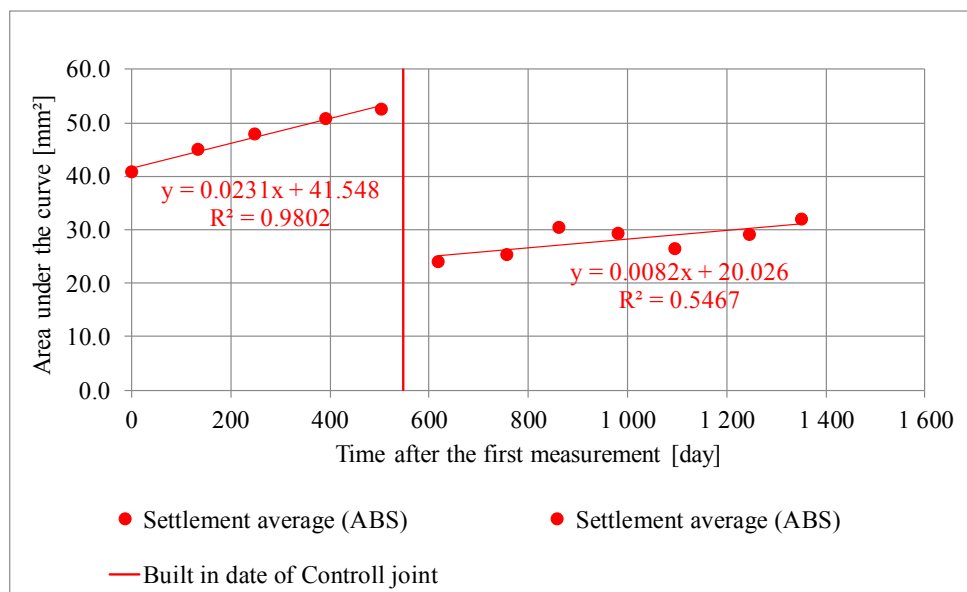


Fig. 4. Area-based evaluation at Control MTH-P steel fishplated insulated rail joint: 60 rail system, left transitive main track (Lébény-Mosonszentmiklós)

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

At Lébény-Mosonszentmiklós railway station: there was not significant change in this track, the track geometry values of the track are close to invariable, and the tangent of the trend line slightly increases. It should not be forgotten that these evaluations do not give an accurate assessment about the condition of the track because the ballast bed was glued (ballast bonding process holds ballast substrate together in many areas wherever this is required), so there can be much smaller vertical movements in these trial railway tracks.

For evaluation of railhead straightness tests the measurement results have been investigated related to the area below the curves (integer), and the areas have been compared and depicted in graph depending on the rolling gross tons in case of the roughness of the guiding edge and the running surface of railhead. The evaluation of results was rated according to the current condition of the investigated sites.

At Biatorbágy railway station: the area under the curve (integer) is increased as a function of through-rolled gross tons in case of polymer-composite fishplated joints in both rails, in case of control fishplated rail joints there are not any signif-

icant changes. The tangent of the graph depicted in case of polymer-composite fishplated rail joints was increased, in case of the control fishplated rail joints is constant.

At Tatabánya railway station: the area under the curve (integer) is slightly increased as a function of through-rolled gross tons, resulting in higher deflection values, but in the case of control rail joints, the tangent of the graph depicted is not significant while very small deterioration is appreciable in case of the current condition of polymer-composite fishplated glued insulated rail joints in both rails. Fig. 5. shows the condition parameters of polymer-composite and control steel fishplated joints at Tatabánya. (It has to be mentioned that the control rail joints at 702+80 section were replaced to new ones at 07-07-2018 because of the run-down state, which can be seen in Fig. 5 with significant low (i.e. approx. excellent) values related to 900 days.)

At Lébény-Mosonszentmiklós railway station: the area under the curve (integer) is does not change, the tangent of the graph depicted is nearly constant.

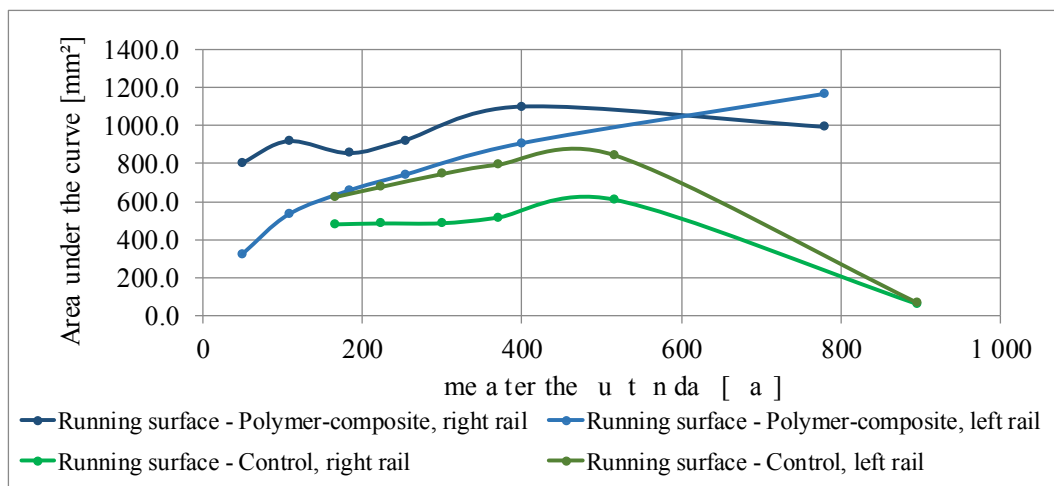


Fig. 5. Change of condition of PC and Control joints on running surface at Tatabánya

### Originality and practical value

The role of the rail connections (rail joints) is to ensure the continuity of rails without vertical and horizontal 'step', as well as directional break [63]. Rail connections are the weak points of the track, because their fish-plates can compensate only the 60% of the moment of inertia of the rail. Wheel,

during through-rolling (passing) the gap between the rail ends, hits the following (forthcoming) rail end, which is disadvantageous for the whole railway super- and substructure as well as the railway vehicle, too. Dynamic effects are much higher in case of vertical and horizontal step connections than in case of 0 'controlled' one [27].

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Requirements to rail connections are the followings [31]:

- to bear vertical and horizontal dynamic loadings at the discontinuity of rail, and avoid or limit (maximize) the vertical and horizontal step between rail ends;
- to ensure longitudinal motion of rail ends due to dilatation force without structural damages;
- it should consist of few particles, and its assembly and its components' (parts') exchange should be quick and easy;
- to fit to traffic control system, and fit the railway safety rules.

Insulated joints are special types of fishplate joints, where the rail ends are insulated from each other, in this way metallic connection can arise neither at the rail ends, nor via fishplates. It can be applied in suspended and supported joints depending on their type in case of value of sleeper space and wheel load prescribed by manufacturer. High tensile strength bolts with great forces are used to press fishplates and rail together. In this way high friction force can be achieved, it causes that the high tensile forces cannot open the rail connection. Plastic profile lining (plate) is built between rail ends. Insulated joints can be produced in plant as prefabricated elements with given length rails, as well as on the field, where they are assembled.

### Conclusions

All of the experimental polymer-composite bonded-insulated rail joints in more than 2 years after their installation (the 4-5 mm gap opening in the winter of 2016/2017 at the Lébény-Mosonszentmiklós bindings and the related precautions, as well as the increased track supervision and speed limitation, they were canceled in February 2017) they were carrying the rolled 20-25 million gross tons without any problems, and it is still possible to keep in track of these stages/sections.

Except for the special case of glued ballast site at Lébény-Mosonszentmiklós railway station, where the level of the tracks is almost «set» for both the experimental and the control rail alignment, the deterioration trends in the other two loca-

tions in some of cases differed significantly the glued-insulated joints from the steel fishplated glued insulated rail joints. Cannot be released relationship or mathematically correlation about the status parameter between the elapsed time from the built-in date and the through-rolled gross tons. In addition to deterioration trends, the measurement data series also showed improvement trends. During the evaluation of the straightness data, it was concluded that the area of the glued-insulated joints in measuring the tread and the surface of the guide surface, the area below the rail ends  $\pm 0.5$  m (interpreted lengthwise) varies linearly as a function of the rolled gross tons. The authors tried to find correlation between the measurement of the straightness data on the running surface and the data of the measuring geometry recording car at 25 cm per settlement data with evaluating on area precept. Unfortunately, there was no correlation between the two evaluation methods which is resulting from the short length of the joints.

The statement which based on the results of the authors's track geometry analysis between 2015-2018, the authors found that – although there were no structural and geometric problems, signal and interlocking interruptions during the three-year observation period, or any other situation with glued-insulated rail joints – the glued insulated rail joints with Apatech branded, nevertheless, the polymer-composite fishplates – on the basis of the laboratory tests and railway track measurements – are not a general solution for replacing the steel fishplated glued insulated rail joints in the CWR railway tracks.

The authors think that not only static but dynamic railway track measurements of glued insulated rail joints as well as their assessment can be a very interested research direction in the future.

### Acknowledgements

Thank you for the help of MÁV KfV. Ltd., MÁV-THERMIT Ltd. And MÁV Ltd. This research is supported by the EFOP 3.6.1-16-2016-00017 project.



## LIST OF REFERENCE LINKS

1. Курган, Д. М. До вирішення задач розрахунку колії на міцність із урахуванням нерівнопружності підрейкової основи // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 1 (55). – С. 90–99. doi: 10.15802/stp2015/38250
2. Advances in Bonded Insulated Rail Joints to Improve Product Performance [Electronic resource] / K. Ciloglu, P. C. Frye, S. Almes, S. Shue // 2014 Joint Rail Conference (April 2–4, 2014, Colorado Springs, CO, USA). – Colorado Springs, 2014. – Available at: <http://clc.am/k6j0lg> – Title from the screen. – Accessed: 18.03.2019. doi: 10.1115/jrc2014-3746
3. Ágh, C. A new arrangement of accelerometers on track inspection car FMK-007 for evaluating derailment safety / C. Ágh // Track Maintenance Machines in Theory and Practice – SETRAS 2018: Conference Paper (November 2018, Žilina, Slovakia). – Žilina, 2018. – P. 7–14.
4. Ágh, C. Egyenértékű kúposág mérése Magyarországon: Pálya és jármű kapcsolata – futási instabilitás / C. Ágh // Sínek világa. – 2012. – Vol. 54, No. 6. – P. 10–13.
5. Ágh, C. Vágánygeometria irány- és fekszinthibák valós nagyságának értékelése húrmérési eredmények alapján / C. Ágh // Közlekedéstudományi szemle. – 2018. – Vol. 68, No. 5. – P. 46–55.
6. Ágh, C. Vasúti kerékpár futási instabilitása a pályadiagnosztika szemszögéből / C. Ágh // Sínek világa. – 2017. – Vol. 59, No. 6. – P. 17–20.
7. Albakri, M. I. Modeling and experimental analysis of piezoelectric augmented systems for structural health and stress monitoring applications: Dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering Mechanics / M. I. Albakri; The Virginia Polytechnic Institute. – Blacksburg, Virginia, 2016. – 235 p.
8. Analysis of tapered, adhesively bonded, insulated rail joints / R. H. Plaut, H. Lohse-Busch, A. Eckstein, S. Lambrecht, D. A. Dillard // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2007. – Vol. 221. – Iss. 2. – P. 195–204. doi: 10.1243/0954409jrrt107
9. Askarinejad, H. Assessing the Effects of Track Input to the Response of Insulated Rail Joints Using Field Experiments / H. Askarinejad, M. Dhanasekar, C. Cole // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2012. – Vol. 227. – Iss. 2. – P. 176–187. doi: 10.1177/0954409712458496
10. Askarinejad, H. Minimising the Failure of Rail Joints Through Managing the Localised Condition of Track [Electronic resource] / H. Askarinejad, M. Dhanasekar // Railway Engineering 2015. – Edinburgh, 2015. – Available at: <https://clck.ru/FNZKS> – Title from the screen. – Accessed: 18.03.2019.
11. Ataei, S. Dynamic Forces at Square and Inclined Rail Joints: Field Experiments [Electronic resource] / S. Ataei, S. Mohammadzadeh, A. Miri // Journal of Transportation Engineering. – 2016. – Vol. 142. – Iss. 9. – Available at: <http://clc.am/Jx0xKw> – Title from the screen. – Accessed: 18.03.2019. doi: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000866
12. A three dimensional finite element analysis of insulated rail joints deterioration / H. M. El-sayed, M. Lotfy, H. N. El-din Zohny, H. S. Riad // Engineering Failure Analysis. – 2018. – Vol. 91. – P. 201–215. doi: 10.1016/j.engfailanal.2018.04.042
13. Bandula-Heva, T. M. Experimental Investigation of Wheel/Rail Rolling Contact at Railhead Edge / T. M. Bandula-Heva, M. Dhanasekar, P. Boyd // Experimental Mechanics. – 2013. – Vol. 53. – Iss. 6. – P. 943–957. doi: 10.1007/s11340-012-9701-6
14. Bongiorno, J. Track insulation verification and measurement [Electronic resource] / J. Bongiorno, A. Mariscotti // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 180. – Available at: <http://clc.am/L4nsTg>. – Title from the screen. – Accessed: 21.03.2019. doi: 10.1051/mateconf/201818001008
15. Mechanical requirements for joints in running rails: WG 18 / DG 11 [Electronic resource]. – 2010. – 32 p. – Available at: <https://mail.google.com/mail/u/0/#inbox/QgrcJHsHlltHGdfHRzQFTtBmPxKvIzMKthg?projector=1&messagePartId=0.6> – Title from the screen. – Accessed: 22.03.2019.
16. Chen, Y. C. Contact stress variations near the insulated rail joints / Y. C. Chen, J. H. Kuang // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2002. – Vol. 216. – Iss. 4. – P. 265–273. doi: 10.1243/095440902321029217
17. Cheng, Y. Transient Analysis of Electric Arc Burning at Insulated Rail Joints in High-Speed Railway Stations Based on State-Space Modeling / Y. Cheng, Z. Liu, K. Huang // IEEE Transactions on Transportation Electrification. – 2017. – Vol. 3. – Iss. 3. – P. 750–761. doi: 10.1109/tte.2017.2713100

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

18. Dhanasekar, M. Performance of square and inclined insulated rail joints based on field strain measurements / M. Dhanasekar, W. Bayissa // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit.* – 2011. – Vol. 226. – Iss. 2. – P. 140–154. doi: 10.1177/0954409711415898
19. Dhanasekar, M. Research Outcomes for Improved Management of Insulated Rail Joints / M. Dhanasekar // *Railway Engineering.* – Edinburgh, United Kingdom, 2015. – P. 1–14.
20. El-khateeb, L. Defect-based Condition Assessment Model of Railway Infrastructure: A Thesis in the Department of Building, Civil and Environmental Engineering / Laith El-khateeb ; Concordia University. – Montreal, Quebec, Canada, 2017. – 139 p.
21. Elshukri, F. A. An Experimental Investigation and Improvement of Insulated Rail Joints (IRJs) and Post Performance: A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy / Fathi A. Elshukri ; The University of Sheffield. – Sheffield, 2016. – 206 p.
22. Elshukri, F. A. An Experimental Investigation and Improvement of Insulated Rail Joints / F. A. Elshukri, R. Lewis // *Tribology in Industry.* – 2016. – Vol. 38, No. 1. – P. 121–126.
23. Elshukri, F. A. An Experimental Investigation and Improvement of Insulated Rail Joints / F. A. Elshukri, R. Lewis // 14th International Serbian Conference on Tribology – Serbiatrib'15 (Belgrade, Serbia, 13–15 May 2015). – Belgrade, Serbia, 2015. – P. 1–7.
24. Experimental Investigation Into the Condition of Insulated Rail Joints by Impact Excitation / M. Oregui, M. Molodova, A. Núñez, R. Dollevoet, Z. Li // *Experimental Mechanics.* – 2015. – Vol. 55. – Iss. 9. – P. 1597–1612. doi: 10.1007/s11340-015-0048-7
25. Experimental Investigation into the Failure Behaviour of Insulated Rail Joints [Electronic resource] / P. Boyd, N. Mandal, T. Bandula, N. Zong, M. Dhanasekar // *Conference on Railway Engineering, CORE (Brisbane 10–12 September 2012).* – Brisbane, 2012. – Available at: <https://clck.ru/FMM5c> – Title from the screen. – Accessed: 13.03.2019.
26. Experimental modelling of lipping in insulated rail joints and investigation of rail head material improvements / P. Beaty, B. Temple, M. B. Marshall, R. Lewis // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit.* – 2016. – Vol. 230. – Iss. 4. – P. 1375–1387. doi: 10.1177/0954409715600740
27. Fischer, Sz. Investigation of polymer-composite fishplated glued insulated rail joints in laboratory, as well as in field tests for dynamic effects: Research Report / Sz. Fischer, A. Németh. – Győr: Universitas-Győr Non-profit Ltd., 2017. – 578 p.
28. Full-scale testing of laser clad railway track; Case study – Testing for wear, bend fatigue and insulated block joint lipping integrity / S. R. Lewis, R. Lewis, P. S. Goodwin, S. Fretwell-Smith, D. I. Fletcher, K. Murray, J. Jaiswal // *Wear.* – 2017. – Vol. 376–377. – P. 1930–1937. doi: 10.1016/j.wear.2017.02.023
29. Health monitoring on line of the impedance of the glued isolating joints to improve the availability of the French railway lines [Electronic resource] / J. de Reffye, M. Antoni // 20e Congrès de maîtrise des risques et de sûreté de fonctionnement (Saint-Malo 11–13 Octobre 2016). – Saint-Malo, 2016. – Available at: <https://clck.ru/FLzVH> – Title from the screen. – Accessed: 13.03.2019.
30. Himebaugh, A. K. Finite element analysis of bonded insulated rail joints / A. K. Himebaugh, R. H. Plaut, D. A. Dillard // *International Journal of Adhesion and Adhesives.* – 2008. – Vol. 28. – Iss. 3. – P. 142–150. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2007.09.003
31. Horvát, F. Application of polymer-composite fishplates for glued insulated rail joints: Research Report / F. Horvát. – Győr: Széchenyi István Egyetem, 2012. – 62 p.
32. Impact Load Response of PC Rail Joint Sleeper under a Passing Train [Electronic resource] / K. Goto, S. Minoura, T. Watanabe, C. Ngamkhanong, S. Kaewunruen // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2018. – Vol. 1106. – Available at: <https://clck.ru/FPhtF> – Title from the screen. – Accessed: 18.03.2019. doi: 10.1088/1742-6596/1106/1/012008
33. Kabo, E. Prediction of dynamic train-track interaction and subsequent material de-terioration in the presence of insulated rail joints / E. Kabo, J. C. O. Nielsen, A. Ekberg // *Vehicle System Dynamics.* – 2006. – Vol. 44. – Iss. sup1. – P. 718–729. doi: 10.1080/00423110600885715
34. Kaewunruen, S. Railway track inspection and maintenance priorities due to dynamic coupling effects of dipped rails and differential track settlements [Electronic resource] / S. Kaewunruen, C. Chiengson // *Engineering Failure Analysis.* – 2018. – Vol. 93. – P. 157–171. doi: 10.1016/j.engfailanal.2018.07.009
35. Kaewunruen, S. Vibration attenuation at rail joints through under sleeper pads / S. Kaewunruen, A. Aikawa, A. M. Remennikov // *Procedia Engineering.* – 2017. – Vol. 189. – P. 193–198. doi: 10.1016/j.proeng.2017.05.031

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

36. Kurhan, D. Determination of Load for Quasi-static Calculations of Railway Track Stress-strain State // *Acta Technica Jaurinensis*. – 2016. – Vol. 9, No. 1. – P. 83–96. doi: 10.14513/actatechjaur.v9.n1.400
37. Mandal, N. K. An Engineering Analysis of Insulated Rail Joints: A General Perspective / N. K. Mandal, B. Peach // *International Journal of Engineering Science and Technology*. – 2010. – Vol. 2 (8). – P. 3964–3988.
38. Mandal, N. K. Stress Analysis of Joint Bars of Insulated Rail Joints Due to Wheel/Rail Contact Loadings / N. K. Mandal // *The 11th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, CM2018 (Delft, the Netherlands, September 24–27, 2018)*. – Delft, 2018. – P. 675–680.
39. Mayers, A. The effect of heavy haul train speed on insulated rail joint bar strains / A. Mayers // *Australian Journal of Structural Engineering*. – 2017. – Vol. 18. – Iss. 3. – P. 148–159. doi: 10.1080/13287982.2017.1363977
40. Microstructural Characterisation of Railhead Damage in Insulated Rail Joints / C. Rathod, D. Wexler, T. Chandra, H. Li // *Materials Science Forum*. – 2012. – Vol. 706-709. – P. 2937–2942. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.706-709.2937
41. Monitoring bolt tightness of rail joints using axle box acceleration measurements / M. Oregui, S. Li, A. Núñez, Z. Li, R. Carroll, R. Dollevoet // *Structural Control and Health Monitoring*. – 2017. – Vol. 24. – Iss. 2. – Available at: <http://clc.am/gFvDkg> – Title from the screen. – Accessed: 18.03.2019. doi: 10.1002/stc.1848
42. Nagy, R. Analytical differences between seven prediction models and the description of the rail track deterioration process through these methods / R. Nagy // *Intersections*. – 2017. – Vol. 14, No. 1. – P. 14–32.
43. Nagy, R. Analytical differences between six prediction models and the description of the rail track deterioration process through these methods / R. Nagy // *Computational Civil Engineering 2017: International Symposium (Iasi, Romania, May 26, 2017)*. – Iasi, 2017. – P. 31–50.
44. Nagy, R. A vasúti pályageometria romlási folyamatának leírása / R. Nagy // *Sínek világa*. – 2016. – Vol. 58, No. 6. – P. 12–18.
45. Nagy, R. Description of rail track geometry deterioration process in Hungarian rail lines No. 1 and No. 140 / R. Nagy // *Pollack Periodica*. – 2017. – Vol. 12. – Iss. 3. – P. 141–156. doi: 10.1556/606.2017.12.3.13
46. Nannan, Z. Sleeper embedded insulated rail joints for minimising the number of modes of failure / N. Zong, M. Dhanasekar // *Engineering Failure Analysis*. – 2017. – Vol. 76. – P. 27–43. doi: 10.1016/j.engfailanal.2017.02.001
47. Németh, A. A polimer-kompozit hevederes ragasztott-szigetelt sínkötések (2. rész): Vasúti pályás vizsgálatok / A. Németh, Sz. Fischer // *Sínek világa*. – 2018. – No. 60. – P. 12–17.
48. Németh, A. Field tests of glued insulated rail joints with polymer-composite and steel fishplates / A. Németh, Sz. Fischer // *Technika és technológia a fenntartható közlekedés szolgálatában: Közlekedéstudományi Konferencia* / B. Horváth, G. Horváth, B. Gábor (szerk.). – Győr, Magyarország: Universitas-Győr Nonprofit Kft., 2018. – P. 97–105.
49. Nichoga, V. Defect Signal Detection Within Rail Junction of Railway Tracks / V. Nichoga, I. Storozh, O. Saldan // *Problemy Kolejnictwa*. – 2016. – Zesz. 171. – P. 57–62.
50. Numerical study of wheel-rail impact contact solutions at an insulated rail joint / Z. Yang, A. Boogaard, Z. Wei, J. Liu, R. Dollevoet, Z. Li // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2018. – Vol. 138-139. – P. 310–322. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2018.02.025
51. Nunez, A. Pareto-Based Maintenance Decisions for Regional Railways with Uncertain Weld Conditions Using the Hilbert Spectrum of Axle Box Acceleration / A. Nunez, A. Jamshidi, H. Wang // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. – 2019. – Vol. 15. – Iss. 3. – P. 1496–1507. doi: 10.1109/tii.2018.2847736
52. Peltier, D. C. Characterizing and Inspecting for Progressive Epoxy Debonding in Bonded Insulated Rail Joints / D. C. Peltier, C. P. L. Barkan // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. – 2009. – Vol. 2117. – Iss. 1. – P. 85–92. doi: 10.3141/2117-11
53. Peltier, D. C. Modeling the Effects of Epoxy Debonding on Bonded Insulated Rail Joints Subjected to Longitudinal Loads [Electronic resource] / D. C. Peltier, C. P. L. Barkan // *2008 TRB 87th Annual Meeting: Conference Recordings (January 13–17, 2008, Washington, D. C.)*. – Washington, 2008. – Available at: <http://clc.am/Q1cqpA> – Title from the screen. – Accessed: 13.03.2019.
54. Potential for external reinforcement of insulated rail joints / M. Gallou, B. Temple, C. Hardwick, M. Frost, A. El-Hamalawi // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. – 2016. – Vol. 232. – Iss. 3. – P. 697–708. doi: 10.1177/0954409716684278

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

55. Railway track component condition monitoring using optical fibre Bragg grating sensors [Electronic resource] / S. J. Buggy, S. W. James, S. Staines, R. Carroll, P. Kitson, D. Farrington, L. Drewett, J. Jaiswal, R. P. Tatam // *Measurement Science and Technology*. – 2016. – Vol. 27. – Iss. 5. – Available at: <http://clc.am/OfQAnA> – Title from the screen. – Accessed: 18.03.2019. doi: 10.1088/0957-0233/27/5/055201
56. Residual Stresses in Rail-Ends from the in-Service Insulated Rail Joints Using Neutron Diffraction / V. Luzin, C. Rathod, D. Wexler, P. Boyd, M. Dhanasekar // *Materials Science Forum*. – 2013. – Vol. 768-769. – P. 741–746. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.768-769.741
57. Sandström, J. Numerical study of the mechanical deterioration of insulated rail joints / J. Sandström, A. Ekberg // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. – 2009. – Vol. 223. – Iss. 3. – P. 265–273. doi: 10.1243/09544097jrrt243
58. Service Condition of Railroad Corridors around the Insulated Rail Joints / N. Zong, H. Askarinejad, T. B. Heva, M. Dhanasekar // *Journal of Transportation Engineering*. – 2013. – Vol. 139. – Iss. 6. – P. 643–650. doi: 10.1061/(asce)te.1943-5436.0000541
59. Signal Processing for Non-Destructive Testing of Railway Tracks [Electronic resource] / T. Heckel, R. Casperson, S. Rühe, G. Mook // *AIP Conference Proceedings*. – 2018. – Vol. 1949. – Iss. 1. – Available at: <http://clc.am/jOUayQ> – Title from the screen. – Accessed: 18.03.2019. doi: 10.1063/1.5031528
60. Soylemez, E. Influence of Track Variables and Product Design on Insulated Rail Joints / E. Soylemez, K. Ciloglu // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. – 2016. – Vol. 2545. – Iss. 1. – P. 1–10. doi: 10.3141/2545-01
61. Sueki, T. Evaluation of Acoustic and Vibratory Characteristics of Impact Noise Due to Rail Joints / T. Sueki, T. Kitagawa, T. Kawaguchi // *Quarterly Report of RTR*. – 2017. – Vol. 58. – Iss. 2. – P. 119–125. doi: 10.2219/rtrqr.58.2\_119
62. Sysyn, M. P. Performance study of the inertial monitoring method for railway turnouts / M. P. Sysyn, V. V. Kovalchuk, D. Jiang // *International Journal of Rail Transportation*. – 2018. – Vol. 4. – P. 33–42. doi: 10.1080/23248378.2018.1514282
63. Szamos, A. Structures and materials of railway superstructure / A. Szamos. – Budapest: Közdot, 1991. – 459 p.
64. The complex phenomenological model for prediction of inhomogeneous deformations of railway ballast layer after tamping works / M. Sysyn, U. Gerber, V. Kovalchuk, O. Nabochenko // *Archives of Transport*. – 2018. – Vol. 46. – Iss. 3. – P. 91–107. doi: 10.5604/01.3001.0012.6512
65. Theoretical study into efficiency of the improved longitudinal profile of frogs at railroad switches / V. Kovalchuk, M. Sysyn, J. Sobolevska, O. Nabochenko, B. Parneta, A. Pentsak // *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. – 2018. – Vol. 4, No. 1. – P. 27–36. doi: 10.15587/1729-4061.2018.139502
66. Ultrasonic Monitoring of Insulated Block Joints / J. Stephen, C. Hardwick, P. Beaty, R. Lewis, M. Marshall // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. – 2018. – Vol. 233. – Iss. 3. – P. 251–261. doi: 10.1177/0954409718791396
67. Using standard adhesion tests to characterize performance of material system options for insulated rail joints / E. Nicoli, D. A. Dillard, J. G. Dillard, J. Campbell, D. D. Davis, M. Akhtar // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. – 2011. – Vol. 225. – Iss. 5. – P. 509–522. doi: 10.1177/2041301710392481
68. Wöhhart, A. ÖBB Infrastruktur AG: ÖBB Infrastruktur szigetelt kötés leírás. Nagyszilárdságú csavarkötéssel készült szigetelt sínillesztések [Electronic resource] / A. Wöhhart – 2011. – 88 p. – Available at: <https://mail.google.com/mail/u/0/#inbox/QgrcJHsHlltHGdfHRzQFTtBmPxKvlzMKthg?projector=1&messagePartId=0.1>. – Title from the screen. – Accessed: 22.03.2019.
69. Yang, Z. Numerical modeling of dynamic frictional rolling contact with an explicit finite element method / Z. Yang, X. Deng, Z. Li // *Tribology International*. – 2019. – Vol. 129. – P. 214–231. doi: 10.1016/j.triboint.2018.08.028
70. Zong, N. Structural and Material Characterisation of Insulated Rail Joints / N. Zong, D. Wexler, M. Dhanasekar // *Electronic Journal of Structural Engineering*. – 2013. – Vol. 13. – Iss. 1. – P. 75–87.

А. НЕМЕС<sup>1\*</sup>, С. ФІШЕР<sup>2</sup><sup>1\*</sup>Каф. «Інфраструктура транспорту та гідротехніка», Університет Іштвана Сечені, пл. Університетська, 1, Д'єр, Угорщина, 9026, тел. +36 (96) 613 544, ел. пошта nemeth.attila@sze.hu, ORCID 0000-0002-3477-6902<sup>2\*</sup>Каф. «Інфраструктура транспорту та гідротехніка», Університет Іштвана Сечені, пл. Університетська, 1, Д'єр, Угорщина, 9026, тел. +36 (96) 613 544, ел. пошта fischersz@sze.hu, ORCID 0000-0001-7298-9960

## ПОЛЬОВІ ВИПРОБУВАННЯ КЛЕЙОВИХ ІЗОЛЬОВАНИХ РЕЙКОВИХ СТИКІВ З ВИКОРИСТАННЯМ СКЛОПЛАСТИКОВИХ І СТАЛЕВИХ РЕЙКОВИХ НАКЛАДОК

**Мета.** Основною метою статті є порівняння поведінки клейових ізольованих рейкових стиків з полімерно-композиційними й контрольними сталевими рейковими накладками (типу GTI і MTH-P). **Методика.** Після проведення лабораторних випробувань (на зрушення клейових матеріалів, на триточковий згин, на осьовий розтяг), а також польових перевірок клейові ізольовані рейкові стики з тестованими полімерно-композиційними й контрольними сталевими накладками були вбудовані в залізничні колії з (майже) однаковими граничними умовами (рейкові профілі, параметри поперечного перерізу, стан колії й т. д.). Підсумовано результати польових випробувань клейових ізольованих рейкових стиків з полімерно-композиційними, а також контрольними сталевими накладками за період з 2015 до 2018 року з урахуванням вимірних даних колієвимірювача геометрії колії та випробувань на прямолінійність. **Результати.** Проведено дослідження й діагностику експериментальних (із накладками зі склопластику) й контрольних (із накладками зі сталі) рейкових стиків (тести на прямолінійність, вимірювання геометрії колії за допомогою колієвимірювача). **Наукова новизна.** Застосування нового типу клейових ізольованих рейкових стиків із накладками, виготовленими з полімерно-композиційного пластику під високим тиском із регульованою температурою, дозволяє усунути виникнення електричного кола на накладках і передчасний утомний вигин, а також може ізолювати кінці рейок із точки зору електропровідності. **Практична значимість.** Клейові ізольовані рейкові стики з полімерно-композиційними й контрольними сталевими накладками були вбудовані в залізничну магістраль № 1 (Келенфельд–Хед'єшалом) в Угорщині на трьох різних залізничних станціях. Точний час, коли клейові ізольовані рейкові стики з полімерно-композиційними накладками досягають кінця свого терміну служби, за результатами попередніх досліджень визначити неможливо. У цій статті описано дослідження процесу зношення клейових ізольованих рейкових стиків.

*Ключові слова:* полімер-композит; накладки; рейковий стик; залізниця; польові випробування

А. НЕМЕС<sup>1\*</sup>, С. ФІШЕР<sup>2</sup><sup>1\*</sup>Каф. «Инфраструктура транспорта и гидротехника», Университет Иштвана Сечени, пл. Университетская, 1, Дьер, Венгрия, 9026, тел. + 36 (96) 613 544, эл. почта nemeth.attila@sze.hu, ORCID 0000-0002-3477-6902<sup>2\*</sup>Каф «Инфраструктура транспорта и гидротехника», Университет Иштвана Сечени, пл. Университетская, 1, Дьер, Венгрия, 9026, тел. + 36 (96) 613 544, эл. почта fischersz@sze.hu, ORCID 0000-0001-7298-9960

## ПОЛЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ КЛЕЕВЫХ ИЗОЛИРОВАННЫХ РЕЛЬСОВЫХ СТЫКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ И СТАЛЬНЫХ РЕЛЬСОВЫХ НАКЛАДОК

**Цель.** Основной целью данной статьи является сравнение поведения клеевых изолированных рельсовых стыков с полимерно-композиционными и контрольными стальными рельсовыми накладками (типа GTI и MTH-P). **Методика.** После проведения лабораторных испытаний (на сдвиг клеевых материалов, на трехточечный изгиб, на осевое растяжение), а также полевых проверок клеевые изолированные рельсовые стыки с тестируемыми полимерно-композиционными и контрольными стальными накладками были встроены в железнодорожные пути с (почти) одинаковыми граничными условиями (рельсовые профили, параметры поперечного сечения, состояние пути и т. д.). Авторы суммировали результаты полевых испытаний клеевых изолированных рельсовых стыков с полимерно-композиционными, а также контрольными стальными накладками за период с 2015 по 2018 г. с учетом полученных данных путеизмерителя геометрии пути и ис-

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

пытаний на прямолинейность. **Результаты.** Проведены исследования и диагностика экспериментальных (с накладками из стеклопластика) и контрольных (с накладками из стали) рельсовых стыков (тесты на прямолинейность, измерения геометрии пути с помощью путеизмерителя). **Научная новизна.** Применение нового типа клеевых изолированных рельсовых стыков с накладками, изготовленными из полимерно-композиционного пластика под высоким давлением с регулируемой температурой, позволяет устранить возникновение электрической цепи на накладках и преждевременный усталостный изгиб, а также может изолировать концы рельсов с точки зрения электропроводимости. **Практическая значимость.** Клеевые изолированные рельсовые стыки с полимерно-композиционными и контрольными стальными накладками были встроены в железнодорожную магистраль № 1 (Келенфельд–Хедьешалом) в Венгрии на трех различных железнодорожных станциях. Точное время, когда клеевые изолированные рельсовые стыки с полимерно-композиционными накладками достигают конца своего срока службы, по результатам предыдущих исследований, определить невозможно. В данной статье описано исследование процесса износа клеевых изолированных рельсовых стыков.

**Ключевые слова:** полимер-композит; накладки; рельсовый стык; железная дорога; полевые испытания

## REFERENCES

1. Kurhan, D. M. (2015). To the solution of problems about the railways calculation for strength taking into account unequal elasticity of the subrail base. *Science and Transport Progress*, 1(55), 90-99. doi: 10.15802/stp2015/38250 (in English)
2. Ciloglu, K., Frye, P. C., Almes, S., & Shue, S. (2014). *Advances in Bonded Insulated Rail Joints to Improve Product Performance, 2014 Joint Rail Conference*. Colorado Springs. Retrieved from <http://clc.am/k6j0lg> doi: 10.1115/jrc2014-3746 (in English)
3. Ágh, C. (2018). *A new arrangement of accelerometers on track inspection car FMK-007 for evaluating derailment safety, Track Maintenance Machines in Theory and Practice, SETRAS 2018*. Žilina. (in English)
4. Ágh, C. (2012). Egyenértékű kúposság mérése Magyarországon: Pálya és jármű kapcsolata – futási instabilitás. *Sínek világa*, 54(6), 10-13. (in Hungarian)
5. Ágh, C. (2018). Vágánygeometriai irány- és fekszinthibák valós nagyságának értékelése húrmérési eredmények alapján. *Közlekedéstudományi szemle*, 68(5), 46-55. (in Hungarian)
6. Ágh, C. (2017). Vasúti kerékpár futási instabilitása a pályadiagnosztika szemszögéből. *Sínek világa*, 59(6), 17-20. (in Hungarian)
7. Albakri, M. I. (2016). *Modeling and experimental analysis of piezoelectric augmented systems for structural health and stress monitoring applications*. (Dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering Mechanics). The Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg. (in English)
8. Plaut, R. H., Lohse-Busch, H., Eckstein, A., Lambrecht, S., & Dillard, D. A. (2007). Analysis of tapered, adhesively bonded, insulated rail joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 221(2), 195-204. doi: 10.1243/0954409jrrt107 (in English)
9. Askarinejad, H., Dhanasekar, M., & Cole, C. (2012). Assessing the Effects of Track Input to the Response of Insulated Rail Joints Using Field Experiments. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 227(2), 176-187. doi: 10.1177/0954409712458496 (in English)
10. Askarinejad, H., & Dhanasekar, M. (2015). Minimising the Failure of Rail Joints through Managing the Localised Condition of Track. *Railway Engineering 2015*. Edinburgh. Retrieved from <https://clck.ru/FNZKS> (in English)
11. Ataei, S., Mohammadzadeh, S., & Miri, A. (2016). Dynamic Forces at Square and Inclined Rail Joints: Field Experiments. *Journal of Transportation Engineering*, 142(9). Retrieved from <http://clc.am/Jx0xKw> doi: 10.1061/(asce)te.1943-5436.0000866 (in English)
12. El-sayed, H. M., Lotfy, M., El-din Zohny, H. N., & Riad, H. S. (2018). A three dimensional finite element analysis of insulated rail joints deterioration. *Engineering Failure Analysis*, 91, 201-215. doi: 10.1016/j.engfailanal.2018.04.042 (in English)
13. Bandula-Heva, T. M., Dhanasekar, M., & Boyd, P. (2012). Experimental Investigation of Wheel/Rail Rolling Contact at Railhead Edge. *Experimental Mechanics*, 53(6), 943-957. doi: 10.1007/s11340-012-9701-6 (in English)
14. Bongiorno, J., & Mariscotti, A. (2018). Track insulation verification and measurement. *MATEC Web of Conferences*, 180. Retrieved from <http://clc.am/L4nsTg> doi: 10.1051/mateconf/201818001008 (in English)

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

15. Mechanical requirements for joints in running rails: WG 18 / DG 11. (2010). Retrieved from: <https://mail.google.com/mail/u/0/#inbox/QgrcJHsHlltHGdfHRzQFTtBmPxKvlzMKthg?projector=1&messagePartId=0.6> (in English)
16. Chen, Y. C., & Kuang, J. H. (2002). Contact stress variations near the insulated rail joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 216(4), 265-273. doi: 10.1243/095440902321029217 (in English)
17. Cheng, Y., Liu, Z., & Huang, K. (2017). Transient Analysis of Electric Arc Burning at Insulated Rail Joints in High-Speed Railway Stations Based on State-Space Modeling. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 3(3), 750-761. doi: 10.1109/tte.2017.2713100 (in English)
18. Dhanasekar, M., & Bayissa, W. (2011). Performance of square and inclined insulated rail joints based on field strain measurements. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 226(2), 140-154. doi: 10.1177/0954409711415898 (in English)
19. Dhanasekar, M. (2015). Research outcomes for improved management of insulated rail joints. In Forde, M. C. (Ed.), *Railway Engineering* (pp. 1-14). Edingburgh, United Kingdom. (in English)
20. El-khateeb, L. (2017). *Defect-based Condition Assessment Model of Railway Infrastructure*. (A Thesis in The Department of Building, Civil and Environmental Engineering). Concordia University, Montreal. (in English)
21. Elshukri, F. A. (2016). *An Experimental Investigation and Improvement of Insulated Rail Joints (IRJs) end Post Performance*. (A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy). The University of Sheffield, Sheffield. (in English)
22. Elshukri, F. A., & Lewis, R. (2016). An Experimental Investigation and Improvement of Insulated Rail Joints. *Tribology in Industry*, 38(1), 121-126. (in English)
23. Elshukri, F. A., & Lewis, R. (2015). *An Experimental Investigation and Improvement of Insulated Rail Joints, 14th International Serbian Conference on Tribology, Serbiatrib'15*. Belgrade. (in English)
24. Oregui, M., Molodova, M., Núñez, A., Dollevoet, R., & Li, Z. (2015). Experimental Investigation Into the Condition of Insulated Rail Joints by Impact Excitation. *Experimental Mechanics*, 55(9), 1597-1612. doi: 10.1007/s11340-015-0048-7 (in English)
25. Boyd, P., Mandal, N., Bandula, T., Zong, N., & Dhanasekar, M. (2012). *Experimental Investigation into the Failure Behaviour of Insulated Rail Joints, Conference on Railway Engineering, CORE*. Brisbane. Retrieved from <https://clck.ru/FMM5c> (in English)
26. Beaty, P., Temple, B., Marshall, M. B., & Lewis, R. (2016). Experimental modelling of lipping in insulated rail joints and investigation of rail head material improvements. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 230(4), 1375-1387. doi: 10.1177/0954409715600740 (in English)
27. Fischer, Sz., & Németh, A. (2017). *Investigation of polymer-composite fishplated glued insulated rail joints in laboratory, as well as in field tests for dynamic effects: Research Report*. Győr: Universitas-Győr Nonprofit Ltd. (in Hungarian)
28. Lewis, S. R., Lewis, R., Goodwin, P. S., Fretwell-Smith, S., Fletcher, D. I., Murray, K., & Jaiswal, J. (2017). Full-scale testing of laser clad railway track; Case study – Testing for wear, bend fatigue and insulated block joint lipping integrity. *Wear*, 376-377, 1930-1937. doi: 10.1016/j.wear.2017.02.023 (in English)
29. Reffye, J. de, & Antoni, M. (2016). *Health monitoring on line of the impedance of the glued isolating joints to improve the availability of the French railway lines, 20e Congrès de maîtrise des risques et de sûreté de fonctionnement*. Saint-Malo. Retrieved from <https://clck.ru/FLzVH> (in English)
30. Himebaugh, A. K., Plaut, R. H., & Dillard, D. A. (2008). Finite element analysis of bonded insulated rail joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 28(3), 142-150. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2007.09.003 (in English)
31. Horvát, F. (2012). *Application of polymer-composite fishplates for glued insulated rail joints: Research Report*. Győr: Széchenyi István Egyetem. (in Hungarian)
32. Goto, K., Minoura, S., Watanabe, T., Ngamkhanong, C., & Kaewunruen, S. (2018). Impact Load Response of PC Rail Joint Sleeper under a Passing Train. *Journal of Physics: Conference Series*, 1106. Retrieved from <https://clck.ru/FPHtF> doi: 10.1088/1742-6596/1106/1/012008 (in English)
33. Kabo, E., Nielsen, J. C. O., & Ekberg, A. (2006). Prediction of dynamic train-track interaction and subsequent material deterioration in the presence of insulated rail joints. *Vehicle System Dynamics*, 44(sup1), 718-729. doi: 10.1080/00423110600885715 (in English)



## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

34. Kaewunruen, S., & Chiengson, C. (2018). Railway track inspection and maintenance priorities due to dynamic coupling effects of dipped rails and differential track settlements. *Engineering Failure Analysis*, 93, 157-171. doi: 10.1016/j.engfailanal.2018.07.009 (in English)
35. Kaewunruen, S., Aikawa, A., & Remennikov, A. M. (2017). Vibration Attenuation at Rail Joints through under Sleeper Pads. *Procedia Engineering*, 189, 193-198. doi: 10.1016/j.proeng.2017.05.031 (in English)
36. Kurhan, D. (2016). Determination of Load for Quasi-static Calculations of Railway Track Stress-strain State. *Acta Technica Jaurinensis*, 9(1), 83-96. doi: 10.14513/actatechjaur.v9.n1.400 (in English)
37. Mandal, N. K., & Peach, B. (2010). An Engineering Analysis of Insulated Rail Joints: A General Perspective. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2(8), 3964-3988. (in English)
38. Mandal, N. K. (2018). *Stress Analysis of Joint Bars of Insulated Rail Joints Due to Wheel/Rail Contact Loadings, the 11th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, CM2018*. Delft. (in English)
39. Mayers, A. (2017). The effect of heavy haul train speed on insulated rail joint bar strains. *Australian Journal of Structural Engineering*, 18(3), 148-159. doi: 10.1080/13287982.2017.1363977 (in English)
40. Rathod, C., Wexler, D., Chandra, T., & Li, H. (2012). Microstructural Characterisation of Railhead Damage in Insulated Rail Joints. *Materials Science Forum*, 706-709, 2937-2942. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.706-709.2937 (in English)
41. Oregui, M., Li, S., Núñez, A., Li, Z., Carroll, R., & Dollevoet, R. (2016). Monitoring bolt tightness of rail joints using axle box acceleration measurements. *Structural Control and Health Monitoring*, 24(2). Retrieved from <http://clc.am/gFvDkg> doi: 10.1002/stc.1848 (in English)
42. Nagy, R. (2017). Analytical differences between seven prediction models and the description of the rail track deterioration process through these methods. *Intersections*, 14(1), 14-32. (in English)
43. Nagy, R. (2017). *Analytical differences between six prediction models and the description of the rail track deterioration process through these methods, Computational Civil Engineering 2017, International Symposium*. Iasi. (in English)
44. Nagy, R. (2016). A vasúti pályageometria romlási folyamatának leírása. *Sínek világa*, 58(6), 12-18. (in Hungarian)
45. Nagy, R. (2017). Description of rail track geometry deterioration process in Hungarian rail lines No. 1 and No. 140. *Pollack Periodica*, 12(3), 141-156. doi: 10.1556/606.2017.12.3.13 (in English)
46. Zong, N., & Dhanasekar, M. (2017). Sleeper embedded insulated rail joints for minimising the number of modes of failure. *Engineering Failure Analysis*, 76, 27-43. doi: 10.1016/j.engfailanal.2017.02.001 (in English)
47. Németh, A., & Fischer, Sz. (2018). A polimer-kompozit hevederes ragasztott-szigetelt sínkötések (2. rész): Vasúti pályás vizsgálatok. *Sínek világa*, 60, 12-17. (in Hungarian)
48. Németh, A., & Fischer, Sz. (2018). Field tests of glued insulated rail joints with polymer-composite and steel fishplates. In B. Horváth, G. Horváth, B. Gábor (szerk.), *Technika és technológia a fenntartható közlekedés szolgálatában: Közlekedéstudományi Konferencia* (pp. 97-105). Győr: Universitas-Győr Nonprofit Kft. (in Hungarian)
49. Nichoga, V., Storozh, I., & Saldan, O. (2016). Defect Signal Detection within Rail Junction of Railway Tracks. *Problemy Kolejnictwa*, 171, 57-62. (in English)
50. Yang, Z., Boogaard, A., Wei, Z., Liu, J., Dollevoet, R., & Li, Z. (2018). Numerical study of wheel-rail impact contact solutions at an insulated rail joint. *International Journal of Mechanical Sciences*, 138-139, 310-322. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2018.02.025 (in English)
51. Nunez, A., Jamshidi, A., & Wang, H. (2019). Pareto-Based Maintenance Decisions for Regional Railways with Uncertain Weld Conditions Using the Hilbert Spectrum of Axle Box Acceleration. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(3), 1496-1507. doi: 10.1109/tii.2018.2847736 (in English)
52. Peltier, D. C., & Barkan, C. P. L. (2009). Characterizing and Inspecting for Progressive Epoxy Debonding in Bonded Insulated Rail Joints. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2117(1), 85-92. doi: 10.3141/2117-11 (in English)
53. Peltier, D. C., & Barkan, C. P. L. (2008). *Modeling the Effects of Epoxy Debonding on Bonded Insulated Rail Joints Subjected to Longitudinal Loads, 2008 TRB 87th Annual Meeting: Conference Recordings*. Washington. Retrieved from <http://clc.am/Q1cqpa> (in English)
54. Gallou, M., Temple, B., Hardwick, C., Frost, M., & El-Hamalawi, A. (2016). Potential for external reinforcement of insulated rail joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 232(3), 697-708. doi: 10.1177/0954409716684278 (in English)

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

55. Buggy, S. J., James, S. W., Staines, S., Carroll, R., Kitson, P., Farrington, D., ... Tatam, R. P. (2016). Railway track component condition monitoring using optical fibre Bragg grating sensors. *Measurement Science and Technology*, 27(5). Retrieved from <http://clc.am/OfQAnA> doi: 10.1088/0957-0233/27/5/055201 (in English)
56. Luzin, V., Rathod, C., Wexler, D., Boyd, P., & Dhanasekar, M. (2013). Residual Stresses in Rail-Ends from the in-Service Insulated Rail Joints Using Neutron Diffraction. *Materials Science Forum*, 768-769, 741-746. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.768-769.741 (in English)
57. Sandström, J., & Ekberg, A. (2008). Numerical study of the mechanical deterioration of insulated rail joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 223(3), 265-273. doi: 10.1243/09544097jrrt243 (in English)
58. Zong, N., Askarinejad, H., Heva, T. B., & Dhanasekar, M. (2013). Service Condition of Railroad Corridors around the Insulated Rail Joints. *Journal of Transportation Engineering*, 139(6), 643-650. doi: 10.1061/(asce)te.1943-5436.0000541 (in English)
59. Heckel, T., Casperson, R., Rühle, S., & Mook, G. (2018). Signal Processing for Non-Destructive Testing of Railway Tracks. *AIP Conference Proceedings*, 1949(1). Retrieved from <http://clc.am/jOUayQ> doi: 10.1063/1.5031528 (in English)
60. Soylemez, E., & Ciloglu, K. (2016). Influence of Track Variables and Product Design on Insulated Rail Joints. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2545(1), 1-10. doi: 10.3141/2545-01 (in English)
61. Sueki, T., Kitagawa, T., & Kawaguchi, T. (2017). Evaluation of Acoustic and Vibratory Characteristics of Impact Noise Due to Rail Joints. *Quarterly Report of RTRI*, 58(2), 119-125. doi: 10.2219/rtriqr.58.2\_119 (in English)
62. Sysyn, M. P., Kovalchuk, V. V., & Jiang, D. (2018). Performance study of the inertial monitoring method for railway turnouts. *International Journal of Rail Transportation*, 4, 33-42. doi: 10.1080/23248378.2018.1514282 (in English)
63. Szamos, A. (1991). *Structures and materials of railway superstructure*. Budapest: Köz dok. (in English)
64. Sysyn, M., Gerber, U., Kovalchuk, V., & Nabochenko, O. (2018). The complex phenomenological model for prediction of inhomogeneous deformations of railway ballast layer after tamping works. *Archives of Transport*, 47(3), 91-107. doi: 10.5604/01.3001.0012.6512 (in English)
65. Kovalchuk, V., Sysyn, M., Sobolevska, J., Nabochenko, O., Parneta, B., & Pentsak, A. (2018). Theoretical study into efficiency of the improved longitudinal profile of frogs at railroad switches. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/1(94), 27-36. doi: 10.15587/1729-4061.2018.139502 (in English)
66. Stephen, J., Hardwick, C., Beaty, P., Lewis, R., & Marshall, M. (2018). Ultrasonic monitoring of insulated block joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 233(3), 251-261. doi: 10.1177/0954409718791396 (in English)
67. Nicoli, E., Dillard, D. A., Dillard, J. G., Campbell, J., Davis, D. D., & Akhtar, M. (2011). Using standard adhesion tests to characterize performance of material system options for insulated rail joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 225(5), 509-522. doi: 10.1177/2041301710392481 (in English)
68. Wöhrhart, A. (2011). *ÖBB Infrastruktur AG: ÖBB Infrastruktur szigetelt kötés leírás. Nagyszilárdságú csavarkötéssel készült szigetelt sínillesztések*. Retrieved from <https://mail.google.com/mail/u/0/#inbox/QgrcJHsHlltHGdfHRzQFTtBmPxKvIzMKthg?projector=1&messagePartId=0.1> (in Hungarian)
69. Yang, Z., Deng, X., & Li, Z. (2019). Numerical modeling of dynamic frictional rolling contact with an explicit finite element method. *Tribology International*, 129, 214-231. doi: 10.1016/j.triboint.2018.08.028 (in English)
70. Zong, N., Wexler, D., & Dhanasekar, M. (2013). Structural and Material Characterisation of Insulated Rail Joints. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 13(1), 75-87. (in English)

Received: Nov. 16, 2018

Accepted: March 27, 2019

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

UDC 004.7.032.26:656.222.3

V. M. PAKHOMOVA<sup>1\*</sup>, T. I. SKABALLANOVICH<sup>2\*</sup>, V. S. BONDAREVA<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Electronic Computing Machines», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan 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, Lazaryan St., 2, 49010, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 373 15 89, e-mail sti19447@gmail.com, ORCID 0000-0001-9409-0139

<sup>3\*</sup>Dep. «Electronic Computing Machines», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, 49010, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 373 15 89, e-mail bond290848@gmail.com, ORCID 0000-0002-4016-1656

### INTELLIGENT ROUTING IN THE NETWORK OF INFORMATION AND TELECOMMUNICATION SYSTEM OF RAILWAY TRANSPORT

**Purpose.** At the present stage, the strategy of informatization of railway transport of Ukraine envisages the transition to a three-level management structure with the creation of a single information space, therefore one of the key tasks remains the organization of routing in the network of information and telecommunication system (ITS) of railway transport. In this regard, the purpose of the article is to develop a method for determining the routes in the network of information and telecommunication system of railway transport at the trunk level using neural network technology. **Methodology.** In order to determine the routes in the network of the information and telecommunication system of railway transport, which at present is working based on the technologies of the Ethernet family, one should create a neural model 21-1-45-21, to the input of which an array of delays on routers is supplied; as a result vector – build tags of communication channels to the routes. **Findings.** The optimal variant is the neural network of configuration 21-1-45-21 with a sigmoid activation function in a hidden layer and a linear activation function in the resulting layer, which is trained according to the Levenberg-Marquardt algorithm. The most quickly the neural network is being trained in the samples of different lengths, it is less susceptible to retraining, reaches the value of the mean square error of 0.2, and in the control sample determines the optimal path with a probability of 0.9, while the length of the training sample of 100 examples is sufficient. **Originality.** There were constructed the dependencies of mean square error and training time (number of epochs) of the neural network on the number of hidden neurons according to different learning algorithms: Levenberg-Marquardt; Bayesian Regularization; Scaled Conjugate Gradient on samples of different lengths. **Practical value.** The use of a multilayered neural model, to the entry of which the delay values of routers are supplied, will make it possible to determine the corresponding routes of transmission of control messages (minimum value graph) in the network of information and telecommunication system of railway transport at the trunk level in the real time.

**Keywords:** information and telecommunication system; ITS; router delay; neural network; NN; sample; activation function; learning algorithm; epoch; error

## Introduction

Until recently, the work of the railway transport of Ukraine was the interaction of six railways, on each of which an appropriate information and telecommunication system (ITS) was implemented. The main focus of the development of ITS rail networks is the use of Ethernet (Ethernet, Fast Ethernet, Gigabit Ethernet) family technologies that provide a 10/100/1000 Mbps hierarchy and the use of the TCP/IP protocol stack [9]. The most important part of ITS of railway transport is the data transmission network, which is a three-level hierarchical structure and has the following levels: trunk, road, linear. The node of the data transmission network belongs to the trunk level, if it includes, besides the connections to the nodes of the data transmission network of a particular railway, a connection to the nodes of the data transmission network of other railways. Local enterprise networks belong to the linear level, all other nodes of the data network – to the road level.

To build a unified data transmission network of Ukrzaliznytsia, the network equipment of Cisco [13], which is an integrated software and hardware complex, was selected. One of the key tasks is the organization of routing in the railway transport ITS network. The current routing protocol (OSPF protocol) uses the search for the shortest path on the graph, the real-time implementation of which causes some difficulties, so it is advisable to find solutions to the routing problem using the methods of artificial intelligence [10, 13-20] and study them [1-4, 7]. For example, for the search of the shortest path on the route graph in the railway transport ITS, we analyzed the possibility of using the Hopfield network, ant colony and genetic methods [8], for the integrated network of ITS of railway transport, that in the prospect should work on different technologies, we defined the optimal route by the means of the software model «MLP34-2-410-34», the input of which is an array of bandwidth network channels [17]. In addition to the parameters studied (distance between routers, channel bandwidth) it is appropriate to conduct a study of other parameters, such as: service availability; line losses; router delays.

## Purpose

To develop a routing methodology in the ITS network of rail transport at the trunk level using the neural network technology.

## Methodology

Let us consider a fragment of a hypothetical network of railway transport ITS presented in Fig. 1.

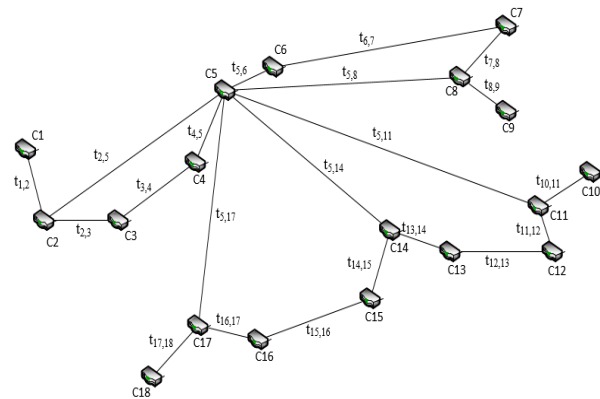


Fig. 1. Graph of routers connections of hypothetical network of information and telecommunication system (ITS) of railway transport

*Designations: C1 – Rivne; C2 – Lviv; C3 – Ternopil; C4 – Khmelnytskyi; C5 – Kyiv; C6 – Nizhyn; C7 – Poltava; C8 – Kharkiv; C9 – Sumy; C10 – Luhansk; C11 – Donetsk; C12 – Krasnoarmiisk; C13 – Chaplyne; C14 – Dnipro; C15 – Zaporizhzhia; C16 – Znamianka; C17 – Odesa; C18 – Izmail*

The ITS network of rail transport may be represented as a weighted graph  $G(V, W)$ , where  $V$  is the set of vertices of the graph whose number is equal to  $B$  ( $B = 18$ ), with each vertex modeling a node (router) of the network;  $W$  is the set of edges of the graph, each edge simulates the relationship between the nodes, the number of graph edges is equal to  $M$  ( $M = 21$ ).

Each edge of the graph is assigned with a certain weight  $t_{ij}$ . Since the channel transmission time is much smaller, it is expedient to use the router delay time when transmitting data from the  $i$ -th to  $j$ -th router of the ITS network of railway transport, as a weight, in  $\mu s$ .

It is necessary to determine the minimal spanning tree (MST) of the rail transport ITS network, that is, to find such a graph  $G'(V', W')$ , where  $V' \in V$  and  $W' \in W$ , in addition

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

$$\sum_{(i,j) \in W'} t_{i,j} \rightarrow \min. \quad (1)$$

The construction of MST is useful for distributing messages addressed to all nodes of the ITS network of rail transport at the trunk level, for example, the control messages from the main node (Kyiv), then the weight of the whole spanning tree is the cost of sending a message to all its nodes. It should also be noted that if all the weights of the graph edges are different then there is only one MST of the network.

*Neural network as the main mathematical device for solving the problem.* To determine the MST in the ITS network of rail transport, we used a two-layer neural network (NN), the input vector of which is a plurality of delays on routers and consists of 21 neurons, the resulting vector is build tags of communication channels to the routes, and also consists of 21 neurons. The corresponding NN structure is shown in Fig. 2.

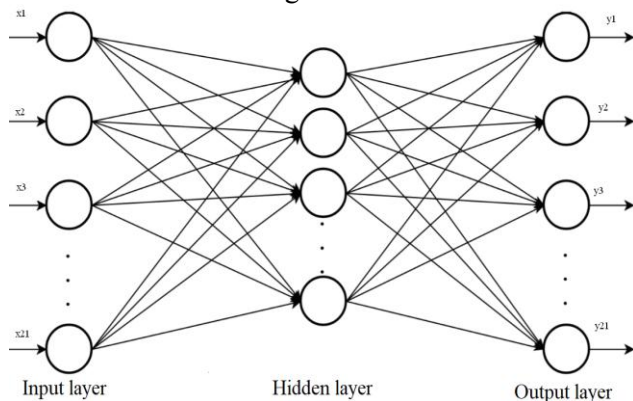


Fig. 2. Structure of the two-layer neural network (NN)

As an activation function of a hidden layer it is appropriate to use the sigmoidal function, which is presented in Fig. 3, *a*, in the resulting layer – a linear function shown in Fig. 3, *b*.

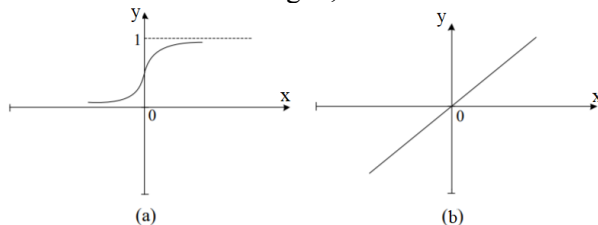


Fig. 3. Activation function graphs:  
*a* – sigmoid; *b* – linear

Determination of the number of neurons in NN layers is performed using the following formula:

$$\frac{mN}{1 + \log_2 N} \leq L_w \leq m\left(\frac{N}{m} + 1\right)(n + m + 1) + m \quad (2)$$

where  $L_w$  – the number of synaptic weights;  $n$  – input signal dimension;  $m$  – output signal dimension;  $N$  – the number of sample elements.

In this case  $210 \leq L_w \leq 4020$ . Having estimated the required number of synaptic weights  $L_w$ , we calculate the required number of neurons in the hidden layer  $k$  according to the known formula:

$$k = \frac{L_w}{m + n}. \quad (3)$$

If you take  $L_w = 1900$ , then the number of neurons in the hidden layer will be 45.

The training of a multi-layered NN involves the use of the reverse error propagation algorithm. The training samples are used for learning. The basis of NN training is the minimization of some target function, which depends on the parameters of the neurons and infinity of training samples. As a minimizing target error function of a multilayer NN, the function of the following type is taken:

$$E(w) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^H (G_{jl}(k) - Y_{jl}(k))^2, \quad (4)$$

where  $G_{jl}(k)$  – desired output of the  $j$ -th neuron of the  $l$ -th output layer for  $k$ -th sample of the reference set;  $Y_{ij}(k)$  – actual output of the  $j$ -th neuron of the  $l$ -th output layer when supplied to the  $k$ -th sample network input from the reference set.

*Preparation of the general sample (preparatory stage).* The formation of a general sample of NN was carried out for a fragment of a hypothetical network of railway ITS (see Fig. 1). Sample data are obtained on the corresponding simulation model of the ITS network of rail transport, created with assistance of the Master A. Piskun in modelling system OpNet Modeler [6] using Gigabit Ethernet technology under the following conditions: protocol – TCP; type of traffic – FTP; traffic intensity – 600 MB/s; package length – 700 bytes; operation time of the network simulation model – 14 min. Learning vectors are formed in the form of tables

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

using the Excel package in two files. In the first file «input.xml», the data submitted to the NN input, are presented in the form of 21 vectors; a fragment of contents of the file «input.xml» is shown in Fig. 4.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
t1,2	1821	1852	1887	1912	1944	2010	1979	2001	2109	2158	213
t2,3	1769	2492	1803	1827	1858	1921	1891	1912	2015	2904	290
t2,5	2117	2153	2194	2224	2262	2338	2302	2327	2452	2510	248
t3,4	2450	1799	2539	2539	2539	1679	2663	2663	2663	2062	204
t4,5	1521	1547	1576	1597	1624	2705	1653	1671	1761	1802	178
t5,6	1487	1512	1541	1562	2811	1615	1590	1607	1693	1733	171
t5,8	2084	2119	2159	2188	2225	2300	2264	2289	2412	2469	244
t5,11	2311	2350	2395	2427	2468	2551	2511	2538	2674	2737	271
t5,14	2037	2072	2111	2139	2175	2248	2213	2237	2357	2412	238
t5,17	2201	2238	2281	2312	2351	2430	2392	2418	2548	2608	258
t6,7	2631	2676	2727	2764	1589	2906	2861	2892	1854	3047	301
t7,8	1601	1628	1659	1681	1710	1768	1740	1759	3047	1897	187

Fig. 4. Fragment of contents of the file «input.xml»

In the second file «target.xml», the data submitted to the NN output are also represented as 21 vectors; a fragment of contents of the «target.xml» file is shown in Fig. 5.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
t1,2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
t2,3	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1
t2,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
t3,4	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0
t4,5	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
t5,6	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
t5,8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
t5,11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
t5,14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
t5,17	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
t6,7	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1
t7,8	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1

Fig. 5. Fragment of contents of the file «target.xml»

*Creating a neural network.* Neural Network Toolbox for the MatLab environment was chosen as a neural package to solve the problem of routing the rail transport ITS network. Using Import Data on the Matlab toolbar, the data were imported from the created Excel-table. Training, testing and analysis of NN work are carried out on appropriate samples (Training, Testing and Validation), whose percentage from the general sample is shown in Fig. 6.

The «Network Architecture» window provides the required number of hidden neurons (Figure 7).

Fig. 8 shows the structure of the created neural network.

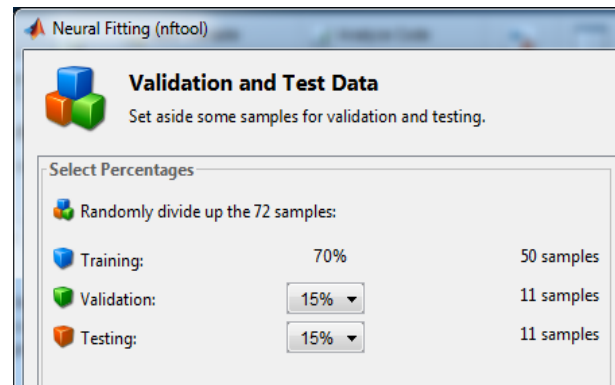


Fig. 6. Data validation and testing window

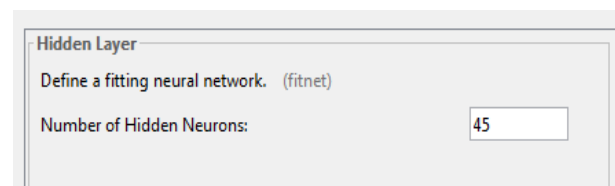


Fig. 7. Setting the hidden neurons

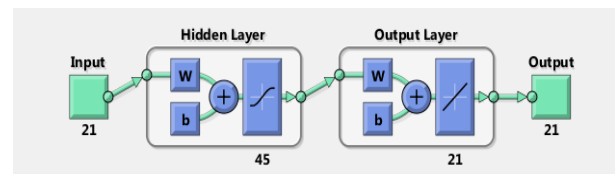


Fig. 8. Structure of the created NN

*Teaching and testing of neural network.* In the Train Network window, one of the three proposed learning algorithms for the NN (Levenberg-Marquardt, Bayesian Regularization, and Scaled Conjugate Gradient) is selected. For example, learning of the 21-1-45-21 configuration NN by the Levenberg-Marquardt algorithm took place during 11 epochs, the time spent was 26 s (Fig. 9).

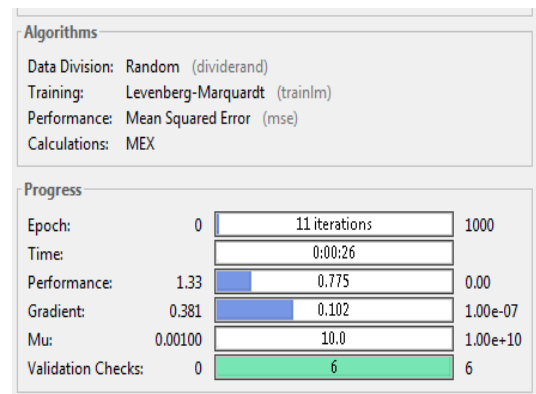


Fig. 9. Characteristics of the NN training



## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

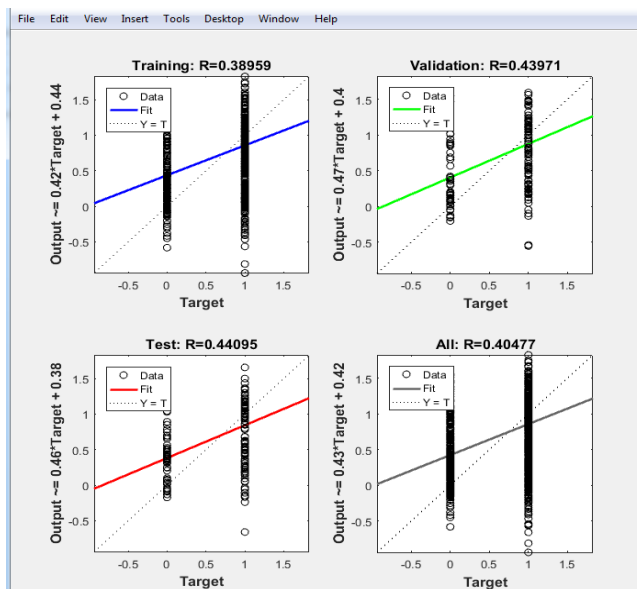
Mean Squared Error (MSE) is the mean square deviation between output and target; the lower the value, the better; zero means no error. The value of regression  $R$  means the correlation between output and target. If  $R = 1$ , this means close correlation, zero is a random relationship. The MSE values of training, validation and testing of the neural network made 0.204, 0.186 and 0.183, respectively;  $R$  has a value of 0.38, 0.43 and 0.44, respectively (Fig. 10).

	Samples	MSE	R
Training:	50	2.04886e-1	3.89591e-1
Validation:	11	1.86199e-1	4.39712e-1
Testing:	11	1.83325e-1	4.40948e-1

Fig. 10 Results of the NN 21–1–45–21

Regression diagrams and error histograms of the 21-1-45-21 configuration NN by the Levenberg-Marquardt algorithm are presented in Fig. 11.

a



b

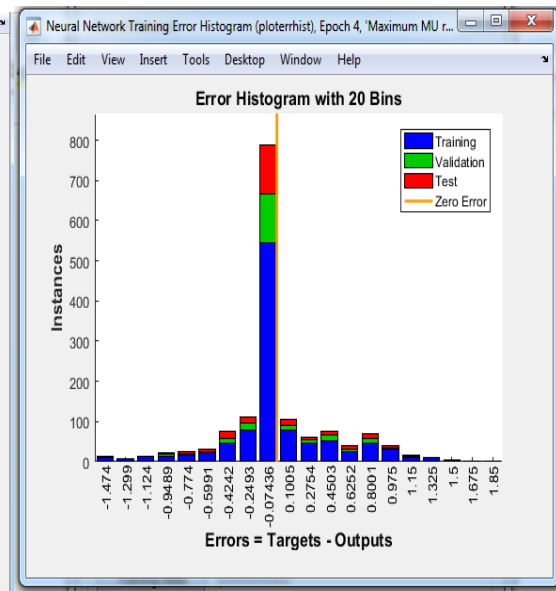


Fig. 11. Graphical presentation of results of NN 21-1-45-21:

a – regression diagrams; b – error histogram

## Findings

*Analysis of the neural network operation.* Based on the results obtained on the 21-1-45-21 configuration NN, the MST of the ITS network of railway transport was built and presented in Fig. 12 (the bold line shows the route for sending control messages from Kyiv).

According to the Kruskal algorithm [5] (without using NN), the MST of the ITS network of railway transport was built, as shown in Fig. 13.

As can be seen from Fig. 12-13, the results coincided, that is, the NN of configuration 21-1-45-21 works correctly. Ten launches were conducted

on this NN, the data obtained are summarized in Table 1.

From the table it is clear that the probability of building the MST of the ITS network of rail transport is 0.9 (experiments No. 1-2, 4-10), here-with in experiment No. 7 another MST was obtained (different edges had the same value of weight), but the solution is correct (Fig. 14), but in experiment No. 3, the solution provided by the NN is, unfortunately, incorrect (gap in the route: separation of C1-C2-C3 fragment from C5, which is the source of sending control messages), Fig. 15.



## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

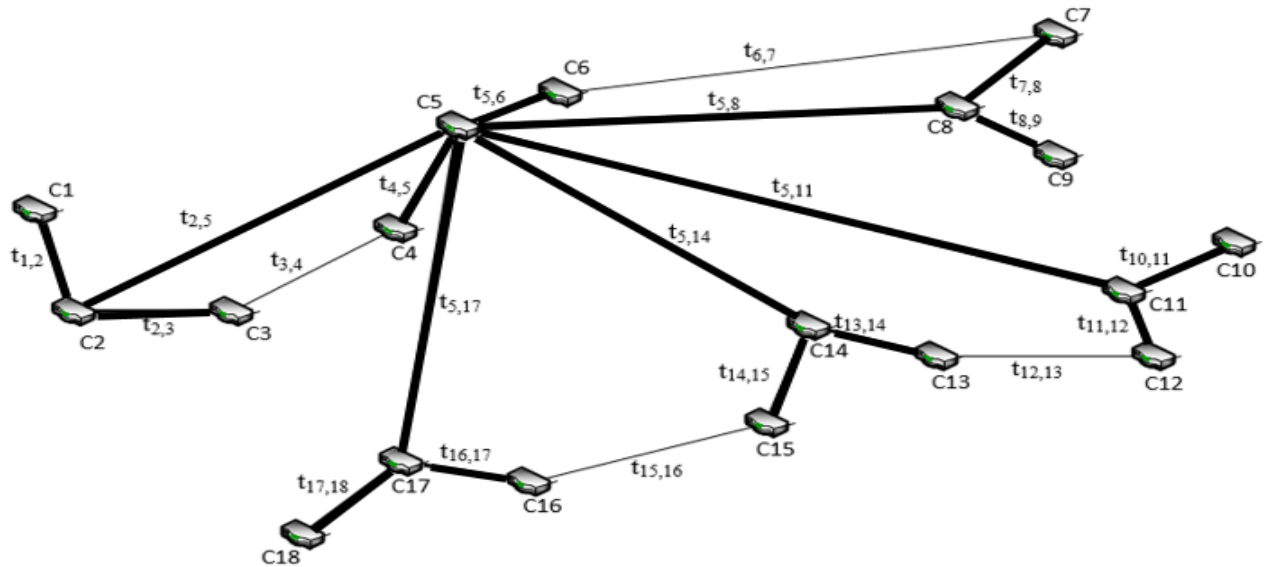
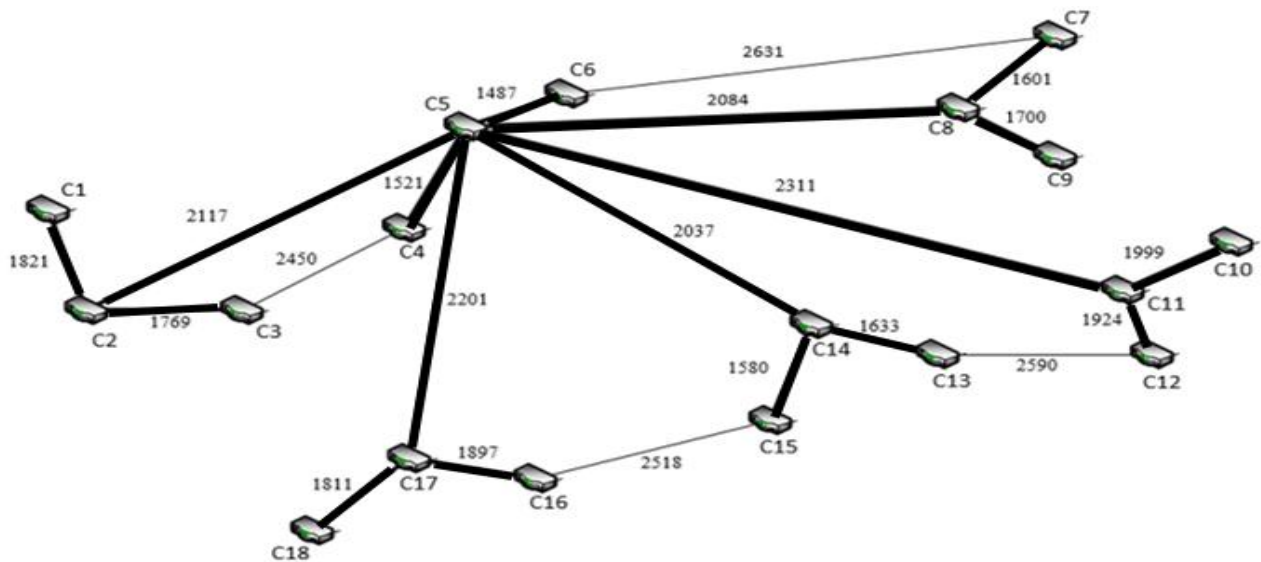


Fig. 12. MST of the ITS network based on NN

Fig. 13. MST the ITS network, built by the Kruskal algorithm  
Designations: edge weights – delays on ITS network routers,  $\mu$ s

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Table 1

## Analysis of operation of 21-1-45-21 configuration NN

Edge weigh t	Organization of experiments on NN																			
	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10	
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
$t_{1,2}$	1 828	1	1 859	1	1 895	1	2 549	1	2 549	1	1 686	1	2 674	1	2 674	1	2 674	1	2 070	1
$t_{2,3}$	1 776	1	2 502	1	1 810	1	1 603	1	1 630	1	2 716	1	1 660	1	1 678	1	1 768	1	1 809	1
$t_{2,5}$	2 125	1	2 162	1	2 549	1	1 568	1	2 822	1	1 621	1	1 596	1	1 613	1	1 700	1	1 740	1
$t_{3,4}$	2 460	0	1 806	0	2 598	0	2 197	0	2 234	0	2 309	0	2 273	0	2 298	0	2 422	0	2 479	0
$t_{4,5}$	1 527	1	1 553	1	1 582	1	2 437	1	2 478	1	2 561	1	2 521	1	2 548	1	2 685	1	2 748	1
$t_{5,6}$	1 493	1	1 518	1	1 547	1	2 148	1	2 184	1	2 257	1	2 222	1	2 246	1	2 366	1	2 422	1
$t_{5,8}$	2 092	1	2 127	1	2 168	1	2 321	1	2 360	1	2 440	1	2 402	1	2 428	1	2 558	1	2 618	1
$t_{5,11}$	2 320	1	2 359	1	2 405	1	2 775	1	1 595	1	2 918	1	2 872	1	2 904	1	1 861	1	3 059	1
$t_{5,14}$	2 045	1	2 080	1	2 119	1	1 688	1	1 717	1	1 775	1	1 747	1	1 766	1	3 059	1	1 905	1
$t_{5,17}$	2 210	1	2 247	1	2 290	1	1 793	1	1 823	1	1 885	1	1 855	1	1 875	1	1 976	1	2 022	1
$t_{6,7}$	2 642	0	2 687	0	2 738	0	2 108	0	2 145	0	2 217	0	2 183	0	2 207	0	2 325	0	2 379	0
$t_{7,8}$	1 607	1	1 635	1	1 666	1	2 029	1	2 063	1	2 132	1	2 099	1	2 856	1	2 237	1	2 289	1
$t_{8,9}$	1 707	1	1 736	1	1 769	1	1 723	1	1 752	1	2 870	1	2 825	1	2 122	1	3 010	1	3 080	1
$t_{10,11}$	2 007	1	2 041	1	2 080	1	2 731	1	2 777	1	1 811	1	1 783	1	1 802	1	1 899	1	1 943	1
$t_{11,12}$	1 932	1	1 965	1	2 002	1	1 667	1	1 695	1	1 752	1	2 749	1	1 744	1	1 837	1	1 880	1
$t_{12,13}$	2 600	0	2 645	0	2 695	0	2 656	0	2 701	0	2 792	0	1 725	0	2 779	0	2 929	0	2 255	0
$t_{13,14}$	1 640	1	1 668	1	1 700	1	2 000	1	2 034	1	2 102	1	2 069	1	2 091	1	2 204	1	2 997	1
$t_{14,15}$	1 586	1	1 613	1	1 645	1	1 910	1	1 942	1	2 007	1	1 976	0	1 997	1	2 104	1	2 154	1
$t_{15,16}$	2 528	0	2 571	0	1 974	1	2 549	0	2 549	0	1 686	0	2 692	1	2 564	0	2 642	0	2 070	0
$t_{16,17}$	1 905	1	1 937	1	2 620	0	1 628	1	1 647	1	2 756	1	1 658	1	1 678	1	1 771	1	1 816	1
$t_{17,18}$	1 818	1	1 849	1	1 885	1	1 583	1	2 872	1	1 692	1	1 596	1	1 627	1	1 707	1	1 756	1
MAS	+		+				+		+		+		+		+		+		+	
Correct solution													+							
Incorrect solution					+															

Note: Delay values on routers in the ITS network of rail transport are given in  $\mu s$

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

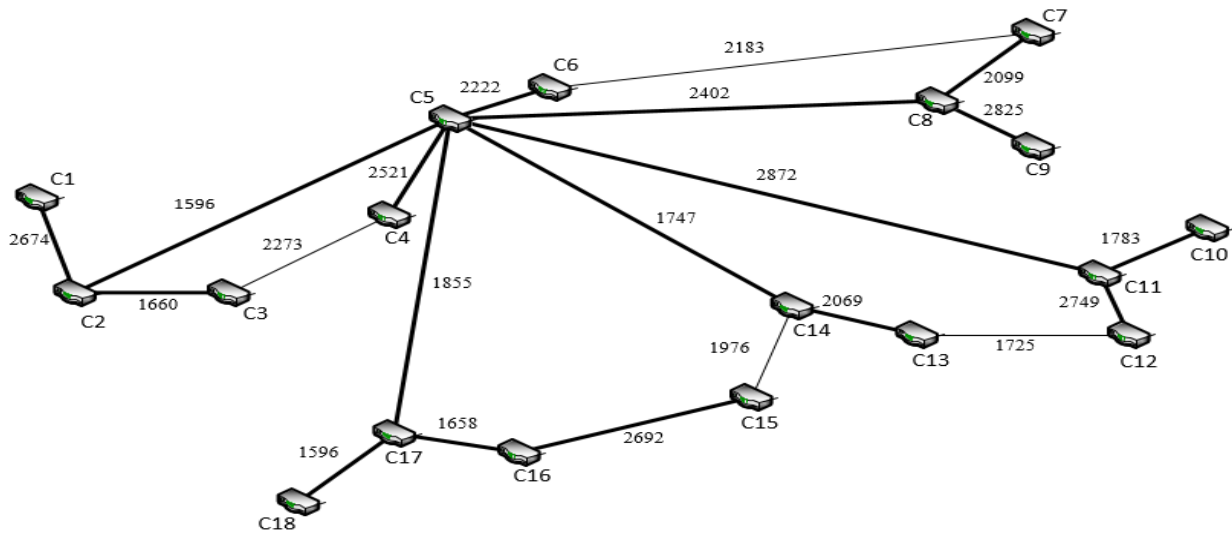


Fig. 14. MST of the ITS network built on the basis of NN (experiment No. 7)  
Designations: edge weights – delays on ITS network routers,  $\mu\text{s}$

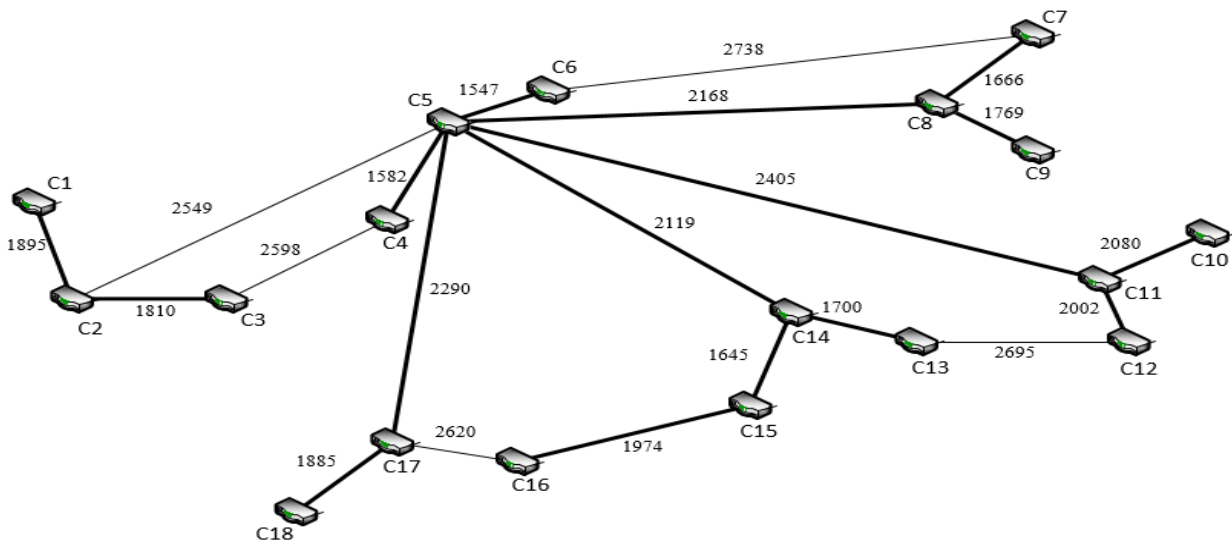


Fig. 15. Incorrect solution obtained on NN (experiment No. 3)  
Designations: edge weights – delays on ITS network routers,  $\mu\text{s}$

### Originality and practical value

*Study of the error and time of NN training on the number of hidden neurons by different learning algorithms.* Experiments were performed on the NN of 21-1-X-21 configuration with a sigmoidal activation function in the hidden layer and a linear

activation function in the output layer at 10, 45 and 90 hidden neurons using the following algorithms: Levenberg-Marquardt; Bayesian Regularization; Scaled Conjugate Gradient. The results obtained are summarized in Table 2.

Table 2

**Error and time of NN training on the number of hidden neurons**

Number of hidden neurons	Levenberg-Marquardt		Bayesian Regularization		Scaled Conjugate Gradient	
	MSE	Number of epochs	MSE	Number of epochs	MSE	Number of epochs
10	0.775	2	0.392	4	0.00770	125
45	0.204	11	0.870	5	0.00015	154
90	0.991	29	1.270	6	0.00004	302

The dependence of error and time of NN training on the number of hidden neurons by different learning algorithms is presented in Fig. 16

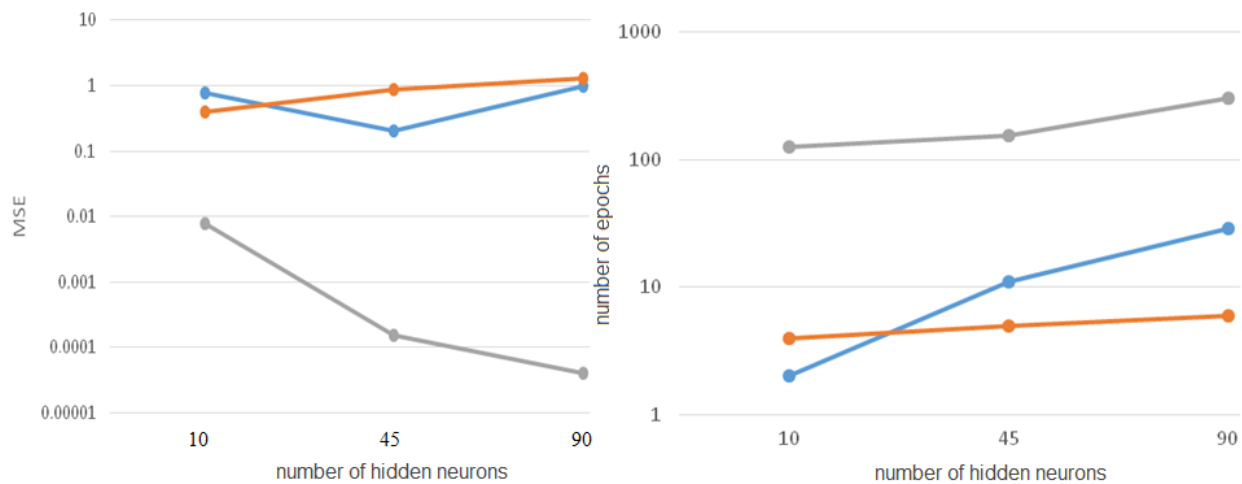


Fig. 16. MSE and NN training time versus the number of hidden neurons

Designations:



From Fig.16 it can be seen that with the increased number of neurons in the hidden layer, the time of training for the 21-1-X-21 configuration NN increases, with 45 neurons in the hidden layer being optimal by the Levenberg-Marquardt algorithm.

*Study of the error and time of training NN on the length of the training sample by the Levenberg-Marquardt algorithm.* Experiments were performed on the 21-1-45-21 configuration NN with a sigmoid activation function in the hidden layer and a linear activation function in the output layer, while the length of the training sample was 50, 100 and 152 examples. Dependence of the error and time of training of the NN on the length of the

training sample is presented in Fig. 17. The Figure shows that the increased length of the training sample results in decrease in the root mean square error, while the training time of NN increases rapidly, but the use of the sample with 100 examples for the NN training is sufficient.

The use of a multilayered neural model, to the entry of which the delay values of routers are supplied, will make it possible to determine the corresponding routes of transmission of control messages from Kyiv (minimum value graph) in the ITS network of railway transport at the trunk level in the real time.

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

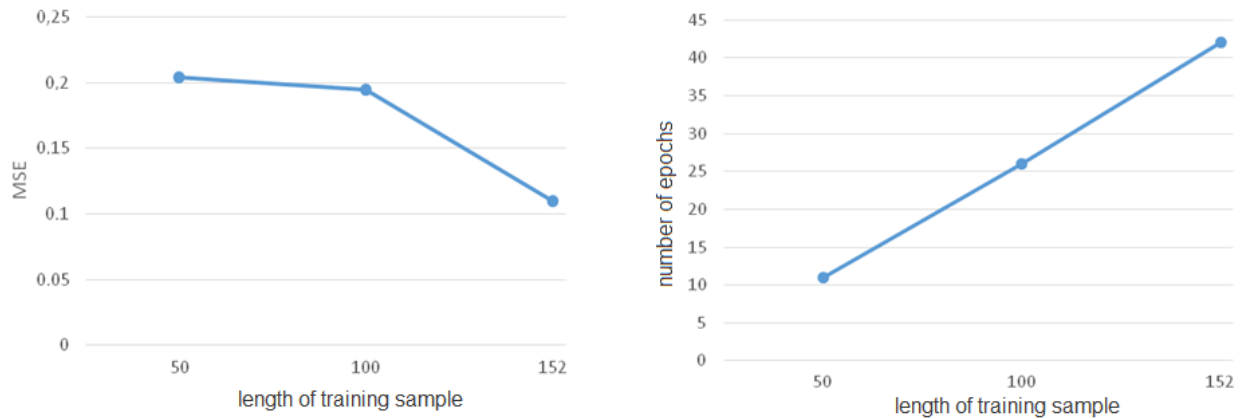


Fig. 17. MSE and NN training time versus the training sample length

### Conclusions

1. To determine routes for sending the control messages in the ITS network (at the trunk level) of railway transport using the Neural Network Toolbox of the Matlab environment the neural network of configuration 21-1-45-21 is created, to the input of which an array of delays on the routers is supplied; as a result vector – build tags of communication channels to the routes.

2. The neural network of configuration 21-1-45-21 with a sigmoidal activation function in the hidden layer and a linear function in the resulting layer under the learning algorithm of Levenberg-Marquardt for 11 epochs gives the MSE value of 0.204, 0.186 and 0.183 in the training, validation and testing samples, respectively. The result given by the neural network coincides with the graph obtained by the Kruskal algorithm. In addition, 10 experiments on the neural network were

conducted: the correct result is achieved with a probability of 0.9.

3. On the 21-1-X-21 neural network, a study was made of the mean square error and time of training on the number of hidden neurons (10, 45 and 90) under different learning algorithms: Levenberg-Marquardt, Bayesian Regularization, and Scaled Conjugate Gradient. It is determined that the optimal variant is the configuration 21-1-45-21 by the Levenberg-Marquardt algorithm.

4. On the 21-1-45-21 configuration neural network, there was conducted the study of the mean square error and the time of training depending on the length of the training sample: 50, 100 and 152 examples using the Levenberg-Marquardt algorithm. It is determined that the increased length of the training sample results in decrease in the root mean square error, while the training time of the neural network increases rapidly, but the use of the sample with 100 examples for its training is sufficient.

### 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. Білоус, Р. В. Особливості прикладного застосування генетичного алгоритму пошуку оптимальних шляхів / Р. В. Білоус, С. Д. Погорілий // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2010. – Т. 12, № 2. – С. 81–87.
3. Колесников, К. В. Нейросетевые модели оптимизации маршрутов доставки данных в динамических сетях / К. В. Колесников, А. Р. Карапетян, А. С. Курков // Международный научный журнал. – 2015. – № 6. – С. 74–77.
4. 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.

Creative Commons Attribution 4.0 International

doi: 10.15802/stp2019/166092

© V. M. Pakhomova, T. I. Skaballanovich, V. S. Bondareva, 2019

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

5. Минимальное остовное дерево. Алгоритм Крускала [Electronic resource] // MAXimal. – 2008. – Available at: [http://e-maxx.ru/algo/mst\\_kruskal](http://e-maxx.ru/algo/mst_kruskal) – Title from the screen. – Accepted : 15.05.2018.
6. Никитченко, В. В. Утилиты моделирующей системы Opnet Modeler / В. В. Никитченко. – Одесса : Одес. нац. акад. связи им. А. С. Попова, 2010. – 128 с.
7. 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. – Accepted : 20.11.2018.
8. Пахомова, В. М. Аналіз методів з природними механізмами визначення оптимального маршруту в комп'ютерній мережі Придніпровської залізниці / В. М. Пахомова, Р. О. Лепеха // Інформ.-керуючі системи на заліз. трансп. – 2014. – № 4. – С. 82–91.
9. Пахомова, В. М. Дослідження інформаційно-телекомунікаційної системи залізничного транспорту з використанням штучного інтелекту : монографія / В. М. Пахомова. – Дніпро : Стандарт-Сервіс, 2018. – 220 с.
10. Погорілий, С. Д. Генетичний алгоритм розв'язання задачі маршрутизації в мережах / С. Д. Погорілий, Р. В. Білоус // Проблеми програмування. – 2010. – № 2-3. – С. 171–178.
11. 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.
12. CiscoTips [Electronic resource] : [веб-сайт]. – Електрон. текст. дані. – Available at: <http://ciscotips.ru/ospf> – Title from the screen. – Accepted : 20.05.2018.
13. Dorigo, M. Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem / M. Dorigo, L. M. Gambardella // IEEE Trans. on Evolutionary Computation. – 1997. – Vol. 1. – Iss. 1. – P. 53–66. doi: 10.1109/4235.585892
14. 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
15. Neural Network Based Near-Optimal Routing Algorithm / Chang Wook Ahn, R. S. Ramakrishna, In Chan Choi, Chung Gu Kang // Neural Information Processing – ICONIP'02 : Proc. of the 9th Intern. Conf. (18–22 Nov. 2002). – Singapore, 2002. – P. 1771–1776.
16. 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
17. 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
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'kyu, I. Research of Token Ring network options in automation system of marshalling yard / I. Zhukovyts'kyu, V. Pakhomova // Transport Problems. – 2018. – Vol. 13. – Iss. 2. – P. 145–154. doi: 10.20858/tp.2018.13.2.14

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

В. М. ПАХОМОВА<sup>1\*</sup>, Т. І. СКАБАЛЛАНОВИЧ<sup>2\*</sup>, В. С. БОНДАРЕВА<sup>3\*</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, 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 sti19447@gmail.com, ORCID 0000-0001-9409-0139

<sup>3\*</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 bond290848@gmail.com, ORCID 0000-0002-4016-1656

## ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ МАРШРУТІВ У МЕРЕЖІ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

**Мета.** На сучасному етапі стратегія інформатизації залізничного транспорту України передбачає перехід на трирівневу структуру керування зі створенням єдиного інформаційного простору, тому однією із ключових задач залишається організація маршрутизації в мережі інформаційно-телекомунікаційної системи (ІТС). У зв'язку з цим метою статті є розроблення методики визначення маршрутів у мережі інформаційно-телекомунікаційної системи залізничного транспорту на магістральному рівні з використанням нейромережної технології. **Методика.** Для визначення маршрутів у мережі інформаційно-телекомунікаційної системи залізничного транспорту, що на сучасному етапі працює за технологіями родини Ethernet, створено нейронну модель 21–1–45–21, на вхід якої подають масив затримок на маршрутизаторах. За результуючий вектор взяті ознаки входження каналів зв'язку до маршрутів. **Результати.** Оптимальним варіантом є нейронна мережа (НМ) конфігурації 21–1–45–21 із сигмоїдальною функцією активації у прихованому шарі й лінійною функцією активації у результуючому шарі, що навчається за алгоритмом Levenberg-Marquardt. Нейронна мережа навчається найбільш швидко на вибірках різної довжини, менше за інші піддається перенаванчання, досягає значення середньоквадратичної помилки в 0,2 і на контрольній вибірці визначає оптимальний шлях з імовірністю 0,9, при цьому достатньо довжини навчальної вибірки зі 100 прикладів. **Наукова новизна.** Побудовані залежності середньоквадратичної похибки й часу навчання нейронної мережі (кількості епох) від кількості прихованих нейронів за алгоритмами навчання Levenberg-Marquardt, Bayesian Regularization, Scaled Conjugate Gradient на вибірках різної довжини. **Практична значимість.** Використання багатoshарової нейронної моделі, на вхід якої подають значення затримок на маршрутизаторах, дозволить у масштабі реального часу визначити відповідні маршрути передачі керівних повідомлень (граф мінімальної вартості) в мережі інформаційно-телекомунікаційної системи залізничного транспорту на магістральному рівні.

**Ключові слова:** інформаційно-телекомунікаційна система; ІТС; затримка на маршрутизаторі; нейронна мережа; НМ; вибірка; функція активації; алгоритм навчання; епоха; похибка

В. Н. ПАХОМОВА<sup>1\*</sup>, Т. І. СКАБАЛЛАНОВИЧ<sup>2\*</sup>, В. С. БОНДАРЕВА<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Электронные вычислительные машины», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, эл. почта viknikpakh@gmail.com, ORCID 0000-0002-0022-099X

<sup>2\*</sup>Каф. «Электронные вычислительные машины», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, эл. почта sti19447@gmail.com, ORCID 0000-0001-9409-0139

<sup>3\*</sup>Каф. «Электронные вычислительные машины», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, эл. почта bond290848@gmail.com, ORCID 0000-0002-4016-1656



## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ МАРШРУТОВ В СЕТИ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОМУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

**Цель.** На современном этапе стратегия информатизации железнодорожного транспорта Украины предусматривает переход на трехуровневую структуру управления с созданием единого информационного пространства, поэтому одной из ключевых задач остается организация маршрутизации в сети информационно-телекоммуникационной системы (ИТС). В связи с этим целью статьи является разработка методики определения маршрутов в сети информационно-телекоммуникационной системы железнодорожного транспорта на магистральном уровне с использованием нейросетевой технологии. **Методика.** Для определения маршрутов в сети информационно-телекоммуникационной системы железнодорожного транспорта, которая на данном этапе работает по технологиям семейства Ethernet, создано нейронную модель 21–1–45–21, на вход которой подаются массив задержек на маршрутизаторах сети. В качестве результирующего вектора приняты признаки включения каналов связи до маршрутов. **Результаты.** Оптимальным вариантом является нейронная сеть (НС) конфигурации 21–1–45–21 с сигмоидальной функцией активации в скрытом слое и линейной функцией активации в результирующем слое, обучаемая по алгоритму Levenberg-Marquardt. Нейронная сеть обучается наиболее быстро на выборках любой длины, менее других подвержена переобучению, достигает значения среднеквадратичной ошибки в 0,2 и на контрольной выборке определяет оптимальный путь с вероятностью 0,9, при этом достаточно длины обучающей выборки со 100 примеров. **Научная новизна.** Построены зависимости среднеквадратичной погрешности и времени обучения нейронной сети (количества эпох) от количества скрытых нейронов по алгоритмам обучения Levenberg-Marquardt, Bayesian Regularization, Scaled Conjugate Gradient на выборках различной длины. **Практическая значимость.** Использование многослойной нейронной модели, на вход которой подаются значения задержек на маршрутизаторах, позволит в масштабе реального времени определить соответствующие маршруты передачи управляющих сообщений (граф минимальной стоимости) в сети информационно-телекоммуникационной системы железнодорожного транспорта на магистральном уровне.

**Ключевые слова:** информационно-телекоммуникационная система; ИТС; задержка на маршрутизаторе; нейронная сеть; НС; выборка; функция активации; алгоритм обучения; эпоха; погрешность

### 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. Bilous, R. V., & Pohorilyi, S. D. (2010). Features of the Application of Genetic Algorithm for Searching Optimal Paths on the Graph. *Reiestratsiia, zberihannia i obrobka danykh*, 12(2), 81–87. (in Ukrainian)
3. Kolesnikov, K. V., Karapetyan, A. R., & Kurkov, A. S. (2015). Neural network models of data delivery route optimization in dynamic networks. *International Scientific Journal*, 6, 74–77. (in Russian)
4. Kolesnikov, K. V., Karapetian, A. R., & Bahan, V. Y. (2016). Analiz rezultativ doslidzhennia realizatsii zadachi marshrutyzatsii na osnovi neironnykh merezh ta henetychnykh alhorytmiv. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. Seria: Tehnichni nauky*, 1, 28–34. (in Ukrainian)
5. Minimalnoe ostovnoe derevo. Algoritm Kruskala. *MAXimal*. Retrieved from [http://e-maxx.ru/algo/mst\\_kruskal](http://e-maxx.ru/algo/mst_kruskal) (in Russian)
6. Nikitchenko, V. V. (2010). *Utility modeliruyushchey sistemy Opnet Modeler*. Odessa: Odesskaya natsionalnaya akademiya svyazi im. A. S. Popova. (in Russian)
7. Pavlenko, M. A. (2011). Analysis opportunities of artificial neural networks for solving single-path routing in telecommunication network. *Problemy telekomunikatsii*, 2(4). Retrieved from <http://pt.journal.kh.ua/index/0-139> (in Russian)
8. Pakhomova, V. M., & Lepekha, R. O. (2014). Analiz metodiv z pryrodnyimi mekhanizmami vyznachennia optymalnogo marshrutu v komp'yuternii merezhi Prydniprovskoi zaliznytsi. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, 4, 82–91. (in Ukrainian)
9. Pakhomova, V. M. (2018). *Doslidzhennia informatsiino-telekomunikatsiinoi systemy zaliznychnoho transportu z vykorystanniam shtuchnogo intelektu: monohrafiia*. Dnipro: Standart-Servis. (in Ukrainian)
10. Pohorilyi, S. D., & Bilous, R. V. (2010). Henetychnyi alhorytm rozv'iazannia zadachi marshrutyzatsii v merezhakh. *Problemy prohranuvannia*, 2–3, 171–178. (in Ukrainian)

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

11. Bryndas, A. M., Rozhak, P. I., Semenyshyn, N. O., & Kurka, R. R. (2016). Realizatsiia zadachi vyboru optymalnoho aviamarshrutu neironnoiui merezheiu Khopfilda. *The Scientific Bulletin of UNFU*, 26.1, 357-363. (in Ukrainian)
12. CiscoTips. Retrieved from <http://ciscotips.ru/ospf> (in English)
13. Dorigo, M., & Gambardella, L. M. (1997). Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1(1), 53-66. doi: 10.1109/4235.585892 (in English)
14. Hopfield, J. J. (1982). Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 79(8), 2554-2558. doi: 10.1073/pnas.79.8.2554 (in English)
15. Chang Wook Ahn, Ramakrishna, R. S., In Chan Choi, & Chung Gu Kang. (n.d.). *Neural network based near-optimal routing algorithm, Proceedings of the 9th International Conference on Neural Information Processing, 2002, ICONIP'02*. Singapore. doi: 10.1109/iconip.2002.1198978 (in English)
16. Kojic, N., Zajeganovic-Ivancic, M., Reljin, I., & Reljin, B. (2010). New algorithm for packet routing in mobile ad-hoc networks. *Journal of Automatic Control*, 20(1), 9-16. doi: 10.2298/jac1001009k (in English)
17. 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: 10.15802/stp2018/154443 (in Ukrainian)
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: 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)*. Berlin, Germany. doi: 10.1109/nfv-sdn.2017.8169844 (in English)
20. Zhukovyts'kyi, I., & Pakhomova, V. (2018). Research of Token Ring network options in automation system of marshalling yard. *Transport Problems*, 13(2), 145-154. doi: 10.20858/tp.2018.13.2.14 (in English)

Received: Nov. 05, 2018

Accepted: March 14, 2019

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 669.245:620.193.5

А. А. ГЛОТКА<sup>1\*</sup>, С. В. ГАЙДУК<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Физическое материаловедение», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, Запорожье, Украина, 69063, тел. +38 (061) 769 82 84, +38 (061) 769 82 82, эл. почта glotka-alexander@ukr.net, ORCID 0000-0002-3117-2687

<sup>2</sup>Каф. «Физическое материаловедение», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, Запорожье, Украина, 69063, тел. +38 (061) 769 82 84, +38 (061) 769 82 82, эл. почта gayduksv@gmail.com, ORCID 0000-0002-5724-9566

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СВОЙСТВ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

**Цель.** Работа предполагает получение прогнозирующих регрессионных моделей, с помощью которых можно адекватно рассчитывать механические свойства монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) без проведения предварительных экспериментов. **Методика.** Для проведения исследований были выбраны промышленные сплавы для монокристаллического литья отечественного и зарубежного производства. Значения обработаны методом наименьших квадратов с получением корреляционных зависимостей и математических уравнений регрессионных моделей. **Результаты.** Вследствие обработки экспериментальных данных предложено соотношение легирующих элементов, которое может быть использовано для оценки механических свойств и учитывает комплексное влияние основных компонентов сплава. Поскольку размерное несоответствие параметров решетки связано со степенью концентрационного твердорастворного упрочнения фаз, эффективностью дисперсионного упрочнения сплава, скоростью ползучести и другими свойствами монокристаллов, то соотношение легирующих элементов позволяет связать эти свойства с многокомпонентными системами. Приведены регрессионные модели, с помощью которых возможно рассчитать размерное несоответствие, прочность, жаропрочность, количество фазы и плотность сплавов с высокой точностью. Установлены закономерности влияния состава на свойства монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов. Показано, что для многокомпонентных никелевых систем можно с высокой достоверностью прогнозировать мисфит, который оказывает существенное влияние на прочностные характеристики сплавов данного класса. Для монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов увеличение значения мисфита сопровождается снижением предела их кратковременной прочности, поскольку между кристаллическими решетками фаз образуются значительные напряжения, которые способствуют процессам структурной и фазовой нестабильности и приводят к преждевременному разрушению материала. Установлена корреляционная связь между удельной плотностью и средней атомной массой сплавов, а также пределом их кратковременной прочности. **Научная новизна.** Впервые предложено соотношение  $K_{\gamma}$ , с помощью которого можно адекватно прогнозировать свойства монокристаллических жаропрочных сплавов на никелевой основе, а также регрессионные модели для прогнозирования основных характеристик литейных монокристаллических сплавов. **Практическая значимость.** Показано перспективное и эффективное направление в решении задачи прогнозирования основных характеристик, влияющих на комплекс служебных свойств сплавов как при разработке новых монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов, так и при совершенствовании составов известных промышленных марок данного класса.

**Ключевые слова:** монокристаллические жаропрочные никелевые сплавы; ЖНС; размерное несоответствие; мисфит; прочность; жаропрочность

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

**Введение**

Наиболее важными деталями газотурбинных двигателей (ГТД) являются лопатки газовой турбины, определяющие максимальную температуру рабочего газа на входе в турбину и, следовательно, удельную мощность, экономичность и ресурс двигателя. Повышение рабочей температуры газа перед турбиной (до 2 000...2 200 К в перспективных двигателях) может быть достигнуто за счет применения лопаток с монокристаллической структурой из литейных жаропрочных никелевых сплавов нового поколения (ЖНС) [1].

Основное преимущество монокристаллических лопаток, по сравнению с обычными поликристаллическими ЖНС, заключается в более высоком сопротивлении высокотемпературной ползучести, обусловленном отсутствием в сплаве границ зерен, поскольку их структура сформирована ветвями одного дендрита, развившегося от монокристаллической затравки [5].

На микроскопическом уровне структура монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов представлена только двумя фазами: частицами  $\gamma'$ -фазы, рассеянными в матрице из сложнолегированного  $\gamma$ -твердого раствора на никелевой основе. Гамма и гамма штрих фазы, как указано выше [5, 9]. В свою очередь частицы интерметаллидной  $\gamma'$ -фазы различаются размерами и состоят из кубоидных микрочастиц, которые разделены нанопрослойками  $\gamma$  фазы.

Упрочнение  $\gamma'$ -фазой обеспечивает длительное сохранение высокой температурной работоспособности сплавов данного класса в широком интервале температур, вплоть до 1 150 °С [3, 7]. Следовательно, важнейшая роль в сопротивлении высокотемпературной ползучести монокристаллических ЖНС принадлежит таким структурно-фазовым характеристикам, как период кристаллических решеток  $\gamma$ - и  $\gamma'$ -фаз, их размерное несоответствие  $\delta$  или  $\gamma/\gamma'$ -мисфит, который рассчитывают по формуле  $\delta = 2 \cdot ((a_{\gamma'} - a_{\gamma}) / (a_{\gamma} + a_{\gamma'})) \cdot 100 \%$ , где  $a_{\gamma}$  и  $a_{\gamma'}$  – периоды решеток  $\gamma$ - и  $\gamma'$ -фаз соответственно [4, 6].

Экспериментально установлено, что влияние легирующих элементов на период кристаллической решетки  $\gamma'$ -фазы слабее, чем

$\gamma$  твердого раствора в многокомпонентных жаропрочных сплавах на основе никеля. Мисфит  $\gamma/\gamma'$  определяется главным образом теми легирующими элементами, которые наиболее сильно увеличивают период решетки  $\gamma$ -твердого раствора. Такими элементами, в порядке возрастания влияния на период решетки  $\gamma$ -фазы, являются Ru, Re, Mo, W, Nb и Ta [2, 10, 11].

**Цель**

Основная цель данной работы – получение прогнозирующих регрессионных моделей, с помощью которых можно адекватно рассчитывать механические свойства монокристаллических ЖНС без проведения предварительных экспериментов.

**Методика**

Для экспериментально-теоретических исследований температурной работоспособности была сформирована рабочая выборка сплавов, состоящая из известных промышленных ЖНС для монокристаллического литья отечественного и зарубежного производства, следующих марок: CMSX2, CMSX3, CMSX4, CMSX10, AM1, 203E, TUT92, PWA1484, PWA1480, SRR99, NASAIR100, SMP14, R162, TMS71, TMS75, ReneN4, ReneN5, ReneN6, SC180, MC2, ЖС36, ЖС30М, ЖС40, ЖС47. Выборка сплавов осуществлена с позиции разнообразия химических составов (систем легирования), которые по содержанию основных элементов охватывают широкий диапазон легирования.

Полученные значения были обработаны в программном комплексе Microsoft Office в пакете EXCEL методом наименьших квадратов с получением корреляционных зависимостей типа «параметр – свойство» и математических уравнений регрессионных моделей (линий трендов), которые оптимально описывают эти зависимости.

**Результаты**

С учётом того, что в сопротивлении высокотемпературной ползучести монокристаллических ЖНС роль принадлежит такому структурному параметру, как размерное несоответствие

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

$\delta$  ( $\gamma/\gamma'$ -мисфит), которое зависит от системы легирования, актуальной является задача получения оптимальной регрессионной модели для расчета данной характеристики на основе химического состава сплавов класса монокристаллических ЖНС.

Все компоненты, используемые при легировании ЖНС, можно условно разделить на три группы: растворяющиеся основным образом в  $\gamma$ -твердом растворе (Co, Cr, Mo, W, Re), растворяющиеся преимущественно в  $\gamma'$ -фазе (Al, Ti, Ta, Hf) и карбидообразующие элементы (Ti, Ta, Hf, Nb, V, W, Mo, Cr). Типичная микроструктура сплава ЗМИ-3У с монокристаллической структурой представлена на рис. 1. Её основными фазовыми составляющими являются  $\gamma$ -твердый раствор и упрочняющая  $\gamma'$ -фаза. Таким образом, разделение легирующих элементов сводится к двум группам.

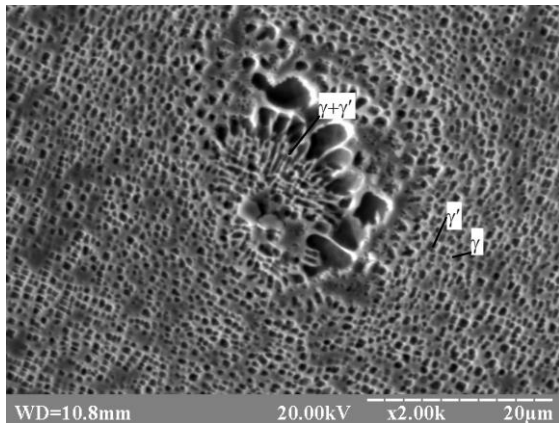


Рис. 1. Типичная структура монокристаллических ЖНС

Fig. 1. Typical structure of single-crystal heat-resistant nickel base alloys

С другой стороны, в состав  $\gamma'$ -фазы ( $\text{Ni}_3\text{Al}$ ) входят такие элементы как: Ti, Nb, Cr, Co, Mo, W, V и др. Но их содержание в  $\gamma'$ -фазе и влияние на ее объемную долю в структуре различно. Это влияние связано со способностью этих элементов образовывать с никелем стабильные интерметаллидные фазы типа  $\text{Ni}_3\text{Me}$ . Отсюда следует, что на мисфит и механические свойства сплавов оказывают влияние не только элементы, которые относятся к  $\gamma'$ -образующим, но и те, которые классифицируют как  $\gamma$ -твердорастворные упрочнители.

В результате анализа и обработки экспериментальных данных предложено соотношение легирующих элементов:

$$K_{\gamma} = \frac{\sum_{\gamma} (\text{Al} + \text{Ti} + \text{Nb} + \text{Ta} + \text{Hf})}{0,2 \sum_{\gamma} (\text{Cr} + \text{W} + \text{Mo} + \text{Re} + \text{Co} + \text{Ru})},$$

в котором калибровочный коэффициент 0,2 был определен эмпирическим путем. Это соотношение учитывает комплексное влияние основных компонентов сплава в массовых процентах на механические свойства. Поскольку размерное несоответствие параметров решетки связано со степенью концентрационного твердорастворного упрочнения  $\gamma$ - и  $\gamma'$ -фаз, эффективностью дисперсионного упрочнения сплава, скоростью ползучести и другими свойствами монокристаллов, то соотношение  $K_{\gamma}$  позволяет связать эти свойства с многокомпонентными системами.

Установлено, что размерное несоответствие  $\delta$  имеет экспоненциальную зависимость (рис. 2, а) с предложенным соотношением:  $\delta = 0,0045 \text{ EXP}(1,6775 K_{\gamma})$ ; относительная погрешность  $\pm 3,32\%$ . Увеличение соотношения  $K_{\gamma}$  приводит к повышению  $\delta$ , что связано с уменьшением количества  $\gamma$ -растворных упрочнителей и увеличением  $\gamma'$ -образующих элементов, которые влияют на параметры кристаллических решеток фаз. Показано, что для многокомпонентных никелевых систем (монокристаллических ЖНС) можно с высокой достоверностью прогнозировать мисфит, который оказывает существенное влияние на прочностные характеристики сплавов данного класса.

Установлено, что зависимость предела  $\sigma_b$  кратковременной прочности сплавов от величины мисфита (рис. 2, б) оптимально описывается логарифмической зависимостью  $\sigma_b = -52,32 \ln(\delta) + 1179,9$  с относительной погрешностью  $\pm 3,74\%$ . Для монокристаллических ЖНС увеличение абсолютного значения мисфита сопровождается снижением предела их кратковременной прочности, поскольку между кристаллическими решетками  $\gamma$ - и  $\gamma'$ -фазы образуются значительные напряжения, которые способствуют процессам структурной и фазовой нестабильности, что приводит к преждевременному разрушению материала.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

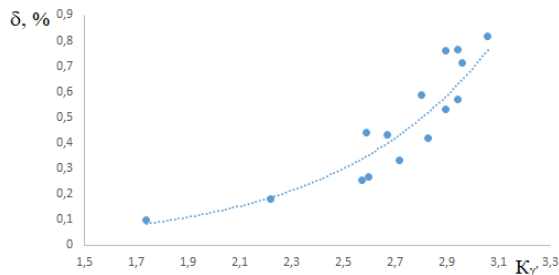
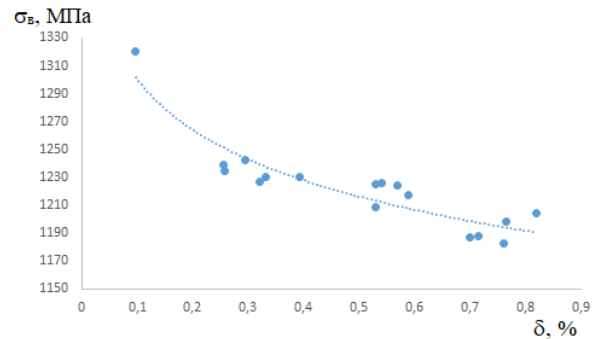
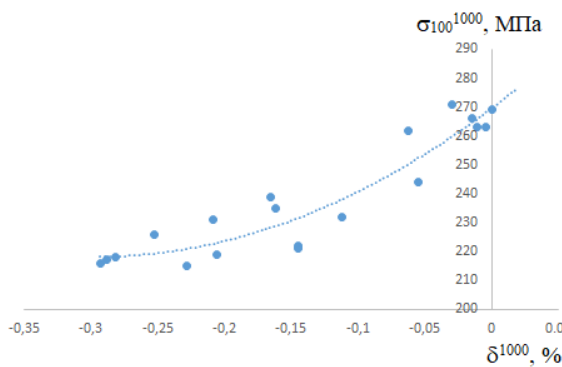
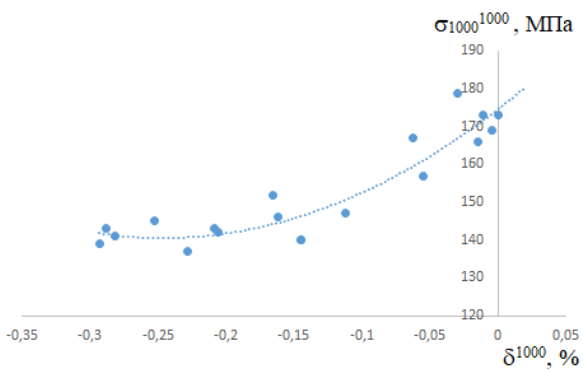
*a – a**б – b**в – c**г – d*

Рис. 2. Корреляционная зависимость свойств монокристаллических ЖНС от величины мисфита  $\delta$  и соотношения  $K_\gamma$  в их составе:

*a* – зависимость величины мисфита  $\delta$  от величины соотношения  $K_\gamma$ ; *б* – зависимость предела кратковременной прочности  $\sigma_b$  от мисфита  $\delta$  при 20 °C;

*в, г* – зависимость пределов 100- и 1 000-часовой длительной прочности от мисфита при 1 000 °C

Fig. 2. Correlation dependence of the properties of single-crystal heat-resistant nickel base alloys on the misfit value  $\delta$  and the ratio  $K_\gamma$  in their composition:

*a* – dependence of the misfit value  $\delta$  on the value of the  $K_\gamma$  ratio; *b* – dependence of the short-term strength limit  $\sigma_b$  on misfit  $\delta$  at 20 °C; *c, d* – dependence of the limits of 100 and 1 000 hours of long-term strength on misfit at 1 000 °C

Показано, что при температуре испытаний 1000 °C зависимость пределов 100- и 1 000- часовой длительной прочности от величины мисфита (рис. 2, *в, г*) оптимально описывается полученными моделями  $\sigma_{100}^{1000} = 587,7\delta^2 + 347,96\delta + 269,65$  с относительной погрешностью  $\pm 3,46$  % (рис. 2, *в*);  $\sigma_{1000}^{1000} = 561,4\delta^2 + 276,64\delta + 174,65$  с относительной погрешностью  $\pm 3,6$  % (рис. 2, *г*). Эти зависимости показывают, что при температуре 1 000 °C значение размерного несоответствия близко к нулю, сплавы имеют лучшие показатели длительной прочности. Из вышерассмотренных зависимостей можно сделать вывод, что при разработке

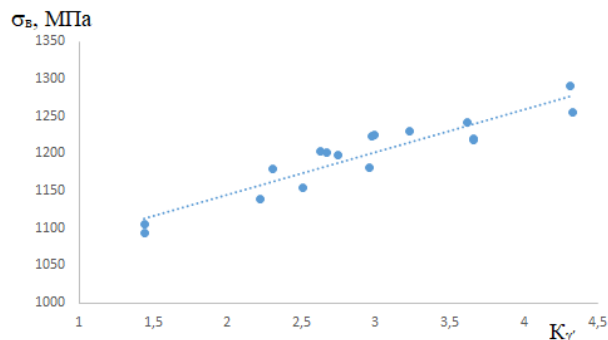
новых составов сплавов или совершенствовании составов известных промышленных марок данного класса, нужно закладывать высокие абсолютные значения мисфита при комнатной температуре (рис. 2, *б*). Это связано с тем, что с повышением температуры изменится размерное несоответствие параметров решеток  $\gamma$ -  $\gamma'$ -фаз, а при температуре эксплуатации желательно иметь величину мисфита близкой к нулю (рис. 2, *в, г*), что снизит когерентные напряжения и обеспечит улучшение структурно-фазовой стабильности и, следовательно, повысит длительную прочность.

Установлено, что предложенное соотношение  $K_\gamma$  имеет тесную корреляцию с пределами

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

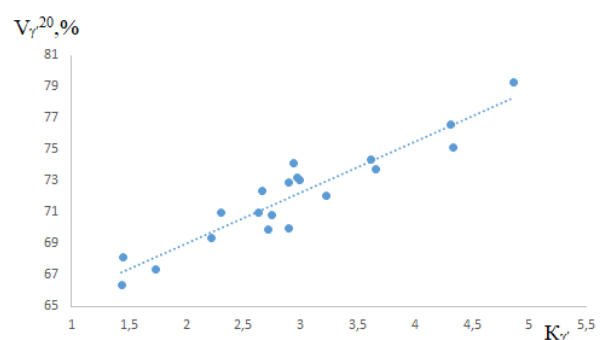
кратковременной ( $\sigma_b$ ) и длительной ( $\sigma_{100}$ ,  $\sigma_{1000}$ ) прочности, а также с объемной долей  $\gamma'$ -фазы, которая находится в пределах 60–70 % мас. для комнатной температуры и от 45 до 65 % мас. при 1 000 °С в монокристаллических ЖНС (рис. 3). Все эти зависимости имеют линейный характер с положительным угловым коэффициентом и погрешностью не более  $\pm 3,8$  %. Такое

*a – a*

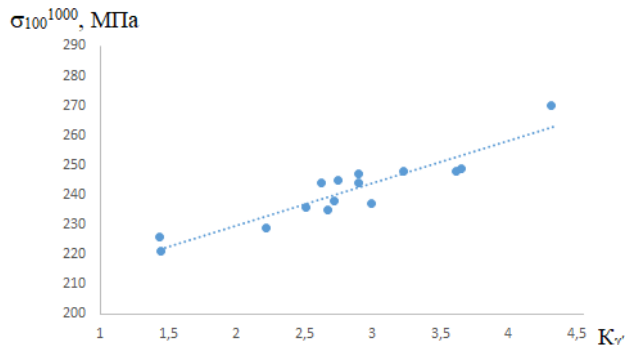


поведение объясняется тем, что с увеличением  $K_\gamma$  увеличивается объемное количество основной упрочняющей  $\gamma'$ - фазы при комнатной температуре (рис. 3, б) и остаточной при повышенных температурах эксплуатации (рис. 3, з), следственно, повышаются пределы кратковременной (рис. 3, а) и длительной прочности (рис. 3, в) у монокристаллических сплавов.

*б – b*



*в – c*



*з – d*

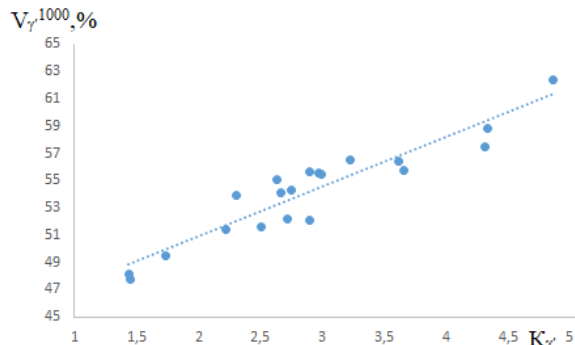


Рис. 3. Зависимость от соотношения  $K_\gamma$  в составе монокристаллических ЖНС: *a* – предела кратковременной прочности; *б* – объемного количества  $\gamma'$ -фазы при 20 °С; *в* – пределов длительной прочности; *з* – остаточного количества  $\gamma'$ -фазы при 1 000 °С

Fig. 3. Dependence on the  $K_\gamma$  ratio in the single-crystal heat-resistant nickel base alloys: *a* – of the limit of short-term strength; *b* – the volume amount of the  $\gamma'$ -phase at 20 °C; *c* – the limits of long-term strength; *d* – the residual amount of the  $\gamma'$ -phase at 1000 °C

Связь объемной доли  $\gamma'$ -фазы пределами кратковременной и длительной прочности с предложенным соотношением  $K_\gamma$  для класса монокристаллических ЖНС адекватно описывают полученными регрессионными моделями:

$$\sigma_s = 57,414 K_\gamma + 1030,1;$$

$$V_{\gamma}^{20} = 3,2607 K_\gamma + 62,481;$$

$$\sigma_{100}^{1000} = 14,303 K_\gamma + 201,11;$$

$$V_{\gamma}^{1000} = 3,6597 K_\gamma + 43,551.$$

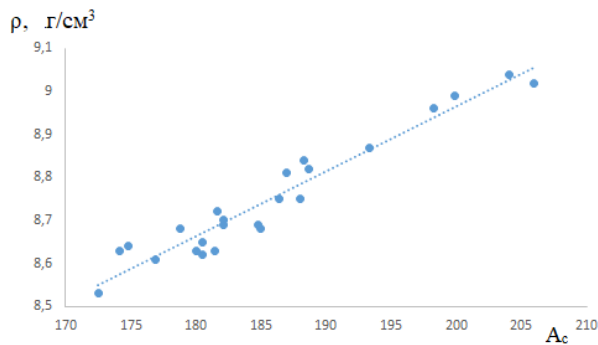
Таким образом, полученные модели можно применять для расчетов при прогнозировании механических свойств многокомпонентных никелевых систем (монокристаллических ЖНС) на основе их химического состава.



## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Начиная со второго поколения, в монокристаллические ЖНС введён рений в количестве от 2 до 6 % (в отдельных случаях до 9 %), что значительно увеличило плотность сплавов, а следовательно, и массу готового изделия. Начиная с четвертого поколения, рекомендовано часть рения заменять рутением (от 2–6 %) с целью ограничения плотности монокристаллических ЖНС на уровне, не превышающем  $9 \text{ г/см}^3$ . Известно, что плотность  $\rho$  тесно коррелирует со средней атомной массой сплава  $A_c$ , поэтому авторы предложили регрессионную модель, полученную для многокомпонентных систем легирования монокристаллических ЖНС:  $\rho = 0,0151 \cdot A_c + 5,9462$  с погрешностью, не превышающей  $\pm 2,6 \%$  (рис. 4, а).

а – а



б – б

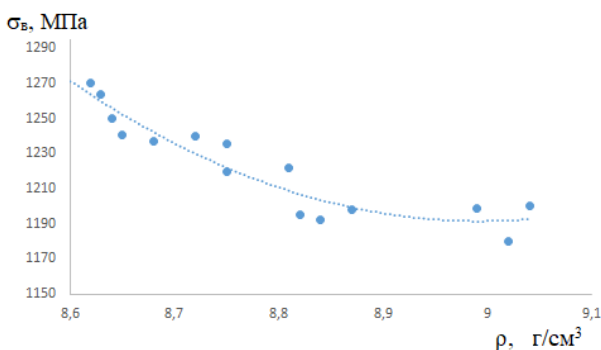


Рис. 4. Зависимость для монокристаллических ЖНС:

а – удельной плотности от средней атомной массы;  
б – предела кратковременной прочности от удельной плотности

Fig. 4. Dependence for single-crystal heat-resistant nickel base alloys:

а – specific density on the average atomic mass;  
б – the limit of short-term strength on specific density

На рис. 4, а показана зависимость удельной плотности от средней атомной массы сплавов, которая имеет линейный характер, поскольку с увеличением количества тугоплавких элементов с высоким значением атомной массы неизбежно будет повышаться плотность монокристаллических сплавов. Установлено, что увеличение удельной плотности приводит к снижению предела кратковременной прочности сплава (рис. 4, б), что оптимально описывает следующая зависимость:  $\sigma_b = 521,06\rho^2 - 9370,9\rho + 43324$  с погрешностью  $\pm 3,46 \%$ . Такая тенденция проявляется вследствие того, что элементы с высокой атомной массой имеют высокую температуру плавления, они упрочняют  $\gamma$ -твердый раствор и не оказывают заметного влияния на интерметаллидное упрочнение сплавов. Полученные регрессионные модели дают возможность прогнозировать удельную плотность и предел кратковременной прочности по удельной плотности сплава как при разработке новых монокристаллических ЖНС, так и при усовершенствовании известных промышленных композиций в рамках марочного состава.

### Научная новизна и практическая значимость

Обобщены закономерности комплексного влияния легирующих элементов, которые входят в состав монокристаллических ЖНС, на свойства, которые влияют на их работоспособность.

Впервые предложено соотношение  $K_\gamma$  с помощью которого можно адекватно прогнозировать свойства монокристаллических ЖНС, а также регрессионные модели для прогнозирования основных характеристик литейных монокристаллических ЖНС как при разработке новых составов, так и при совершенствовании известных промышленных марок.

### Выводы

1. В данной работе представлены исследования, проведенные моделированием термодинамических процессов выделения фаз и их связей с прочностными характеристиками для монокристаллических никелевых сплавов с разными системами легирования.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

2. На основе эмпирического подхода получено новое соотношение  $K_{\gamma'}$ , по величине которого можно адекватно прогнозировать размерное несоответствие ( $\gamma/\gamma'$ -мисфит), предел кратковременной прочности, объемное количество  $\gamma'$ -фазы в структуре, а также пределы 100- и 1 000-часовой длительной прочности для многокомпонентных композиций монокристаллических ЖНС.

3. Приведены регрессионные модели корреляционных зависимостей от размерного несоответствия ( $\gamma/\gamma'$ -мисфит), которые дают возможность прогнозировать пределы кратковременной и длительной прочности сплавов. Показано, что величина мисфита при температуре эксплуатации должна стремиться к нулю. Это обеспечит повышение структурной стабильности за счет сведения к минимуму структурных напряжений и окажет положительное влияние на прочностные и пластические характеристики ЖНС.

4. Установлена корреляционная связь между удельной плотностью и средней атомной массой сплавов, а также пределом их кратковременной прочности. Показано, что с увеличением удельной плотности предел кратковременной прочности сплавов снижается, поскольку элементы с высокой атомной массой, повышающие удельную плотность, преимущественно упрочняют  $\gamma$ -твердый раствор и не оказывают заметного влияния на интерметаллидное упрочнение сплавов.

5. Показано перспективное и эффективное направление в решении задачи прогнозирования основных характеристик, влияющих на комплекс служебных свойств сплавов, без предварительного проведения экспериментальных исследований как при разработке новых монокристаллических ЖНС, так и при совершенствовании составов известных промышленных марок данного класса.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Влияние термической обработки на дендритную ликвацию и жаропрочность монокристаллов интерметаллидных сплавов на основе  $\text{Ni}_3\text{Al}$ , легированных рением / К. Б. Поварова, О. А. Базылева, А. А. Дроздов [и др.] // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2018. – № 9. – С. 41–47.
2. Гайдук, С. В. Применение CALPHAD-метода для расчета количества  $\gamma'$ -фазы и прогнозирования длительной прочности литейных жаропрочных никелевых сплавов / С. В. Гайдук // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2015. – № 6. – С. 64–68.
3. Киселев, Ф. Д. Исследование структуры материала рабочих лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей в процессе эксплуатации / Ф. Д. Киселев // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2018. – Т. 84, № 2. – С. 28–37. doi: 10.26896/1028-6861-2018-84-2-28-36
4. Объемное нанофазное упрочнение в монокристаллическом никелевом сплаве ЖС36-ВИ [001] после высокотемпературных выдержек / В. П. Кузнецов, В. П. Лесников, И. П. Конеева [и др.] // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2014. – № 4. – С. 3–6.
5. Оспенникова, О. Г. Создание нового поколения жаропрочных литейных и деформируемых сплавов и сталей – залог успешного развития отечественного двигателестроения / О. Г. Оспенникова // *Металлургия машиностроения*. – 2017. – № 4. – С. 17–20.
6. Размерное несоответствие периодов кристаллических решеток  $\gamma$ - и  $\gamma'$ -фаз в монокристаллах жаропрочных никелевых сплавов / Н. А. Протасова, И. Л. Светлов, М. Б. Бронфин, Н. В. Петрушин // *Физика металлов и металловедение*. – 2008. – Т. 106, № 5. – С. 512–519.
7. *Superalloys* / Edited by M. Aliofkhazraei. – Rijeka, Croatia : IntechOpen, 2015. – 336 p. doi: 10.5772/59358
8. Caron, J. L. Weldability of Nickel-Base Alloys / J. L. Caron, J. W. Sowards // *Comprehensive Materials Processing*. – 2014. – Vol. 6. – P. 151–179. doi: 10.1016/B978-0-08-096532-1.00615-4
9. High Temperature Properties of a Single Crystal Superalloy Pw1484 Directly Recycled after Turbine Blade Use / S. Utada, Y. Joh, M. Osawa [et al.] // *Superalloys 2016 : Proceedings of the 13th International Symposium of Superalloys*. – Hoboken, 2016. – P. 589–599. doi: 10.1002/9781119075646.ch63
10. Investigation of the Size Effect of Nickel-Base Superalloy Single Crystals Based on Strain Gradient Crystal Plasticity / J. F. Nie, Z. L. Liu, X. M. Liu, X. C. You, Z. Zhuang // *International Journal for Multiscale Computational Engineering*. – 2009. – Vol. 7. – Iss. 3. – P. 227–236. doi: 10.1615/IntJMultCompEng.v7.i3.60

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

11. Müller, J. On the identification of superdislocations in the  $\gamma'$ -phase of single crystal Ni-base superalloys – An application of the LACBED method to complex microstructures / J. Müller, G. Eggeler, E. Spiecker // Acta Materialia. – 2015. – Vol. 87. – P. 34–44. doi: 10.1016/j.actamat.2014.12.029

О. А. ГЛОТКА<sup>1\*</sup>, С. В. ГАЙДУК<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Фізичне матеріалознавство», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063, тел. +38 (061) 769 82 84, +38 (061) 769 82 82, ел. пошта glotka-alexander@ukr.net, ORCID 0000-0002-3117-2687

<sup>2</sup>Каф. «Фізичне матеріалознавство», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063, тел. +38 (061) 769 82 84, +38 (061) 769 82 82, ел. пошта gayduksv@gmail.com, ORCID 0000-0002-5724-9566

## ПРОГНОЗУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ МОНОКРИСТАЛІЧНИХ ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ

**Мета.** Робота передбачає отримання прогнозних регресійних моделей, за допомогою яких можна адекватно розраховувати механічні властивості монокристалічних жароміцних нікелевих сплавів (ЖНС) без проведення попередніх експериментів. **Методика.** Для проведення досліджень були обрані промислові сплави для монокристалічного лиття вітчизняного й зарубіжного виробництва. Значення оброблено методом найменших квадратів з отриманням кореляційних залежностей і математичних рівнянь регресійних моделей. **Результати.** Унаслідок обробки експериментальних даних запропоновано співвідношення легувальних елементів, яке може бути використане для оцінки механічних властивостей і враховує комплексний вплив основних компонентів сплаву. Оскільки розмірна невідповідність параметрів решітки пов'язана зі ступенем концентраційного твердорозчинного зміцнення фаз, ефективністю дисперсійного зміцнення сплаву, швидкістю повзучості й іншими властивостями монокристалів, то співвідношення легувальних елементів дозволяє пов'язати ці властивості з багатокомпонентними системами. Наведено регресійні моделі, за допомогою яких можна розрахувати розмірну невідповідність, міцність, жароміцність, кількість фази й густину сплавів із високою точністю. Установлено закономірності впливу складу на властивості монокристалічних жароміцних нікелевих сплавів. Показано, що для багатокомпонентних нікелевих систем можна з високою вірогідністю прогнозувати місфіт, який істотно впливає на характеристики міцності сплавів цього класу. Для монокристалічних жароміцних нікелевих сплавів збільшення значення місфіту супроводжується зниженням межі їх короточасної міцності, оскільки між кристалічними решітками фаз утворюються значні напруження, які сприяють процесам структурної й фазової нестабільності й призводять до передчасного руйнування матеріалу. Установлено кореляційний зв'язок між питомою щільністю й середньою атомною масою сплавів, а також межею їх короточасної міцності. **Наукова новизна.** Уперше запропоновано співвідношення  $Ky'$ , за допомогою якого можна адекватно прогнозувати властивості монокристалічних жароміцних сплавів на нікелевій основі, а також регресійні моделі для прогнозування основних характеристик ливарних монокристалічних сплавів. **Практична значимість.** Показано перспективний та ефективний напрямок у розв'язанні задачі прогнозування основних характеристик, що впливають на комплекс службових властивостей сплавів як під час розробки нових монокристалічних жароміцних нікелевих сплавів, так і під час вдосконалення складу відомих промислових марок цього класу.

**Ключові слова:** монокристалічні жароміцні нікелеві сплави; ЖНС; розмірна невідповідність; місфіт; міцність; жароміцність

О. А. GLOTKA<sup>1\*</sup>, S. V. HAIDUK<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Physical Materials Science», Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovskiy St., 64, Zaporizhzhia, Ukraine, 69063, tel. +38 (061) 769 82 84, +38 (061) 769 82 82, e-mail glotka-alexander@ukr.net, ORCID 0000-0002-3117-2687

<sup>2</sup>Dep «Physical Materials Science», Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovskiy St., 64, Zaporizhzhia, Ukraine, 69063, tel. +38 (061) 769 82 84, +38 (061) 769 82 82, e-mail gayduksv@gmail.com, ORCID 0000-0002-5724-9566

## PREDICTION OF THE PROPERTIES OF SINGLE-CRYSTAL HEAT-RESISTANCE NICKEL ALLOYS

**Purpose.** This work aims to obtain predictive regression models, with which, one can adequately calculate the mechanical properties of single-crystal heat-resistant nickel alloys, without conducting preliminary experiments. **Methodology.** Industrial alloys for single-crystal casting of domestic and foreign production were selected for the research. Values were processed by the method of least squares with obtaining correlation dependencies with obtaining mathematical equations of regression models. **Findings.** As a result of processing the experimental data, a ratio of alloying elements has been proposed, which can be used to evaluate mechanical properties, which considers the complex effect of the main alloy components. Since the dimensional mismatch of the lattice parameters is related to the degree of solid-solution concentration hardening of the phases, the efficiency of the dispersion hardening of the alloy, the creep rate and other properties of single crystals, the ratio of alloying elements allows these properties to be associated with multi-component systems. The regression models are given, with the help of which it is possible to calculate the size mismatch, strength, heat resistance, amount of phase and density of alloys with high accuracy. The regularities of the influence of the composition on the properties of single-crystal heat-resistant nickel alloys are established. It is shown that for multicomponent nickel systems it is possible to predict with a high degree of confidence a misfit, which has a significant impact on the strength characteristics of alloys of this class. For single-crystal heat-resistant nickel alloys, an increase in the value of misfit is accompanied by a decrease in the limit of their short-term strength, since considerable stresses form between the crystal lattices of the phases, which contribute to structural and phase instability processes leading to premature destruction of the material. A correlation was established between the specific density and the average atomic mass of the alloys, as well as the limit of their short-term strength. **Originality.** For the first time, we proposed the ratio  $K\gamma'$  with the help of which it is possible to adequately predict the properties of single-crystal heat-resistant nickel alloys, as well as regression models for predicting the main characteristics of casting single-crystal alloys. **Practical value.** A promising and effective direction in solving the problem of predicting the main characteristics affecting the complex service properties of alloys both in the development of new single-crystal heat-resistant nickel alloys and in improving the compositions of well-known industrial grades of this class is shown.

**Keywords:** single crystal heat-resistant nickel alloys; HNA; dimensional discrepancy; misfit; strength; heat resistance

### REFERENCES

1. Povarova, K. B., Bazyleva, O. A., Drozdov, A. A., Morozov, A. Y., Arginbaeva, E. G., & Antonova, A. V. (2018). Vliyanie termicheskoy obrabotki na dendritnyuyu likvatsiyu i zharoprochnost monokristallov intermetallidnykh splavov na osnove Ni3Al, legirovannykh reniem. *Metal Science and Heat Treatment*, 9, 41-47. (in Russian)
2. Gayduk, S. V. (2015). Primenenie CALPHAD-metoda dlya rascheta kolichestva  $\gamma'$ -fazy i prognozirovaniya dli-telnoy prochnosti liteynykh zharoprochnykh nikelovykh splavov. *Metallurgical and Mining Industry*, 6, 64-68. (in Russian)
3. Kiselev, F. D. (2018). Microstructural Criteria for Determining Thermo-Mechanical Conditions of Operational Vulnerability of the Working Blades of High-Temperature Gas Turbine Aviation Engines. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*, 84(2), 28-37. doi: 10.26896/1028-6861-2018-84-2-28-36 (in Russian)
4. Kuznetsov, V. P., Lesnikov, V. P., Konakova, I. P., & Popov, N. A. (2014). Volume nanophase hardening in single-crystal nickel alloy ZhS36-VI [001] after high-temperature holds. *Metal Science and Heat Treatment*, 4, 3-6. (in Russian)
5. Ospennikova, O. G. (2017). Sozдание novogo pokoleniya zharoprochnykh liteynykh i deformiruemykh splavov i staley – zalog uspehnogo razvitiya otechestvennogo dvigatelestroeniya. *Metallurgy of Machinery Building*, 4, 17-20. (in Russian)
6. Protasova, N. A., Svetlov, I. L., Bronfin, M. B., & Petrushin, N. V. (2008). Lattice-parameter misfits between the and in single crystals of nickel superalloys. *The Physics of Metals and Metallography*, 106(5), 495-502. (in Russian)
7. Aliofkhae, M. (Ed). (2015). Superalloys. Rijeka, Croatia: IntechOpen. doi: 10.5772/59358 (in English)
8. Caron, J. L., & Sowards, J. W. (2014). Weldability of Nickel-Base Alloys. *Comprehensive Materials Processing*, 6, 151-179. doi: 10.1016/b978-0-08-096532-1.00615-4 (in English)

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

9. Utada, S., Joh, Y., Osawa, M., Yokokawa, T., & Harada, H. (2016). High Temperature Properties of a Single Crystal Superalloy PWA1484 Directly Recycled after Turbine Blade Use. In *Superalloys 2016: Proceedings of the 13th International Symposium of Superalloys* (pp. 589-599). Hoboken. doi: 10.1002/9781119075646.ch63 (in English)
10. Nie, J. F., Liu, Z. L., Liu, X. M., You, X. C. & Zhuang, Z. (2009). Investigation of the Size Effect of Nickel-Base Superalloy Single Crystals Based on Strain Gradient Crystal Plasticity. *International Journal for Multiscale Computational Engineering*, 7(3), 227-236. doi: 10.1615/IntJMultCompEng.v7.i3.60 (in English)
11. Müller, J., Eggeler, G. & Spiecker, E. (2015). On the identification of superdislocations in the  $\gamma'$ -phase of single crystal Ni-base superalloys – An application of the LACBED method to complex microstructures. *Acta Materialia*, 87, 34-44. doi: 10.1016/j.actamat.2014.12.029 (in English)

Поступила в редколлегию: 06.11.2018

Принята к печати: 15.03.2019

## РУХОМІЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.439

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

<sup>1\*</sup>Отд. № 7 Института транспортных систем и технологий НАН Украины, ул. Писаржевского, 5, Днепро, Украина, 49005, тел. +38 (056) 232 30 55, эл. почта p\_v\_a\_725@i.ua, ORCID 0000-0002-4957-8028

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

### ПРОДОЛЬНЫЕ НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ДВИЖЕНИЯ МАГНИТОЛЕВИТИРУЮЩЕГО ПОЕЗДА

**Цель.** Качество транспортирования пассажиров и грузов магнитолевитирующим поездом (МЛП) является ключевым критерием оценки его потребительских свойств. Определяющее влияние на это качество оказывает динамика электромеханической подсистемы (ЭМП) поезда. Особо критичны нестационарные режимы движения этой подсистемы, такие как набор скорости, служебное и экстренное торможение, а также проход тоннеля. Движение поезда в таких режимах лимитировано допустимыми нормами безопасности. Исходя из указанного, цель настоящего исследования состоит в оценке динамических качеств и нагруженности поезда в нестационарных режимах. Методика. На современном этапе основным и наиболее универсальным инструментом анализа и синтеза процессов в системах является их математическое и, в частности, компьютерное моделирование. Исходя из этого, работа выполнена путём проведения ряда экспериментов с компьютерной моделью динамики ЭМП МЛП, полученной в результате релевантного преобразования в неё соответствующей модели математической. Компьютерная модель программно зафиксирована на входном языке системы компьютерной математики Mathematica. Результаты. Полученные результаты моделирования приведены в графической форме и отражают движение поезда в режимах разгона, прохождения тоннеля, а также служебного и экстренного торможения. Управление электромеханической подсистемой поезда во всех рассматриваемых переходных режимах движения, за исключением экстренного торможения, осуществляют путём изменения, согласно тому или иному закону, напряжения, питающего якорную обмотку линейного синхронного двигателя. Поэтому при моделировании движения поезда в каждом из таких режимов рассмотрены варианты только частотного, амплитудно-частотного, а также фазо-частотного управления изменением упомянутого якорного напряжения двигателя. Анализ результатов моделирования позволил оценить динамические качества МЛП в различных нестационарных режимах движения и его нагруженность в их процессе. Научная новизна. Исследование приоритетно по критерию холического рассмотрения нестационарных режимов движения электромеханической подсистемы магнитолевитирующего поезда. Практическая значимость. Основным проявлением практической значимости работы является возможность, в случае использования её результатов, существенного повышения эффективности динамических исследований нестационарных режимов магнитолевитирующего поезда при одновременном снижении их ресурсоёмкости.

**Ключевые слова:** магнитолевитирующий поезд; МЛП; нестационарные режимы движения; динамические качества; динамическая нагруженность; компьютерный эксперимент

#### Введение

Магнитолевитирующий поезд (МЛП) – большая, сложная система, элементы которой весьма разнотипны. Её основное предназначе-

ние – транспортирование пассажиров и грузов. Качество транспортирования – ключевой критерий оценки потребительски свойств поезда.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

**Цель**

На указанное качество детерминирующее влияние оказывает динамика электромеханической подсистемы (ЭМП). Особо критичны нестационарные режимы её движения. Они являются лимитирующими и подлежат первоочередному исследованию. Его проведение – основная цель работы.

**Методика**

Работа выполнена путём проведения ряда экспериментов с компьютерной моделью динамики ЭМП МЛП, полученной в результате релевантной трансформации в неё созданной модели математической.

**Результаты**

Рассмотрено одномерное продольное движение МЛП. В качестве расчётной схемы его механической подсистемы (МП) принято твёрдое тело массой  $m$ . Движение рассматривается относительно инерциальной неподвижной декартовой системы отсчёта  $OXYZ$ . С упомянутым телом связан декартов триэдр  $Cxyz$ , оси которого являются его главными центральными. Изменение положения тела во времени  $t$  определяется декартовой координатой  $x(t)$  центра масс. На тело не наложены аналитические связи. Конфигурация МП МЛП может быть описана с помощью одной обобщённой координаты:

$$\eta^1 = x. \quad (1)$$

Движение рассматриваем в состоянии электродинамической левитации – после отрыва от путенаправляющих конструкций. В процессе движения считаем отсутствующими отклонения центра масс тела  $m$  от стационарной траектории, параллельной кривой оси пути и симметрично расположенной относительно его конструкций. На тело действуют следующие силы [2]:  $F_{Tx}$  – продольная составляющая тягового усилия – со стороны линейного синхронного двигателя (ЛСД);  $F_{ADx}$  – продольная составляющая аэродинамического усилия – со стороны окружающей воздушной среды;  $F_{EDx}$  – продольная составляющая электродинамиче-

ского усилия – со стороны путевых контуров подвешивания;  $F_{Wx}$  – продольная составляющая веса поезда – вследствие наличия продольного уклона пути.

Продольное поступательное движение МП МЛП описуемо вторым законом Ньютона:

$$m \cdot \ddot{x} = F_{Tx} + F_{ADx} + F_{EDx} + F_{Wx}, \quad (2)$$

где  $\ddot{x}$  – продольное ускорение точки  $C$ .

Значения  $F_{Tx}$  определимы [3] соотношениями:

$$F_{Tx} = f_{\lambda\chi} \cdot e^\lambda \cdot e^\chi; e^\lambda = e^\chi = 1; \\ f_{\lambda\chi} = l_{\lambda\chi} \cdot i^\lambda \cdot B_{\lambda\chi} \quad \forall \lambda \in [\overline{1, N}], \chi \in [\overline{1, 2}], \quad (3)$$

где  $f_{\lambda\chi}$  – сила взаимодействия полей токов цепей  $\chi$ -го прямолинейного элемента  $\lambda$ -го контура индуктора с якорем;  $l_{\lambda\chi}, i^\lambda, B_{\lambda\chi}$  – длина такого элемента, ток в нём, а также индукция (условно однородного – в пределах элемента) магнитного поля, в котором элемент находится.

Значения величин  $F_{ADx}$  оценочно описуемы [4, 7, 8] соотношениями:

$$F_{ADx} = -C_x \cdot q \cdot S; q = 0,5 \cdot \rho \cdot \dot{x}^{(2)}, \quad (4)$$

где  $C_x$  – безразмерный аэродинамический коэффициент в направлении  $Cx$ ;  $S$  – характерная площадь сечения поезда в том же направлении;  $\rho$  – плотность окружающего его воздуха.

Значения величин  $F_{EDx}$  аппроксимируемы [5, 9, 11] полиномом вида:

$$F_{EDx} = k_p \cdot \dot{x}^p \cdot e^p; e^p = 1 \quad \forall p \in [\overline{1, n_r}], \quad (5)$$

в котором  $k_p \quad \forall p \in [\overline{1, n_r}]$  – коэффициенты регрессии экспериментальных зависимостей  $F_{EDx}(t)$  со степенью аппроксимационного полинома  $n_r$ .

Наконец, изменение  $F_{Wx}$  описываем выражением:

$$F_{Wx} = m \cdot g \cdot \sin \phi_k, \quad (6)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $\phi_k$  – угол уклона профиля  $k$ -го участка пути, по которому движется поезд.



## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Математическая модель (2) описывает продольное одномерное движение МП МЛП под действием учитываемых внешних возмущений, а также управления со стороны его ЛСД. Упомянутая модель была принята в качестве алгоритмической основы построения компьютерной модели того же процесса движения. Элементы компьютерной модели подразделяем на расчётную и графическую части. Первая из этих частей решает прямую задачу динамики подсистемы, а вторая – преобразует результаты расчётов в графическую форму. Исследование осуществлено проведением экспериментов с компьютерной моделью. Их результатом явились графики функциональных зависимостей от времени характеризующих и порождающих это движение величин. Было исследовано движение в нестационарных режимах набора скорости, прохода тоннеля, служебного и экстренного торможения. Ниже изложены и проанализированы некоторые результаты этого исследования.

Частоту напряжения, питающего якорную обмотку ЛСД, всегда автоматически поддерживают [2] пропорциональной скорости движения МЛП. Помимо частотного, управление системой может иметь дополнительный компонент, обеспечивающий повышение плавности электромагнитных процессов в ЛСД и механических – в МП. В качестве такого компонента можно использовать амплитудное либо фазовое управление. В первом из этих случаев, в процессе разгона МЛП, плавность подачи энергии на ЛСД обеспечивается за счёт повышения амплитуды напряжения, питающего его якорь, например, по закону:

$$U_a(t) = U_a^* \cdot th(t \cdot k_{vd}), \quad (7)$$

где  $U_a^*$  – предельное значение этой амплитуды;  $k_{vd}$  – коэффициент, определяющий интенсивность нарастания амплитуды напряжения.

При фазовом регулировании разгона поезда начальная фаза якорного напряжения может изменяться, например, согласно закону:

$$\theta_u(t) = \alpha_u \cdot [th(t \cdot k_{fd}) - 1], \quad (8)$$

где  $\alpha_u$  – его текущая фаза;  $k_{fd}$  – коэффициент, определяющий темп изменения начальной фазы.

Иллюстративные примеры результатов исследования движения МЛП в режиме набора скорости приведены на рис. 1–6. Рис. 1 и 2 соответствуют управлению только частотой напряжения, рис. 3 и 4 – амплитудно-частотному управлению, рис. 5 и 6 – фазо-частотному управлению. На рис. 1, 3 и 5 приведены графики скорости экипажа, а на рис. 2, 4 и 6 – графики действующей на него тяговой силы ЛСД.

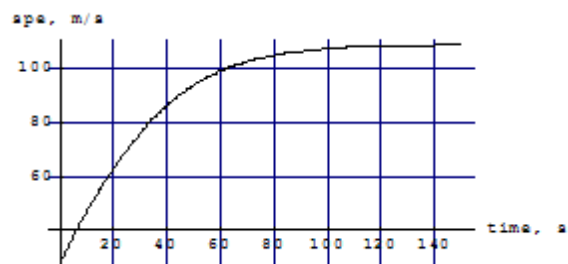


Рис. 1. График скорости поезда при управлении частотой напряжения

Fig. 1. The train's speed graph with voltage frequency control

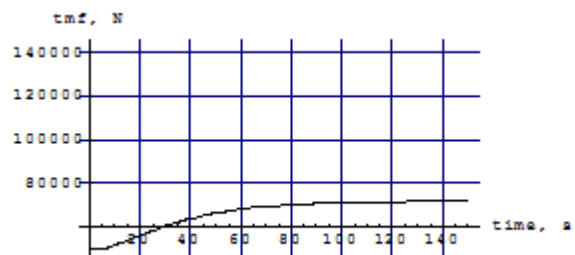


Рис. 2. График тяговой силы МЛП при управлении частотой напряжения

Fig. 2. The maglev train's traction force graph with voltage frequency control

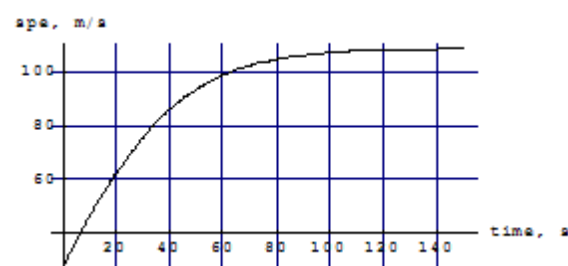


Рис. 3. График скорости поезда при амплитудно-частотном управлении напряжением

Fig. 3. The train's speed graph with amplitude-frequency voltage control

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

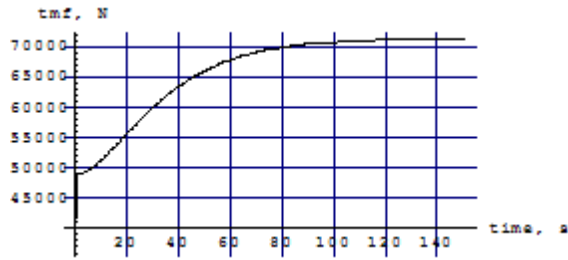


Рис. 4. График тяговой силы МЛП при амплитудно-частотном управлении напряжением

Fig. 4. The maglev train's traction force graph with amplitude-frequency voltage control

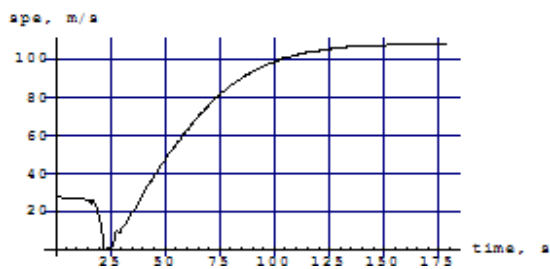


Рис. 5. График скорости поезда при фазо-частотном управлении напряжением

Fig. 5. The train's speed graph with phase-frequency voltage control

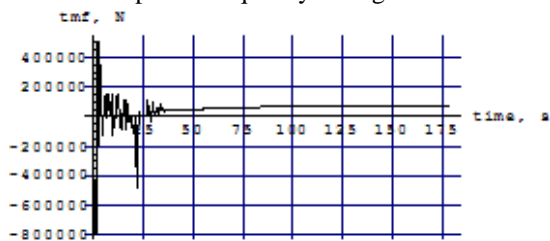


Рис. 6. График тяговой силы МЛП при фазо-частотном управлении напряжением

Fig. 6. The maglev train's traction force graph with phase-frequency voltage control

Анализ результатов моделирования разгона поезда свидетельствует о неприемлемости как только частотного управления – из-за высокого ускорения поезда, так и фазо-частотного – вследствие осцилляции скорости МЛП. Наиболее приемлемо амплитудно-частотное управление якорным напряжением.

Вход поезда в тоннель и выход из него приводят к перепадам аэродинамического сопротивления примерно на 30 % [1, 6, 8, 10], что может приводить к резким колебаниям ускорения и скорости движения. Это недопустимо

и делает целесообразной автоматизацию управления им. При входе и выходе из тоннеля это дополнительное сопротивление изменяется почти по линейному закону. Поэтому при моделировании такого режима движения считалось, что аэродинамическое сопротивление ему описывают соотношения:

$$F_{ADx}^* = F_{ADx} \cdot [1 + (1/0,7 - 1) \cdot \kappa];$$

$$\kappa = \begin{cases} 0 & \forall x < \xi_{ts} - 0,5 \cdot l_v \vee x > \xi_{tf} + 0,5 \cdot l_v; \\ (x + 0,5 \cdot l_v - \xi_{ts}) \cdot l_v^{(-1)} & \forall \xi_{ts} - 0,5 \cdot l_v \leq x \leq \xi_{ts} + 0,5 \cdot l_v; \\ 1 & \forall \xi_{ts} + 0,5 \cdot l_v < x < \xi_{tf} - 0,5 \cdot l_v; \\ (\xi_{tf} - x + 0,5 \cdot l_v) \cdot l_v^{(-1)} & \forall \xi_{tf} - 0,5 \cdot l_v \leq x \leq \xi_{tf} + 0,5 \cdot l_v, \end{cases} \quad (9)$$

где  $l_v$  – длина поезда;  $\xi_{ts}, \xi_{tf}$  – расстояния от точки начала отсчёта пути до начала и конца тоннеля. Цель управления при движении в тоннеле:

$$\ddot{x}(t) = \ddot{x}_{ts} = const, \quad (10)$$

где  $\ddot{x}_{ts}$  – ускорение поезда при входе в тоннель. Этого условие достигается частотным, амплитудно-частотным либо фазо-частотным управлением напряжением  $U_a$ . Требуемые законы его изменения найдены с использованием модели (2) (в которой  $F_{ADx}$  заменено величиной  $F_{ADx}^*$ , вычисляемой согласно соотношениям (9), а  $\dot{x}$  заменено величиной  $\ddot{x}_{ts}$ , вычисляемой согласно (10)), а также модели динамики ЛСД [4].

Иллюстративные примеры результатов исследования движения МЛП в тоннеле приведены на рис. 7–12. Рис. 7 и 8 соответствуют управлению частотой якорного напряжения, рис. 9 и 10 – амплитудно-частотному управлению этим напряжением, а рис. 11 и 12 – фазо-частотному управлению. При этом на рис. 7, 9

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

и 11 приведены графики скорости экипажа, а на рис. 8, 10 и 12 – графики действующей на него тяговой силы ЛСД.

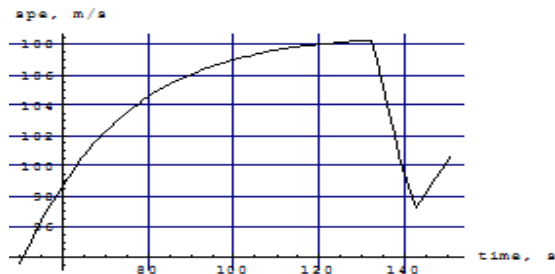


Рис. 7. График скорости поезда во время движения в тоннеле при управлении частотой напряжения

Fig. 7. The train's speed graph at motion in the tunnel while frequency voltage controlling

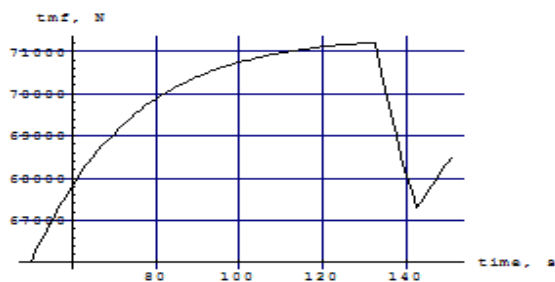


Рис. 8. График тяговой силы МЛП во время движения в тоннеле при управлении частотой напряжения

Fig. 8. The maglev train's traction force graph at motion in the tunnel while frequency voltage controlling

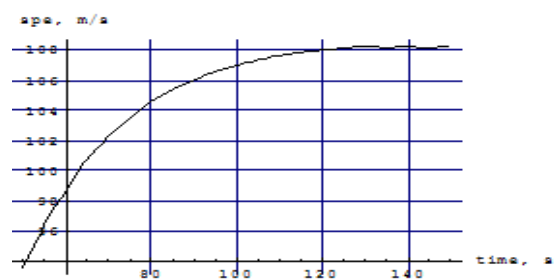


Рис. 9. График скорости поезда во время движения в тоннеле при амплитудно-частотном управлении напряжением

Fig. 9. The train's speed graph at motion in the tunnel with amplitude-frequency voltage control

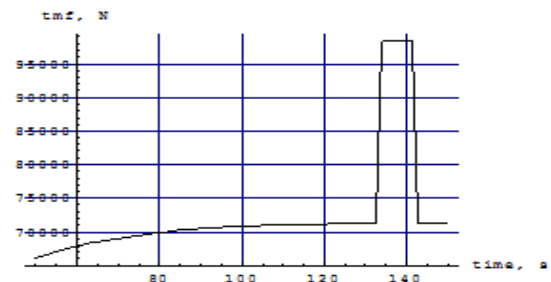


Рис. 10. График тяговой силы МЛП во время движения в тоннеле при амплитудно-частотном управлении напряжением

Fig. 10. The maglev train's traction force graph at motion in the tunnel with amplitude-frequency voltage control

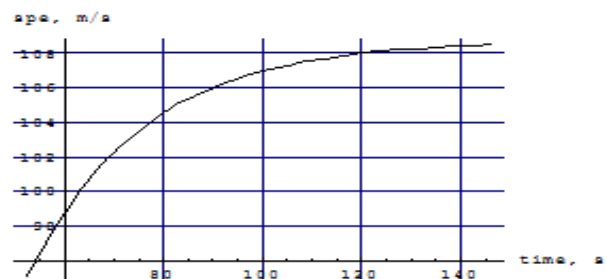


Рис. 11. График скорости поезда во время движения в тоннеле при фазо-частотном управлении напряжением

Fig. 11. The train's speed graph at motion in a tunnel with phase-frequency voltage control

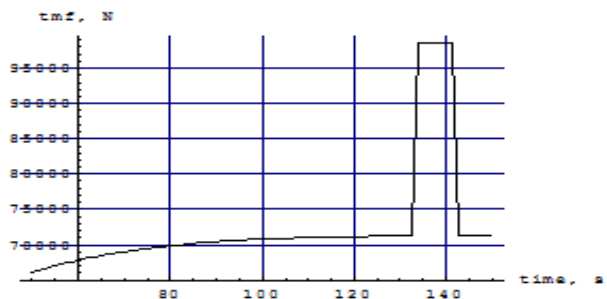


Рис. 12. График тяговой силы МЛП во время движения в тоннеле при фазо-частотном управлении напряжением

Fig. 12. The maglev train's traction force graph at motion in a tunnel with phase-frequency voltage control

Анализ результатов моделирования указанных трёх вариантов управления проходом поезда сквозь тоннель приводит к следующим

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

выводам. В случае только частотного управления перепад значения скорости МЛП составляет около 10 %, что, безусловно, недопустимо. Иные два способа автоматического регулирования напряжения примерно эквивалентны, так как в обоих этих случаях отсутствуют сколь угодно существенные колебания скорости и ускорения МЛП при проходе тоннеля. В то же время фазо-частотный способ регулирования проще (поскольку отпадает необходимость регулирования высоковольтных напряжений). Однако при амплитудно-частотном регулировании пиковые значения фазовых токов примерно в полтора раза ниже, что снижает токовую нагрузку на электрооборудование двигателя.

В процессе движения МЛП происходит взаимное перемещение якорной и индукторных обмоток ЛСД. В этих обмотках индуцируются электродвижущие силы взаимной индукции, ведущие к возникновению механических сил, противодействующих взаимному смещению обмоток. Напряжение, питающее якорную обмотку двигателя, обычно компенсирует указанные электродвижущие силы, и ЛСД работает в тяговом режиме. Но если текущее значение якорного напряжения  $u_v \forall v \in [A, B, C]$  снижается, двигатель автоматически переходит в тормозной режим. Как и разгон МЛП, его электродинамическое торможение должно быть плавным. Поэтому двумя наиболее приемлемыми путями осуществления служебного торможения поезда являются амплитудно-частотное и фазо-частотное регулирование якорного напряжения ЛСД. Для реализации указанных режимов плавного регулирования амплитуда и начальная фаза напряжения на якоре могут изменяться, например, согласно законам:

$$U_a(t) = U_a^* \cdot [1 - th(t \cdot k_{vi})]; \quad (11)$$

$$\theta_u(t) = -\alpha_u \cdot th(t \cdot k_{fm}), \quad (12)$$

где  $k_{vi}, k_{fm}$  – коэффициенты, определяющие темп изменения амплитуды и начальной фазы якорного напряжения. Эти законы можно использовать для служебного торможения поезда. Для экстренного же торможения применимо мгновенное снятие питающего напряжения

с якорной обмотки двигателя, но с сохранением замкнутости её контуров – путём двубортного трёхфазного короткого замыкания этой обмотки.

Иллюстративные примеры результатов исследования движения МЛП в различных тормозных режимах приведены на рис. 13–18. Рис. 13 и 14 соответствуют реализации служебного торможения при амплитудно-частотном регулировании напряжения, а рис. 15 и 16 – при фазо-частотном. Наконец, рис. 17 и 18 соответствуют экстремальному торможению – путём двубортного трёхфазного короткого замыкания якорной обмотки ЛСД. При этом на рис. 13, 15 и 17 приведены графики скорости поезда, а на рис. 14, 16 и 18 – графики действующей на него тяговой силы ЛСД.

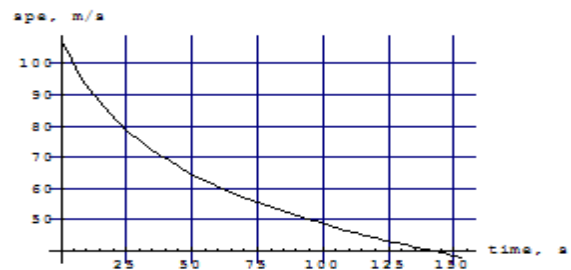


Рис. 13. График скорости поезда во время служебного торможения при амплитудно-частотном регулировании напряжения

Fig. 13. The train's speed graph at service braking with amplitude-frequency voltage control



Рис. 14. График тяговой силы МЛП во время служебного торможения при амплитудно-частотном регулировании напряжения

Fig. 14. The maglev train's traction force graph at service braking with amplitude-frequency voltage regulation

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

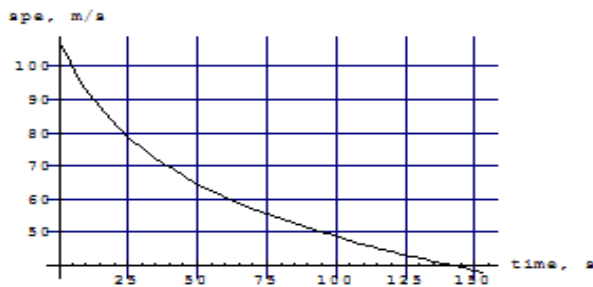


Рис. 15. График скорости поезда во время служебного торможения при фазо-частотном регулировании напряжения

Fig. 15. The train's speed graph at service braking with phase-frequency voltage regulation

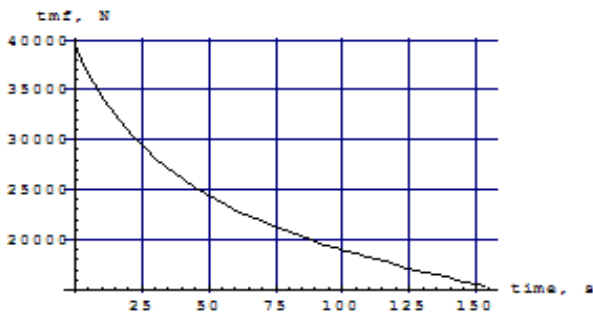


Рис. 16. График тяговой силы МЛП во время служебного торможения при фазо-частотном регулировании напряжения

Fig. 16. The maglev train's traction force graph at service braking with phase-frequency voltage regulation



Рис. 17. График скорости поезда во время экстренного торможения

Fig. 17. The train's speed graph at emergency braking

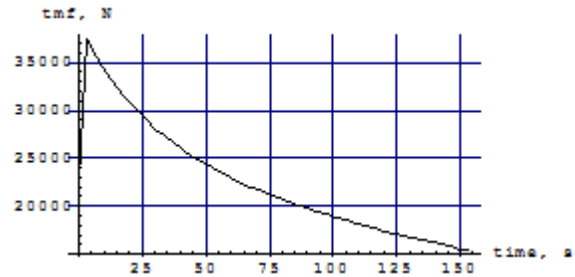


Рис. 18. График тяговой силы МЛП во время экстренного торможения

Fig. 18. The maglev train's traction force graph at emergency braking

Анализ результатов моделирования указанных тормозных режимов движения МЛП позволяет сделать следующие выводы. Рассмотренные режимы служебного торможения (при амплитудно-частотном и фазо-частотном регулировании якорного напряжения двигателя) по реализуемым тормозным характеристикам примерно равноценны. Оба они обеспечивают достаточную плавность изменения ускорения и скорости поезда. Пиковые значения ускорения при этом не превышают  $0,15 \cdot g$ , что вполне приемлемо. Реализация экстренного торможения приводит к значительным пиковым ускорениям – около  $0,22 \cdot g$ , устранить которые не представляется возможным. Однако такое кратковременное повышение ускорения в экстремальных ситуациях является оправданным.

### Научная новизна и практическая значимость

Научная новизна исследования состоит в приоритетности холического исследования нестационарных режимов движения ЭМП МЛП. Основным же проявлением практической значимости является возможность, в случае использования результатов работы, существенного повышения эффективности динамических исследований МЛП при одновременном снижении их ресурсоёмкости.

### Выводы

Путём компьютерного моделирования изучена динамика магнитолевитирующего поезда, подверженного естественным возмущениям

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

и управляемого линейным синхронным двигателем в режимах разгона, прохода тоннеля, а также служебного и экстренного торможения. Анализ полученных результатов позволил оце-

нить динамические качества поезда в рассмотренных нестационарных режимах движения, а также его нагруженность в их процессе. Этим решена задача настоящей части исследования.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Анисимов, В. А. Тяговые расчёты : монография / В. А. Анисимов, В. В. Анисимов. – Хабаровск : [б. и.], 2013. – 185 с.
2. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией / В. А. Дзензерский, В. И. Омеляненко, С. В. Васильев [и др.]. – Киев : Наукова думка, 2001. – 479 с.
3. Поляков, В. А. Модель процесса реализации тяговой силы двигателя магнитолевитирующего поезда / В. А. Поляков, Н. М. Хачапуридзе // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 4 (64). – С. 55–62. doi: 10.15802/stp2016/77909
4. Baker, C. The Flow Around High Speed Trains / C. Baker // J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2010. – Vol. 98. – Iss. 6-7. – P. 277–298. doi: 10.1016/j.jweia.2009.11.002
5. Behbahani, H. Development of technical and economical models for widespread application of magnetic levitation system in public transport / H. Behbahani, H. Yaghoubi, M. A. Rezvani // International Journal of Civil Engineering. – 2012. – Vol. 10, No. 1. – P. 13–24.
6. Choi, J.-K. Effects of nose shape and tunnel cross-sectional area on aerodynamic drag of train traveling in tunnels / J.-K. Choi, K.-H. Kim // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2014. – Vol. 41. – P. 62–73. doi: 10.1016/j.tust.2013.11.012
7. Djabbarov, S. T. Aerodynamic field model of high-speed train / S. T. Djabbarov, M. Mirakhmedov, B. Mardonov // Transport Problems : VIII Conf. Intern. (27.06–29.06.2016) / Silesian University of Technology. – Katowice, 2016. – P. 107–115.
8. CFD simulation of train aerodynamics: train-induced wind conditions at an underground railroad passenger platform / A. Khayrullina, B. Blocken, W. Janssen, J. Straathof // J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2015. – Vol. 139. – P. 100–110. doi: 10.1016/j.jweia.2015.01.019
9. Paudel, N. Modeling the dynamic electromechanical suspension behavior of an electrodynamic eddy current maglev device / N. Paudel, J. Z. Bird // Progress in Electromagnetic Research B. – 2013. – Vol. 49. – P. 1–30. doi: 10.2528/pierb12121115
10. Rabani, M. Numerical analysis around a passenger train entering the tunnel / M. Rabani, A. K. Faghih // Tunneling and Underground Space Technology. – 2015. – Vol. 45. – P. 203–213. doi: 10.1016/j.tust.2014.10.005
11. Yaghoubi, H. Development of a Maglev Vehicle/Guideway System Interaction Model and Comparison of the Guideway Structural Analysis with Railway Bridge Structures / H. Yaghoubi, H. Ziari // Journal of Transportation Engineering. – 2011. – Vol. 137. – Iss. 2. – P. 140–154. doi: 10.1061/(asce)te.1943-5436.0000197

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

<sup>1\*</sup>Від. № 7 Інституту транспортних систем і технологій НАН України, вул. Пісаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 232 30 55, ел. пошта p\_v\_a\_725@i.ua, ORCID 0000-0002-4957-8028

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

## ПОЗДОВЖНІ НЕСТАЦІОНАРНІ РУХИ МАГНІТОЛЕВІТУЮЧОГО ПОЇЗДА

**Мета.** Якість транспортування пасажирів і вантажів магнітолевітуючим поїздом (МЛП) є ключовим критерієм оцінки його споживчих властивостей. Визначальний вплив на цю якість має динаміка електромеханічної підсистеми (ЕМП) поїзда. Особливо критичні нестационарні режими руху цієї підсистеми, такі як набір швидкості, службове й екстрене гальмування, а також проходження тунелю. Тому рух поїзда в таких режимах



## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

лімітовано допустимими нормами безпеки. Зважаючи на зазначене, мета цього дослідження полягає в оцінці динамічних якостей і навантаженості поїзда в нестационарних режимах. **Методика.** На сучасному етапі основним і найбільш універсальним інструментом аналізу й синтезу процесів у системах є їх математичне і, зокрема, комп'ютерне моделювання. Тому робота виконана шляхом проведення ряду експериментів із комп'ютерною моделлю динаміки ЄМП МЛП, отриманої в результаті релевантного впровадження в неї відповідної моделі математичної. Комп'ютерна модель програмно зафіксована вхідною мовою системи комп'ютерної математики Mathematica. **Результати.** Отримані результати моделювання наведені в графічній формі й відображають рух поїзда в режимах розгону, проходження тунелю, а також службового й екстреного гальмування. Керування електромеханічною підсистемою поїзда в усіх розглянутих перехідних режимах руху, за винятком екстреного гальмування, здійснюють шляхом зміни, згідно з тим чи іншим законом, напруги, що живить якірну обмотку лінійного синхронного двигуна. Тому під час моделювання руху поїзда в кожному з таких режимів розглянуті варіанти тільки частотного, амплітудно-частотного, а також фазо-частотного керування змінною якірної напруги двигуна. Аналіз результатів моделювання дозволив оцінити динамічні якості МЛП в різних нестационарних режимах руху і його навантаженість у їх процесі. **Наукова новизна.** Дослідження пропонує установити пріоритетність холичного розгляду нестационарних режимів руху електромеханічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда. **Практична значимість.** Основним проявом практичної значимості роботи є можливість, у разі використання її результатів, істотного підвищення ефективності динамічних досліджень нестационарних режимів магнітолевітуючого поїзда за одночасного зниження їх ресурсомісткості.

*Ключові слова:* магнітолевітуючий поїзд; МЛП; нестационарні режими руху; динамічні якості; динамічна навантаженість; комп'ютерний експеримент

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

<sup>1\*</sup>Dep. No. 7 of the Institute of Transport Systems and Technologies of NAS of Ukraine, Pisarzhevskiy St. 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 232 30 55, e-mail p\_v\_a\_725@i.ua, ORCID 0000-0002-4957-8028

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

## LONGITUDINAL NON-STATIONARY MOTIONS OF MAGLEV TRAIN

**Purpose.** The quality of passenger's and good's transportation by a magnetically levitated train (MLT) is a key criterion for evaluating its consumer properties. The dynamics of a train's electromechanical subsystem (EMS) has a decisive influence on this quality. Non-stationary modes of this subsystem's motion, such as a speed increase, service and emergency braking, as well as the passage of the tunnel are especially critical. Therefore, the train's motion in such modes is limited by acceptable safety standards. Based on this, the purpose of this study is to assess the dynamic qualities and load of the train in the above-mentioned non-stationary modes. **Methodology.** At the present stage, the main and most universal tool for analyzing and synthesizing processes in systems is their mathematical and, in particular, computer modelling. On this basis, the work was done by conducting a series of experiments with computer model of EMS MLT dynamics. This computer model was obtained as a result of the relevant transformation of the corresponding mathematical model into it. The mentioned computer model was programmatically recorded in the input language of the Mathematica computer mathematics system. **Findings.** The obtained results of modelling are presented in graphical form and reflect the train's motion in the modes of acceleration, the passage through a tunnel, as well as service and emergency braking. The control by the train's electromechanical subsystem in all considered transient modes of motion, with the exception of emergency braking, is carried out by changing the voltage feeding of the linear synchronous motor's armature's winding according to one or another law. Therefore, during modelling the train's motion in each of these modes, frequency, amplitude-frequency, and phase-frequency control options for the motor's armature's voltage changing were considered. Analysis of the simulation results made it possible to estimate the MLT's dynamic qualities in various non-stationary modes of motion and its load in their process. **Originality.** The research suggests setting the priority of the holistic consideration of non-stationary modes of MLT's EMS's motion. **Practical value.** The main manifestation of the practical value of the work is the possibility, in the case of using its results, of significant increasing in the efficiency of dynamic studies of MLT while reducing their resource intensity.

*Keywords:* magnetically levitated train; MLT; nonstationary modes of motion; dynamic qualities; dynamic loading; computer experiment



## REFERENCES

1. Anisimov, V. A., & Anisimov, V. V. (2013). *Tyagovye raschety: Monografiya*. Khabarovsk. (in Russian)
2. Dzenzerskiy, V. A., Omelyanenko, V. I., Vasilev, S. V., Matin, V. I., & Sergeev, S. A. (2001). *Vysokoskorostnoy magnitnyy transport s elektrodinamicheskoy levitatsiey*. Kiev: Naukova dumka. (in Russian)
3. Polyakov, V. O., & Khachapuridze, M. M. (2016). Implementation model of motor traction force of maglev train. *Science and Transport Progress*, 4(64), 55-62. doi: 10.15802/stp2016/77909 (in Russian)
4. Baker, C. (2010). The flow around high speed trains. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 98(6-7), 277-298. doi: 10.1016/j.jweia.2009.11.002 (in English)
5. Behbahani, H., Yaghoubi, H., & Rezvani, M. A. (2012). Development of technical and economical models for widespread application of magnetic levitation system in public transport. *International Journal of Civil Engineering*, (10/1), 13-24. (in English)
6. Choi, J.-K., & Kim, K.-H. (2014). Effects of nose shape and tunnel cross-sectional area on aerodynamic drag of train traveling in tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 41, 62-73. doi: 10.1016/j.tust.2013.11.012 (in English)
7. Djabbarov, S. T., Mirakhmedov, M., & Mardonov B. (2016). Aerodynamic field model of high-speed train. In *Proceedings of the VIII International Conference Transport Problems, June 27-29, Katowice*. (pp. 107-115). Katowice: SilesianUniversity of Technology. (in English)
8. Khayrullina, A., Blocken, B., Janssen, W., & Straathof, J. (2015). CFD simulation of train aerodynamics: traininduced wind conditions at an underground railroad passenger platform. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 139, 100-110. doi: 10.1016/j.jweia.2015.01.019 (in English)
9. Paudel, N., & Bird, J. Z. (2013). Modeling the dynamic electromechanical suspension behavior of an electrodynamic eddy current maglev device. *Progress in Electromagnetics Research B*, 49, 1-30. doi: 10.2528/pierb12121115 (in English)
10. Rabani, M. & Faghih, A. K. (2015) Numerical analysis around a passenger train entering the tunnel. *Tunneling and Underground Space Technology* (45), 203–213. doi: 10.1016/j.tust.2014.10.005 (in English)
11. Yaghoubi, H., & Ziari, H. (2011). Development of a Maglev Vehicle/Guideway System Interaction Model and Comparison of the Guideway Structural Analysis with Railway Bridge Structures. *Journal of Transportation Engineering*, 137(2), 140-154. doi: 10.1061/(asce)te.1943-5436.0000197 (in English)

Поступила в редколлегию: 16.11.2018

Принята к печати: 20.03.2019

УДК 629.463.077

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

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ДУАЛЬНОГО ЗНОСУ КОЛОДОК У ГАЛЬМОВІЙ СИСТЕМІ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ

**Мета.** Це дослідження спрямоване на виявлення особливостей дуального зносу колодок у гальмовій системі вантажних вагонів. **Методика.** Проведено комплекс теоретичних та експлуатаційних досліджень причин і наслідків дуального зносу колодок як найбільш розповсюдженого у вантажних вагонах. За допомогою теорії планування експерименту й на підставі зібраного статистичного матеріалу виконано адаптоване математичне моделювання процесу дуального зносу та визначено негативні фактори. Для дослідження використано програмне забезпечення Mathcad і комп'ютерну програму «STATISTIKA». **Результати.** Порівняльний аналіз різноманітних пристроїв для рівномірного зносу гальмових колодок показав недостатню їх ефективність. Установлено, що типові пристрої рівномірного зносу гальмових колодок (до 95 %) за дією значних динамічних навантажень перебувають у пошкоджені стані. Тому колодки нахилі, притиснуті верхніми крайками до поверхонь кочення коліс і під час руху в поїздах без гальмування здійснюють шкідливе тертя з утворенням подвійного фрикційного зносу робочого тіла. Теоретично доведено, що в шарнірному з'єднанні вертикального важеля з розпіркою триангеля утворюється шкідливо діючий крутий момент від гравітаційних сил, який стає основною причиною дуального зносу гальмових колодок. Кінестатичний аналіз з урахуванням динамічних сил у невіднесеної частині візка дозволив встановити причину дуального зносу та визначити можливість ліквідації вказаного моменту сил у наявній гальмовій системі. За виконаною НДКР і розпорядженням від Укрзалізниці проведено експлуатаційні випробовування на 10 напіввагонах виробництва Крюківського ВБЗ, які підтвердили результати виконаних теоретичних досліджень. **Наукова новизна.** Уперше виявлено явище, якому дано визначення – дуальний знос гальмових колодок. Започатковано його дослідження. Розроблено математичну регресійну модель для встановлення основної причини дуального зносу колодок у типовій механічній гальмовій системі трьохелементних візків. Адаптовано математичний підхід до планування експериментів із побудовою відповідних схем-моделей, за якими виявлено шкідливо діючий момент сил, що нахилає триангель на маятникових підвісках до впирання верхніми крайками гальмових колодок у поверхні кочення колісної пари. **Практична значимість.** Результати проведених досліджень можна використовувати під час проектування, модернізації й експлуатації гальмових систем як експлуатаційного парку, так і трьохелементних візків нового покоління.

**Ключові слова:** дуальний знос; гальмова колодка; гальмова важільна передача; триангель; модель; статистичний аналіз; кінестатичний аналіз; момент сили; динамічні сили; експлуатаційні випробовування

### Вступ

Якнайважливіше значення для залізничної інфраструктури має зменшення собівартості перевезень. Технічний стан і надійність рухомого складу в цьому відіграє основну роль. Його гальмове обладнання істотно впливає як на безпеку руху, так і на енергоощадження. Але нині спостерігається критична ситуація з ненормативним збитковим зносом гальмових колодок у вантажних вагонах.

У вантажних поїздах під час руху без гальмування масово відбувається шкідливе тертя

нахилених та притиснутих до поверхні кочення коліс верхніх крайок гальмових колодок. Таке тертя завдає значних збитків для вантажних перевезень.

Збільшується опір рухові, на переборювання якого зайво витрачаються енергоносії на тягу поїздів. Колодки зношуються дуально, тобто на їх робочих поверхнях утворюються дві площини зносу: верхня шкідлива – від пасивного тертя по колесах у разі попущених гальм, і нижня робоча – під час здійснення активного гальмування. При цьому активна поверхня колодок зменшується на величину верхньої стертості. Тому й ефективність гальмувань пропорційно

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

погіршується, що створює загрозу безпеці руху [2]. Під час гальмувань контактні сили натиснення на дуально зношені колодки розподіляються ексцентрично вздовж зменшеної робочої площі тертя, через що на верхніх її частинах зосереджуються значно більші сили тертя та концентрується інтенсивне фрикційне тепловиділення. Це стає причиною утворення у великій кількості на поверхні кочення коліс високотемпературних пошкоджень (мікротріщин, вищербин та ін.). Нині майже всі колісні пари вантажних вагонів працюють із такими дефектами, через це динаміка перекочування коліс по рейках має додатково збільшений опір рухові та підвищені енерговитрати на тягу вантажних поїздів.

Напрацювання на ресурс гальмових колодок за дуального зносу не досягає 50 %. Тому їх масово замінюють на нові з великими залишками робочого тіла через загрозу безпеці руху.

Спостерігаються випадки, коли у вагонах, щойно випущених із вагоноремонтних чи вагонобудівних підприємств, гальмові колодки нахилені й труть верхніми окрайками по колесах. Тобто пристрої рівномірного відведення колодок уже не працюють.

Наведені в статті результати досліджень стосуються виявлення основних причин дуального зносу гальмових колодок із врахуванням просторової розгалуженості частин і деталей, із яких складається важільно-шарнірна гальмова система візка, із використанням кінетостатичного аналізу механізму. Враховано переміщення й вплив силових факторів, що виникають і діють у шарнірних з'єднаннях, як під час гальмувань, так і в разі попуску гальм.

Вирішення проблеми дуального зносу гальмових колодок наявної, як на сьогодні, досить ефективної гальмової важільної передачі (ГВП) візка потребує новітніх конструкторських рішень.

Проблема нерівномірного зносу гальмових колодок виникла на початку застосування литих конструкцій трьохелементних візків МТ-50 і ЦНП-ХЗ, вона була пов'язана зі зменшенням ресурсу гальмових колодок через клиноподібний знос. Вивченню причин і наслідків такого явища присвячено велику кількість праць [4, 12]. Потрібно відзначити роботу [5], у якій

доведено, що кількість зайвих зв'язків, які перешкоджають самоустановленню гальмових колодок у візку відносно поверхні кочення коліс після попуску гальм, досягає великих значень – 12. Для їх зменшення було рекомендовано конструкторські зміни затягувань вертикальних важелів. Однак за півстоліття така пропозиція не доведена до робочої досконалості й не набула практичного втілення. Хоча таке рішення могло б сприяти не тільки самоустановленню колодок відносно поверхні кочення колісних пар, а й підвищенню ефективності гальмувань під час проходження кривих ділянок рейкової колії.

Вивчення науково-технічних і рекламних джерел інформації про працездатність ГВП сучасних вантажних вагонів доводить, що ні одна з новітніх конструкцій візків із ГВП [8, 12, 14] не вирішує проблеми через те, що їх розробники пропонували створювати різноманітні допоміжні пристрої протидії силам, які нахилляють колодки до впирання в колеса у візках тільки на підставі кінетостатичного аналізу механізму ГВП [7].

У статті [13] визначено, що конфігурація ГВП, яку нині використовують у двовісних візках вантажних вагонів, у разі установлення гальмових колодок максимальної товщини не забезпечує їх знос до мінімально допустимої величини в експлуатації без додаткового ручного регулювання. Однак автори статті не висвітлюють питання клиноподібного й дуального зносу гальмових колодок. У праці [3] розроблена методика оцінки натиснень гальмових колодок, що містить структурний аналіз механізму ГВП, визначення положень ланок на основі координатного методу й силового аналізу, який базується на розгляді ГВП як плоского механізму, що перебуває в статиці. Дослідження виконано за номінальних розмірів гальмових колодок і різних діаметрів коліс, однак розгляд питань, пов'язаних із дуальним фрикційним зносом і його впливом на гальмову силу натиснення, залишився поза увагою. У роботі [11] наведено обґрунтування координації розмірних ланцюгів ГВП вантажного вагона з метою визначення характеру й величини зносу гальмових колодок. Запропоновано методику розрахунку розмірних ланцюгів ГВП, яка дозволяє

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

визначити граничні відхилення складових ланок для гальмових колодок, які зношуються рівномірно.

Колектив авторів у праці [1] наводить результати порівняльних випробувань різних типів гальмових колодок українського й закордонного виробництва у візках вантажних вагонів. Випробування колодок зі вставками вітчизняного виробника й колодок виробництв США підтвердили їх здатність зменшувати кількість дефектів на поверхні кочення коліс. Однак необхідно зазначити, що наявна конструкція й робота ГВП візка вантажного вагона буде сприяти утворенню дуального зносу будь-яких типів гальмових колодок.

Зважаючи на гостру актуальність цієї проблеми, фахівці й науковці різних країн провели значну кількість досліджень, на підставі яких розроблено різноманітні пристрої й механізми ГВП для усунення чи сповільнення інтенсивного зносу колодок, наприклад, клиноподібного. У праці [9] 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 періодичних 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) [12] можна зазначити, що істотна зміна кріплення триангеля спиранням 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

шипів 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.

У проаналізованих закордонних роботах надана перевага експериментальним підходам, які базуються на дослідженнях зносових і температурних показників працездатності елементів гальмових системи рухомого складу [16, 18], а деякі зосереджені на використанні спеціальних чавунних гальмових колодок [17]. Водночас не виявлено джерел із дослідженням ненормативного зносу гальмових колодок, якому притаманне двоплощинне їх стирання, що нині масово відбувається в гальмових системах вантажних вагонів і завдає істотних збитків галузі залізничного транспорту.

### Мета

Це дослідження спрямоване на актуалізацію проблеми маловивченого ненормативного й збиткового для залізничної галузі явища – дуального зносу гальмових колодок у візках вантажних вагонів.

Для досягнення зазначеної мети необхідно вирішити такі завдання:

- виявити й дослідити недоліки в конструкції гальмової системи трьохелементних візків вантажних вагонів, що стають причиною дуального зносу колодок;
- виконати моделювання процесів утворення на гальмових колодках верхньої стертості, формування й зростання дуального зносу у взаємодії з колесами вагона для визначення негативних факторів зменшення ресурсу гальмових колодок і коліс, погіршення ефективності гальмувань і збільшення опору рухові в поїздах;
- виробити методику досліджень і напрямки конструкторсько-технологічних рішень для досягнення можливості ефективної модернізації як наявної гальмової системи у візках експлуатаційного парку вантажних вагонів, так і інноваційних візків.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

## Методика

Відомо, що найбільш складною задачею кінетостатичного структурного аналізу механізму є визначення коректних моделей чи схем силового аналізу ГВП. Це обумовлено перш за все тим, що поки не існує надійних методів експериментальної перевірки теоретичного вирішення такої задачі. У зв'язку з цим під час аналізу враховують велику кількість факторів, які впливають на процеси, що досліджують за кінематикою або динамікою. Безсумнівно, що чим більше їх включено в постановній частині задачі, тим точніші результати слід очікувати під час її розв'язання. Однак таке твердження  $a - a$

справедливе лише за умови достовірності первинного матеріалу, на базі якого будують дослідження.

Якщо враховувати, що схема-модель рис. 1,  $a$  – плоска проекція 1/2 конструкції ГВП з розпіркою триангеля 3, тоді зрозуміло, що небажані силові фактори, пов'язані з додатковим динамічним навантаженням від сумарної маси деталей, приєднаних до розпірки триангеля з числом ступенів вільності механізму  $W=2$  й однією зайвою рухомістю механізму ГВП, утворюють руйнівні дії на типовий пристрій рівномірного зносу колодок.

$b - b$

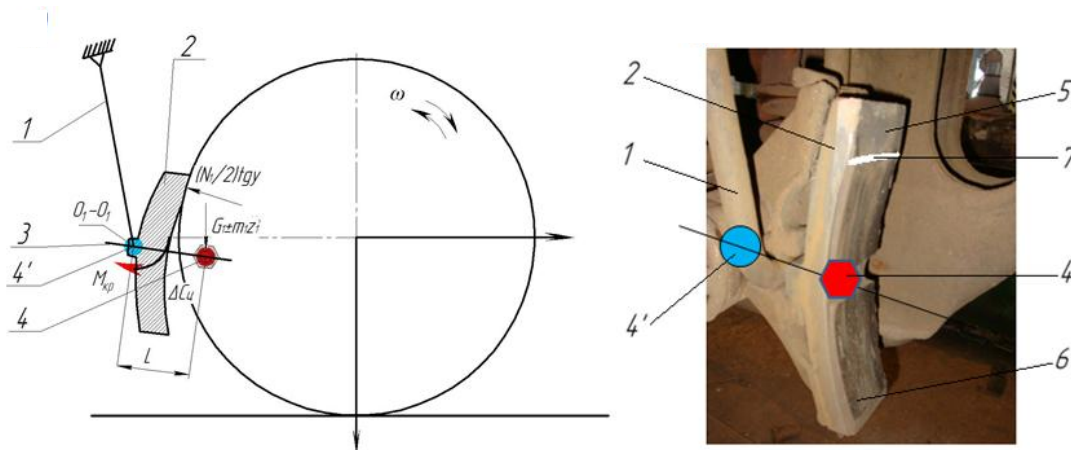


Рис. 1. Схема дії сил на триангель для визначення місця розташування отвору з метою ліквідації крутного моменту, що зумовлює дуальний знос колодок:

$a$  – відтворення початкового осередку стирання верхнього краю колодки під час руху без гальмувань;  $b$  – експлуатаційний вигляд дуального зносу гальмової колодки; 1 – маятникова підвіска; 2 – гальмова колодка; 3 – розпірка триангеля; 4 – шарнір з'єднання вертикального важеля з розпіркою триангеля; 4' – шарнір з'єднання вертикального важеля з розпіркою триангеля, в разі його перенесення на відстань  $L$ ; 5 – площина шкідливої стертості колодки; 6 – площа робочої гальмової стертості; 7 – лінія розмежування площин верхньої й нижньої стертостей дуального зносу гальмової колодки

Fig. 1. Scheme of forces' action on the brake beam to determine the aperture location for liquidation of torque, which causes the dual wear of pads:

$a$  – reproduction of the initial center of the attrition of the upper edge of pad when moving without braking;  $b$  – operational view of the dual wear of the brake pad; 1 – pendulum suspension; 2 – brake pad; 3 – brake beam king post; 4 – articulation pivot of the vertical lever with the brake beam king post; 4' – articulation pivot of the vertical lever with the brake beam king post, in case of its transfer to a distance  $L$ ; 5 – the plane of harmful attrition of the pad; 6 – the area of operational brake attrition; 7 – the delimitation line of the planes of the upper and lower attritions of the dual wear of a brake pad

На рис. 1,  $a$  наведено схему дії гравітаційно утворених сил від ваги приєднаних до розпірки триангеля 3 деталей, з утворенням крутного моменту. На триангель діють статична й динамічна сили  $G_1 \pm m_1 \ddot{z}_1$ , які утворюються від ваги деталей ГВП, приєднаних до його розпірки 3.

Під дією цієї сили на плече  $L$  виникає крутий момент  $M_{кр}$ , який повертає триангель навколо нижніх шарнірів маятникових підвісок до впирання верхньою частиною обох колодок, жорстко приєднаних до триангеля, у поверхню коління колісної пари і врівноважується реакцією

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

$(N_1/2)tg\gamma$ , що починає діяти в зоні зіткнення колодок з колесами. Деталі ГВП, масою яких створюється динамічна сила  $G_1 \pm m_1 \ddot{z}_1$  і момент  $M_{кр}$ , з'єднані між собою шарнірами з досить великими зазорами (1–10 мм) і розташовані в невідпресореній частині візка. Тому під час руху вагона створюються вимушені дуже інтенсивні ударного характеру коливання цих деталей, що спричиняє руйнування типового пристрою рівномірного зносу гальмових колодок. У зв'язку з тим, що в усіх винайдених конструкціях пристроїв, призначених для усунення клиноподібного зносу гальмових колодок, створюється протидія вказаному крутному моменту сил, в експлуатації вони швидко руйнуються й мають дуже незначний ресурс [4].

На рис. 2, *а* наведено характерне пошкодження замка 1 та стертість розпірки 2 триангеля в контакті з петлею 3 типового пристрою рівномірного зносу колодок, що стає причиною нахилання гальмової колодки 1 (рис. 2, *б*) до

впирання й утворення стертості її верхівки 5 в колесо в разі попушення гальм.

Для вирішення проблеми дуального зносу гальмових колодок у триангельній системі ГВП поставлена задача досягти ліквідації такої шкідливої дії моменту сил  $M_{кр}$ .

Зі схеми (рис. 1, *а*) видно, що для вирішення проблеми зазначеним способом необхідно ліквідувати плече  $L$ . Для цього шарнір з'єднання вертикального важеля (т.  $C_1$  розпірки триангеля) треба перенести на відстань  $L$  до вісі  $O_1-O_1$ , яка умовно об'єднує обидва шарніри маятникових підвісок триангеля з колодками. Для цього слід зменшити до мінімуму в горизонтальному розмірі такий ланцюжок параметрів:  $L$  (червоний шестигранник 4)  $\rightarrow$  min (блакитне коло 4') (рис. 1, *б*). Тобто не тільки наблизити на відстань  $\Delta C_{ц}$  відповідний отвір розпірки до сумарного центра тяжіння, а ще й мінімізувати параметр  $(L-\Delta C_{ц})$ , якщо це можна виконати конструктивно.

*б – б*

*а – а*

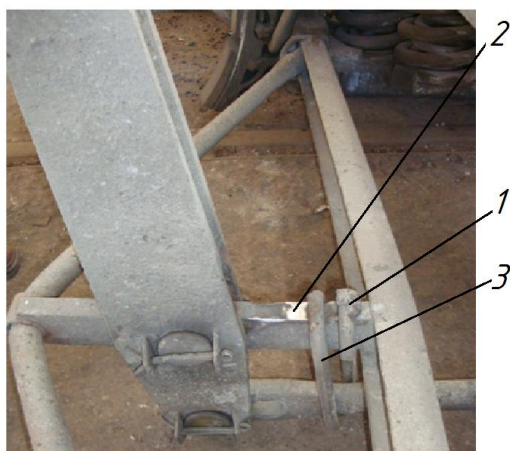


Рис. 2. Характерний вигляд в умовах експлуатації:

*а* – пошкодженого типового пристрою рівномірного зносу колодок; *б* – нахиленої та притиснутої верхівки гальмової колодки до поверхні кочення колеса; 1 – зруйнований замок; 2 – стертість розпірки триангеля; 3 – петля; 4 – гальмова колодка; 5 – стертість верхівки колодки; 6 – колесо

Fig. 2. Typical view in operation conditions:

*а* – damaged standard device of uniform wear of pads; *б* – bent and pressed top of the brake pad to the wheel thread; 1 – destroyed lock; 2 – attrition of the brake beam king post; 3 – loop; 4 – brake pad; 5 – attrition of the pad top; 6 – wheel

Існує спосіб зменшення крутного моменту  $M_{кр}$ , який, вочевидь, пов'язаний зі зменшенням сумарної маси  $m_1$  деталей ГВП візка. Але такий підхід не має практичного втілення.

На відміну від зовнішніх сил  $T_0(t)$ , які дестабілізують рівновагу досліджуваної системи (кінетостатично чи динамічно), внутрішні сили  $\delta T_2 = \delta T_1$  на рівновагу системи не впливають.



## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Визначення обох різновидів пов'язане зі схемою-моделлю, яка наведена на рис. 3. Необхідно звернути увагу й на те, що на час роботи ведучого силового важеля й інших деталей ГВП його рушійна гальмова тяга  $T_0(t)$  спирається одним кінцем на вертикальний важіль ГВП, який шарнірно підвішений до невіднесених боковин візка, а другим кінцем – на обресорену раму вантажного вагона. При цьому всі шарнірні з'єднання деталей ГВП змінюють від коливань своє відносне лінійне й кутове розташування під час руху й гальмування, а також за різних режимів завантаження вагонів [5].

Тут доречно зазначити, що лінійні й кутові зміни координат шарнірних з'єднань деталей, технологічні неточності виготовлення ланок кінематичного ланцюга ГВП порушують умови

рівноваги цього механізму, що істотно впливає на ненормативний знос гальмових колодок.

Таким чином, безпосередньо конструкція трьохелементного візка вантажного вагона з ГВП являє собою систему, яка ідеально забезпечує рівномірний розподіл сил натискання колодок на колеса, тому слід очікувати рівномірний їх знос. Але експлуатація вантажних вагонів показує, що це не так.

Слід зазначити, що схеми-моделі (рис. 1 і 3) навантаження деталей ГВП, які пов'язані з вертикальною динамікою руху вантажного вагона по нерівностях рейкової колії, дозволяють за допомогою структурного аналізу виробити рекомендації стосовно запобігання виникнення дуального зносу гальмових колодок у наявних конструкціях ГВП візків.

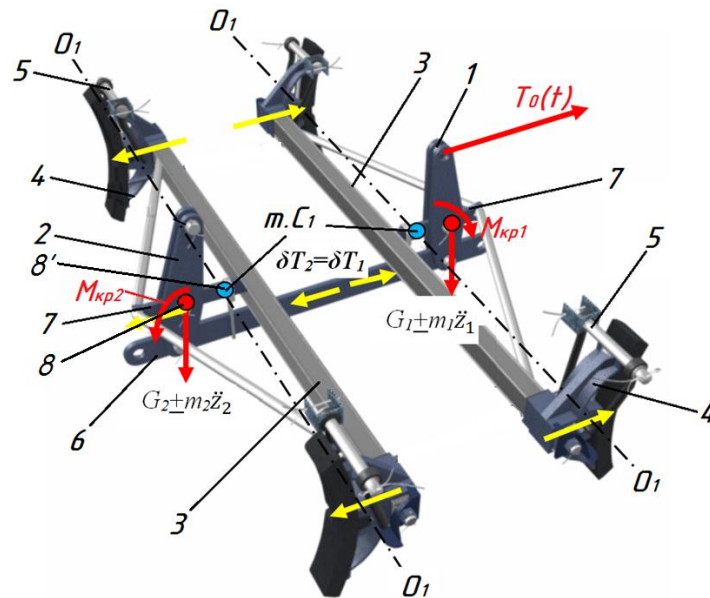


Рис. 3. Схематичне уявлення розподілу силових факторів до проведення кінетостатичного силового аналізу роботи ГВП:

1, 2 – вертикальний важіль; 3 – триангель; 4 – гальмовий башмак з колодкою; 5 – маятникова підвіска триангеля; 6 – з'єднання вертикальних важелів; 7 – розпірка триангеля; 8, 8' – відповідно отвір у розпірці триангеля наявної конструкції та перенесений для ліквідації моменту сили;  $\delta T_2 = \delta T_1$  – внутрішня розпірна сила;

$T_0(t)$  – зовнішня гальмова сила;  $G_1 \pm m_1 \ddot{z}_1$  – гравітаційна динамічна сила;  $M_{кр}$  – крутний момент;

$O_1-O_1$  – умовна вісь нахилання триангеля, що відстає від його центра (т.  $C_1$ ) на відстань  $L$

Fig. 3. Schematic representation of the distribution of force factors before kinetostatic force analysis of the operation of brake lever transmission:

1, 2 – vertical lever; 3 – brake beam; 4 – brake shoe with a pad; 5 – pendulum suspension of the brake beam; 6 – tie rod of vertical levers; 7 – brake beam king post; 8, 8' – respectively, aperture in the brake beam king post of the existing design and the transferred one for the force moment elimination;  $\delta T_2 = \delta T_1$  – internal spreading force;

$T_0(t)$  – external braking force;  $G_1 \pm m_1 \ddot{z}_1$  – gravitational dynamic force;  $M_{кр}$  – torque;

$O_1-O_1$  – conditional declination axis of the brake beam lagging behind its center ( $C_1$ ) at a distance  $L$



## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

*Визначення раціонального місця розташування центра отвору розпірки триангеля для шарнірного з'єднання з вертикальним важелем ГВП за рахунок її модернізації.*

Залишаючись у рамках розглянутої методики ліквідації дуального зносу колодок, на першому кроці модернізації отвір розпірки типових триангелів, де вони з'єднані з вертикальними важелями ГВП, було наближено до умовної лінії  $O_1-O_I$ , що попарно об'єднує шарніри підвіски триангелів з колодками (рис. 1, а). Тут у разі зміни конструктивних параметрів у розпірці триангеля і її з'єднання з вертикальним важелем будуть змінюватися відповідні параметри ГВП візка і знос його гальмових колодок залежно від пробігу. У нашій задачі кількість вхідних параметрів  $n = 2$ , причому натискання гальмових колодок на колеса візка  $Q = 68,67$  кН є сталою величиною [2];  $X_1$  – відстань до отвору розпірки від балки триангеля,  $L$ , мм;  $X_2$  – кут нахилу триангеля,  $\alpha^\circ$ . Кількість вихідних харак-

теристик  $m = 2$ ,  $Y_1$  – знос вверху колодки;  $Y_2$  – знос внизу колодки.

Математична модель механічної гальмової системи (зі складовими:  $\vec{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$  – вхідний вектор змінних параметрів;  $\vec{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$  – вектор вихідних характеристик) буде відповідати спрощеній 2-о параметричній моделі планування експерименту. Сукупність процедур перетворень, що містять функціональні операції, які виконує технічна система, має вигляд:

$$T: \vec{X} \rightarrow \vec{Y}. \quad (1)$$

Подібні задачі пошуку оптимальних (раціональних) рішень формалізують відомими методами теорії планування експериментів.

Під час проведення експериментальних досліджень було отримано статистичні дані про знос гальмових колодок в експлуатації (табл. 1).

Таблиця 1

**Дослідні статистичні дані для визначення раціональних параметрів перенесення отвору в розпірці триангеля на відстань  $L$  з метою ліквідації крутного моменту сил на триангелі**

Table 1

**The experimental statistical data for determining the rational parameters of the aperture transfer in the brake beam king post at a distance  $L$ , for elimination of the torque moment of forces at the brake beam**

Пробіг вагонів, N, тис. км	Товщина зверху колодки, мм	Різниця між номінальною й виміряною товщиною колодки зверху	Товщина знизу колодки, мм	Різниця між номінальною й виміряною товщиною колодки знизу
Типова конструкція ( $L = 224$ мм, $\alpha = 9^\circ$ )				
0	65	0	65	0
3	62,9	2,1	63,5	1,5
7	60,8	4,2	62,5	2,5
9	58,6	6,4	61,1	3,9
17	55,7	9,3	59,5	5,5
24	52,2	12,8	57,5	7,5
30	48,8	16,2	53,5	11,5
40	44,7	20,3	49,3	15,7
60	40,1	24,9	46,4	18,6

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Продовження таблиці 1

Continuation of Table 1

Пробіг вагонів, N, тис. км	Товщина зверху колодки, мм	Різниця між номіна- льною й виміряною товщиною колодки зверху	Товщина знизу колодки, мм	Різниця між номіна- льною й виміряною товщиною колодки знизу
Типова конструкція ( $L = 224$ мм, $\alpha = 9^\circ$ )				
85	32,7	32,3	41,2	23,8
110	22,6	42,4	38,3	26,7
135	16,9	48,1	34,6	30,4
160	11,8	53,2	30,4	34,6
Запропонована конструкція ( $L = 112$ мм, $\alpha = 8^\circ$ )				
0	65	0	65	0
3	63,5	1,5	63,7	1,3
7	62,5	2,5	62,8	2,2
9	60,9	4,1	61,4	3,6
17	58,8	6,2	59,6	5,4
24	56,7	8,3	57,7	7,3
30	53,7	11,3	55,3	9,7
40	48,6	16,4	52,2	12,8
60	42,7	22,3	47,1	17,9
85	38,8	26,2	42,6	22,4
110	34,8	30,2	38,3	26,7
135	29,9	35,1	31,4	33,6
160	20,7	44,3	25,3	39,7

Для знаходження раціональної моделі перенесення отвору в розпірці триангеля з метою ліквідації крутного моменту сил  $M_{кр}$ , за допомогою теорії планування експерименту розроблено поліноміальну квадратичну модель (кубічна парабола), яка враховує реальні зміни найбільш важливих факторів  $x_i$ ,  $i = 1, 2$ , що впливають на кінцевий результат.

Регресійна математична модель зносу гальмових колодок залежно від пробігу вагонів в обох випадках має вигляд наступної функціональної залежності:

$$y = b_0 + b_1 \frac{x}{1000} + b_2 \left( \frac{x}{1000} \right)^2 + b_3 \left( \frac{x}{1000} \right)^3, \quad (2)$$

де  $x$  – пробіг вагонів;  $b_0, b_1, b_2, b_3$  – шукані коефіцієнти регресії.

Для їх знаходження було задіяно метод найменших квадратів (МНК). Результати обчислень наведено в табл. 2, а відповідні графічні залежності зносів гальмових колодок зображено на рис. 4.

Використання проведених розрахунків у середовищі програмного забезпечення Mathcad дозволило оцінити значимості всіх коефіцієнтів регресії за критерієм Стюдента за рівня значимості  $\alpha = 0,005$  і кількості степенів свободи  $N_0 = 10$ . Найширший надійний інтервал склав від 2,0 мм до 1,5 мм, а оцінка середнього відхилення – 0,99 мм.

Таблица 2

## Безрозмірні коефіцієнти регресії за МНК

Table 2

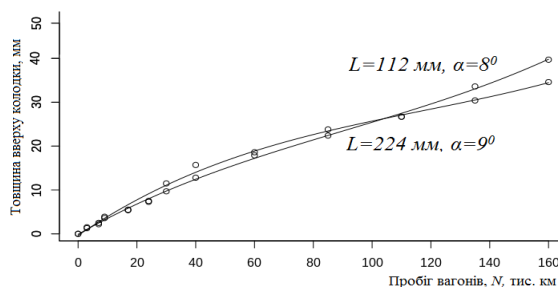
## Non-dimensional regression coefficients according to the least squares method

Місце вимірювання колодки	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$
Типова конструкція ( $L = 224$ мм, $\alpha = 9^\circ$ )				
зверху	$8,208585 \cdot 10^{-1}$	$5,383442 \cdot 10^{-1}$	$-2,192588 \cdot 10^{-3}$	$5,606141 \cdot 10^{-6}$
знизу	$-3,572003 \cdot 10^{-1}$	$4,571698 \cdot 10^{-1}$	$-2,747773 \cdot 10^{-3}$	$7,816891 \cdot 10^{-6}$
Запропонована конструкція ( $L = 112$ мм, $\alpha = 8^\circ$ )				
зверху	$-7,604903 \cdot 10^{-1}$	$5,309275 \cdot 10^{-1}$	$-3,681336 \cdot 10^{-3}$	$1,31264 \cdot 10^{-6}$
знизу	$-1,070960 \cdot 10^{-1}$	$3,819281 \cdot 10^{-1}$	$-1,992730 \cdot 10^{-3}$	$7,280919 \cdot 10^{-6}$

Отримані моделі перевірено на адекватність за критерієм Фішера (F-критерій) за рівня значимості  $\alpha = 0,005$ . Значення F-критерію склали від 1 477 до 5 852 для 3 і 10 степенів свободи. Імовірність отримати такі значення за відсутно-

сті зв'язку між пробігом вагонів і зносом колодки дуже мала ( $F = 1,091e-14$ ). Крім того, значення F-критерію суттєво більше  $F_{кр} = 8,08$  ( $\alpha = 0,005$ ,  $\kappa_1 = 3$ ,  $\kappa_2 = 10$ ), тому побудовані моделі є адекватними з гарантією 99,5 %.

а – а



б – б

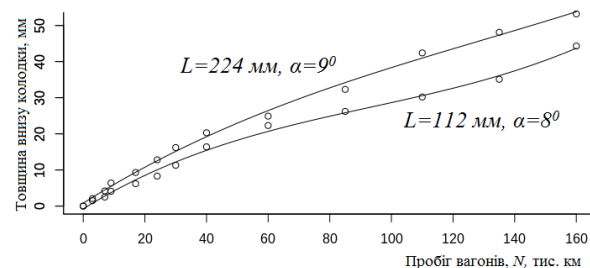


Рис. 4. Регресійні математичні залежності зносу гальмових колодок від пробігу вагонів типової й запропонованої конструкції (точками позначено дані експерименту):

$a$  – верх колодок;  $b$  – низ колодок

Fig. 4. Regression mathematical dependences of brake pads wear on the cars' run of the typical and proposed design (the experiment data are indicated with the dots):

$a$  – pads' top;  $b$  – pads' bottom

На рис. 5 у форматі 3D наведено об'єднані поверхні залежності зносу гальмових колодок від пробігу вагонів, які свідчать, що в наших випадках випуклі екстремуми досліджених функцій відсутні, а найкраще (раціональне) рішення відповідає конструкції розпірки триангеля ГВП з параметрами розміщення шуканого

отвору в розпірці за  $L = 112$  мм і  $\alpha = 8^\circ$ .

На рис. 6 показано дані зносу «верх – низ» гальмових колодок за ознаками пробігу вагонів з типовою (рис. 6,  $a$ ,  $b$ ) й запропонованою (рис. 6,  $в$ ,  $г$ ) конструкцією ГВП візків, які обладнані триангелями з типовими й запропонованими розпірками.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

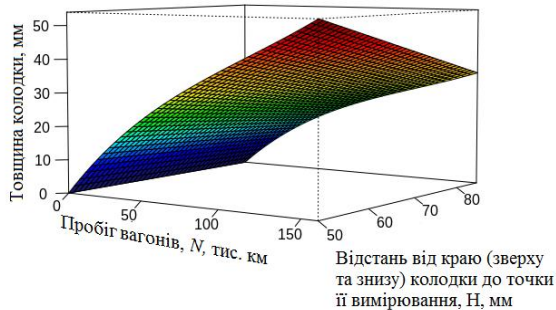
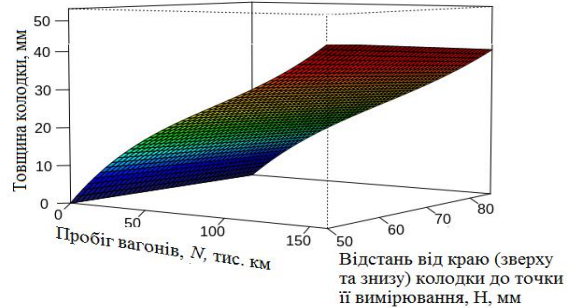
*a – a**б – б*

Рис. 5. Сумарні залежності зносу гальмових колодок від пробігу вагонів для геометрії розпірок:  
*a* – типової конструкції; *б* – запропонованої конструкції

Fig. 5. Total dependencies of brake pads wear on the cars' run for the king posts (strut) geometry:  
*a* – a typical design; *b* – proposed design

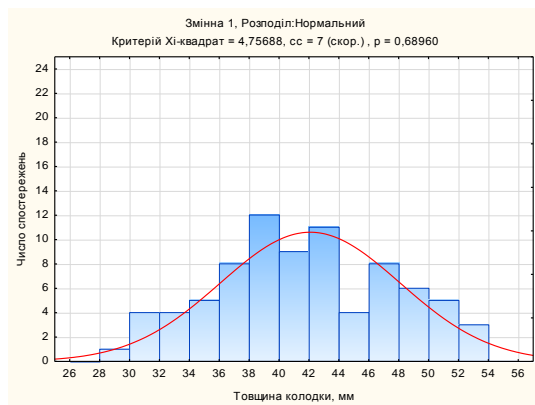
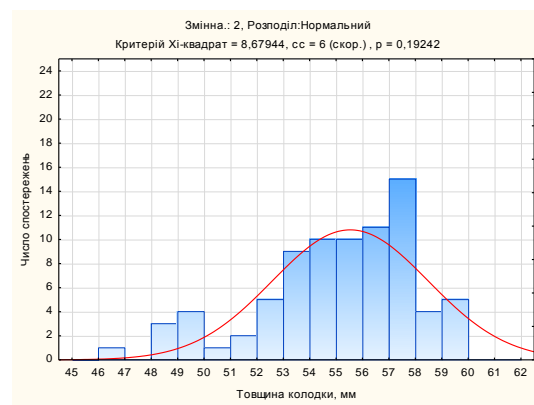
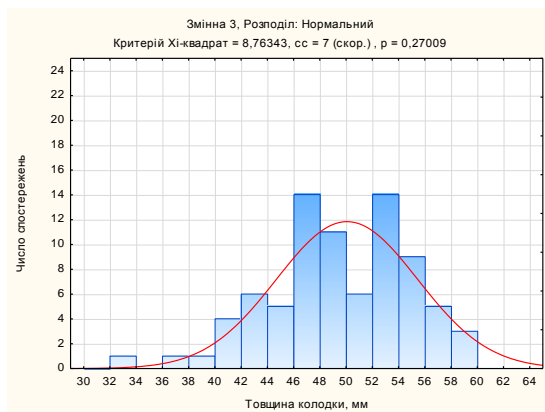
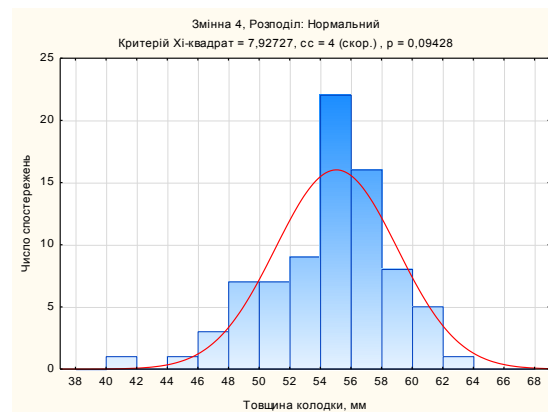
*a**б**в**г*

Рис. 6. Гістограми, побудовані за статистичними даними зносу «верх – низ» гальмових колодок  
у разі пробігу вагонів 60 тис. км:  
*a* і *в* – верхня частина колодки; *б* і *г* – нижня частина колодки

Fig. 6. Histograms are based on statistical wear data «top-bottom» of brake pads at cars' run of 60 ths. km:  
*a* and *c* – the upper part of the pad; *b* and *d* – the lower part of the pad

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ



Рис. 7. Вигляд рівномірного зносу гальмових колодок і необхідного нормативного зазору відносно поверхні кочення колеса у візку дослідного напіввагона після пробігу 84 тис. км:  
1 – гальмова колодка; 2 – зазор між колодкою і колесом

Fig. 7. The view of brake pads' uniform wear and the required standard gap relative to the wheel thread in the bogie of the experimental gondola car after the run of 84 ths. km:  
1 – brake pad; 2 – gap between the pad and the wheel

Із наведених даних видно, що зі збільшенням пробігу вагонів від 27 до 60 тис. км інтенсивність зносу колодок для типових і запропонованих ГВП візків зменшується (рис. 6), хоча тенденція до їх рівномірного зносу за довжиною спостерігається більшою мірою в колодках запропонованої конструкції триангельних ГВП візків (рис. 6, з).

Дослідження виконано на замовлення Укрзалізниці, за їх результатами розроблено конструкторсько-технологічну документацію. Відповідно до неї на Крюковському ВБЗ виготовлено модернізовані деталі ГВП та встановлено на 10 дослідних напіввагонах. За підсумками проведених комісійних обстежень отримано позитивні результати. На рис. 7 наведено вигляд рівномірного зносу гальмових колодок після пробігу 84 тис. км.

Під час випробувань у гальмовій передачі візків, які працюють у дослідних вагонах в умовах експлуатації, вивчено вплив перенесеного отвору в розпірках триангелів на характер зносу колодок у верхній і нижній частинах, змінено розташування вертикальних важелів, приєднаних до перенесених отворів маятникових підвісок гальмових башмаків.

Підсумки випробувань підтверджують теоретичні доводи про те, що з перенесенням отвору в розпірці триангеля на одну пряму із шарнірним з'єднанням маятникових підвісок гальмових башмаків зникає шкідливо діючий крутний момент сил. Таке просте перенесення отвору в розпірці триангеля позитивно впливає

на відведення гальмових колодок під час попуску гальм та на їх розташування й утримання відносно поверхні кочення коліс під час руху вагона без гальмування. А це є головним у забезпеченні рівномірності зносу гальмових колодок.

## Результати

Виконаний порівняльний аналіз типових пристроїв і винайдених за останні роки вітчизняними й іноземними фахівцями різноманітних пристроїв рівномірного зносу гальмових колодок показав недостатню їх ефективність за функціонуванням і конструкцією. Установлено, що в гальмових системах трьохелементних візків експлуатаційного парку вантажних вагонів типові пристрої рівномірного зносу гальмових колодок у великій кількості (до 95 %), за дією на них значних динамічних навантажень, перебувають у пошкодженному стані. Тому гальмові колодки в них нахилені, притиснуті верхівками до поверхонь кочення коліс і під час руху в поїздах без гальмування здійснюють шкідливе тертя з утворенням спотвореного подвійного фрикційного зносу робочого тіла. Такій стертості вперше дано назву – дуальний знос гальмової колодки, і розпочато його дослідження. Теоретично доведено, що в шарнірному з'єднанні вертикального важеля з розпіркою триангеля утворюється шкідливо діючий крутний момент від гравітаційних сил, який нахилиє триангель до впирання верхніми крайками колодок у поверхні кочення коліс. Це стає ос-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

новною причиною дуального зносу гальмових колодок. Кінетостатичний аналіз гальмової важільної передачі, виконаний з урахуванням динамічної складової у непідресореній частині візка, дозволив:

а) встановити, що механічні пристрої різних конструкцій показують низьку надійність тільки тому, що під дією моменту сил вони руйнуються;

б) визначити простий технічний спосіб повної ліквідації вказаного моменту сил у наявній гальмовій системі. За виконаною НДКР і розпорядженням від Укрзалізниці проведено експлуатаційні випробування на 10 напіввагонах виробництва Крюковського ВБЗ, які підтвердили результати теоретичних досліджень: ліквідація крутного моменту сил запобігає дуальному зносу гальмових колодок.

#### Наукова новизна та практична значимість

Уперше виявлено явище, якому дано визначення – дуальний знос гальмових колодок. Започатковано його дослідження. Розроблено математичну регресійну модель для встановлення основної причини дуального зносу колодок у типовій механічній гальмовій системі трьохелементних візків. Адаптовано математичний підхід до планування експериментів із побудовою відповідних схем-моделей, за якими виявлено шкідливо діючий момент сил, що нахиляє триангель на маятникових підвісках до впирання верхніми крайками гальмових колодок у поверхні кочення колісної пари. Аналітично доведено, що ліквідувати такий момент сили в наявній гальмовій системі можна перенесенням отвору в розпірці триангеля.

Результати проведених досліджень можна використовувати під час проектування, модернізації й експлуатації гальмових систем як експлуатаційного парку, так і трьохелементних візків нового покоління.

#### Висновки

На підставі виконаних досліджень можна зробити такі висновки:

1. Накопичено статистичний матеріал за вимірюванням величин зносу 860 гальмових колодок, виконано віртуальне моделювання про-

цесу фрикційного спрацьовування робочого тіла колодок із використанням теорії планування експерименту безпосередньо, в реальних умовах технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів, за результатами якого виявлено особливий ненормативний двоплощинний знос колодок, якому вперше дано визначення – дуальний знос гальмових колодок.

2. Відповідно до зібраних статистичних даних, за характером зносу гальмових колодок маємо: дуально зношених – 95,6 %; клиноподібно моністично зношених – 3,2 %; рівномірно зношених – 1,2 %.

3. Доведено, що дуальний знос гальмових колодок має суттєві негативні наслідки для залізничної галузі: ресурс гальмових колодок зменшений майже на 50 %; ефективність гальмувань, виходячи зі зменшення робочої площі тертя колодок, може погіршуватися до 30 %; тертя нахилених колодок і впертих у поверхні кочення коліс збільшує опір руху, на переборювання якого загальні енерговитрати на тягу вантажних поїздів зростають до 3 %; майже всі поверхні кочення колісних пар, що гальмуються дуально зношуваними колодками, мають високотемпературні пошкодження, що додатково збільшує енерговитрати на динаміку перекочування коліс по рейках і зменшує ресурс колісних пар.

4. Теоретично доведено, що основною причиною дуального зносу колодок стає неврівноваженість конструкції триангеля з приєднаним вертикальним важелем відносно маятникового підвішування, через що під час попуску гальм відбувається нахилення триангеля до впирання й тертя верхівками гальмових колодок по поверхні кочення колісної пари.

5. 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, що використано для модернізації гальмової важільної передачі візка.

6. Дослідні випробування розробленої модернізації гальмової важільної передачі в умовах експлуатації на вантажних вагонах показали позитивні результати. Дуальний знос колодок не спостерігається.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Испытания перспективных тормозных колодок на железных дорогах Украины / Л. А. Мурадян, В. Ю. Шапошник, Б. У. Винстрот, С. П. Муковоз // Локомотив-информ. – 2015. – № 7/8. – С. 20–22.
2. Інструкція з експлуатації гальм рухомого складу на залізницях України : ЦТ-ЦВ-ЦЛ-0015 : затв. наказом Укрзалізниці від 28 жовтня 1997 р. № 264-Ц. – Київ, 2004. – 146 с.
3. Карпычев, В. А. К вопросу оценки и контроля тормозных нажатий колодок на колеса в зависимости от положений рычагов при регулировках рычажной передачи тележки 18-100 / В. А. Карпычев, Г. Б. Никитин, П. А. Андреев // Вестник ВНИИЖТ. – 2013. – № 5. – С. 43–48.
4. Мартынов, И. Э. О способе полной ликвидации клиновидного износа тормозных колодок грузовых вагонов / И. Э. Мартынов, К. С. Нечволода // Вагонный парк. – 2010. – № 4. – С. 36–39.
5. Пути совершенствования конструкции тележки грузового вагона / А. А. Босов, С. В. Мямлин, В. Я. Панасенко, И. В. Клименко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. 29. – С. 27–32.
6. Равлюк, В. Г. Щодо визначення силових перетворень при клиноподібному зносі гальмових колодок вантажних вагонів / В. Г. Равлюк // Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Сер.: Динаміка і міцність машин : зб. наук. пр. – Харків, 2017. – № 40 (1262). – С. 75–80.
7. Равлюк, В. Г. Спрощений кінетостатичний аналіз гальмової важільної передачі візків вантажних вагонів / В. Г. Равлюк // Зб. наук. пр. Держ. ун-ту інфраструктури та технологій. Серія: Транспортні системи і технології. – Київ, 2018. – Вип. 32 (1). – С. 55–70.
8. Радзиховский, А. А. Системный подход к проектированию тележек для грузовых вагонов с повышенными осевыми нагрузками / А. А. Радзиховский, И. А. Омеляненко, Л. А. Тимошина // Вагонный парк. – 2008. – № 8. – С. 10–16.
9. Радзиховский, А. А. Устройство отвода тормозных колодок / А. А. Радзиховский, И. А. Омеляненко, Л. А. Тимошина // Вагонный парк. – 2009. – № 11-12. – С. 18–21.
10. Розробка конструкторсько-технологічної документації на проведення модернізації гальмових важільних передач візків вантажних вагонів : звіт про НДКР (заключ.) / Укр. держ. акад. залізн. трансп. ; кер. Мартинов І. Е. ; вик.: Равлюк В. Г. [та ін.]. – Харків, 2012. – 53 с. – Бібліогр.: с. 44. – № ДР 0111U008972.
11. Смольянинов, А. В. Размерные расчеты тормозной рычажной передачи грузового вагона как метод обоснования путей повышения качества ремонта / А. В. Смольянинов, П. В. Смольянинов // Известия Транссиба. – 2012. – № 2 (10). – С. 27–36.
12. 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.
13. Тулузин, С. В. Оценка работоспособности тормозной рычажной передачи тележки грузового вагона на различных стадиях износа колодок и колес / С. В. Тулузин, Д. В. Горский // Вестник ВНИИЖТ. – 2015. – № 2. – С. 38–44.
14. Турутин, И. В. Конструкция тележек моделей 18-9889 и 18-9890 для инновационных четырех- и шестиосных грузовых вагонов / И. В. Турутин, Е. А. Рудакова // Транспорт РФ. – 2013. – № 3 (46). – С. 10–12.
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 доступу: <https://clck.ru/FrMs9> – Назва з екрана. – Перевірено : 03.05.2019. 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. 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

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДУАЛЬНОГО ИЗНОСА КОЛОДОК В ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЕ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

**Цель.** Данное исследование направлено на выявление особенностей дуального износа колодок в тормозной системе грузовых вагонов. **Методика.** Проведен комплекс теоретических и эксплуатационных исследований причин и последствий дуального износа колодок как наиболее распространенного в грузовых вагонах. С помощью теории планирования эксперимента и на основании собранного статистического материала выполнено адаптированное математическое моделирование процесса дуального износа и определены негативные факторы. Для исследования использованы программное обеспечение Mathcad и компьютерная программу «STATISTIKA». **Результаты.** Сравнительный анализ различных устройств для равномерного износа тормозных колодок показал недостаточную их эффективность. Установлено, что типовые устройства равномерного износа тормозных колодок (до 95 %) при действии значительных динамических нагрузок находятся в поврежденном состоянии. Поэтому колодки наклоненные, прижаты верхними окрайками к поверхностям качения колес и при движении в поездах без торможения осуществляют вредное трение с образованием двойного фрикционного износа рабочего тела. Теоретически доказано, что в шарнирном соединении вертикального рычага с распоркой триангеля образуется вредно действующий крутящий момент от гравитационных сил, который становится основной причиной дуального износа тормозных колодок. Кинестатический анализ с учетом динамических сил в неподрессоренной части тележки позволил установить причину дуального износа и определить возможность ликвидации указанного момента сил в существующей тормозной системе. По выполненной НИОКР и распоряжению от Укрзализныци проведены эксплуатационные испытания на 10 полувагонах производства Крюковского ВЗЗ, которые подтвердили результаты выполненных теоретических исследований. **Научная новизна.** Впервые выявлено явление, которому дано определение – дуальный износ тормозных колодок. Начаты его исследования. Разработана математическая регрессионная модель для установления основной причины дуального износа колодок в типовой механической тормозной системе трёхэлементных тележек. Адаптирован математический подход к планированию экспериментов с построением соответствующих схем-моделей, по которым выявлен вредно действующий момент сил, наклоняющий триангель на маятниковых подвесках до упора верхними окрайками тормозных колодок в поверхности качения колесной пары. **Практическая значимость.** Результаты проведенных исследований можно использовать при проектировании, модернизации и эксплуатации тормозных систем как эксплуатационного парка, так и трёхэлементных тележек нового поколения.

**Ключевые слова:** дуальный износ; тормозная колодка; тормозная рычажная передача; триангель; модель; статистический анализ; кинестатический анализ; момент силы; динамические силы; эксплуатационные испытания

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

## INVESTIGATION OF FEATURES OF DUAL WEAR OF PADS IN BRAKE SYSTEM OF FREIGHT CARS

**Purpose.** This research is aimed at revealing features of dual wear of pads in the brake system of freight cars. **Methodology.** The complex of theoretical and operational research concerning the causes and consequences of dual wear of pads, as the most widespread one in the freight cars, was conducted. Using the theory of planning the experiment based on the collected statistical material an adapted mathematical modeling of the dual wear process was performed and negative factors were determined. The Mathcad software and STATISTIKA software application were used. **Findings.** A comparative analysis of various devices for the uniform wear of brake pads showed insuffi-

Creative Commons Attribution 4.0 International

doi: 10.15802/stp2019/166114

© В. Г. Равлюк, 2019

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

cient efficiency. It has been established that typical devices of uniform wear of brake shoes (up to 95%) are in damaged condition due to the effect of significant dynamic loads. Therefore, the shoes are bent, pressed with their upper edges to the wheel threads and when driving in trains without braking do harmful friction with the formation of double frictional wear of the working body of the shoes. It has been theoretically proved that in a hinged connection of a vertical lever with a brake beam king post a harmfully acting torque from the gravitational forces is formed, which becomes the main cause of the dual wear of the brake shoes. Kinetostatic analysis, taking into account the dynamic forces in the unsprung parts of the bogie, has allowed establishing the cause of dual wear and determining the possibility of eliminating the specified torque in the existing brake system. According to the R & D and the Ukrzaliznytsia's order the operational tests on 10 gondola cars constructed by Kriukiv Railway Car Building Works were performed. They confirmed the results of the theoretical studies. **Originality.** For the first time, it was discovered, the research was initiated and the definition – the dual deterioration of brake pads was proposed. A mathematical regression model was developed for determining the main cause of dual wear of pads in a typical mechanical braking system of three-element bogies. It was adapted the mathematical approach to the planning of experiments with the construction of the corresponding schemes-models, which revealed the malignant moment of forces, bending the break beam on the pendulum suspensions until the upper edges of the brake pads will be pressed to the wheel thread. **Practical value.** The results of the research can be used in the design, modernization and operation of brake systems for both the operational fleet, as well as a new generation of three-element bogies.

**Keywords:** dual wear; brake pad; brake lever transmission; brake beam; model; statistical analysis; kinetic static analysis; force moment; dynamic forces; operational tests

## REFERENCES

1. Muradyan, L. A., Shaposhnik, V. Y., Vinstrot, B. U., & Mukovoz, S. P. (2015). Ispytaniya perspektivnykh tormoznykh kolodok na zheleznykh dorogakh Ukrainy, *Lokomotiv-Inform*, 7/8, 20-22. (in Russian)
2. Instrukttsiia z ekspluatatsii halm rukhomoho skladu na zaliznytsiakh Ukrainy: TsT-TsV-TsL-0015, No. 264-Ts. (2004). Kyiv. (in Ukrainian)
3. Karpichev, V. A., Nikitin, G. B., & Andreev, P. A. (2013). K voprosu otsenki i kontrolya tormoznykh nazhatiy kolodok na kolese v zavisimosti ot polozheniy rykhagov pri regulirovках rykhazhnoy peredachi telezhki 18-100. *Vestnik of the Railway Research Institute*, 5, 43-48. (in Russian)
4. Martynov, I. E., & Nechvoloda, K. S. (2010). O sposobe polnoy likvidatsii klinovidnogo iznosa tormoznykh kolodok gruzovykh vagonov. *Vagonnyi park*, 4, 36-39. (in Russian)
5. Bosov, A. A., Myamlin, S. V., Panasenko, V. Y., & Klymenko, I. V. (2009). The ways of the freight train trucks design improvement. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnogo universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana*, 29, 27-32. (in Russian)
6. Ravlyuk, V. G. (2017). On the issue of determination of the force transformations under wedge-shaped wear of the brake shoes of freight cars. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Dynamics and Strength of Machines: Collective works*, 40(1262), 75-80. (in Ukrainian)
7. Ravlyuk, V. G. (2018). Simultaneous kinetostatic analysis of brake immediate transmission of freight wagons. *Zbirnyk naukovykh prats DUIT. Seriya: Transportni systemy i tekhnologii*, 32(1), 55-70. (in Ukrainian)
8. Radzikhovskiy, A. A., Omelyanenko, I. A., & Timoshina, L. A. (2008). Sistemnyy podkhod k proektirovaniyu telezhkek dlya gruzovykh vagonov s povyshennymi osevyimi nagruzkami. *Vagonnyi park*, 8, 10-16. (in Russian)
9. Radzikhovskiy, A. A., Omelyanenko, I. A., & Timoshina, L. A. (2009). Ustroystvo otvoda tormoznykh kolodok. *Vagonnyi park*, 11-12, 18-21. (in Russian)
10. Martynov, I. E., & Ravlyuk, V. G. (2012). *Rozrobka konstruktorsko-tekhnologichnoi dokumentatsii na provedennia modernizatsii halmovykh vazhilnykh peredach vizkiv vantazhnykh vahoniv: zvit pro NDKR (№ DR 0111U008972)*. Kharkiv: Ukrainian State Academy of Railway Transport. (in Ukrainian)
11. Smolyaninov, A. V., & Smolyaninov, P. V. (2012). Razmernye raschety tormoznoy rykhazhnoy peredachi gruzovogo vagona kak metod obosnovaniya putey povysheniya kachestva remonta. *Izvestiya Transsiba*, 2(10), 27-36. (in Russian)
12. Blokhin, Y. P., Alpysbaev, K. T., & Panasenko, V. Y. (2012). Telezhki ZK1 poluvagonov, postroennykh v KNR. *Vagonnyi park*, 9(66), 12-14. (in Ukrainian)
13. Tuluzin, S. V., & Gorskiy, D. V. (2015). Otsenka rabotosposobnosti tormoznoy rykhazhnoy peredachi telezhki gruzovogo vagona na razlichnykh stadiyakh iznosa kolodok i koles. *Vestnik of the Railway Research Institute*, 2, 38-44. (in Russian)

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

14. Turutin, I. V., & Rudakova, E. A. (2013). Konstruktsiya telezhek modeley 18-9889 i 18-9890 dlya innovatsionnykh chetyreh- i shestiosnykh gruzovykh vagonov. *Transport RF*, 3(46), 10-12. (in Russian)
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. 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: 03.12.2018

Прийнята до друку: 20.03.2019

## UDC 629.463.62.015

O. V. SHATUNOV<sup>1\*</sup>, A. O. SHVETS<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Cars and Car Facilities», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, La-zaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 953 60 14, e-mail shatunov220648@gmail.com, ORCID 0000-0002-1115-0093

<sup>2\*</sup>Dep. «Theoretical and Structural Mechanics», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 214 14 19, e-mail angela\_shvets@ua.fm, ORCID 0000-0002-8469-3902

## STUDY OF DYNAMIC INDICATORS OF FLAT WAGON WITH LOAD CENTRE SHIFT

**Purpose.** The article deals with the determining the influence of the longitudinal and lateral shift of gravity centre of the heavy load on the flat wagons, taking into account the travel speed based on the main dynamic indicators – the maximum coefficients of the dynamic supplement of spring-suspended and unsprung parts, the maximum ratio of frame force to static axle load, the wheel derailment safety factor. **Methodology.** The study was carried out using the method of mathematical and computer simulation of the dynamic loading of flat wagons based on the model of spatial oscillations of five coupled wagons and the software complex developed in the branch research laboratory of the rolling stock dynamics and strength (BRL RSDS). Theoretical studies were carried out during the movement of the model 13-401 flat wagon on typical 18-100 bogies with speeds in the range from 50 to 90 km/h in curves with radii of 350 and 600 m, with 130 and 120 mm canting, respectively. **Findings.** The paper presents the analysis of theoretical studies of the rolling stock dynamics on the example of flat wagons. The calculations were carried out using an application software package. In the course of performing theoretical studies and after simulation, taking into account the processes of oscillation of the flat wagon and load in the presence of longitudinal and lateral shift of its gravity centre, the dependences of the main dynamic indicators were obtained with regard to the magnitude of the travel speed. **Originality.** Using the mathematical model of the five coupled wagons, the effect of shift in two directions from the central symmetry axis of the heavy load centre was studied with regard to the travel speed along the curved track of small and medium radius in order to determine the dynamic loading of the flat wagon. **Practical value.** As a result of the above theoretical studies, the recommendations on the maximum possible values of the centre shift of heavy loads during their transportation on flat wagons are substantiated and proposed.

**Keywords:** load; flat wagon; dynamic indicators; curved track; longitudinal and lateral load; centre shift; travel speed

### Introduction

The process of integrating the railway industry of Ukraine into the European transport system is one of the urgent problems of today. Its solution is connected with the formation of a network of international transport corridors on the territory of Ukraine, the reconstruction of the main railway lines connecting the Europe and Ukraine, the organization of high-speed train traffic [10].

In addition, one of the key issues of transport policy, which is associated with perspectives of sustainable development of the transport industry in Ukraine, is the promotion of combined transport. This technology should be in line with international standards, the main criteria of which are: route speed, schedule accuracy and cargo safety. Increased speed and frequency of transportation

would accelerate the introduction of a combined cargo transportation system, including by international transport corridors. Thus, improvement of speed characteristics of rolling stock becomes almost the most important task for increasing the competitiveness of rail transport in mixed traffic systems.

One of the main obstacles to a significant increase in the velocity of combined transport is the dynamic properties of the rolling stock. At the same time, the main characteristics of the rolling stock are being constantly improved by the producing factories, with the changing of the range of goods. Among the heavy loads transported on flat wagons, the more common is becoming the equipment with asymmetrical centre of gravity, which requires train speed limitation. This causes

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

a reduction in the throughput and transportation capacity of railways, lengthening of the equipment delivery time to the consumer [3, 10, 18].

### Purpose

Of particular importance is the further improvement of the transportation conditions and, in particular, the development of new scientifically based admissible values of longitudinal and lateral load centre shifts from the flat wagon symmetry axes. When elaborating them, particular attention should be paid to the safety of movement, as there may be intense fluctuations of rolling stock and large dynamic forces. Therefore, of great interest is the study of spatial oscillations of a flat wagon with asymmetric load, which in turn leads to the need for the development of regional, local (LTC) and unspecified (UTC) technical conditions, the effect of which would be extended to enterprises serviced by one railway [1, 3, 7, 9, 11, 12].

The purpose of this research is to determine the influence of the longitudinal and lateral shift of gravity centre of the heavy load on the flat wagon, taking into account the travel speed based on the main dynamic indicators – the maximum coefficients of the dynamic supplement of spring-suspended and unsprung parts, the maximum ratio of frame force to static axle load, the wheel derailment safety factor.

### Methodology

The above problems can be solved experimentally or theoretically. The first method, although it is sufficiently reliable, but expensive, requires a long time and cannot cover all possible options of the load positioning. Therefore, it is necessary to develop a general theoretical method for studying the oscillation of the flat wagon with asymmetric placement of loads of different weights, both with spring-dissipative elements between the load and the flat wagon body, and without them [3].

Quantitative evaluation of dynamic indicators can be obtained by mathematic simulation. The wagon calculation scheme should reflect the spe-

cifics of the wagon interaction in the train: the possibility of manifestation of all forms of body oscillations in space, the transmission of longitudinal forces in the vertical and horizontal directions from the neighboring wagons, the record of the technical condition of individual parts of the wagon and their design features, as well as operating conditions – speed, movement along the straight and curved tracks, loading mode, type of load, its positioning and fastening, vertical and horizontal track irregularities [5, 8, 13, 15–22].

The travel speed when passing on the curved track is limited by the lateral impact of the railway rolling stock on the track, the lateral acceleration value, the possibility of wheel unloading and derailment. In connection with this, it is necessary to study the railway vehicle oscillations while driving precisely along the curved track.

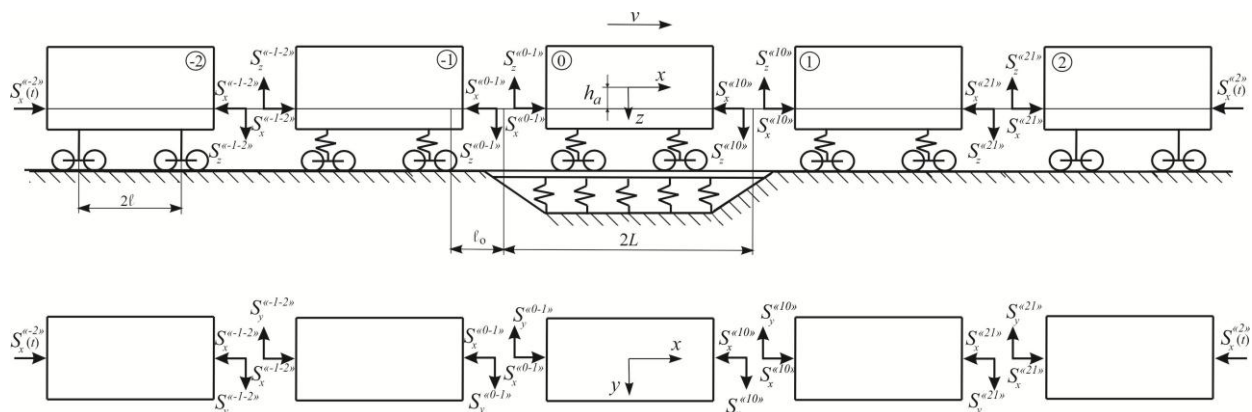
The calculation scheme of the flat wagon in Fig. 1 shows positive directions for all shifts and angles of rotation, and Table 1 shows the designation of the system bodies.

In Table 1 through  $x$ ,  $y$  and  $z$  we marked the gravity centre shift of the flat wagon frame along the corresponding axes, and through  $\theta$ ,  $\varphi$ ,  $\psi$  – the angles of its rotation relative to the main central axis of inertia. Similar displacements of bolsters are provided with the index  $i$  ( $i=1, 2$  – bogie number), side frames – with the index  $\delta_{ij}$  ( $j=1$  – left,  $j=2$  right side of the wagon), wheel sets – with the index  $k_{im}$  ( $m=1, 2$  – wheel set number in the bogie), rails in the wheel contact points  $p_{imj}$  (movements of rails are assumed only in two directions – along the axes  $Y$  and  $Z$ ). Displacement of the wheels is indicated by the index  $imj$ .

The mathematical model describing the spatial oscillations of the coupled wagons in the train (Fig. 2) is proposed in [4], of which one rail vehicle is considered as per the most complete calculation scheme (called «zero»), and the calculation schemes of neighbouring wagons, depending from task setting, are simplified with increasing distance from the «zero» vehicle on both sides.

Table 1

Systems bodies	Displacement					
	Linear along the axes			Angle relative to axes		
	X	Y	Z	X	Y	Z
flat wagon frame	$x$	$y$	$z$	$\theta$	$\varphi$	$\psi$
bolsters	$x_i$	$y_i$	$z_i$	$\theta_i$	$\varphi_i$	$\psi_i$
side frames	$x_{6ij}$	$y_{6ij}$	$z_{6ij}$	$\theta_{6ij}$	$\varphi_{6ij}$	$\psi_{6ij}$
wheel sets	$x_{kim}$	$y_{kim}$	$z_{kim}$	$\theta_{kim}$	$\varphi_{kim}$	$\psi_{kim}$
rails	-	$y_{pimj}$	$z_{pimj}$	-	-	-



Creative Commons Attribution 4.0 International  
doi: 10.15802/stp2019/165160

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

As a calculation scheme of the «zero» vehicle we adopted a mechanical system with 58 degrees of freedom [5, 17]. The following values are adopted as generalized coordinates:  $q_1 = z$ ,  $q_2 = \varphi$ ,  $q_3 = \theta$ ,  $q_4 = y$ ,  $q_5 = \psi$ ,  $q_n = \theta_i$  ( $n = 6.7$ ),  $q_n = \psi_i$  ( $n = 8.9$ ),  $q_n = \psi_{\text{bij}}$  ( $n = 10 \div 13$ ),  $q_n = y_{\text{bij}}$  ( $n = 14 \div 17$ ),  $q_n = z_{\text{bij}}$  ( $n = 18 \div 21$ ),  $q_n = \varphi_{\text{bij}}$  ( $n = 22 \div 25$ ),  $q_n = \psi_{\text{kim}}$  ( $n = 26 \div 29$ ),  $q_n = y_{\text{kim}}$  ( $n = 30 \div 33$ ),  $q_n = z_{\text{kim}}$  ( $n = 34 \div 37$ ),  $q_n = \theta_{\text{kim}}$  ( $n = 38 \div 41$ ),  $q_n = y_{\text{pimj}}$  ( $n = 42 \div 49$ ),  $q_n = x_{\text{bij}}$  ( $n = 50 \div 53$ ),  $q_n = x_{\text{kim}}$  ( $n = 54 \div 57$ ),  $q_{58} = x$ .

Wagons, adjacent to the «zero» one, are represented by a system with 12 degrees of freedom. The calculation schemes describing the oscillations of these wagons preserve the main features of freight wagon bogies – lozenging of side frames.

In the study of spatial oscillations of wagons neighboring with the «zero» one, which are considered under the simplified calculation scheme, the following assumptions are introduced. It is assumed that the wagons have one-stage spring suspension. Each of them consists of eleven solid bodies: a body, two bolsters, four bogie side frames and four wheel sets. Unlike the «zero» wagon, the track under adjacent wagons is considered to be absolutely rigid in the vertical direction and resilient in the horizontal lateral direction. This assumption does not lead to an increase in the number of degrees of freedom, since the speed of the pressed (displaced) rails in expressions for lateral forces can be neglected.

As generalized coordinates for these wagons the following values are adopted:  $q_1^n = z^n$ ,  $q_2^n = \varphi^n$ ,  $q_3^n = \theta^n$ ,  $q_4^n = y^n$ ,  $q_5^n = \psi^n$ ,  $q_k^n = \psi_i^n$  ( $k = 6.7$ ),  $q_k^n = \psi_{\text{bi}}^n$  ( $k = 8.9$ ),  $q_k^n = y_{\text{bi}}^n$  ( $k = 10.11$ ),  $q_{12}^n = x^n$ , where  $i=1, 2$ ;  $n=1$  and  $-1$  – respectively for the «first» and «minus first» wagons.

The end coupled wagons, which by analogy are called the «second» and the «minus second», are considered by an even simplified scheme than «1» and «-1» wagons. In «2» and «-2» wagons we will take into account only the vibration of the bodies, that is, these wagons are systems with six degrees of freedom:  $q_1^n = z^n$ ,  $q_2^n = \varphi^n$ ,  $q_3^n = y^n$ ,  $q_4^n = \theta^n$ ,  $q_5^n = \psi^n$ , ,

where – respectively for the «second» and «minus second» wagons.

In our study, the flat wagon as a «zero» wagon is considered as a mechanical system (Fig. 3), which consists of 12 solids (load, flat wagon frame, two bolsters, four bogie side frames, four wheel sets). The flat wagon frame gravity center is located at the beginning of the coordinate system of the flat wagon, and the load gravity center, shifted by the value in the longitudinal direction and in the lateral direction, is located at the beginning of the coordinate system of the load.

The work [3] studied the flat wagon as a mechanical system of 12 solids with an asymmetric load, but its oscillations were considered only in the horizontal plane. Each body of the system had three displacements: recoiling, swaying and hunting. The connections to the flat wagon were installed on the assumption that the side frames of the bogie of model 18-100 had the same swaying and hunting; there are no longitudinal and lateral gaps between the bogie bolsters and side frames, or they are very small, and the swaying of bolsters and wheel sets is the same; the gaps between the bogie center plates and center plate bearing are not taken into account.

The work [14] shows the effect of load center shift in the gondola, but even though the flat wagon and gondola belong to the open rolling stock and have some common requirements for load positioning, it is expedient to determine the dynamic load during the operation of not only different types of railway vehicles, but also of the same type models close by the technical parameters.



## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

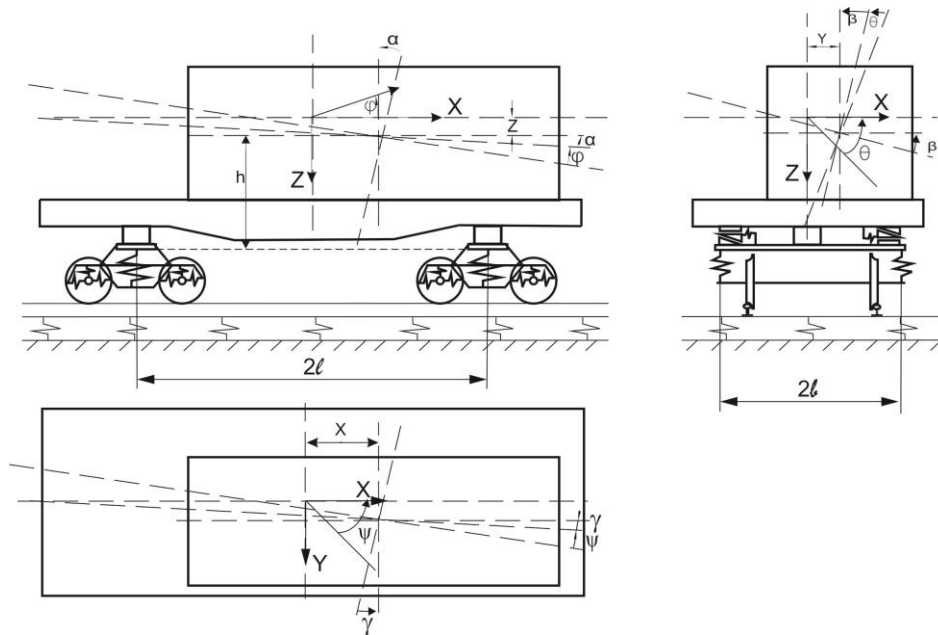


Fig. 3. Calculation scheme of 4-axle flat wagon with asymmetric load arrangement

Standard and technical requirements for positioning and fastening of goods in an open rolling stock are presented in [7, 12]. In accordance with the current requirements, the total center of gravity of goods () should be located on the intersection of the longitudinal and lateral plane of symmetry of

the wagon. The shift of relative to the longitudinal and lateral planes of the wagon symmetry is allowed (Table 2), if there are objective reasons for this (geometric parameters of the load, arrangement and fastening conditions).

Table 2

Permissible longitudinal shift of the common load center in a 4-axle wagon

Parameter	Load weight, t														
	<10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	62	67	70	>70
l <sub>sh</sub> cm	during loading														
	270	225	195	155	125	110	95	85	75	68	60	55	20	0	0
	along the track														
	300	248	216	173	144	123,5	108	96	86,5	78,5	72	63	26	6	0

The permissible value of shift in the longitudinal direction  $l_{sh}$  (relative to the lateral plane of symmetry) during loading and along the track is determined in accordance with Table 2 depending on the total weight of the load in the wagon.

According to [7, 12], in the case of necessity of asymmetric arrangement of load in a wagon, the difference in loading of bogies should not exceed for 4-axle wagons – 10 t, and the loading, which

falls on each of the bogies, should not exceed half of the carrying capacity of the wagon.

The permissible value of shift in the lateral direction  $b_{sh}$  (relative to the longitudinal plane of symmetry) during loading and along the track is determined in accordance with Table 3 depending on the total weight of the load in the wagon and the height of the common gravity centre of the wagon with load () above the level of the top of rail TOR [7, 12].

Table 3

## Permissible lateral shift of the common load center in a 4-axle wagon

Parameter	Load weight, t																	
	≤10			30				50				55			67			≥67
	Height of common gravity center of wagon with load over the TOR, m																	
	≤1, 2	1,5	2,0	≤1, 2	1,5	2,0	2,3	≤1, 2	1,5	2,0	2,3	≤1,5	2,0	2,3	≤1,5	2, 0	2, 3	≤2,3
bsh, cm	during loading																	
	45	38	29	38	31	25	20	25	20	18	14	15	12	10	12, 5	9, 5	8, 0	7,0
	along the track																	
	62	55	41	55	45	35	28	35	28	25	20	22	17	15	18	14	12	10

Simultaneous shift of relative to the longitudinal and lateral symmetry of the wagon (Fig. 4) is allowed within the limits given in Tables 2, 3.

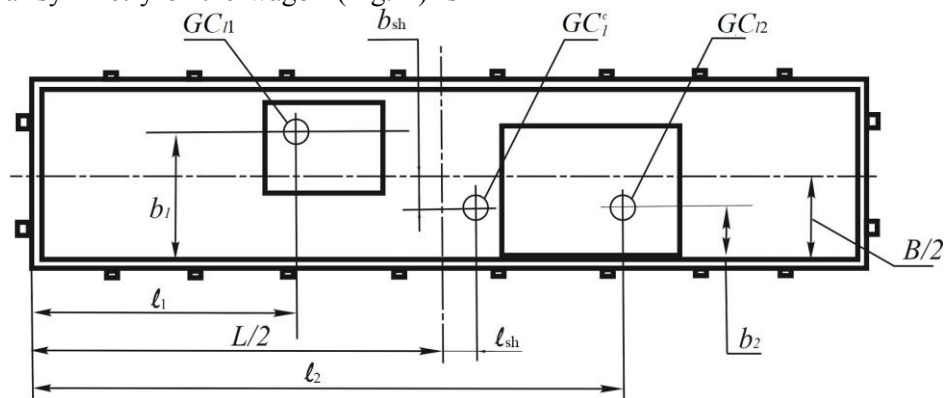


Fig. 4. Calculation scheme for determining the longitudinal and lateral shift of the common load centre in a wagon

It is allowed to transport two loads (or groups of loads) of the same weight with their skew-symmetric arrangement in the wagon (Fig. 5), subject to the following conditions:

– the height of the common gravity center of the wagon with load () above TOR does not exceed 230 cm;

– the distances between the load gravity centers and in the longitudinal and lateral directions do not exceed the allowable values taking into account the total load weight in accordance with the Table 4;

– is located at the intersection of the longitudinal and lateral plane of the wagon symmetry.

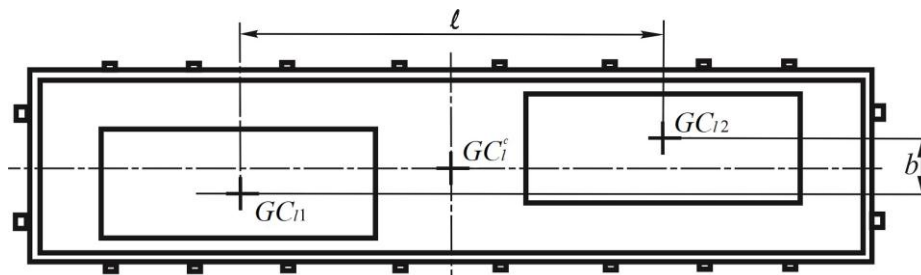


Fig. 5. Skew-symmetric load arrangement in a wagon,  
– gravity centres of loads; – common load centre in a wagon

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

The total weight of the load and means of its fastening in the wagon shall not exceed its maximum load capacity, and in the case of loading supported by two wagons, the proportion of the weight of the load and the means of its fastening, which

falls on each loaded coupled wagon, shall not exceed the maximum load capacity of the wagon. The load overrun in its longitudinal direction beyond the limits of the headstock of the flat wagon frame must not exceed 40 cm [7, 12].

Table 4

**Maximum allowable distances between load centers with skew-symmetric arrangement in a wagon**

Parameter	Total weight of two loads, t						
	≤20	30	40	50	55	67	72
$\ell$ , cm	800	700	600	600	600	500	450
$b$ , cm	125	90	75	60	50	40	35

When the load is placed on a flat wagon on two supports, laid across its frame symmetrically relative to the lateral plane of symmetry of the flat wagon, the location of the supports is determined depending on the load on the support and the width of the load distribution on the flat wagon frame. In the case of support placement within or outside the flat wagon base (Fig. 6, *a*, *b*), the minimum permissible distance between the longitudinal axis of the support and the lateral plane of the flat wagon

symmetry is determined in accordance with Table 5.

In case of asymmetric location of gravity centre of the load or the support relative to the lateral plane of the wagon symmetry, a checking calculation of the bending moment of the wagon frame shall be performed. It is also necessary to perform a checking calculation of the bending moment of the flat wagon frame when arranging support at a distance that does not meet the requirements of Table 5.

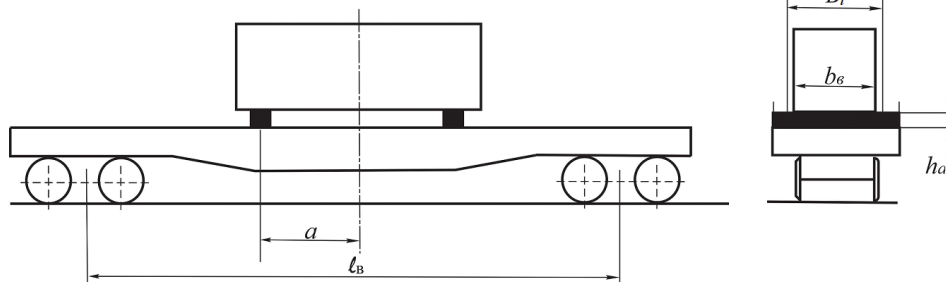
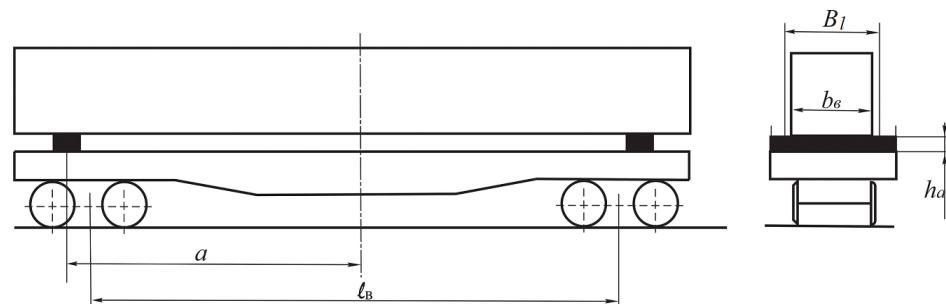
*a**b*

Fig. 6. Load arrangement on two supports located:

*a* – within the flat wagon base; *b* – outside the flat wagon base

Table 5

**Maximum permissible distances between the longitudinal axis of the support  
and the lateral plane of the flat wagon symmetry**

Location of supports within the flat wagon base				Location of supports outside the flat wagon base			
Load on one support, tc	Minimum permissible distance $a$ (cm) at width $B_l$ (cm) of load distribution			Load on one support, tc	Minimum permissible distance $a$ (cm) at width $B_l$ (cm) of load distribution		
	88	178	270		88	178	270
<20	55	32.5	0	<12.5	625	635	640
22	95	75	50	15.0	600	605	615
25	120	110	90	20.0	560	565	575
27	142.5	135	1,20	25.0	540	545	555
30	167.5	160	145	30.0	537	542	552
33	207.5	188.5	185	33.0	535	540	550
36	310	290	240	36.0	533	538	550

It is generally known that the railway rolling stock ability rating is essential for ensuring the safety of trains, and the quality of rolling stock depends on its design, fabrication and acceptance. At each of

these stages, the normative base plays a decisive role. Levels of estimation and allowable values of ability rating in accordance with normative documentation are given in Table 6 [6].

Table 6

**Levels of estimation and allowable values of ability rating**

Indicator	Levels of estimation	Allowable values	
		empty	loaded
Maximum coefficient of dynamic supplement of the spring-suspended parts (coefficient of vertical dynamics of the central suspension stage)	excellent	0.5	0.2
	good	0.6	0.35
	satisfactorily	0.7	0.4
	acceptable	0.75	0.65
Maximum coefficient of dynamic supplement of unsprung parts (coefficient of vertical dynamics of the box suspension stage)	excellent	0.6	0.5
	good	0.75	0.7
	satisfactorily	0.85	0.8
	acceptable	0.98	0.9
Maximum ratio of frame force to static axial load (coefficient of horizontal dynamics)	excellent	0.25	0.2
	good	0.3	0.25
	satisfactorily	0.38	0.3
	acceptable	0.4	0.38
Wheel derailment safety factor ..	acceptable	1.3	

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

The Order of the Ministry of Transport and Communications of Ukraine of May 18, 2010, No. 299 «On Approval of the Procedure for the Development of Technical Documentation on the Load Positioning and Fastening in Wagons and Containers Transported by Rail» establishes requirements for registration, approval and review of technical documentation for transportation of loads in wagons and containers by railway transport, control over the correct load positioning.

In accordance with the order for the development and adjustment of technical documentation for the carriage of goods by the manner not provided for by regulatory acts, there must be the following information as well: determination of inertial forces and wind force acting on the load; determination of the stability of the wagon with load and load in the wagon; load on the wagon bogies. The method of calculating the stability of the wagon with load and load in the wagon contains the determination of additional vertical load on the wheel from the action of centrifugal forces and wind force, but does not take into account the dynamic processes that arise during the movement of wagons on the railway track in the presence of vertical and horizontal irregularities.

Maximum coefficients of the dynamic supplement of the spring-suspended and unsprung parts, the maximum ratio of frame force to static axial load and the wheel derailment safety factor are used to study the dynamic forces acting on the wagon bogie or body components.

### Findings

Theoretical studies using the software complex developed by the BRL RSDS are conducted under the condition of the movement of the flat wagon of model 13–401 on typical bogies 18–100 at speeds ranging from 50 to 90 km/h in curves with radii of 350 and 600 m, with 130 and 120 mm canting, respectively. Rails – P65, sleepers – wooden, ballast – broken stone.

Wooden sleepers to this day are the main type of rail support and it is expedient to lay them:

- on the ribbon track in horseshoe curves with the purpose of expansion of the rail track to prevent the possible derailment of wagons;

- on highly loaded lines, where the use of continuous welded track with reinforced concrete sleepers is ineffective.

In addition, wooden sleepers in comparison with reinforced concrete ones have less rigidity and resilience for the perception and even distribution of loads from the rolling stock wheel sets on the rails, are less resistant to deformation. The trains move smoother on rails with reinforced concrete sleepers, since there are practically no joints at the rails, thanks to the high stability in terms of transverse rows. Therefore, when conducting calculations, wooden sleepers were chosen as the basis of rail support [2].

In the given study we considered the influence of the load center shift on the flat wagon in the longitudinal and transverse directions, as well as in both directions simultaneously. Graphs of variance of the dynamic parameters during the travel on curved tracks and 350 m are shown in Fig. 7-9. The shift in the longitudinal direction (Fig. 7) is studied within the limits, that is permitted by the standards (Table 2) [7, 12].

As can be seen from Fig. 7, with the increased longitudinal shift of the load center, the studied dynamic coefficients as a whole remain unchanged. In the whole range of velocities, the indices (Fig. 7 (a, b)), (Fig. 7 (c, d)), (Fig. 7 (e, f)), and (Fig. 7 (g, h)), in case of increasing the longitudinal shift from 0 to 0.3 m, do not exceed the permissible norm both in the curve m and in the curve m. The level of assessment is «excellent» [6].

From the results obtained, it follows that the longitudinal shift of the load in case of increased speed does not cause an increase in the dynamics, and their values do not exceed the values determined by the current regulatory documents [5].

The lateral shift of the load is considered in the range from up to 0,2 m with a longitudinal shift m (Fig. 8). For loads weighing 50 t with m, taken for calculations, longitudinal shift of m is allowed, this value can be 0.2 m on the travel line (Table 3, 4) [7, 12].

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

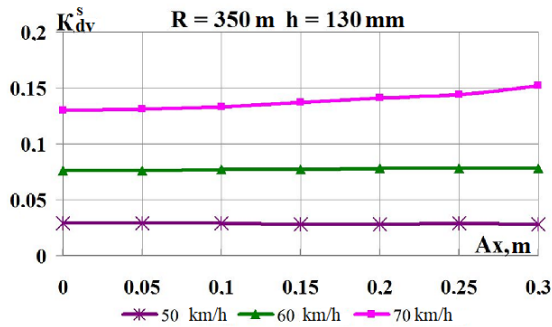
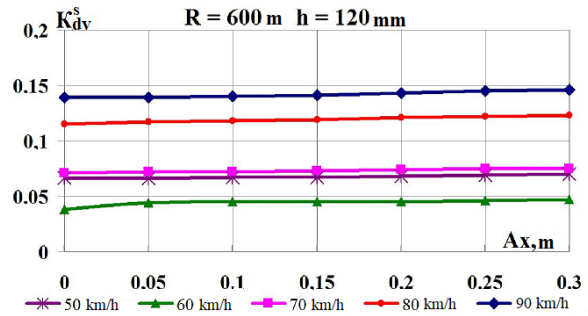
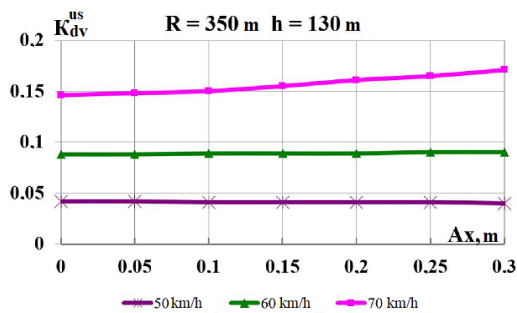
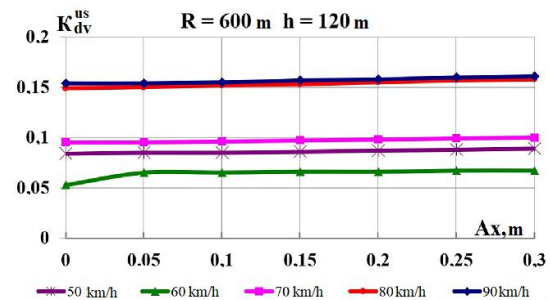
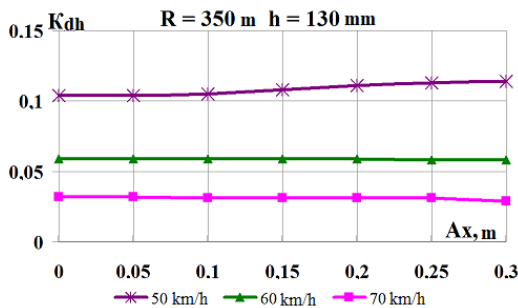
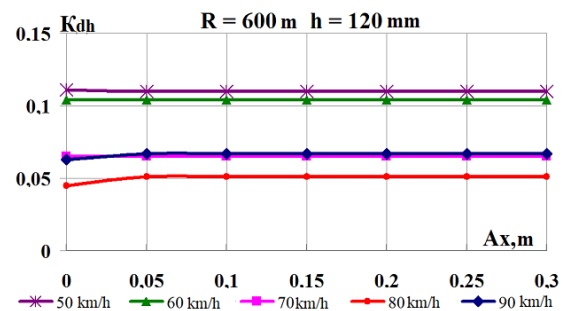
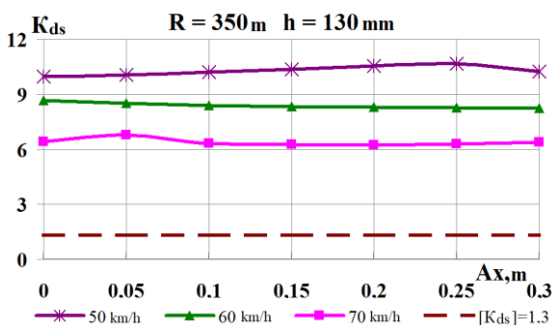
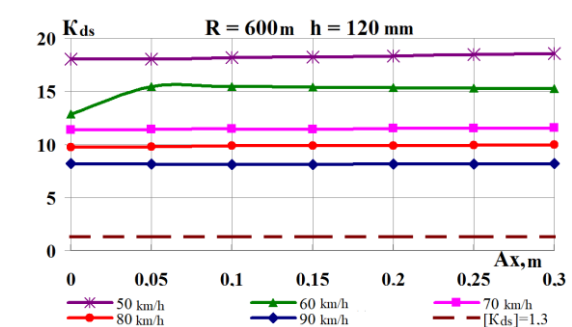
*a**b**c**d**e**f**g**h*

Fig. 7. Graphs of dependence on the load shift in the longitudinal direction

while moving along the corresponding curve:

*a, b* – coefficients of the dynamic supplement of the spring-suspended parts; *c, d* – coefficients of the dynamic supplement of unsprung parts; *e, f* – ratio of the frame force to the static axial load; *g, h* – wheel derailment safety factors

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

The Figure 8 shows the effect on the dynamic indicators of the lateral load center shift in curves  $m$  and  $m$ , respectively. The effect of lateral load center shift has a more significant effect on the dynamic indicators than the longitudinal shift. With the increase of  $m$  in both sides from the central lateral axis, the coefficients of the dynamic supplement of the spring-suspended and unsprung parts increase (Fig. 8, *a–d*), the ratio of the frame force to the static axial load varies considerably (Fig. 8, *e, f*). With the growth of  $m$  towards the wheel based on the inner rail, the dynamic figures even decrease. The wheel derailment safety factors on the contrary are significantly reduced (Fig. 8, *g, h*).

The level of assessment from the lateral load center shift of the coefficients of the dynamic supplement of the spring-suspended parts is «acceptable», the coefficients of the dynamic supplement of the unsprung parts are «good», and the ratio of the frame force to the static axial load is «excellent» [5].

At speed of 70-90 km/h, in case of increasing lateral shift  $m$  from 0 to the value of 0.2 m acceptable for the indicated weight, the wheel derailment safety factor is significantly reduced in both curves. On the curve  $m$  (Fig. 8, *g*) the values for  $m$  reach a dangerous value, especially taking into account the fact that the given results are obtained when the flat wagon moves along a curve without irregularities. Therefore, exceeding the lateral shift beyond the regulatory value of 0.15 m is inappropriate from the point of view of traffic safety.

Consequently, the lateral load center shift limitation, as defined by the regulatory documents, must be observed, it is due to a sharp decrease in the wheel derailment safety factor.

The simultaneous shift of the gravity center along the axes is considered within  $m$  and  $m$  from 0 and 0.15 m (Fig. 9) [7, 12].

Fig. 9 shows the graphs of the dependence of the dynamic indicators on the value of the load centre shift in the lateral direction  $m$  for the value of the longitudinal shift  $m$ . As can be seen from the comparison of the graphs given in Fig. 8 for  $m$  and Fig. 9 for  $3a$   $m$ , differences in indicators  $\delta$ ,  $\delta$  and  $\delta$  are

small, that is, the presence of simultaneous lateral and longitudinal load center shifts practically does not affect the dynamic indicators.

The level of assessment of the coefficients of the dynamic supplement of the spring-suspended parts is «acceptable», the coefficients of the dynamic supplement of the unsprung parts is «good», and the ratio of the frame force to the static axial load is «excellent» for the simultaneous longitudinal and lateral load center shift. But this shift leads to a significant decrease in the factor  $\delta$ . As the lateral load center shift of the flat wagon increases towards the wheel based on the inner rail, the indices of  $\delta$  vary considerably, as can be seen from Fig. 9, (*g, h*). Therefore, the limitation of simultaneous longitudinal and lateral shift, as defined by the regulatory documents, must be also observed. In addition, the calculations showed the impossibility of increasing the travel speed in small radius curves due to the high probability of the rolling stock derailment.

### Originality and practical value

This study includes the development of methods of mathematical simulation of dynamic processes of rolling stock and track interaction. Similar theoretical calculations can be applied in the course of quantitative and qualitative assessment of the impact of the load center shift on the rolling stock ability rating, taking into account the wear of parts and bogies while moving on the straight and curved track with irregularities.

During the study, the following scientific and practical results were obtained:

- mathematical simulation of five coupled wagons for studying the dynamic loading of a flat wagon with heavy load;
- assessment of the basic dynamic indicators at a shift of the gravity center of heavy load during movement on curved railway track;
- substantiation and introduction of the maximum possible values of lateral shift of the heavy load gravity center during transportation on flat wagons.



## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

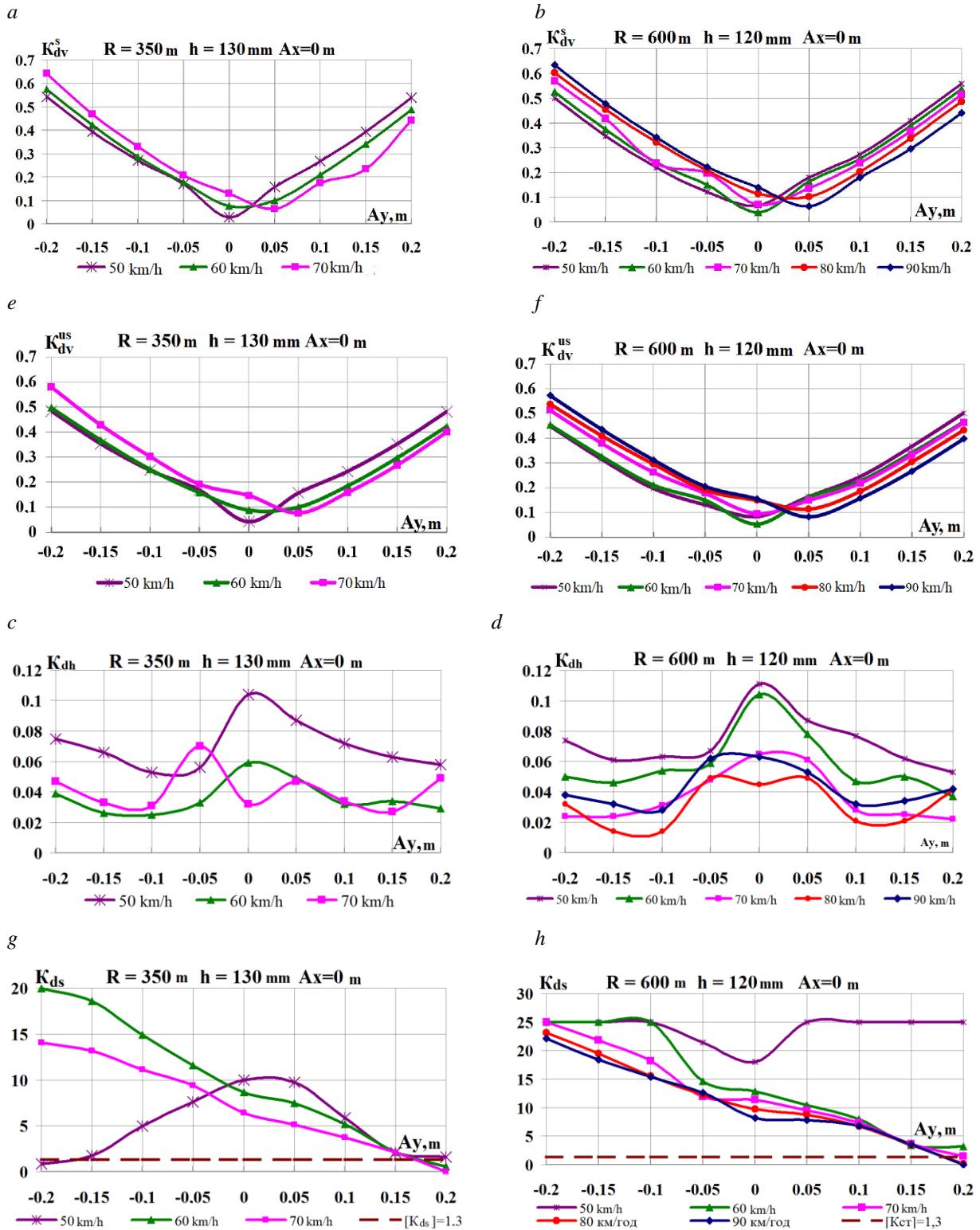


Fig. 8. Graphs of dependence on the load shift in the lateral direction while moving along the corresponding curve:  
*a, b* – coefficients of the dynamic supplement of the spring-suspended parts;  
*c, d* – coefficients of the dynamic supplement of unsprung parts; *e, f* – ratio of the frame force to the static axial load;  
*g, h* – wheel derailment safety factors

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

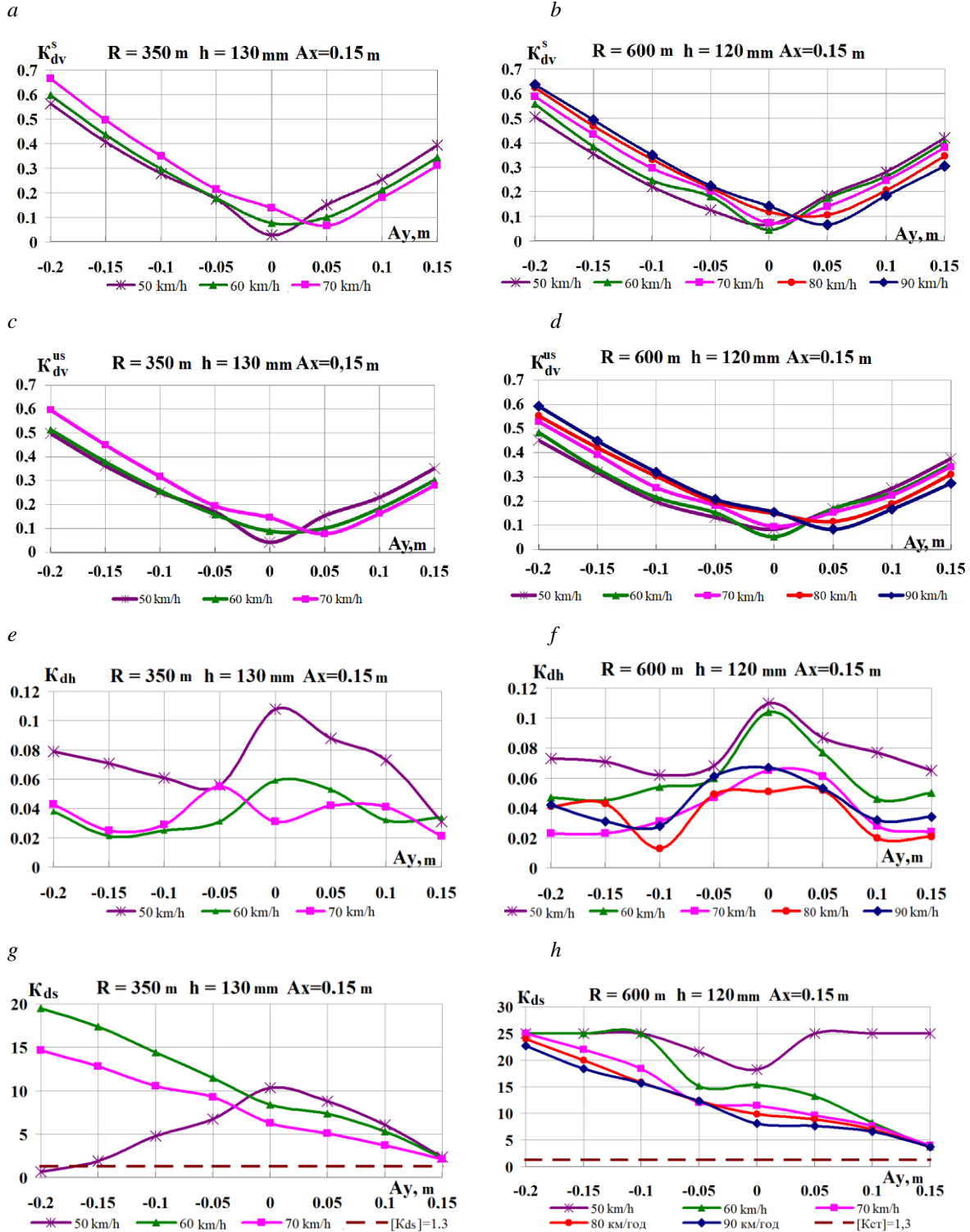


Fig. 9. Graphs of dependence on simultaneous load shift in the lateral and longitudinal directions while moving along the corresponding curve:

*a, b* – coefficients of the dynamic supplement of the spring-suspended parts;

*c, d* – coefficients of the dynamic supplement of unsprung parts;

*e, f* – ratio of the frame force to the static axial load; *g, h* – wheel derailment safety factors

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

**Conclusions**

Based on the analysis of the conducted theoretical studies of the rolling stock dynamic qualities on example of the flat wagon, it is possible to draw the following conclusions:

- Longitudinal shifts of the load weighing 63 tons do not result in increasing of the coefficients of the dynamic supplement of the spring-suspended and unsprung parts, the ratio of the frame force to the static axle load, as well as the wheel derailment safety factor;
- Longitudinal shifts of the load center have a significantly less influence on the dynamic forces

that arise when the flat wagon moves than the lateral shift, or the presence of simultaneous shift in both directions from the axis of symmetry;

- Limitation of the lateral shift set by the regulatory documents must be observed; it is caused not by an increase in the dynamics coefficients, but by a sharp decrease in the wheel derailment safety factor;
- Exceeding the lateral shift of the load center on the flat wagon frame beyond the regulatory value of 0.15 m is inappropriate from the point of view of traffic safety.

**LIST OF REFERENCE LINKS**

1. Бабаев, А. М. Динамико-прочностные качества сцепа платформ с упругим грузом / А. М. Бабаев, В. А. Каблуков, А. В. Шатунов // Динамика вагонов : сб. науч. тр. / Петербург. ин-т инж. ж.-д. трансп. – Санкт-Петербург, 1993. – С. 118–120.
2. Даніленко, Е. І. Залізнична колія : підручник для вищ. навч. закл. : у 2 т. / Е. І. Даніленко. – Київ : Ін-прес, 2010. – Т. 1. – 528 с.
3. Данович, В. Д. Колебания в горизонтальной плоскости 4-осн. платформы с несимметрично расположенным тяжеловесным грузом / В. Д. Данович, П. С. Анисимов // Вестн. ВНИИЖТ. – 1989. – № 3. – С. 5–9.
4. Данович, В. Д. Математическая модель пространственных колебаний сцепа пяти вагонов, движущихся по прямолинейному участку пути / В. Д. Данович, А. А. Малышева // Транспорт. Нагруженность и прочность подвижного состава : сб. науч. тр. / Днепропетр. гос. техн. ун-т ж.-д. трансп. – Днепропетровск, 1998. – С. 62–69.
5. Данович, В. Д. Пространственные колебания вагонов на инерционном основании : дис. д-ра техн. наук / Данович Виктор Данилович ; Днепропетр. ин-т инж. ж.-д. трансп. – Днепропетровск, 1981. – 465 с.
6. ДСТУ ГОСТ 33211:2017. Вагони вантажні. Вимоги до міцності та динамічних якостей (ГОСТ 33211-2014, IDT). – Введ. 2017–07–01. – Київ : УкрНДНЦ, 2017. – 58 с.
7. Збірник № 17 Правил перевезення і тарифів залізничного транспорту України. – Київ : САМ, 2005. – 176 с.
8. Определение допустимых сил при оценке устойчивости грузовых вагонов от выжимания в поездах / А. А. Швець, К. И. Железнов, А. С. Акулов, А. Н. Заболотный, Е. В. Чабанюк // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 1 (61). – С. 189–192. doi: 10.15802/stp2016/61045
9. Определение показателей безопасности движения платформ с порожним автопоездом / А. В. Шатунов, В. В. Соборницкая, Е. Н. Ковтун, О. М. Маркова // Транспорт : сб. науч. тр. / Днепропетр. гос. техн. ун-т ж.-д. трансп. – Днепропетровск, 2001. – Вып. 7. – С. 116–120.
10. Підвищення ефективності оперативного керування локомотивним парком залізниць України : монографія / Д. М. Козаченко, Р. В. Вернигора, Л. О. Єльнікова, М. І. Березовий ; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпро : Герда, 2017. – 164 с.
11. Теоретическая оценка динамических качеств платформ, загруженных автопоездом с грузом / А. В. Шатунов, В. В. Соборницкая, Е. Н. Ковтун, О. М. Маркова // Транспорт : сб. науч. тр. / Днепропетр. гос. техн. ун-т ж.-д. трансп. – Днепропетровск, 2000. – Вып. 3. – С. 21–27.
12. Технические условия размещения и крепления грузов. Приложение 3 к Соглашению о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС). – Київ : Девольта, 2011. – Т. 1. – 436 с.
13. Шатунов, А. В. Нагруженность сцепа из двух платформ при ресурсосберегающем способе транспортировки длинномерных грузов : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.22.07 / Шатунов Александр Васильевич ; Днепропетр. ин-т инж. ж.-д. трансп. – Днепропетровск, 1992. – 17 с.
14. Швець, А. О. Вплив поздовжнього та поперечного зміщення центру ваги вантажу в піввагонах на їх динамічні показники / А. О. Швець // Наука та прогрес транспорту. – 2018. – № 5 (77). – С. 115–128. doi: 10.15802/stp2018/146432

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

15. Determination of the issue concerning the lift resistance factor of lightweight car / A. O. Shvets, K. I. Zheliez-nov, A. S. Akulov, O. M. Zabolotnyi, Y. V. Chabaniuk // *Наука та прогрес транспорту*. – 2015. – № 6 (60). – С. 134–148. doi: 10.15802/stp2015/57098
16. Effect of the state of car running gears and railway track on wheel and rail wear / E. P. Blokhin, O. M. Pshinko, V. D. Danovich, M. L. Korotenko // *Railway Bogies and Running Gears : Proc. of the 4th Intern. Conf. / Technical University of Budapest*. – Budapest, 1998. – P. 313–323.
17. McKinnon, A. C. Freight Transport Deceleration: Its Possible Contribution to the Decarbonisation of Logistics / A. C. McKinnon // *Transport Reviews*. – 2016. – Vol. 36. – Iss. 4. – P. 418–436. doi: 10.1080/01441647.2015.1137992
18. Modeling, simulation and applications of longitudinal train dynamics / C. Cole, M. Spiryagin, Q. Wu, Y. Q. Sun // *Vehicle System Dynamics*. – 2017. – Vol. 55. – Iss. 10. – P. 1498–1571. doi: 10.1080/00423114.2017.1330484
19. Navarrete, J. A. Experimental and theoretical modeling of cargo sloshing during braking / J. A. Navarrete, F. Otremba // *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Phoenix, Arizona, USA, Nov. 11–17, 2016)*. – Phoenix, 2016. – Vol. 4B : Dynamics, Vibration, and Control. doi: 10.1115/imece2016-65698
20. Ramos, A. G. A new load balance methodology for container loading problem in road transportation / A. G. Ramos, E. Silva, J. F. Oliveira // *European Journal of Operational Research*. – 2018. – Vol. 266. – Iss. 3. – P. 1140–1152. doi: 10.1016/j.ejor.2017.10.050
21. Wu, H. Effects of wheel and rail profiles on vehicle performance / H. Wu // *Vehicle System Dynamics*. – 2006. – Vol. 44. – Iss. sup1. – P. 541–550. doi: 10.1080/00423110600875393
22. Wu, Q. Longitudinal train dynamics: an overview / Q. Wu, M. Spiryagin, C. Cole // *Vehicle System Dynamics*. – 2016. – Vol. 54. – Iss. 12. – P. 1688–1714. doi: 10.1080/00423114.2016.1228988

О. В. ШАТУНОВ<sup>1\*</sup>, А. О. ШВЕЦЬ<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 953 60 14, ел. пошта shatunov220648@gmail.com, ORCID 0000-0002-1115-0093

<sup>2\*</sup>Каф. «Теоретична та будівельна механіка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 214 14 19, ел. пошта angela\_Shvets@ua.fm, ORCID 0000-0002-8469-3902

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ПЛАТФОРМИ В РАЗІ ЗМІЩЕННЯ ЦЕНТРА ТЯЖІННЯ ВАНТАЖУ

**Мета.** Визначення впливу поздовжнього й поперечного зміщення центра тяжіння великовагового вантажу на платформах, з урахуванням швидкості руху, на основні динамічні показники – максимальні коефіцієнти динамічної добавки обресорених і необресорених частин, максимальне відношення рамної сили до статичного осевого навантаження, коефіцієнт стійкості колеса від сходження з рейок. **Методика.** За основу дослідження взято метод математичного та комп'ютерного моделювання динамічної навантаженості платформи з використанням моделі просторових коливань зчепу з п'яти вагонів і програмного комплексу, розробленого в галузевій науково-дослідній лабораторії динаміки й міцності рухомого складу (ГНДЛ ДМРС). Теоретичні дослідження проведені за умови руху платформи моделі 13–401 з типовими візками 18–100 зі швидкостями в інтервалі від 50 до 90 км/год по кривих із радіусами 350 й 600 м, із підвищеннями зовнішньої рейки 130 і 120 мм відповідно. **Результати.** Подано аналіз теоретичних досліджень динамічних якостей рухомого складу на прикладі платформ. Розрахунки проведені з використанням пакета прикладних програм. У ході виконання теоретичних досліджень і після проведення моделювання з урахуванням процесів коливання вагона-платформи й вантажу, за наявності поздовжнього й поперечного зміщення його центра тяжіння, отримано залежності основних динамічних показників з огляду на величину швидкості руху. **Наукова новизна.** Для визначення динамічної навантаженості вагона платформи, із застосуванням математичної моделі зчепу з п'яти вантажних вагонів, досліджено вплив зміщення у двох напрямках від центральної осі симетрії центра тяжіння великовагового вантажу з огляду на величину швидкості руху по кривих

Creative Commons Attribution 4.0 International

doi: 10.15802/stp2019/165160

© О. В. Шатунів, А. О. Шветс, 2019

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ділянках колії малого й середнього радіуса. **Практична значимість.** У результаті проведених теоретичних досліджень обґрунтовано рекомендації стосовно максимально можливих величин зміщення центра тяжіння великогазових вантажів під час їх транспортування на вагонах-платформах.

**Ключові слова:** вантаж; вагон-платформа; динамічні показники; криві ділянки колії; поздовжнє й поперечне зміщення; центр тяжіння; швидкість руху

А. В. ШАТУНОВ<sup>1\*</sup>, А. А. ШВЕЦ<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>\*Каф. «Вагони и вагонное хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (067) 953 60 14, эл. почта shatunov220648@gmail.com, ORCID 0000-0002-1115-0093

<sup>2</sup>\*Каф. «Теоретическая и строительная механика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (050) 214 14 19, эл. почта angela\_shvets@ua.fm, ORCID 0000-0002-8469-3902

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЛАТФОРМЫ ПРИ СМЕЩЕНИИ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ ГРУЗА

**Цель.** Определение влияния продольного и поперечного смещения центра тяжести тяжеловесного груза на платформах, с учетом скорости движения на основные динамические показатели – максимальные коэффициенты динамической добавки обрессоренных и необрессоренных частей, максимальное отношение рамной силы к статической осевой нагрузке, коэффициент устойчивости колеса от схода с рельсов.

**Методика.** Основой исследования является метод математического и компьютерного моделирования динамической нагруженности платформы с использованием модели пространственных колебаний сцепа из пяти вагонов и программного комплекса, разработанного в отраслевой научно-исследовательской лаборатории динамики и прочности подвижного состава (ОНИЛ ДППС). Теоретические исследования проведены при движении платформы модели 13–401 с типичными тележками 18–100 со скоростями в интервале от 50 до 90 км/ч по кривым с радиусами 350 и 600 м, с возвышением наружного рельса 130 и 120 мм соответственно.

**Результаты.** Представлен анализ теоретических исследований динамических качеств подвижного состава на примере платформ. Расчеты проведены с использованием пакета прикладных программ. В ходе выполнения теоретических исследований и после моделирования с учетом процессов колебания вагона-платформы и груза, при наличии продольного и поперечного смещения его центра тяжести, получены зависимости основных динамических показателей на основании величины скорости движения. **Научная новизна.** Для определения динамической нагруженности вагона-платформы, с применением математической модели сцепа из пяти грузовых вагонов, исследовано влияние смещения в двух направлениях от центральной оси симметрии центра тяжести тяжеловесного груза с учетом величины скорости движения по криволинейным участкам пути малого и среднего радиуса. **Практическая значимость.** В результате проведенных теоретических исследований обоснованы рекомендации относительно максимально возможных величин смещения центра тяжести тяжеловесных грузов при их транспортировке на платформах.

**Ключевые слова:** груз; вагон-платформа; динамические показатели; кривые участки пути; продольное и поперечное смещение; центр тяжести; скорость движения

### REFERENCES

1. Babaev, A. M., Kablukov, V. A., & Shatunov, A. V. (1993). Dinamiko-prochnostnye kachestva scea platform s uprugim gruzom. *Dynamics of cars* (pp. 118-120). St. Petersburg. (in Russian)
2. Danilenko, E. I. (2010). *Zaliznychna kolia: pidruchnyk dlia vyshchykh navchalnykh zakladiv*. (Vol. 1-2). Kyiv: Inpres. (in Ukrainian)
3. Danovich, V. D., & Anisimov, P. S. (1989). Kolebaniya gorizontally ploskosti 4-osn. platformy s nesimmetrichno raspolozhennym tyazhelovesnym gruzom. *Vestnik of the railway Research Institute*, 3, 5-9. (in Russian)
4. Danovich, V. D., & Malysheva, A. A. (1998). Mathematical Model of Spatial Oscillations of the Coupling of Five Cars Moving Along a Rectilinear Section of the Track. *Transport. Stress loading and durability of a rolling stock* (pp. 62-69). Dnepropetrovsk. (in Russian)

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

5. Danovich, V. D. (1981). *Spatial Cars Oscillations in Inertia Track*. (Dysertatsiia doktora tekhnichnykh nauk). Dnepropetrovsk Institute of Railway Transport Engineering, Dnepropetrovsk. (in Russian)
6. Vahonyi vantazhni. Vymohy do mitsnosti ta dynamichnykh yakostei, 58 DSTU 33211:2017 (2017). (in Ukrainian)
7. *Zbirnyk № 17 Pravyl perevezennia i taryfiv zaliznychnoho transportu Ukrainy*. (2005). Kyiv: SAM. (in Ukrainian)
8. Shvets, A. A., Zheleznov, K. I., Akulov, A. S., Zabolotny, A. N., & Chabanyuk, E. V. (2016). Determination the permissible forces in assessing the lift resistant factor of freight cars in trains. *Science and Transport Progress*, 1(61), 189-192. doi: 10.15802/stp2016/61045 (in Russian)
9. Shatunov, A. V., Sobornitskaya, V. V., Kovtun, E. N., & Markova, O. M. (2001). Opredelenie pokazatelej bezopasnosti dvizheniya platform s porozhnim avtopoezdom. *Transport*, 7, 116-120. (in Russian)
10. Kozachenko, D. M., Vernigora, R. V., Yelnikova, L. O., & Berezovy, M. I. (2017). *Pidvyshchennia efektyvnosti operatyvnoho keruvannia lokomotyvnyim parkom zaliznyts Ukrainy: Monohrafiia*. Dnipro: Herda. (in Ukrainian)
11. Shatunov, A. V., Sobornitskaya, V. V., Kovtun, E. N., & Markova, O. M. (2000). Teoreticheskaya ocenka dinamicheskikh kachestv platform, zagruzhennykh avtopoezdom s gruzom. *Transport*, 3, 21-27. (in Russian)
12. *Tekhnicheskie usloviya razmeshcheniya i krepeleniya gruzov. Prilozhenie 3 k Soglasheniyu o mezhdunarodnom zheleznodorozhnom gruzovom soobshchenii (SMGS)*. (2011). Kyiv: Devolta. (in Russian)
13. Shatunov, A. V. (1992). *Nagruzhennost stsepa iz dvukh platform pri resursoberegayushchem sposobe transportirovki dlinnomernykh gruzov*. (Avtoreferat dysertatsii kandydata tekhnichnykh nauk). Dnepropetrovsk Institute of Railway Transport Engineering, Dnepropetrovsk. (in Russian)
14. Shvets, A. O. (2018). Influence of the longitudinal and transverse displacement of the center of gravity of the load in gondola cars on their dynamic indicators. *Science and Transport Progress*, 5(77), 115-128. doi: 10.15802/stp2018/146432 (in Ukrainian)
15. Shvets, A. A., Zhelieznov, K. I., Akulov, A. S., Zabolotnyi, A. N., & Chabaniuk, Y. V. (2015). Determination of the issue concerning the lift resistance factor of lightweight car. *Science and Transport Progress*, 6(60), 134-148. doi: 10.15802/stp2015/57098 (in English)
16. Blokhin, E. P., Pshinko, O. M., Danovich, V. D., & Korotenko, M. L. (1998). Effect of the state of car running gears and railway track on wheel and rail wear. *Railway Bogies and Running Gears: Proceedings of the 4th International Conference* (pp. 313-323). Budapest. (in English)
17. McKinnon, A. C. (2016). Freight Transport Deceleration: Its Possible Contribution to the Decarbonisation of Logistics. *Transport Reviews*, 36(4), 418-436. doi: 10.1080/01441647.2015.1137992 (in English)
18. Cole, C., Spiryagin, M., Wu, Q., & Sun, Y. Q. (2017). Modeling, simulation and applications of longitudinal train dynamics. *Vehicle System Dynamics*, 55(10), 1498-1571. doi: 10.1080/00423114.2017.1330484 (in English)
19. Navarrete, J. A., & Otremba, F. (2016). Experimental and theoretical modeling of cargo sloshing during braking. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Phoenix, Arizona, USA, Nov. 11-17, 2016). *Dynamics, Vibration, and Control*, 4B. Phoenix. doi: 10.1115/IMECE201665698 (in English)
20. Ramos, A. G., Silva, E., & Oliveira, J. F. (2018). A new load balance methodology for container loading problem in road transportation. *European Journal of Operational Research*, 226(3), 1140-1152. doi: 10.1016/j.ejor.2017.10.050 (in English)
21. Wu, H. (2006). Effects of wheel and rail profiles on vehicle performance. *Vehicle System Dynamics*, 44(sup1), 541-550. doi: 10.1080/00423110600875393 (in English)
22. Wu, Q., Spiryagin, M., & Cole, C. (2016). Longitudinal train dynamics: an overview. *Vehicle System Dynamics*, 54(12), 1688-1714. doi: 10.1080/00423114.2016.1228988 (in English)

Received: Nov. 23, 2018

Accepted: March 27, 2019

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

UDC 624.94.014.2:69.059.7

N. G. KRUKHLYKOVA<sup>1\*</sup>, D. O. BANNIKOV<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Fac. «Industrial and Civil Engineering», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan, St. 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 94 67 288, e-mail dnuzt@diit.edu.ua, ORCID 0000-0003-2822-6696

<sup>2\*</sup>Dep. «Construction Production and Geodesy», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan, St. 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 400 43 07, e-mail bdo2020@yahoo.com ORCID 0000-0002-9019-9679

### RATIONAL DESIGN OF SHORT-SPAN INDUSTRIAL BUILDING ROOF FOR RECONSTRUCTION CONDITIONS

**Purpose.** Recently, the demand for reuse of industrial buildings that have not been in operation for some time has been increasing in Ukraine. Herewith, quite often the design of their roof requires the complete replacement and renovation by using modern roofing materials to meet the requirements of new government standards. Therefore, the choice and justification of the rational design of steel roof on the example of a short-span industrial building (18-24 m span), which is planned to be returned to exploitation after idle time, is the main goal of this publication. The object of the analysis is an unheated building equipped with bridge cranes of a small capacity (up to 10 tons).

**Methodology.** To achieve this purpose, the comparison of structural variants of a roof steel collar tie was performed. Such variants include two types of collar tie cross-section – a lattice truss and a solid I-girder. The first type was analyzed for four possible types of section of elements – double angles, a roll-welded square profile, an electric-welded round tube and a rolled round tube. The second type was analyzed for two possible types of section – rolled I-section made of normal strength steel and fabricated sections of thin-gage high-strength steel. The design variants were compared on the basis of a numerical analysis of their work using the finite element method based on the software complex SCAD for Windows. **Findings.** According to the research results it should be stated that for the conditions of the city of Dnipro the most cost-effective variant of the steel collar tie cross section for the short-span industrial building is the truss made of electric-welded round tubes. Also the construction of collar tie made of roll-welded square profiles or fabricated section of thin-gage high-strength steel is considered quite effective.

**Originality.** The research presented in the publication allows estimating the possibility and economic efficiency of usage for various types of cross-sections for the collar tie of a steel non-insulated roof of the industrial building for the reconstruction conditions in the Dnipro-city. **Practical value.** A practical estimation of mass and cost parameters for steel collar ties of various types has been carried out, and the methodology for conducting such estimation has been substantiated.

**Keywords:** industrial building; collar tie; girder; truss; software complex SCAD for Windows; finite element method

#### Introduction

Currently, in Ukraine one of the key problems in the field of exploitation of the industrial enterprise structures is the level of their technical condition. This is especially true for such buildings, which for some time were not in operation, but were, so to speak, «on their own». During such an idle period some structures degraded, maybe went to ruins, and

the other remained in a semi-usable state of operation. However, attempts to return such structures to operation are increasingly observed in practice, because it is often a cheaper option than the construction of a completely new object.

As a rule, such reuse of building structures is accompanied by their full or partial renewal, depending on their technical condition, and the building itself is redesigned to the requirements of new

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

modern design standards and potentially new equipment to be installed. Most often it is the roof that requires renovation, because, on the one hand, it is in the most unfavorable conditions during idle time, and on the other hand, the roof itself often limits the dimensions for the installation of new equipment in the building.

It should also be noted that the demand for short-span buildings, such as storage buildings, has been particularly active recently. This is due to their relatively low cost, as well as the desire to use them in the future for production processes in the small business.

### Purpose

Taking into account the foregoing, the main purpose of the study conducted by the authors is to choose and justify the rational design of steel roof on the example of a short-span industrial building (18-24 m span), which is planned to be returned to exploitation after idle time. The object of the analysis is an unheated building equipped with bridge cranes of a small capacity (up to 10 tons).

To achieve this, it was necessary first to analyze the existing and approved roof design variants, suitable for use in such buildings, then to compare these variants, taking into account both their carrying capacity and the estimated cost, and to choose the best variant that can be proposed for practical implementation.

### Methodology

Given the nature of the industrial building in question, the design of its roof should provide for the use of bearing collar ties, which include a system of purlins and steel profiled flooring. This roof type is proved itself good in practice and is considered to be the main one for modern non-heated industrial buildings [10].

It is also worth noting that abroad the short-span industrial buildings, which are quite popular, have a similar roof design solution [13].

The main issue, when designing such short-span roofs, is the choice of type of collar tie. For this purpose, straight-axis collar ties (trusses or beams) may be used, as other types of bearing structures, such as arches or frames, are more suitable for significant spans. The slope of the upper

chord of the collar ties in accordance with the standard requirements [6] shall be not less than 20% (11°), which is due to the need of preventing the water flow through the profiled sheet joints to the building. In case of installation of such roofs on the 10 – 20% (5.5 – 11°) slopes there must be provided the sealing of joints between the flooring sheets. However, as the experience of operation shows, firstly, such works are technologically costly, and secondly, over time, sealing requires periodic renewal. Therefore, the practice of such roofs with small slopes is mostly abandoned.

Taking into account the above limitations, a triangular truss with a triangular lattice with additional posts, as the most economical one, was accepted as a lattice truss during the studies. At the same time, four types of sections of the elements of such a truss were analyzed, which are now used in metal structures and available on the Ukrainian steel market: – angles (according to GOST 8), roll-welded square profiles (according to GOST [3]), electric-welded round tubes (according to GOST [1]) and rolled round tubes (according to GOST [4]). For the first two types of cross-sections, C255 grade steel was used, which is the minimum allowable for structures of group 1 according to the standard [7]. For the last two types of round tube cross-sections, C245 grade steel was used according to this standard.

As a solid girder, we considered two types of beams – rolled I-section girder (according to GOST [2]) and a plate girder made of high-strength steel of C325 grade, which is becoming more and more popular at the modern market of Ukraine. To ensure the desired slope, the girder had an asymmetrical design.

Roof loads were determined according to the current standards in Ukraine [5]. Since, at a given angle of inclination of 11° the wind load is upward due to the negative aerodynamic coefficient, we took into account only the proper weight of the roof together with the collar tie and snow load.

To specify the research, we considered the object – the industrial storage building, located in the city of Dnipro at the address of Panikakhi street 1, which for a long time (almost 15 years) was not in operation (Fig. 1). According to the data of its survey, carried out by a specialized organization, the roof design should be completely replaced by



## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

a new one, since its technical condition was assessed as the state of failure.

One of the peculiarities of the building under consideration was a varying span, which for its main part was 24 m, and for final sections decreased to 18 m. Therefore, in order to provide the required slope of the roof, it was necessary to develop a design of a universal collar tie that would provide the required slope of the roof without changing the type of the collar tie itself.

For conducting variant calculations we used an extremely popular and approved numerical method of building mechanics – the method of finite elements [12, 14, 15] based on the well-known domestic software complex SCAD for Windows [11]. The constructed calculation models for the considered collar tie design variants are shown in Fig. 2 – 5. The trusses and the rolled girder were modelled by rod finite element of universal type, and the plate girder was modeled by plate four-node finite elements of isoparametric type. All calculations were performed in geometrically and physically linear settings. This approach avoids issues of estimating the convergence of results peculiar for finite elements of other types [9].

**Findings**

According to the calculation results for truss-type collar ties the sections of the elements were selected for each of the four constructive types. Herewith, upon selection the cross sections were adjusted according to the rules of unification. Also, according to the unification results, a universal truss for 18 and 24 m spans was formed, which consisted of the largest profiles. These data are presented in Table 1.

For the I-section collar ties the profile 70B1 was selected. For the collar ties in the form of fabricated sections the 1.3 m high profile was chosen for the elements thickness of 4 mm and 1.0 m high profile – for the elements thickness of 6 mm. Herewith the condition of stiffness was the determining condition.

Based on the results of calculations, a summary table was drawn up, which takes into account the total costs for the profiles of the collar ties of each type. Data are taken as averaged generalizations at the rolled metal market in the city of Dnipro for November-December 2018. However, this analysis allows us to reveal a general picture.



Fig. 1. Object of the research – short-span industrial storage building

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

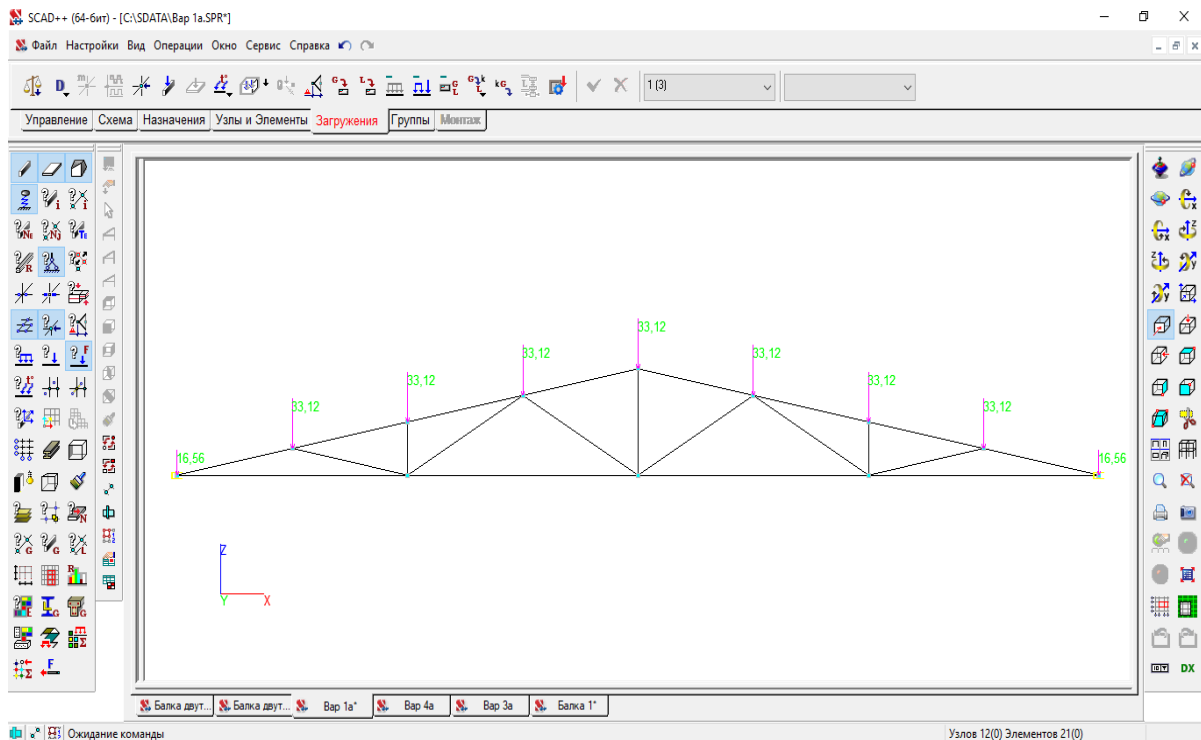


Fig. 2. Finite-element model of 24m span truss

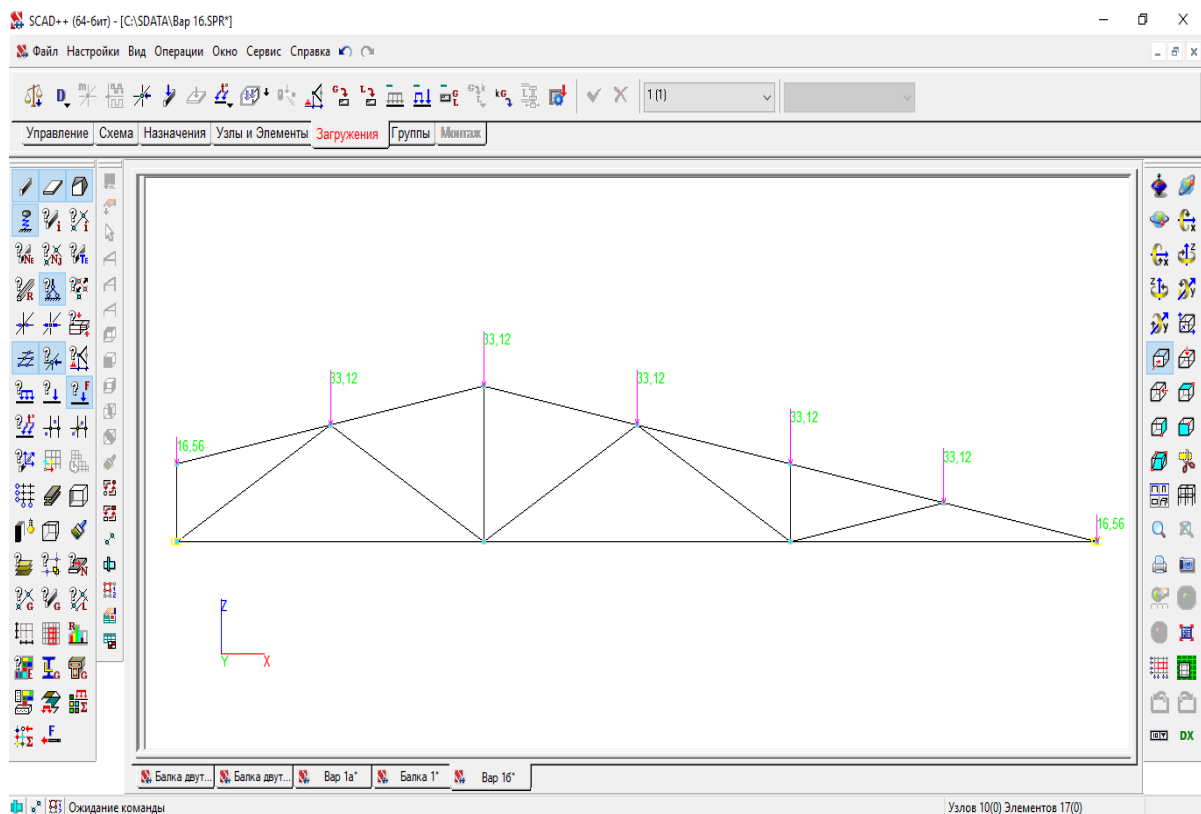


Fig. 3. Finite-element model of the shortened 18 m span truss

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

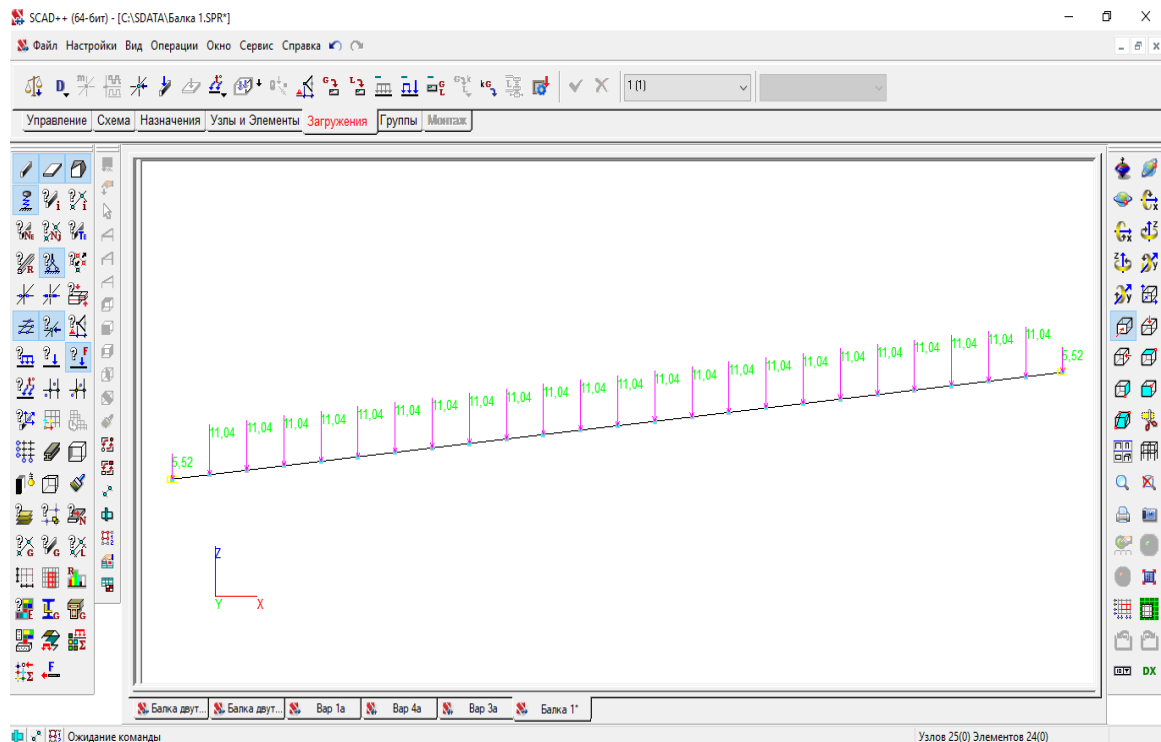


Fig. 4. Finite-element model of rolled girder

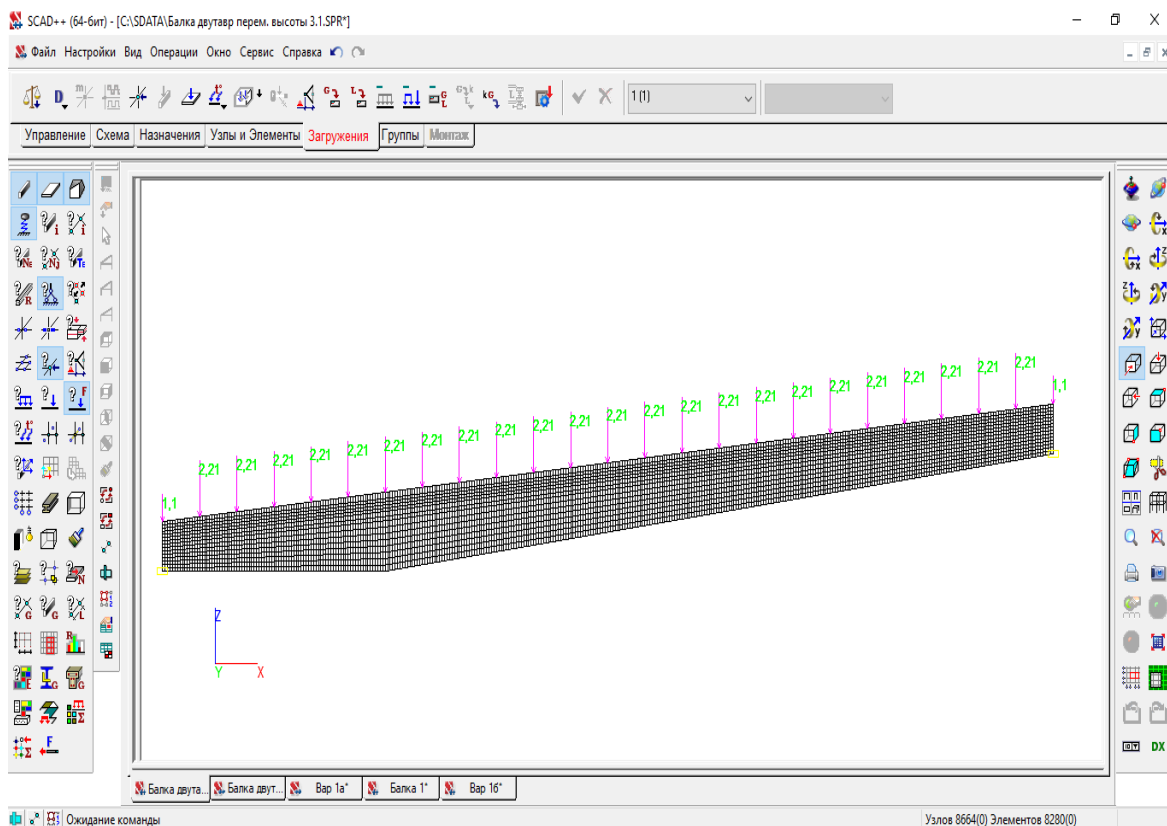


Fig. 5. Finite-element model of plate girder

Table 1

**Cross-sections of universal trusses with 18-24 m span**

Truss element	Truss element cross-section made of			
	double angles	roll-welded square	electric-welded round tubes	rolled round tubes
upper chord	125x8	120x7	193.7x5	194x5
lower chord	90x7	110x6	159x5.5	133x6.5
posts	50x3	80x5	70x4	68x3
diagonal web elements	90x7	80x5	102x4	102x4

Table 2

**Weight and cost of constructive variants for roof collar ties**

No.	Collar tie cross section	Weight, t	Cost per 1 t, UAH	Cost, UAH
1.	Truss of double angles	1.63	22 912	37 350
2.	Truss of roll-welded square profile	1.33	22 150	29 460
3.	Truss of electric-welded round tubes	1.35	18 975	25 620
4.	Truss of rolled round tubes	1.28	28 250	36 160
5.	Girder of rolled I-section	3.10	19 400	60 140
6.	Girder of fabricated I-section (4 mm)	1.58	19 670	31 080
7.	Girder of fabricated I-section (6 mm)	2.08	19 670	40 915

From the data in the table it is clearly seen that the smallest weight for the considered industrial building roof reconstruction conditions has a collar tie in the form of the truss of rolled round tubes. A slightly larger weight, but not much, has a collar tie in the form of trusses of roll-welded square profile and electric-welded round tubes. The largest weight has a collar tie of rolled I-section. The welded collar tie of thin-gage high-strength steel takes an intermediate position.

Taking into account the market value of each type of cross-section, the lowest cost has the collar tie in the form of the truss of electric-welded tubes. In the second place there is the collar tie of roll-welded square profile, the cost of which is 15% higher. The third is ranked the collar tie in the form of welded fabricated I-section of thin-gage (4 mm thick) high-strength steel. Its value is higher by almost 18%. The most uneconomical is the collar

tie made of rolled I-section, the cost of which is more than 2 times higher than that of the collar tie in the form of the truss of electric-welded tubes.

**Originality and practical value**

The research presented in the publication allows estimating the possibility and economic efficiency of usage for various types of cross-sections for the collar tie of a steel non-insulated roof of the industrial building. At the same time, the study outlined the case of reconstruction of the short-span (18-24 m) building, which is quite common nowadays, with the complete roof replacement.

The results obtained are valid for the conditions of Dnipro, but according to a similar methodology the degree of efficiency of reconstruction and rebuilding of steel roofs of industrial build-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

ings can be determined in practice for other regions of Ukraine as well.

Also, it should be noted that the conducted study allow us to outline the range of the most rational constructive solutions of bearing collar ties for short-span industrial buildings.

### Conclusions

Based on the material outlined in the publication, the following conclusions can be drawn:

1. For the reconstruction conditions of a steel roof of a short-span (18-24 m) industrial building, the use of the truss of electric-welded round tubes is the most cost effective as a bearing collar tie.

2. In the second place, according to the degree of economic efficiency, there is the use of the truss of roll-welded square profiles, the cost of which is 15% higher than the previous variant. Taking into

account the higher technological efficiency of the implementation of node connections for such trusses, under certain conditions this type of collar tie can be considered the most rational.

3. Also noteworthy is the collar tie in the form of fabricated I-section of small thickness (4 mm) of high-strength steel, the cost of which is 18% higher than the first constructive variant. Therefore, this section can also be considered as competing with the main recommended variant (truss of electric-welded round tubes), taking into account its high manufacturability.

4. The least effective of all considered variants is the collar tie made of rolled I-section. Its weight and value are more than 2 times higher than the main recommended variant (truss of electric-welded round tubes).

### LIST OF REFERENCE LINKS

- ГОСТ 10704-91. Трубы стальные электросварные прямошовные. Сортамент. – Москва : Стандартинформ, 2007. – 17 с.
- ГОСТ 26020-83. Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Сортамент. – Москва : Изд-во стандартов, 1984. – 6 с.
- ГОСТ 30245-2003. Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные для строительных конструкций. Технические условия. – Москва : Изд-во стандартов, 2003. – 15 с.
- ГОСТ 8732-78\*. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Сортамент. – Москва : Изд-во стандартов, 1989. – 10 с.
- ДБН В.1.2-2-2006 (зі змінами). Система надійності та безпеки в будівництві. Навантаження і впливи. Норми проектування. – Київ : Держбуд, 2007. – 70 с.
- ДБН В.2.6-220:2017. Покриття будівель і споруд. – Київ : Мінрегіон України, 2017. – 53 с.
- ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. – Київ : Мінрегіон України, 2014. – 205 с.
- ДСТУ 2251-93 (ГОСТ 8509-93). Кутики сталеві гарячекатані рівнополічні. Сортамент. – Київ : Держстандарт України, 1993. – 16 с.
- Банніков, Д. О. Оцінка практичної збіжності результатів аналізу пластинчастих моделей в методі скінчених елементів / Д. О. Банніков // Нові технології в будівництві. – 2017. – № 1. – С. 26–31.
- Буга, П. Г. Гражданские, промышленные и сельскохозяйственные здания / П. Г. Буга. – Москва : Книга по требованию, 2013. – 349 с.
- SCAD Office. Версия 21. Вычислительный комплекс SCAD++ / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. А. Маляренко, С. Ю. Фиалко. А. В. Перельмутер, М. А. Перельмутер. – Москва : СКАД СОФТ, 2015. – 850 с.
- Bofang, Z. The Finite Element Method: Fundamentals and Applications in Civil, Hydraulic, Mechanical and Aeronautical Engineering / Zhu Bofang. – Singapore : John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2018. – 843 p. doi: 10.1002/9781119107323
- Johnson, R. P. Composite Structures of Steel and Concrete: Beams, Slabs, Columns and Frames for Buildings / R. P. Johnson. – Hoboken : John Wiley & Sons, Inc., 2018. – 265 p. doi: 10.1002/9781119401353
- Singiresu, S. R. The Finite Element Method in Engineering / S. R. Singiresu. – 6th ed. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2018. – 782 p. doi: 10.1016/c2016-0-01493-6
- Shames, I. H. Energy and Finite Element Methods in Structural Mechanics / I. H. Shames, C. L. Dym. – New York : Routledge, 2017. – 776 p. doi: 10.1201/9780203757567

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Н. Г. КРУГЛИКОВА<sup>1\*</sup>, Д. О. БАННИКОВ<sup>2\*</sup><sup>1\*</sup> Ф-т «Промислове та цивільне будівництво», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 94 67 288, ел. пошта dnuzt@diit.edu.ua, ORCID 0000-0003-2822-6696<sup>2\*</sup> Каф. «Будівельне виробництво та геодезія», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 400 43 07, ел. пошта bdo2020@yahoo.com, ORCID 0000-0002-9019-9679**РАЦІОНАЛЬНА КОНСТРУКЦІЯ ПОКРИТТЯ МАЛОПРОГОНОВОЇ ПРОМИСЛОВОЇ БУДІВЛІ ДЛЯ УМОВ РЕКОНСТРУКЦІЇ**

**Мета.** Останнім часом в Україні зростає попит на повторне використання промислових будівель, які протягом певного часу не перебували в експлуатації. При цьому досить часто конструкція їх покрівлі потребує повної заміни й оновлення із сучасних покрівельних матеріалів з урахуванням вимог нових державних норм. Тому вибір та обґрунтування раціональної конструкції сталевих покріть на прикладі малопрогнаної промислової будівлі (прогін 18–24 м) для повернення її до експлуатації після простою є основною метою цієї публікації. Об'єкт аналізу – неопалювана будівля, обладнана мостовими кранами незначної вантажопідйомності (до 10 т).

**Методика.** Для досягнення поставленої мети виконано зіставлення конструктивних варіантів несного сталевих ригеля покрівлі. Розглянуто два типи перерізу ригеля: наскрізний – у вигляді ферми й суцільний – у вигляді двотаврової балки. Перший тип проаналізовано для чотирьох можливих типів перерізу елементів – подвійні кутики, гнutoзварний квадратний профіль, електрозварна кругла труба й прокатна кругла труба. Другий тип досліджено для двох можливих типів перерізу – прокатний двотавровий профіль зі сталі звичайної міцності і зварний профіль із тонкостінної сталі підвищеної міцності. Зіставлення конструктивних варіантів виконано на основі чисельного аналізу їх роботи методом скінченних елементів на базі проектно-обчислювального комплексу SCAD for Windows.

**Результати.** Проведене дослідження дає змогу констатувати, що для умов м. Дніпро найбільш економічно ефективним варіантом перерізу сталевих ригелів промислової будівлі невеликих прогонів є ферма з електрозварних круглих труб. Також досить ефективним слід вважати конструкцію ригеля, виконану з ферм із гнutoзварними квадратними профілями або зварного двотаврового типу з тонкостінної сталі підвищеної міцності.

**Наукова новизна.** Описане в публікації дослідження дозволяє оцінити можливість, а також економічну ефективність використання різних типів перерізів для ригелів сталевих неутеплених покріть промислової будівлі з метою реконструкції в м. Дніпро.

**Практична значимість.** Виконано практичну оцінку масових і кошторисних показників для сталевих ригелів різних типів, а також обґрунтовано методику проведення подібної оцінки.

**Ключові слова:** промислова будівля; ригель; балка; ферма; проектно-обчислювальний комплекс SCAD for Windows; метод скінченних елементів

Н. Г. КРУГЛИКОВА<sup>1\*</sup>, Д. О. БАННИКОВ<sup>2\*</sup><sup>1\*</sup> Ф-т «Промышленное и гражданское строительство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (063) 94 67 288, эл. почта dnuzt@diit.edu.ua, ORCID 0000-0003-2822-6696<sup>2\*</sup> Каф. «Строительное производство и геодезия», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (063) 400 43 07, эл. почта bdo2020@yahoo.com, ORCID 0000-0002-9019-9679**РАЦИОНАЛЬНАЯ КОНСТРУКЦИЯ ПОКРЫТИЯ МАЛОПРОЛЕТНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ЗДАНИЯ ДЛЯ УСЛОВИЙ РЕКОНСТРУКЦИИ**

**Цель.** В последнее время в Украине возрастает спрос на повторное использование промышленных зданий, которые на протяжении определенного времени не находились в эксплуатации. При этом довольно часто конструкция их покрытия требует полной замены и обновления из современных кровельных материалов

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

с учетом требований новых государственных норм. Поэтому выбор и обоснование рациональной конструкции стального покрытия на примере малопролетного промышленного здания (пролет 18–24 м) для возврата в эксплуатацию после простоя является основной целью публикации. Объект анализа – неотапливаемое здание, оборудованное мостовыми кранами незначительной грузоподъемности (до 10 т). **Методика.** Для достижения поставленной цели было выполнено сопоставление конструктивных вариантов несущего стального ригеля покрытия. В качестве таких вариантов рассмотрено два типа сечения ригеля – сквозной в виде фермы и сплошной в виде двутавровой балки. Первый тип проанализирован для четырех возможных типов сечения элементов – двойные уголки, гнутосварной квадратный профиль, электросварная круглая труба и прокатная круглая труба. Второй тип исследован для двух возможных типов сечения – прокатный двутавровый профиль из стали обычной прочности и сварной профиль из тонкостенной стали повышенной прочности. Сопоставление конструктивных вариантов выполнено на основе численного анализа их работы методом конечных элементов на базе проектно-вычислительного комплекса SCAD for Windows. **Результаты.** Проведенное исследование даёт возможность констатировать, что для условий г. Днипро наиболее экономически эффективным вариантом сечения стального ригеля промышленного здания небольших пролетов является ферма из электросварных круглых труб. Также достаточно эффективной следует считать конструкцию ригеля, выполненную из ферм с гнутосварными квадратными профилями или сварного двутаврового типа из тонкостенной стали повышенной прочности. **Научная новизна.** Представленные в публикации исследования позволяют оценить возможность и экономическую эффективность использования различных типов сечений в качестве ригеля стального неутепленного покрытия промышленного здания для условий реконструкции в г. Днипро. **Практическая значимость.** Выполнена практическая оценка массовых и стоимостных показателей для стальных ригелей различных типов, а также обоснована методика проведения подобной оценки.

**Ключевые слова:** промышленное здание; ригель; балка; ферма; проектно-вычислительный комплекс SCAD for Windows; метод конечных элементов

## REFERENCES

1. Electrically welded steel line-weld tubes. Range, 17 GOST 10704-91 (2007). (in Russian)
2. Hot-rolled steel I-beam with parallel flange edges. Dimensions, 6 GOST 26020-83 (1984). (in Russian)
3. Steel bent closed welded square and rectangular section for building. Specifications, 15 GOST 30245-2003 (2003). (in Russian)
4. Truby stalnye besshovnye goryachedeformirovannye. Sortiment, 10 GOST 8732-78\* (1989). (in Russian)
5. Systema nadiinosti ta bezpeky v budivnytstvi. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia, 70 DBN B.1.2-2:2006 (2007). (in Ukrainian)
6. Pokryttia budivel i sporud, 53 DBN B.2.6-220:2017 (2017). (in Ukrainian)
7. Stalevi konstruktzii. Normy proektuvannia, 205 DBN B.2.6-198:2014 (2014). (in Ukrainian)
8. Kutyky stalevi hariachekatani rivnopolychni. Sortiment, 16 DSTU 2251-93 (GOST 8509-93) (1993). (in Ukrainian)
9. Bannikov, D. O. (2017). Otsinka praktychnoi zbizhnosti rezultativ analizu plastynchastykh modelei v metodi skinchenykh elementiv. *Novi tekhnolohii v budivnytstvi*, 1, 26-31. (in Ukrainian)
10. Buga, P. G. (2013). *Grazhdanskie, promyshlennye i selskokhozyaystvennye zdaniya*. Moscow: Kniga po trebovaniyu. (in Russian)
11. Karpilovskiy, V. S., Kriksunov, E. Z., Malyarenko, A. A., Fialko, S. Y., Perelmuter, A. V., & Perelmuter, M. A. (2015). *SCAD Office. Version 21. Software complex SCAD++*. Moscow: SCAD Soft. (in Russian)
12. Bofang, Z. (2018). *The Finite Element Method: Fundamentals and Applications in Civil, Hydraulic, Mechanical and Aeronautical Engineering*. Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd. doi: 10.1002/9781119107323 (in English)
13. Johnson, R. P. (2018). *Composite Structures of Steel and Concrete: Beams, Slabs, Columns and Frames for Buildings*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. doi: 10.1002/9781119401353 (in English)
14. Singiresu, S. R. (2018). *The Finite Element Method in Engineering* (6th ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann. doi: 10.1016/c2016-0-01493-6 (in English)
15. Shames, I. H., & Dym, C. L. (2017). *Energy and Finite Element Methods in Structural Mechanics*. New York: Routledge. doi: 10.1201/9780203757567 (in English)

Received: Nov. 16, 2018

Accepted: March 19, 2019

## ЗМІСТ

### **АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ**

**К. І. ЯЩУК, А. Ю. ЖУРАВЛЬОВ, В. І. ШЕКА**  
ПАРАМЕТРИЧНИЙ ГЕНЕРАТОР ЧАСТОТИ НА  
НЕКОЛІНЕАРНИХ МАГНІТНИХ ПОЛЯХ ..... 7

### **ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА**

**М. М. БІЛЯЄВ, Т. І. РУСАКОВА,  
В. І. ШИНКАРЕНКО**  
МІНІМІЗАЦІЯ РІВНЯ ХІМІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ В  
РОБОЧИХ ЗОНАХ НА ВІДКРИТІЙ МІСЦЕВОСТІ ЗА  
ДОПОМОГОЮ ЕКРАНІВ ..... 17

**Л. Ф. ДОЛІНА, О. П. САВІНА, Д. А. ДОЛІНА**  
ОЧИЩЕННЯ ВОД ВІД ПЛАСТИКУ ..... 27

**І. В. КАЛАШНИКОВ, В. О. ГАБРИНЕЦЬ,  
В. М. ГОРЯЧКІН**  
КОМПЛЕКС ПРОГРАМ ДЛЯ ОЦІНКИ РІВНЯ  
ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА ..... 41

### **ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ**

**О. А. ХОДОСКІНА, В. Д. АНАСОВИЧ,  
А. І. ХІЛЬКЕВИЧ**  
РОЛЬ ТРАНСПОРТНОЇ ЛОГІСТИКИ В ДІЯЛЬНОСТІ  
ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА ..... 49

### **ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ**

**А. НЕМЕС, С. ФІШЕР**  
ПОЛЬОВІ ВИПРОБУВАННЯ КЛЕЙОВИХ  
ІЗОЛЮВАНИХ РЕЙКОВИХ СТИКІВ  
З ВИКОРИСТАННЯМ СКЛОПЛАСТИКОВИХ  
І СТАЛЕВИХ РЕЙКОВИХ НАКЛАДОК ..... 60

### **ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ**

**В. М. ПАХОМОВА, Т. І. СКАБАЛЛАНОВИЧ,  
В. С. БОНДАРЕВА**  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ  
МАРШРУТІВ У МЕРЕЖІ ІНФОРМАЦІЙНО-  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ЗАЛІЗНИЧНОГО  
ТРАНСПОРТУ ..... 77

### **МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО**

**О. А. ГЛОТКА, С. В. ГАЙДУК**  
ПРОГНОЗУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ  
МОНОКРИСТАЛІЧНИХ ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ  
СПЛАВІВ ..... 91

### **РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ**

**В. О. ПОЛЯКОВ, М. М. ХАЧАПУРІДЗЕ**  
ПОЗДОВЖНІ НЕСТАЦІОНАРНІ РУХИ  
МАГНІТОЛЕВІТУЮЧОГО ПОЇЗДА ..... 101

### **В. Г. РАВЛЮК**

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ДУАЛЬНОГО  
ЗНОСУ КОЛОДОК У ГАЛЬМОВІЙ СИСТЕМІ  
ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ ..... 111

### **О. В. ШАТУНОВ, А. О. ШВЕЦЬ**

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ  
ПЛАТФОРМИ В РАЗІ ЗМІЩЕННЯ ЦЕНТРА  
ТЯЖІННЯ ВАНТАЖУ ..... 127

### **ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО**

### **Н. Г. КРУГЛІКОВА, Д. О. БАННИКОВ**

РАЦІОНАЛЬНА КОНСТРУКЦІЯ ПОКРИТТЯ  
МАЛОПРОГОНОВОЇ ПРОМИСЛОВОЇ БУДІВЛІ ДЛЯ  
УМОВ РЕКОНСТРУКЦІЇ ..... 144



## СОДЕРЖАНИЕ

### **АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ И ТЕЛЕМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ НА ТРАНСПОРТЕ**

**К. И. ЯЩУК, А. Ю. ЖУРАВЛЕВ, В. И. ЩЕКА**  
ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР ЧАСТОТЫ НА  
НЕКОЛЛИНЕАРНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ ..... 7

### **ЭКОЛОГИЯ И ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

**Н. Н. БЕЛЯЕВ, Т. И. РУСАКОВА,  
В. И. ШИНКАРЕНКО**  
МИНИМИЗАЦИЯ УРОВНЯ ХИМИЧЕСКОГО  
ЗАГРЯЗНЕНИЯ В РАБОЧИХ ЗОНАХ НА ОТКРЫТОЙ  
МЕСТНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ЭКРАНОВ ..... 17

**Л. Ф. ДОЛИНА, О. П. САВИНА, Д. А. ДОЛИНА**  
ОЧИСТКА ВОД ОТ ПЛАСТИКА ..... 27

**И. В. КАЛАШНИКОВ, В. А. ГАБРИНЕЦ,  
В. Н. ГОРЯЧКИН**  
КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ДЛЯ ОЦЕНКИ УРОВНЯ  
ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ..... 41

### **ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

**О. А. ХОДОСКИНА, В. Д. АНАСОВИЧ,  
А. И. ХИЛЬКЕВИЧ**  
РОЛЬ ТРАНСПОРТНОЙ ЛОГИСТИКИ  
В ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО  
ПРЕДПРИЯТИЯ ..... 49

### **ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И АВТОМОБИЛЬНЫЕ ДОРОГИ**

**А. НЕМЕС, С. ФИШЕР**  
ПОЛЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ КЛЕЕВЫХ  
ИЗОЛИРОВАННЫХ РЕЛЬСОВЫХ СТЫКОВ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ  
И СТАЛЬНЫХ РЕЛЬСОВЫХ НАКЛАДОК ..... 60

### **ИНФОРМАЦИОННО- КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

**В. Н. ПАХОМОВА, Т. И. СКАБАЛЛАНОВИЧ,  
В. С. БОНДАРЕВА**  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ  
МАРШРУТОВ В СЕТИ ИНФОРМАЦИОННО-  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ..... 77

### **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

**А. А. ГЛОТКА, С. В. ГАЙДУК**  
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СВОЙСТВ  
МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЖАРОПРОЧНЫХ  
НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ..... 91

### **ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА ПОЕЗДОВ**

**В. А. ПОЛЯКОВ, Н. М. ХАЧАПУРИДЗЕ**

ПРОДОЛЬНЫЕ НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ДВИЖЕНИЯ  
МАГНИТОЛЕВИТИРУЮЩЕГО ПОЕЗДА ..... 101

**В. Г. РАВЛЮК**

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДУАЛЬНОГО  
ИЗНОСА КОЛОДОК В ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЕ  
ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ ..... 111

**А. В. ШАТУНОВ, А. А. ШВЕЦ**

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
ПЛАТФОРМЫ ПРИ СМЕЩЕНИИ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ  
ГРУЗА ..... 127

### **ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО**

**Н. Г. КРУГЛИКОВА, Д. О. БАННИКОВ**

РАЦИОНАЛЬНАЯ КОНСТРУКЦИЯ ПОКРЫТИЯ  
МАЛОПРОЛЕТНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ЗДАНИЯ  
ДЛЯ УСЛОВИЙ РЕКОНСТРУКЦИИ ..... 144

# CONTENTS

## ***AUTOMATED AND TELEMATIC SYSTEMS ON TRANSPORT***

**K. I. YASHCHUK, A. Y. ZHURAVLEV, V. I. SHCHEKA**  
PARAMETRIC FREQUENCY GENERATOR ON  
NONCOLLINEAR MAGNETIC FIELDS ..... 7

## ***ECOLOGY AND INDUSTRIAL SAFETY***

**M. M. BILIAIEV, T. I. RUSAKOVA,  
V. I. SHYNKARENKO**  
MINIMIZATION OF THE CHEMICAL POLLUTION  
LEVEL AT THE WORKING ZONES IN OPEN AREAS  
USING SCREENS ..... 17

**L. F. DOLINA, O. P. SAVINA, D. A. DOLINA**  
CLEANING WATER FROM PLASTIC ..... 27

**I. V. KALASHNIKOV, V. O. GABRINETS,  
V. M. HORIACHKIN**  
COMPLEX OF PROGRAMS FOR ASSESSMENT OF AIR  
ENVIRONMENT POLLUTION LEVEL ..... 41

## ***ECONOMICS AND MANAGEMENT***

**O. A. HODOSKINA, V. D. ANASOVICH,  
A. I. HILKEVICH**  
THE ROLE OF TRANSPORT LOGISTICS IN THE  
ACTIVITIES OF INDUSTRIAL ENTERPRISES ..... 49

## ***RAILROAD AND ROADWAY NETWORK***

**A. NEMETH, S. FISCHER**  
FIELD TESTS OF GLUED INSULATED RAIL JOINTS  
WITH USAGE OF SPECIAL PLASTIC AND STEEL  
FISHPLATES ..... 60

## ***INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL MODELLING***

**V. M. PAKHOMOVA, T. I. SKABALLANOVICH,  
V. S. BONDAREVA**  
INTELLIGENT ROUTING IN THE NETWORK OF  
INFORMATION AND TELECOMMUNICATION SYSTEM  
OF RAILWAY TRANSPORT ..... 77

## ***MATERIAL SCIENCE***

**O. A. GLOTKA, S. V. HAIDUK**  
PREDICTION OF THE PROPERTIES OF SINGLE-  
CRYSTAL HEAT-RESISTANCE NICKEL ALLOYS ..... 91

## ***ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION***

**V. A. POLYAKOV, N. M. KHACHAPURIDZE**  
LONGITUDINAL NON-STATIONARY MOTIONS OF  
MAGLEV TRAIN ..... 101

**V. G. RAVLYUK**  
INVESTIGATION OF FEATURES OF DUAL WEAR OF  
PADS IN BRAKE SYSTEM OF FREIGHT CARS ..... 111

**O. V. SHATUNOV, A. O. SHVETS**  
STUDY OF DYNAMIC INDICATORS OF FLAT WAGON  
WITH LOAD CENTRE SHIFT ..... 127

## ***TRANSPORT CONSTRUCTION***

**N. G. KRUKLIKOVA, D. O. BANNIKOV**  
RATIONAL DESIGN OF SHORT-SPAN INDUSTRIAL  
BUILDING ROOF FOR RECONSTRUCTION  
CONDITIONS ..... 144

## 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/>

Д л я н о т а т о к

Наукове видання

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

№2 (80) 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. 18,37. Тираж 100 пр. Зам. №02/02

**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**

№ 2 (80) 2019

(на українському, російському і англійському мов)

Ответственный за выпуск – О. В. Поминова

Компьютерная верстка – О. В. Поминова

Литературная обработка – С. П. Лагдан

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ус. печат. лист. 18,37. Тираж 100 экз. Зак. №02/02

**Дніпровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна**

*Адрес редакції, видавця:*

ул. Лазаряна, 2, ком. 267, г. Дніпро, 49010, Украина

*Тел.:* +38 (056) 371-51-05

*E-mail:* lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

*Печать:*

Издательство «Герда», 49000, г. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 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. 2 (80) 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 18,37. Circulation 100. Order no. 02/02

**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



