



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



---

# НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ  
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

№ 2(86)

---

•• 2020 ••



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 (86) 2020

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

2020

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

ГОЛОВА РЕДАКЦІЙНОЇ РАДИ УНІВЕРСИТЕТУ  
ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛУ

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

ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА  
ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР

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

*ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:*

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

Журнал зареєстровано Державною реєстраційною службою Міністерства юстиції України.  
Свідоцтво про реєстрацію КВ № 19609-9409ПР від 29.12.2012 р.  
Видання внесено до Переліку наукових фахових видань України наказом Міністерства освіти і науки України 29.12.2014 р. № 1528 (технічні науки).  
Журнал зареєстровано: в міжнародних каталогах періодичних видань Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; наукометричних системах Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus та ін.  
Друкується за рішенням вченої ради університету від 18.05.2020 р., протокол № 8

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

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

Видання публікується з 1936 р.:

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

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта  
имени академика В. Лазаряна

## НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Научный журнал

№ 2 (86) 2020

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

2020



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

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОГО  
СОВЕТА УНИВЕРСИТЕТА

Пшинько А. Н., доктор технических наук

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛА

Пичугов С. А., доктор физико-математических наук

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Козаченко Д. Н., доктор технических наук

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Колесникова Т. А., кандидат наук  
по социальным коммуникациям

*ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:*

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

Журнал  
зарегистрирован

Государственной регистрационной службой Министерства юстиции Украины.  
Свидетельство о регистрации КВ № 19609-9409ПР от 29.12.2012 г.  
Издание внесено в Перечень научных специализированных изданий Украины приказом Министерства образования и науки Украины 29.12.2014 г. № 1528 (технические науки).  
Журнал зарегистрирован: в международных каталогах периодических изданий Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; наукометрических системах Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus и др.  
Печатается по решению ученого совета университета от 18.05.2020 г., протокол № 8

Издатель

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

Адрес  
учредителя

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

Издание публикуется с 1936 г.:

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

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

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

**Scientific journal**

**No. 2 (86) 2020**

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

2020

Founder:

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

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

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

**EDITORIAL BOARD MEMBERS:**

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

Journal was registered	by the State Registration Service of the Ministry of Justice of Ukraine. Certificate of Registration KB no.19609-9409PR from 29.12.2012 Edition is included in the list of scientific professional publications of Ukraine by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine 29.12.2014 r. no. 1528 (technical sciences). Journal is registered: in the International Catalogue of periodicals Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; research and metric systems Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, etc. Published according to the Academic Council decision of the University from 18.05.2020, Protocol no. 8
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: <a href="http://stp.diit.edu.ua/">http://stp.diit.edu.ua/</a>

Edition is being published since 1936:

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



## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

УДК 629.7.048:628.1(15)

Л. Ф. ДОЛИНА<sup>1\*</sup>, Ю. А. ЖДАН<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 gidravlika2013@mail.ru, 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 (096) 860 30 84, эл. почта yulia7799@i.ua, ORCID 0000-0002-0837-642X

<sup>3\*</sup>Главное управление Государственной фискальной службы, ул. Шолуденко, 33, Киев, Украина, 04116, тел. +38 (056) 164 22 32, эл. почта dogni06@gmail.com, ORCID 0000-0002-2962-2722

## ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД В УСЛОВИЯХ КОСМОСА

**Цель.** Основная цель статьи – разработать технологию очистки сточных вод в условиях космоса. **Методика.** Исследования выполнены на основании анализа украинских и зарубежных научных источников и отчётных данных о специфике использования воды на космических станциях и способах очистки сточных вод. Для разработки технологии очистки сточных вод в условиях космоса, кроме мирового опыта, использованы собственные исследования. **Результаты.** Комплексное рассмотрение вопросов, связанных с очисткой сточных вод в условиях космоса, позволяет сделать вывод о необходимости регенерации воды на Международных космических станциях (МКС). Ведь для обеспечения жизнедеятельности космонавтов требуется колоссальное количество воды, а её доставка на МКС с Земли является дорогостоящей. **Научная новизна.** Авторы статьи провели анализ работы существующих сооружений по очистке сточных вод в условиях космоса и представили рекомендации по их использованию на МКС. Разработанная технология для очистки сточных и питьевых вод в условиях невесомости (космоса) основывается на использовании различных реакторов. Реакторы могут быть выполнены из различных материалов (металл, пластик и др.), они не содержат нестандартного оборудования, которое требует заводского изготовления. Компактность, полная герметичность и небольшие габариты био- и физико-химических реакторов позволяют устанавливать их в пределах МКС. Процесс очистки прост в управлении и может быть полностью автоматизирован. **Практическая значимость.** Водные проблемы являются главными во всём мире, в том числе и в условиях космоса. На МКС должна быть предусмотрена система по обработке сточных вод и их замкнутому использованию, так как снабжение станций новой водой значительно удорожает освоение космического пространства. Качественная вода – это здоровье и благополучная работа людей в условиях космоса. Поскольку в космосе отсутствует гравитация, для отделения взвешенных частиц от воды нужно использовать центробежные силы (центрифуги).

**Ключевые слова:** очистка сточных вод; космос; сооружения по очистке сточных вод; технология очистки вод в условиях космоса; система жизнеобеспечения в космосе

### Введение

Вода – это жизнь. Этой мысли тысячи лет, а она до сих пор не утратила своей актуальности.

В условиях длительного пилотируемого космического полёта существенным фактором является поддержание жизнедеятельности

и работоспособности экипажа. Одна из важнейших задач – обеспечение экипажа водой. С наступлением космической эры значение воды лишь возросло, так как от неё в космосе зависит буквально все, начиная от работы самой космической станции и заканчивая выработкой кислорода [8].

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Космос – очень холодное место. На сильном холоде, как нам известно, вода превращается в лед – кристаллизируется. Но космос – это еще и самый близкий к идеальному вакуум, до которого можно дотянуться. Одна атмосфера эквивалентна давлению  $6 \times 10^{22}$  атомов водорода на квадратный метр. В лучших вакуумных камерах на Земле ученые создают давление в миллиарды раз меньше, а в межзвездном пространстве оно опускается в миллионы и миллиарды раз ниже земных технических рекордов. А при пониженном давлении вода переходит в газообразное состояние – кипит.

По словам астронавтов Международной космической станции (МКС), вода, попадая в открытый космос, сначала мгновенно становится газообразной, а затем замерзает в виде крошечных льдинок, заполняющих межзвездную пустоту [16]. Вообще, жидкости ведут себя в невесомости совсем не так, как на Земле. Под воздействием силы поверхностного натяжения, которая стремится уменьшить площадь поверхности жидкости, вода в безгравитационном пространстве будет плавать по кабине корабля, собравшись в шар.

На рис. 1 представлен снимок капли в невесомости, который сделан на Международной космической станции 24 июня 2012. На заднем плане нидерландский астронавт Андре Кёйперс (AP Photo/NASA, Andre Kuipers).



Рис. 1. Вода в пространстве МКС

Fig. 1. Water in the space of the ISS

Всю воду, имеющуюся на космической станции, доставляют грузовыми кораблями. Её расходуют для питания, гигиенических процедур, поддержки технических систем станции. Техники просчитывают буквально каждый грамм

лишнего веса, поэтому невозможно взять ее с запасом. На борту с огромным количеством суперсовременной техники ученые и инженеры работают в условиях строгой экономии воды.

Ключевым моментом в регенерации является очистка воды. В очистительные системы собирается любая вода: оставшаяся от приготовления пищи, грязная вода от мытья и даже пот космонавтов. Регенерация воды – это повторное её получение. Но невозможно регенерировать воду, если изначально ее не доставить с Земли. Сам процесс регенерации снижает расходы на космические полеты и делает систему МКС менее зависимой от наземных служб [15].

Таким образом, воду, доставляемую с Земли, используют на МКС многократно.

Сейчас на МКС применяют несколько способов регенерации воды:

- конденсация влаги из воздуха;
- очистка использованной воды;
- переработка урины и твердых отходов.

На МКС установлена специальная аппаратура, которая конденсирует влагу из воздуха. Влага в воздухе – это естественно, она есть и в космосе, и на Земле. В процессе жизнедеятельности космонавты могут выделять до 2,5 л жидкости в сутки. Кроме этого, на МКС есть специальные фильтры для очистки использованной воды. Но учитывая то, как моются космонавты, бытовой расход воды значительно отличается от земного. Переработка урины и твердых отходов – это новая разработка, применяемая на МКС лишь с 2010 года.

На данный момент для функционирования МКС требуется около 9 000 л воды в год. Это обобщенная цифра, отражающая все расходы. Воду на МКС регенерируют примерно на 93 %, поэтому объемы поставок существенно ниже. Но не стоит забывать, что с каждым полным циклом использования воды ее общий объем уменьшается на 7 %, что делает МКС зависимой от поставок с Земли.

Современные российские системы регенерации воды СРВ–К2М и Электрон–ВМ позволяют обеспечить космонавтов на МКС водой на 63 % [9]. Биохимический анализ показал, что регенерированная вода не утрачивает своих исходных свойств и полностью пригодна для питья. Сейчас российские ученые работают над созданием

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

более замкнутой системы, которая позволит обеспечить космонавтов водой на 95 %. Существуют перспективы развития систем очистки, которые обеспечат на 100 % замкнутый цикл.

Американская система регенерации воды ECLSS была разработана в 2008 году. Она дает возможность не только собрать влагу из воздуха, но и регенерировать воду из мочи и твердых отходов. Несмотря на серьезные проблемы и частые поломки на протяжении первых двух лет эксплуатации, сегодня ECLSS может восстановить 100 % влаги из воздуха и 85 % влаги из мочи и твердых отходов. В результате на МКС появился современный аппарат, позволяющий восстановить до 93 % первоначального объема воды.

Вся отработанная вода на МКС собирается в специальный дистиллятор, визуально похожий на бочку. При очистке воды необходимо создать искусственную гравитацию, для этого дистиллятор вращается, прогоняя грязную воду через фильтры. В результате получается чистая питьевая вода, которая по своим качествам даже превосходит питьевую воду во многих уголках Земли [9].

На последнем этапе в воду добавляют йод. Этот химический препарат позволяет предотвратить размножение микробов и бактерий, а также является необходимым элементом для здоровья космонавтов. Любопытный факт, что на Земле йодированную воду считают слишком дорогим удовольствием для массового применения и вместо йода используют хлор. От использования хлора на МКС отказались по причине агрессивности данного элемента и большей пользы от йода.

Австралийское космическое агентство планирует в течение пяти лет отправить на Луну миссию и начать добывать там воду, для этого применить передовой опыт в горном деле в отдаленных и негостеприимных областях [1]. Недавнее исследование НАСА показало, что на полюсах спутника Земли залегают огромные ледники. Именно их хотят взять в разработку австралийцы [11].

Если воду можно будет добывать в космосе, вместо того чтобы отправлять её туда с Земли (а это обходится очень дорого) [9], Луна вполне может стать перевалочным пунктом для миссий на Марс и дальше.

**Цель**

Проблема воды очень важна при освоении космического пространства и заселения других планет и спутников Земли.

Целью нашей статьи является разработка технологии очистки сточных (использованных) вод в условиях космоса. В этом направлении делают первые шаги, которые в дальнейшем требуют более детального изучения и исследования.

**Методика**

Исследования выполнены на основании анализа украинских и зарубежных научных источников и отчетных данных о специфике использования воды на космических станциях и способах очистки сточных вод. Для разработки технологии очистки сточных вод в условиях космоса, кроме мирового опыта, использованы собственные исследования.

Совершенно очевидно, что в условиях длительных космических полётов применение систем водообеспечения, основанных на запасах, является невозможным. В связи с этим одной из наиболее приоритетных задач является разработка технологической схемы регенерации воды [13].

В космосе используют следующие данные в расчёте воды на 1 человека в сутки [2]:

- 2,2 литра – питье и приготовление пищи;
- 0,2 литра – гигиена;
- 0,3 литра – смыв туалета.

Мы изучили количество загрязняющих воду веществ на одного жителя для определения их концентрации в бытовых сточных водах по табл. 1 [4]. Концентрацию загрязняющих веществ определяют, исходя из удельного водоотведения на одного жителя.

Впервые регенерация воды в космосе была осуществлена на космической станции «Салют-4» в январе 1975 года. В системе регенерации воды из конденсата (СРВ-К) регенерировали воду из атмосферной влаги до кондиции питьевой воды. В дальнейшем аналогичные системы работали на станциях «Салют-6», «Салют-7», «Мир». На станции «Мир» работала также система регенерации воды из мочи и проходила апробация система регенерации санитарно-гигиенической воды [8].



## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Важно отметить, что из-за влияния космических условий в моче астронавтов сильно повышается кальций. Фильтры для переработки урины, спроектированные на Земле, не рассчитаны на такой биохимический состав мочи и поэтому быстро приходят в негодность.

Отстаивание использованных вод не будет работать в условиях космоса, так как нет гравитации, но её успешно можно заменить на отстойные центрифуги.

Сооружениями для очистки сточных и питьевых вод в условиях невесомости (космоса) могут быть различные реакторы. Такие реакторы можно выполнить из различных материалов (металл,

пластик и др.), они не содержат нестандартного оборудования, которое требует заводского изготовления [3]. Компактность, полная герметичность и небольшие габариты био- и физико-химических реакторов позволяют устанавливать их в пределах МКС. Процесс очистки прост в управлении и может быть полностью автоматизирован. Количество необходимых контролируемых параметров минимально, например, для аэробных биореакторов – это температура, водородный показатель (рН) и химическое потребление кислорода (ХПК) очищенного стока. Процесс устойчив и к пиковым нагрузкам, и к изменению качества поступающих вод.

Таблица 1

## Количество загрязняющих веществ на одного жителя

Table 1

## The amount of pollutants per inhabitant

Показатель	Количество загрязняющих веществ на одного жителя, г/сутки
Взвешенные вещества	65
Биологическое потребление кислорода (БПК <sub>5</sub> ) неосветлённой жидкости	54
Биологическое потребление кислорода (БПК <sub>полн</sub> ) осветлённой жидкости	75
Химическое потребление кислорода (ХПК) неосветлённой жидкости	87
Азот общий (N), в том числе азот аммонийных солей	11 8
Фосфор общий (P), в том числе фосфор фосфатов	1,8 1,44
Хлориды (Cl)	9
Поверхностно-активные вещества (ПАВ)	2,5

Примечание 1. Количество загрязняющих веществ от населения, проживающего в не канализированных районах, при наличии сливных станций принимают в размере 33 % от приведенных в таблице.

Примечание 2. При сбросе хозяйственно-бытовых сточных вод промышленных предприятий в канализацию населенного пункта количество загрязняющих веществ от эксплуатационного персонала можно дополнительно не учитывать.

Примечание 3. Директивой Совета Европы БПК<sub>5</sub> неосветлённой жидкости нормировано как международная норма государств ЕЭС в количестве 60 мг/сутки на одного жителя.

## ЭКОЛОГИЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

По методу очистки сточных вод реакторы делятся на [12]:

1. Биологические, которые в свою очередь классифицируют:

1.1 По подаче воздуха.

1.2 По иммобилизации микроорганизмов в аппарате.

1.3. По конструктивным особенностям.

1.4. По конструктивно-технологическим признакам.

2. Физико-химические (химические, электрохимические, физические и др.).

3. Биофизико-химические (мембранные биореакторы).

На МКС использование газов (хлора, озона и др.) при обеззараживании вод представляет опасность для космонавтов в случае их утечки.

В настоящее время в пассажирских самолётах для обеззараживания питьевой воды используют дорогостоящую установку дезинфекции воды на основе специальных ультрафиолетовых ламп [3]. Такие системы требуют замены ламп каждые 3 000 часов работы, что приводит к значительным затратам.

В новой системе обеззараживания воды, разработанной канадской компанией International Water Guards, используют ультрафиолетовые светодиоды [14]. Таким образом удалось снизить стоимость системы по сравнению с системой на ультрафиолетовых лампах. Поэтому мы рекомендуем для обеззараживания сточных и питьевых вод на МКС эту систему.

## Результаты

Вышеизложенное подчёркивает тезис и о необходимости, и о возможности регенерации воды на Международных космических станциях. Разработанная авторами технологическая схема (рис. 2) предусматривает обработку сточных вод на МКС и их замкнутое использование.

Как отмечалось выше, в условиях космоса и отсутствия гравитации использование отстойников бесполезно. Поэтому мы предлагаем для отстаивания сточных вод и удаления песка устанавливать осадительные центрифуги [10, 12]. Для очистки вод от растворённых веществ мы предлагаем реакторы, а точнее мембранные биореакторы нового поколения.

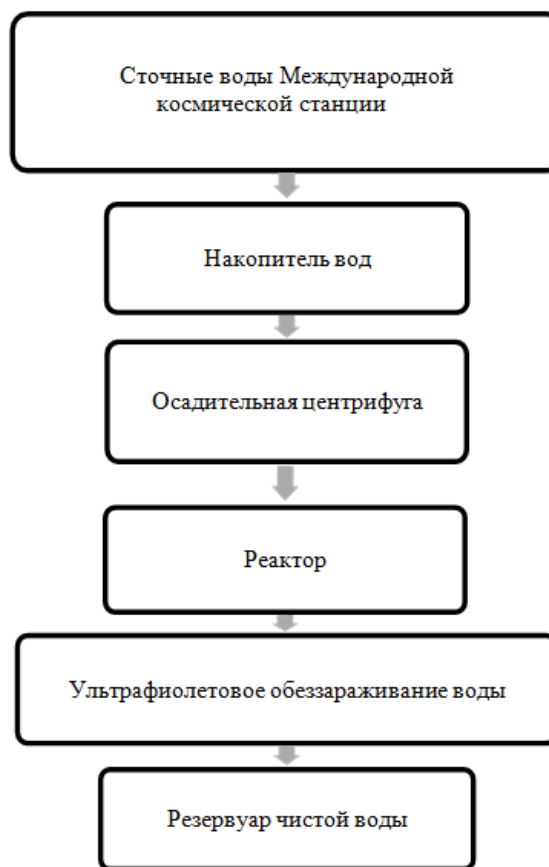


Рис. 2. Технологическая схема очистки сточных вод на Международной космической станции

Fig. 2. The technological scheme of wastewater treatment at the International Space Station

Мембранные биореакторы (МБР) являются современными высокоинтенсивными сооружениями биологической очистки [7]. В отличие от классической схемы биологической очистки с разделением иловой смеси во вторичных отстойниках, в мембранных биореакторах отделение хлопьев активного ила от очищенных сточных вод достигается за счет фильтрации иловой смеси через ультрафильтрационную или микрофильтрационную мембрану с размером пор в диапазоне от 0,04 до 0,4 микрон. Основным компонентом МБР являются кассеты, состоящие из мембранных модулей. Мембраны могут иметь форму полого волокна или двух плоских листов с подложкой из полимерного материала [5, 6]. Кассеты погружены непосредственно в иловую смесь. С помощью самовсасывающего насоса на внутренней поверхности мембран создается отрицательное давление. Таким образом,

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

из-за разницы давлений на внешней и внутренней поверхности мембраны сточные воды фильтруются через мембранный слой. Полученная чистая вода (пермеат) отводится насосом фильтра. Отдельные микроорганизмы (бактерии) активного ила имеют размер, на порядок превышающий размер пор мембраны. Поэтому мембрана задерживает хлопья активного ила, свободно плавающие в процессе фильтрации микроорганизмы и инертные взвешенные вещества, а удаляют их с поверхности мембраны с помощью системы аэрации.

Преимущества использования МБР:

1) меньшее количество сооружений – МБР заменяет вторичные отстойники, аэротенки и песчаные фильтры;

2) компактность – концентрация активного ила в МБР в несколько раз выше, чем в традиционных сооружениях, соответственно, в такое же количество раз меньше объем сооружений;

3) возможность круглогодичной нитрификации даже в условиях холодного климата – в традиционных сооружениях со снижением температуры скорость роста нитрификаторов снижается, и они вымываются из реактора;

4) селекция микроорганизмов, которые способны окислять биорезистентные вещества, – микроорганизмы, медленно растущие и обладающие такой способностью, благодаря мембране не вымываются из реактора. Значит, эффективность очистки по трудноокисляемым веществам в МБР значительно выше, чем в системе аэротенк – отстойник;

5) удобство автоматизации процесса – процесс полностью автоматизирован;

6) надёжная эксплуатация – работа сооружений не зависит от осаждаемости ила (илового индекса), его вспухания и т. д.;

7) обеззараживание сточных вод – поры мембран меньше размера бактерий.

И в заключение мы предлагаем для обеззараживания вод применять УФ-светодиодные лампы. В условиях космоса и отсутствия гравитации для движения воды мы предлагаем насосы нового поколения.

### Научная новизна и практическая значимость

Авторы статьи провели анализ работы существующих сооружений по очистке сточных вод в условиях космоса и представили рекомендации по их использованию на МКС. Разработанная технология для очистки сточных и питьевых вод в условиях невесомости (космоса) основывается на использовании различных реакторов. Благодаря таким характеристикам, как компактность, герметичность и небольшие габариты, реакторы могут быть установлены на МКС. Важно и то, что процесс очистки вод полностью автоматизирован.

Регенерация воды на МКС приводит к её замкнутому использованию и исключает дорогостоящую доставку новой воды с Земли. Поскольку в космосе отсутствует гравитация, для отделения взвешенных частиц от воды нужно использовать центробежные силы (центрифуги).

### Выводы

На борту МКС воду используют не только для питья, но и для обеспечения жизнедеятельности экипажа и функционирования систем станции. Вода – это необходимый компонент для восстановления сублимированных продуктов питания.

Мы разработали технологию и предложили схему по очистке сточных вод в условиях космоса. Также проанализировали работу существующих сооружений по очистке сточных вод в условиях космоса и разработали рекомендации по их использованию на МКС.

На МКС должна быть предусмотрена система по обработке сточных вод и их замкнутому использованию, так как снабжение станций новой водой значительно удорожает освоение космического пространства, а качественная вода – это здоровье и благополучная работа людей в условиях космоса.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Австралия планирует добывать воду на Луне. *Naked Science*. 2019. № 46. URL: <https://naked-science.ru/article/cosmonautics/avstraliya-planiruet-dobyyvat> (дата обращения 09.01.2020)
2. Аристов Н. И. Космическое питание. Технологии. История и современность. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2017. Т. 3. С.980–982.
3. Водные хроники : Научные новости. *Вода и водные технологии*. 2019. № 2 (92). 22 с.
4. ДБН В.2.5-75-2013. Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. [На заміну СНиП 2.04.03-85; чинний від 2014-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2013. 128 с.
5. Долина Л. Ф. *Новые методы и оборудования для обеззараживания сточных и природных вод* : монография. Днепропетровск : Континент, 2003. 218 с.
6. Долина Л. Ф. *Очистка сточных вод от биогенных элементов* : монография. Днепропетровск: Континент, 2011. 115 с.
7. Долина Л. Ф. *Современная техника и технология для очистки сточных вод от солей тяжёлых металлов*: монография. Днепропетровск : Континент, 2008. 254 с.
8. Сальников Н. А. Исследование очистки санитарно-гигиенической воды в замкнутой системе водообеспечения летательных аппаратов. *Научный вестник МГТУ ГА*. 2016. Т. 19, № 3. С. 157–165.
9. Синяк Ю. Е. *Актовая речь. Системы жизнеобеспечения обитаемых космических объектов*. Москва : ИБМП РАН, 2008. С. 3–28.
10. Anderson N. G. Zonal Centrifuges and Other Separation Systems. *Science*. 1966. Vol. 154, Iss. 3745. P. 103–112. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.154.3745.103>
11. Bagrov A. V., Leonov V. A., Kislitsky M. I. Industrial Mining of water ice in space. *Aerospace Sphere Journal*. 2019. № 1 (98). P. 76–81. DOI: <https://doi.org/10.30981/2587-7992-2019-98-1-76-81>
12. Giorno L., Drioli E. Biocatalytic membrane reactors: applications and perspectives. *Trends of biotechnology*. 2000. Vol. 18. Iss. 8. P. 339–349. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-7799\(00\)01472-4](https://doi.org/10.1016/S0167-7799(00)01472-4)
13. Gupta G. S., Orbán S. A. Water is life, life is water : (Un) sustainable use and management of water in the 21st century. *Corvinus Journal of Sociology and Social Policy*. 2018. Vol. 9, No 1. P. 81–100. DOI: <https://doi.org/10.14267/CJSSP.2018.1.04>
14. LED light technology to purify water on airliners. *Flight Global*. 2019. URL: <https://www.flightglobal.com/systems-and-interiors/aix-led-light-technology-to-purify-water-on-airliners/132154.article> (дата обращения 09.01.2020)
15. Wang Y., Pham H. Water Treatment Plant Ancillary Facilities: Unsung Heroes of Hurricane Harvey. *Journal–American Water Works Association*. 2019. Vol. 111. Iss. 8. P. 81–100. DOI: <https://doi.org/10.1002/awwa.1339>
16. Westall F., Brack, A. The Importance of Water for Life. *Space Science Review*. 2018. Vol. 214. Iss. 2. P. 1–23. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0476-7>

Л. Ф. ДОЛИНА<sup>1\*</sup>, Ю. О. ЖДАН<sup>2\*</sup>, Д. А. ДОЛИНА<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 [gidravluka2013@mail.ru](mailto:gidravluka2013@mail.ru), 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 (096) 860 30 84, ел. пошта [yulia7799@i.ua](mailto:yulia7799@i.ua), ORCID 0000-0002-0837-642X

<sup>3\*</sup>Головне управління Державної фіскальної служби, вул. Шолуденка, 33, Київ, Україна, 04116, тел. +38 (056) 164 22 32, ел. пошта [dogni06@gmail.com](mailto:dogni06@gmail.com), ORCID 0000-0000-0002-2962-2722

## ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД В УМОВАХ КОСМОСУ

**Мета.** Основна мета статті – розробити технологію очищення стічних вод в умовах космосу. **Методика.** Дослідження виконані на підставі аналізу українських і зарубіжних наукових джерел і звітних даних про специфіку використання води на космічних станціях і способи очищення стічних вод. Для розробки технології очищення стічних вод в умовах космосу, окрім світового досвіду, використано власні дослідження. **Результати.** Комплексний розгляд питань, пов'язаних з очищенням стічних вод в умовах космосу, дозволяє зробити висновок про необхідність регенерації води на Міжнародних космічних станціях (МКС).

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Адже для забезпечення життєдіяльності космонавтів потрібна величезна кількість води, а її доставляння на МКС із Землі дороге коштує. **Наукова новизна.** Автори статті провели аналіз роботи наявних споруд з очищення стічних вод в умовах космосу і подали рекомендації щодо їх використання на МКС. Розроблена технологія для очищення стічних і питних вод в умовах невагомості (космосу) ґрунтується на використанні різних реакторів. Реактори можуть бути виконані з різних матеріалів (метал, пластик та ін.), вони не містять нестандартного устаткування, яке вимагає заводського виготовлення. Компактність, повна герметичність і невеликі габарити біо- й фізико-хімічних реакторів дозволяють установлювати їх у межах МКС. Процес очищення простий в управлінні й може бути повністю автоматизований. **Практична значимість.** Водні проблеми є головними у всьому світі, у тому числі й в умовах космосу. На МКС має бути передбачена система обробки стічних вод і їх замкнутого використання, тому що постачання станцій новою водою значно здорожує освоєння космічного простору. Якісна вода – це здоров'я й успішна робота людей в умовах космосу. Оскільки в космосі відсутня гравітація, для відділення зважених часток від води потрібно використовувати відцентрові сили (центрифуги).

**Ключові слова:** очищення стічних вод; космос; споруди з очищення стічних вод; технологія очищення вод в умовах космосу; система життєзабезпечення в космосі

L. F. DOLYNA<sup>1\*</sup>, Y. O. ZHDAN<sup>2\*</sup>, D. A. DOLYNA<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0001-6082-7091

<sup>2\*</sup>Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 860 30 84, e-mail yulia7799@i.ua, ORCID 0000-0002-0837-642X

<sup>3\*</sup>Head Office of State Fiscal Service, Sholudenka St., 33, Kyiv, Ukraine, 04116, tel. +38 (056) 164 22 32, e-mail dogni06@gmail.com, ORCID 0000-0000-0002-2962-2722

## WASTE WATER TREATMENT IN SPACE CONDITIONS

**Purpose.** The main purpose of the article is to develop a technology for wastewater treatment in space. **Methodology.** The studies were performed based on the analysis of Ukrainian and foreign scientific sources and reporting data on the specifics of water use at space stations and the treatment methods of the used waters (wastewaters). In addition to international experience, our own research was used to develop a technology for wastewater treatment in space. **Findings.** A comprehensive review of the issues related to wastewater treatment in space, allows us to conclude that it is necessary to regenerate water at International space stations (ISS). Indeed, to ensure the life support of the astronauts, a colossal amount of water is required, and its delivery to the ISS from the Earth is expensive. **Originality.** The authors of the article analyzed the operation of existing wastewater treatment facilities in space and made recommendations for their use at the ISS. The developed technology for the treatment of wastewater and drinking water in zero-gravity (space) is based on the use of various reactors. They can be made of various materials (metal, plastic, etc.); they do not contain non-standard equipment that requires factory manufacturing. Compactness, complete tightness and small dimensions of bio- and physicochemical reactors allow them to be installed within the ISS. The cleaning process is easy to manage and can be fully automated. **Practical value.** Water problems are central to the whole world, including in space. The ISS should have a system for the wastewater treatment and their closed use, since the supply of new water to stations significantly increases the cost of space exploration. Quality water is the health and well-being of people in space. Since there is no gravity in space, centrifugal forces (centrifuges) must be used to separate suspended particles from water.

**Keywords:** waste water treatment; space; wastewater treatment facilities; space water treatment technology; space life support system

## REFERENCES

1. Avstraliya planiruet dobyvat vodu na Lune. (2019). *Naked Science*, 46. Retrieved from <https://naked-science.ru/article/cosmonautics/avstraliya-planiruet-dobyvat>. (in Russian)
2. Aristov, N. I. (2017). Space food. Technologies. History and present. *Aktualnyye problemy aviatsii i kosmonavtiki*, 3, 980-982. (in Russian)

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

3. Vodnye khroniki: Nauchnye novosti. (2019). *Voda i vodnye tekhnologii*, 2(92), 22. (in Russian)
4. Kanalizatsiia. Zovnishni merezhi ta sporudy. Osnovni polozhennia proektuvannia, 128 DBN V.2.5-75-2013. (2013). (in Ukrainian)
5. Dolina, L. F. (2003). *Novye metody i oborudovaniya dlya obezrazhivaniya stochnykh i prirodnykh vod: monografiya*. Dnepropetrovsk: Kontinent. (in Russian)
6. Dolina, L. F. (2011). *Ochistka stochnykh vod ot biogennykh elementov: monografiya*. Dnepropetrovsk: Kontinent. (in Russian)
7. Dolina, L. F. (2008). *Sovremennaya tekhnika i tekhnologiya dlya ochistki stochnykh vod ot soley tyazhelykhmetallov: monografiya*. Dnepropetrovsk: Kontinent. (in Russian)
8. Salnikov, N. A., & Nikolaykina, N. E. (2016). Sanitary and hygienic water purification research for the water supply closed system of the flying apparatus. *Civil Aviation High Technologies*, 19(3), 157-165. (in Russian)
9. Sinyak, Yu. Ye. (2008). *Aktovaya rech. Sistemy zhizneobespecheniya obitaemykh kosmicheskikh obektov*. Moscow: IBMP RAN, 3-28. (in Russian)
10. Anderson, N. G. (1966). Zonal Centrifuges and Other Separation Systems. *Science*, 154(3745), 103-112. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.154.3745.103> (in English)
11. Bagrov, A. V., Leonov, V. A., & Kislitsky, M. I. (2019). Industrial mining of water ice in space. *Aerospace Sphere Journal*, 1(98), 76-81. DOI: <https://doi.org/10.30981/2587-7992-2019-98-1-76-81> (in English)
12. Giorno, L., & Drioli, E. (2000). Biocatalytic membrane reactors: applications and perspectives. *Trends of biotechnology*, 18(8), 339-349. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-7799\(00\)01472-4](https://doi.org/10.1016/S0167-7799(00)01472-4) (in English)
13. Gupta, G. & Orbán, S. A. (2018). Water is life, life is water: (Un) sustainable use and management of water in the 21st century. *Corvinus Journal of Sociology and Social Policy*, 9(1), 81-100. DOI: <https://doi.org/10.14267/CJSSP.2018.1.04> (in English)
14. LED light technology to purify water on airliners. (2019). *Flight Global*. Retrieved from <https://www.flightglobal.com/systems-and-interiors/aix-led-light-technology-to-purify-water-on-airliners/132154.article> (in English)
15. Wang, Y., & Pham, H. (2019). Water Treatment Plant Ancillary Facilities: Unsung Heroes of Hurricane Harvey. *Journal-American Water Works Association*, 111(8), 26-32. DOI: <https://doi.org/10.1002/awwa.1339> (in English)
16. Westall, F., & Brack, A. (2018). The Importance of Water for Life. *Space Science Reviews*, 214(2), 1-23. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0476-7> (in English)

Поступила в редколлегию: 02.12.2019

Принята в печать: 03.04.2020

## УДК 504.5:[628.334.5/6:519.87]

В. Д. ПЕТРЕНКО<sup>1</sup>, М. І. НЕТЕСА<sup>2</sup>, О. Л. ТЮТКІН<sup>3</sup>, О. В. ГРОМОВА<sup>4</sup>,  
В. І. ШИНКАРЕНКО<sup>5</sup>, В. А. КОЗАЧИНА<sup>6\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Мости та тунелі», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, ел. пошта petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

<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 (067) 195 50 27, ел. пошта andreynetes@meta.ua, ORCID 0000-0003-1730-7642

<sup>3</sup>Каф. «Мости та тунелі», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, ел. пошта alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

<sup>4</sup>Каф. «Архітектурне проектування, землеустрій та будівельні матеріали», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (095) 304 73 33, ел. пошта Gromova\_Elen\_upbbm\_diit@i.ua, ORCID 0000-0002-5149-4165

<sup>5</sup>Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта shinkarenko\_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225

<sup>6\*</sup>Каф. «Гідроліка 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 v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

## ЕКСПРЕС МОДЕЛЬ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ

**Мета.** Використання фізичного експерименту для дослідження процесів масопереносу в спорудах систем водопостачання та каналізації потребує значного часу та є досить вартісним. Тому метою роботи є розробка чисельних моделей для проведення обчислювального експерименту з дослідження процесу масопереносу в піскоуловлювачах. **Методика.** Для математичного моделювання процесу масопереносу в піскоуловлювачах використано двовимірні рівняння Нав'є–Стокса та двовимірне рівняння масопереносу домішки. Для чисельного інтегрування рівнянь, що описують рух в'язкої нестисливої рідини, використано неявні різницеві схеми розщеплення. Невідомі параметри на кожному кроці розщеплення знайдено за явною залежністю. Для чисельного інтегрування двовимірного рівняння масопереносу використано поперемінно-трикутну різницеву схему розщеплення. **Результати.** Для проведення обчислювального експерименту на базі побудованої чисельної моделі створено спеціалізований код. Наведено результати обчислювальних експериментів із дослідження процесу масопереносу в піскоуловлювачах з додатковими елементами. З'ясовано, що ефективність очищення води змінюється у випадку використання додаткового елемента на дні піскоуловлювача. **Наукова новизна.** Побудовано чисельні моделі, що дають можливість оперативно аналізувати та прогнозувати ефективність роботи піскоуловлювачів, які мають складну геометричну форму. Ці моделі дозволяють урахувати також гідродинаміку течії в очисній споруді. **Практична значимість.** Запропоновані чисельні моделі можна використовувати на етапі проектування очисних споруд систем каналізації.

**Ключові слова:** очищення води; чисельне моделювання; різницеві схеми; піскоуловлювач; водокористування; математичне моделювання

### Вступ

У наш час у галузі проектування систем водопостачання та каналізації значну роль відіграє метод математичного моделювання. Це пов'язано з тим, що використання фізичного моделювання, навіть у лабораторних умовах,

потребує значного часу на постановку експерименту. Крім цього, є значні труднощі в інтерпретації результатів експериментальних досліджень, що отримані, коли неможливо провести експеримент із виконанням тих чи інших критеріїв подібності. Тому альтернативою фізичному експерименту є метод математичного

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

моделювання. Сьогодні для моделювання та розрахунку процесів масопереносу в системах водопостачання та водовідведення створені математичні моделі різних класів [1, 2, 4, 6–12]. Найчастіше на практиці використовують емпіричні та аналітичні моделі. Вони дозволяють дуже швидко отримати дані необхідні для проектування будь-якої споруди в системах водопостачання та водовідведення. Але в Україні існує певний дефіцит моделей, що базуються на чисельному інтегруванні фундаментальних рівнянь механіки суцільного середовища, які дозволяють, на відміну від емпіричних та аналітичних моделей, під час проведення обчислювального експерименту передати геометричну форму споруди для дослідження процесу масопереносу. Такі моделі є прямою альтернативою фізичного експерименту, окрім цього, не такими вартісними, як витрати на постановку, обладнання, проведення фізичного експерименту.

**Мета**

Зважаючи на викладене, метою цієї статті є побудова CFD-моделі для розрахунку процесу масопереносу в піскоуловлювачі, що має складну геометричну форму. Під час побудови математичної моделі враховано найбільш суттєві фізичні фактори, при цьому час розрахунку на базі моделі є досить невеликим.

**Методика**

Піскоуловлювач є важливим елементом у системах водовідведення. Ефективність роботи піскоуловлювача впливає на ефективність роботи інших елементів – очисних спорудах, що розташовані за піскоуловлювачем у технологічній схемі очищення води. Для підвищення ефективності роботи піскоуловлювачів можна встановлювати в них додаткові елементи або змінювати їх геометричну форму. Для визначення ефективності роботи таких модернізованих піскоуловлювачів необхідно мати ефективні математичні моделі. У нашій роботі для цього використано такі рівняння [2]:

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

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

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial u C}{\partial x} + \frac{\partial (v - w) C}{\partial y} + \sigma C = 0. \quad (3)$$

де  $C$  – концентрація домішки в піскоуловлювачі;  $u, v$  – швидкість течії в піскоуловлювачі;  $w$  – гідравлічна крупність домішки;  $\sigma$  – коефіцієнт, що враховує процеси трансформації домішки в піскоуловлювачі;  $\psi$  – функція потоку;  $\text{Re} = V_0 L / \nu$  – число Рейнольдса;  $\omega = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y$  – вихор;  $u = \partial \psi / \partial y$ ,  $v = -\partial \psi / \partial x$  – компоненти вектора швидкості потоку в піскоуловлювачі.

Рівняння Нав'є–Стокса (1) – (2) використано для розрахунку поля швидкості потоку в піскоуловлювачі. Рівняння масопереносу (3) дозволяє розрахувати процес руху важкої домішки в піскоуловлювачі.

Постановку граничних умов для моделювальних рівнянь розглянуто в [1, 2].

Розглянемо методи чисельного інтегрування моделювальних рівнянь. Для чисельного інтегрування рівняння масопереносу використовуємо апроксимацію [1, 2].

Похідну за часом моделюємо так:

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

Конвективні похідні записуємо таким чином [2]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u C}{\partial x} &= \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x}; \\ \frac{\partial v C}{\partial y} &= \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y}, \end{aligned}$$

де

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

Далі конвективні та другі похідні моделюємо так [1, 2]:

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



## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

$$\begin{aligned}\frac{\partial u^- C}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1}; \\ \frac{\partial v^+ C}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{ij}^{n+1} - v_{il}^+ C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1}; \\ \frac{\partial v^- C}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}; \\ \frac{\partial}{\partial x} (\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}) &\approx \mu_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta x^2} - \mu_x \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = \\ &= M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1}; \\ \frac{\partial}{\partial y} (\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}) &\approx \mu_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta y^2} - \mu_y \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} = \\ &= M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}.\end{aligned}$$

Після такої апроксимації різницевий аналог рівняння масопереносу має вигляд:

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

На наступному етапі здійснимо розщеплення цього рівняння на послідовність таких рівнянь:

– на першому кроці розщеплення ( $k = n + \frac{1}{4}$ ):

$$\begin{aligned}\frac{C_{i,j}^{n+k} - C_{i,j}^n}{\Delta t} &+ \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{i,j}^k = \\ &= \frac{1}{4} (M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^n + M_{yy}^+ C^k + M_{yy}^- C^n); \quad (5)\end{aligned}$$

– на другому кроці розщеплення ( $k = n + \frac{1}{2}; c = n + \frac{1}{4}$ ):

$$\begin{aligned}\frac{C_{i,j}^k - C_{i,j}^c}{\Delta t} &+ \frac{1}{2} (L_x^- C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{i,j}^k = \\ &= \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c); \quad (6)\end{aligned}$$

– на третьому кроці ( $k = n + \frac{3}{4}; c = n + \frac{1}{2}$ ) використовуємо залежність (6);

– на четвертому кроці ( $k = n + 1; c = n + \frac{3}{4}$ ) застосовуємо залежність (5).

Для чисельного інтегрування рівнянь гідродинаміки виконуємо таку апроксимацію рівнянь [1]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u^+ \omega}{\partial x} &\approx \Lambda_x^+ \omega = (u_{i+1,j}^+ \omega_{i,j} - u_{i,j}^+ \omega_{i-1,j}) / \Delta x; \\ \frac{\partial u^- \omega}{\partial x} &\approx \Lambda_x^- \omega = (u_{i+1,j}^- \omega_{i+1,j} - u_{i,j}^- \omega_{i,j}) / \Delta x; \\ \frac{\partial v^+ \omega}{\partial y} &\approx \Lambda_y^+ \omega = (v_{i,j+1}^+ \omega_{i,j} - v_{i,j}^+ \omega_{i,j-1}) / \Delta y; \\ \frac{\partial v^- \omega}{\partial y} &\approx \Lambda_y^- \omega = (v_{i,j+1}^- \omega_{i,j+1} - v_{i,j}^- \omega_{i,j}) / \Delta y; \\ \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} &\approx L_{xx}^+ \omega - L_{xx}^- \omega = \\ &= (-\omega_{i,j} + \omega_{i-1,j}) / \Delta x^2 + (\omega_{i+1,j} - \omega_{i,j}) / \Delta x^2; \\ \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} &\approx L_{yy}^+ \omega - L_{yy}^- \omega = \\ &= (\omega_{i,j-1} - \omega_{i,j}) / \Delta y^2 + (\omega_{i,j+1} - \omega_{i,j}) / \Delta y^2.\end{aligned}$$

Апроксимувальні рівняння мають вигляд:

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

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

або

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

Змінюючи параметр  $\xi$ , можемо змінювати порядок точності схеми. Так, за  $\xi = 1/2$  різницева схема має другий порядок точності за часовою координатою.

Різницева схема розщеплення має вигляд [1]:

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

На базі цих формул можна визначати значення вихору в піскоуловлювачі.

Для чисельного інтегрування рівняння функції потоку на першому кроці зводимо його до вигляду:

$$\frac{\partial \psi}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \omega, \quad (7)$$

де  $\eta$  – фіктивний час.

Далі використовуємо таку схему розщеплення:

$$\psi^{l+\frac{1}{4}} = \psi^l + \tilde{\omega} \frac{\Delta \eta}{2};$$

$$\begin{aligned}
& \left( E - \frac{\Delta \eta}{2} (L_{xx}^+ + L_{yy}^+) \right) \psi^{l+\frac{2}{4}} = \\
& = \left( E + \frac{\Delta \eta}{2} (L_{xx}^- + L_{yy}^-) \right) \psi^{l+\frac{1}{4}}; \quad (8) \\
& \left( E - \frac{\Delta \eta}{2} (L_{xx}^- + L_{yy}^-) \right) \psi^{l+\frac{3}{4}} = \\
& = \left( E + \frac{\Delta \eta}{2} (L_{xx}^+ + L_{yy}^+) \right) \psi^{l+\frac{2}{4}}; \\
& \psi^{l+1} = \psi^{l+\frac{3}{4}} + \tilde{\omega} \frac{\Delta \eta}{2}.
\end{aligned}$$

Особливістю розглянутих різницевих схем є те, що розрахунок невідомої величини на кожному кроці розщеплення здійснено на базі явних залежностей.

Після розрахунку значення функції потоку розраховуємо компоненти вектора швидкості потоку в піскоуловлювачі:

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

## Результати

Для кодування рівнянь чисельної моделі використано FORTRAN. Нижче показано результати чисельного моделювання на базі побудованої чисельної моделі. Розглянуто три сценарії. Перший сценарій – у піскоуловлювачі є додатковий елемент на дні. Другий сценарій – використовуємо два елемента на дні. Третій сценарій – використовуємо три додаткових елемента на дні. Ефективність очищення визначаємо за концентрацією на виході з піскоуловлювача. Ця концентрація показана на рис. 1–3 у відсотках від концентрації домішки на вході в піскоуловлювач (концентрація в безрозмірному вигляді дорівнює 100 одиницям).

На рис. 1 показано розподіл концентрації вагової домішки в піскоуловлювачі, що має додатковий елемент на дні.

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

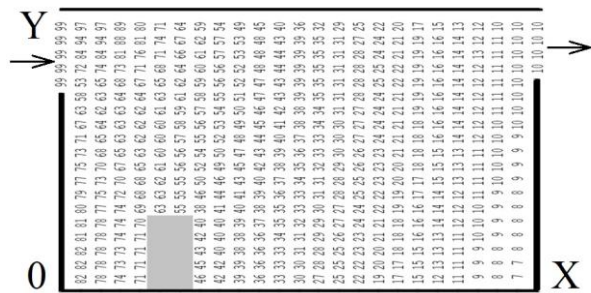


Рис. 1. Концентрація домішки в горизонтальному піскоуловлювачі (додатковий елемент на дні)

Fig. 1. Impurity concentration in the horizontal-flow sand trap (additional element at the bottom)

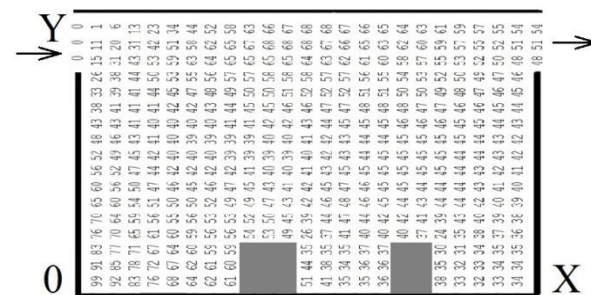


Рис. 2. Концентрація домішки в горизонтальному піскоуловлювачі (два додаткових елемента)

Fig. 2. Impurity concentration in the horizontal-flow sand trap (two additional elements at the bottom)

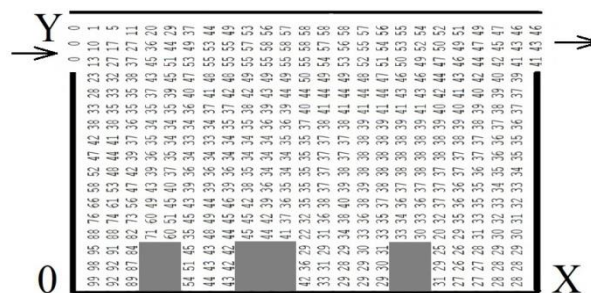


Рис. 3. Концентрація домішки в горизонтальному піскоуловлювачі (три додаткових елемента)

Fig. 3. Impurity concentration in the horizontal-flow sand trap (three additional elements at the bottom)

Як бачимо з наведених рисунків, ефективність очищення води змінюється у випадку збільшення кількості додаткових елементів на дні піскоуловлювача. Так, для першого варіанта, у якому є один додатковий елемент на дні піскоуловлювача, ефект очищення становить 10 %. А коли використано два додаткових елемента, спостерігається зменшення ефекту очищення: для третього сценарію ефект очищення становить вже 43 %.

Відзначимо, що час розрахунку склав приблизно 12 сек.

### Наукова новизна та практична значимість

Запропоновано математичну модель для оперативного розрахунку процесу масопереносу в піскоуловлювачі. Для моделювання процесу очищення води використано рівняння в'язкої нестисливої рідини та рівняння масопереносу. Побудовані чисельні моделі дозволяють проводити обчислювальні експерименти для піскоуловлювачів, які мають складну геометричну форму, що дуже важливо для практики.

Запропоновані чисельні моделі можуть бути використані для проведення пілотних розрахунків на етапі проведення проектних робіт із підвищення ефективності роботи систем очищення води.

### Висновки

У статті запропоновано чисельні моделі, що дають можливість швидко аналізувати, як проходить процес масопереносу в піскоуловлювачах, які мають складну геометричну форму. Основою моделей є фундаментальні рівняння механіки суцільного середовища.

У подальшому цей науковий напрям слід розвивати в галузі побудови тривимірних чисельних моделей для аналізу процесів масопереносу в спорудах систем каналізації та водопостачання.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Беляев Н. Н., Нагорная Е. К. *Математическое моделирование массопереноса в отстойниках систем водоотведения* : монография. Днепропетровск : Новая идеология, 2012. 112 с.
2. Беляев Н. Н., Козачина В. А. *Математическое моделирование массопереноса в горизонтальных отстойниках* : монография. Днепропетровск : Акцент ПП, 2015. 115 с.

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

3. Василенко О. А., Грабовський П. О., Ларкіна Г. М., Поліщук О. В., Прогульний В. Й. *Реконструкція і інтенсифікація споруд водопостачання та водовідведення* : навч. посіб. Київ : ІВНВКП «Укреліотек», 2010. 272 с.
4. ДБН В.2.5-75:2013. *Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування*. [Чинний від 2014-01-01]. Київ : Мінрегіон України, 2013. 128 с.
5. Епоян С. М., Колотило В. Д., Друшляк О. Г. *Водопостачання та очистка природних вод* : навчальний посібник. Харків : Фактор, 2010. 192 с.
6. Олійник О. Я., Айрапетян Т. С. Моделирование очистных стічних вод від органічних забруднень в біореакторах-аэротенках зі зваженим (вільно плаваючим) і закріпленим біоценозом. *Доповідь НАН України*. 2015. № 5. С. 55–60. DOI: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2015.05.055>
7. Alharbi, A. O. M. The biological treatment of wastewater: mathematical models. *Bulletin of the Australian Mathematical Society*. 2016. Vol. 94. Iss. 2. P. 347–348. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0004972716000411>
8. Bakiri Z., Nacef S. A simple model for secondary clarifier: Application to wastewater treatment plant. *Desalination and Water Treatment*. 2013. Vol. 51. Iss. 7–9. P. 1571–1576. DOI: <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.715073>
9. Bomba A., Klymiuk Y., Prysiazniuk I., Prysiazniuk O., Safonyk A. Mathematical modeling of wastewater treatment from multicomponent pollution by through microporous filling. *AIP Conference Proceedings*. 2016. Vol. 1773. P. 040003-1–040003-11. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4964966>
10. Griborio A. *Secondary Clarifier Modeling: A Multi-Process Approach. Dissertation and Theses*. University of New Orleans : USA, 2004. 440 p.
11. Młyński D., Bugajski P., Młyńska A. Application of the Mathematical Simulation Methods for the Assessment of the Wastewater Treatment Plant Operation Work Reliability. *Water*. 2019. Vol. 11. Iss. 5. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11050873>

В. Д. ПЕТРЕНКО<sup>1</sup>, Н. И. НЕТЕСА<sup>2</sup>, А. Л. ТЮТЬКИН<sup>3</sup>, Е. В. ГРОМОВА<sup>4</sup>,  
В. И. ШИНКАРЕНКО<sup>5</sup>, В. А. КОЗАЧИНА<sup>6\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Мосты и туннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, эл. почта [petrenko.diit@gmail.com](mailto:petrenko.diit@gmail.com), ORCID 0000-0003-2201-3593

<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 (067) 195 50 27, эл. почта [andreynetes@meta.ua](mailto:andreynetes@meta.ua), ORCID 0000-0003-1730-7642

<sup>3</sup>Каф. «Мосты и туннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, эл. почта [alexeytutkin@gmail.com](mailto:alexeytutkin@gmail.com), ORCID 0000-0003-4921-4758

<sup>4</sup>Каф. «Архитектурное проектирование, землеустройство и строительные материалы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (095) 304 73 33, эл. почта [Gromova\\_Elen\\_upbbm\\_diit@i.ua](mailto:Gromova_Elen_upbbm_diit@i.ua), ORCID 0000-0002-5149-4165

<sup>5</sup>Каф. «Компьютерные информационные технологии», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, эл. почта [shinkarenko\\_vi@ua.fm](mailto:shinkarenko_vi@ua.fm), ORCID 0000-0001-8738-7225

<sup>6\*</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 [v.kozachyna@gmail.com](mailto:v.kozachyna@gmail.com), ORCID 0000-0002-6894-5532

## ЭКСПРЕСС МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ВОДЫ

**Цель.** Использование физического эксперимента для исследования процессов массопереноса в сооружениях систем водоснабжения и канализации требует значительного времени и является весьма дорогостоящим. Поэтому целью работы является разработка численных моделей для проведения вычислительного эксперимента по исследованию процесса массопереноса в песколовки. **Методика.** Для математического моделирования процесса массопереноса в песколовки использованы двумерные уравнения Навье–Стокса и двумерное уравнение массопереноса примеси. Для численного интегрирования уравнений, описывающих

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

движение вязкой несжимаемой жидкости, использованы неявные разностные схемы расщепления. Неизвестные параметры на каждом шагу расщепления найдены по явным зависимостям. Для численного интегрирования двумерного уравнения массопереноса использована попеременно-треугольная разностная схема расщепления. **Результаты.** Для проведения вычислительного эксперимента на базе построенной численной модели создан специализированный код. Представлены результаты вычислительных экспериментов по исследованию процесса массопереноса в песколовки с дополнительными элементами. Определено, что эффективность очистки воды изменяется при использовании дополнительных элементов на дне песколовки. **Научная новизна.** Построены численные модели, которые дают возможность оперативно анализировать и прогнозировать эффективность работы песколовков, имеющих сложную геометрическую форму. Эти модели позволяют учесть также гидродинамику течения в очистном сооружении. **Практическая значимость.** Предложенные численные модели можно использовать на этапе проектирования очистных сооружений систем канализации.

*Ключевые слова:* очистка воды; численное моделирование; разностные схемы; песколовка; водопользование; математическое моделирование

V. D. PETRENKO<sup>1</sup>, M. I. NETESA<sup>2</sup>, O. L. TIUTKIN<sup>3</sup>, O. V. GROMOVA<sup>4</sup>,  
V. I. SHYNKARENKO<sup>5</sup>, V. A. KOZACHYNA<sup>6\*</sup>

<sup>1</sup>Dep. «Bridges and Tunnels», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 53, e-mail petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

<sup>2</sup>Dep. «Build Production and Geodesy», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 195 50 27, e-mail andreynetesa@meta.ua, ORCID 0000-0003-1730-7642

<sup>3</sup>Dep. «Bridges and Tunnels», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 53, e-mail alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

<sup>4</sup>Dep. «Architectural Design, Land Management and Building Materials», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (095) 304 73 33, e-mail Gromova\_Elen\_upbbm\_diit@i.ua, ORCID 0000-0002-5149-4165

<sup>5</sup>Dep. «Computer and Information Technologies», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail shinkarenko\_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225

<sup>6\*</sup>Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

## EXPRESS MODEL FOR WATER TREATMENT PROCESS CALCULATION

**Purpose.** The use of a physical experiment to study mass transfer processes in structures used in water supply and sewage systems requires considerable time and is very expensive. The aim of the work is to develop numerical models for a computational experiment to study the mass transfer process in sand traps. **Methodology.** For mathematical modeling of the mass transfer process in sand traps, the two-dimensional Navier-Stokes equations and the two-dimensional impurity mass transfer equation are used. For numerical integration of equations describing the motion of a viscous incompressible fluid, implicit difference splitting schemes are used. The unknown parameters at each step of the splitting were found by explicit dependencies. For the numerical integration of the two-dimensional mass transfer equation, an alternately triangular difference splitting scheme is used. **Findings.** To conduct a computational experiment, a specialized code was created on the basis of the constructed numerical model. The results of computational experiments on the study of mass transfer in sand traps with additional elements are presented. It was determined that water purification efficiency changes with installation of additional elements at the bottom of the sand trap. **Originality.** The constructed numerical models make it possible to quickly analyze and predict the efficiency of sand traps having a complex geometric shape. They also make it possible to take into account the flow

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

hydrodynamics in the treatment plant. **Practical value.** The proposed numerical models can be used at the design stage of sewage treatment plants.

**Keywords:** water purification; numerical simulation; difference schemes; sand trap; water use; mathematical modeling

## REFERENCES

1. Biliaiev, N. N., & Nagornaya, E. K. (2012). *Matematicheskoye modelirovaniye massoperenosa v otstoynikakh sistem vodootvedeniya*: monografiya. Dnepropetrovsk: Novaya ideologiya. (in Russian)
2. Biliaiev, N. N., & Kozachina, V. A. (2015). *Modelirovaniye massoperenosa v gorizontalnykh otstoynikakh*: monografiya. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (in Russian)
3. Vasylenko, O. A., Hrabovskyi, P. O., Larkina, H. M., Polishchuk, O. V., & Prohulnyi, V. Y. (2010). *Rekonstruktsiia i in-tensyfikatsiia sporud vodopostachannia ta vodovidvedennia*: navchalnyi posibnyk. Kyiv: IVNVKP «Ukrheliotek». (in Ukrainian)
4. *Kanalizatsiia. Zovnishni merezhi ta sporudy. Osnovni polozhennia proektuvannia, 128 DBN V.2.5-75-2013* (2013). (in Ukrainian)
5. Epoian, S. M., Kolotylo, V. D., & Drushliak, O. H. (2010). *Vodopostachannia ta ochystka pryrodnykh vod*: navchalnyi posibnyk. Xarkiv : Faktor. (in Ukrainian)
6. Oleynik, A. Y., & Airapetyan, T. S. (2015). The modeling of the clearance of waste waters from organic pollutions in bioreactors-aerotanks with suspended (free flow) and fixed biocenoses. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 5, 55-60. DOI: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2015.05.055> (in Ukrainian)
7. Alharbi, A. O. M. (2016). The biological treatment of wastewater: mathematical models. *Bulletin of the Australian Mathematical Society*, 94(2), 347-348. DOI: <https://doi.org/10.1017/s0004972716000411> (in English)
8. Bakiri, Z., & Nacef, S. (2013). A simple model for secondary clarifier: application to wastewater treatment plant. *Desalination and Water Treatment*, 51(7-9), 1571-1576. DOI: <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.715073> (in English)
9. Bomba, A., Klymiuk, Y., Prysiazniuk, I., Prysiazniuk, O., & Safonyk, A. (2016). Mathematical modeling of wastewater treatment from multicomponent pollution by through microporous filling. *AIP Conference Proceedings*, 1773, 040003-1-040003-11. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4964966> (in English)
10. Griborio, A. (2004). *Secondary Clarifier Modeling: A Multi-Process Approach. Dissertation and Theses*. USA, University of New Orleans Publ. (in English)
11. Młyński, D., Bugajski, P., & Młyńska, A. (2019). Application of the Mathematical Simulation Methods for the Assessment of the Wastewater Treatment Plant Operation Work Reliability. *Water*, 11(5), 873. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11050873> (in English)

Надійшла до редколегії: 02.12.2019

Прийнята до друку: 03.04.2020



# ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

УДК 656.222.5:519.87

М. І. МУЗИКІН<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (095) 251 53 14, ел. пошта mihailmuzykin@gmail.com, ORCID 0000-0003-2938-7061

## ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ РУХУ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ПОЇЗДОПОТОКІВ В УМОВАХ РИЗИКІВ

**Мета.** Дослідження спрямовано на встановлення раціонального варіанта прямування спеціалізованих поїздопотоків на залізничних напрямках шляхом управління ризиками та визначення залежності інтервалу руху поїздів від парку локомотивів і локомотивних бригад. Досягнути поставленої мети можна шляхом установа послідовності стадій генетичного алгоритму для реалізації математичної моделі визначення інтенсивності руху спеціалізованих поїздопотоків на залізничних напрямках. **Методика.** У дослідженні розглянуто процес пропуску спеціалізованих поїздопотоків по залізничних коридорах як складову єдиного логістичного ланцюга. До цього процесу ми підійшли з позиції управління ризиками, коли потрібно визначити час прибуття поїздів із різних напрямків за наявних технологічних обмежень. Вибір раціонального інтервалу прямування між поїздами на залізничних коридорах є вкрай важливим, тому що дозволяє здійснювати пропуск спеціалізованих вантажопотоків більш ефективно з позиції витрат на виконання доставки в кінцевий (опорний) пункт та швидкості цієї доставки. Із метою реалізації оптимізаційної математичної моделі визначення інтенсивності руху спеціалізованих поїздопотоків на залізничних напрямках використано генетичний алгоритм із дійсним кодуванням (RGA). **Результати.** Проведений аналіз довів ефективність пошуку раціонального варіанта встановлення інтенсивності руху спеціалізованих поїздопотоків на залізничних напрямках з урахуванням витрат залізниці на тягу та витрат вантажоотримувачів. Представлено графік залежності кращих і середніх значень фітнес-функції від кількості ітерацій RGA у процесі знаходження рішення. **Наукова новизна.** У результаті дослідження розроблено програмну реалізацію математичної моделі визначення інтенсивності руху спеціалізованих поїздопотоків на залізничних напрямках з урахуванням балансу витрат залізниці на тягові ресурси та витрат одержувача вантажу. Ця програма дозволяє моделювати вибір часу прибуття поїздів на кінцеву станцію маршрутів із різних напрямків в умовах невизначеності. Експертний аналіз отриманих результатів моделювання довів адекватність рішення. **Практична значимість.** Виконане дослідження дозволяє встановити залежність інтервалу руху поїздів від парку локомотивів та локомотивних бригад. Пошук оптимального інтервалу прямування поїздопотоків за допомогою розробленої математичної моделі дозволяє управляти супутніми ризиками та мінімізувати експлуатаційні витрати на просування спеціалізованого поїздопотоку.

*Ключові слова:* поїздопотік; інтенсивність руху; тяговий рухомий склад; ризики; генетичний алгоритм

### Вступ

Процес пропуску спеціалізованих поїздопотоків по залізничних коридорах є складовою єдиного логістичного ланцюга. Необхідно підійти до цього процесу з позиції управління ризиками, щоб визначити час прибуття поїздів

із різних напрямків за обмеженнях: 1) величини наявного експлуатаційного парку локомотивів, який може бути використано для обслуговування спеціалізованого поїздопотоку; 2) місткості опорної сортувальної станції та станцій примикання до неї (це можуть бути як припортові станції, так і станції, на яких здійснюється

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

перехід із колії шириною 1 520 мм на колію 1 435 мм); 3) режимів роботи вантажно-розвантажувальних фронтів.

У сучасних дослідженнях [6] наголошено, що для вирішення завдань підвищення ефективності функціонування залізничної мережі потребують теоретичного обґрунтування підходи щодо визначення раціональних параметрів залізничних напрямків у частині пропуску поїздопотоків. Особливу увагу при цьому належить приділити спеціалізованим поїздопотокам.

Автори статті [11] запропонували здійснювати управління доставкою вантажів на основі визначення значень тривалості їх обробки на кожному етапі виконання графіка. Таким чином можна оцінити відхилення від нормативного часу в процесі доставки вантажів, тобто якість перевезень.

У дослідженні [12] за пропонувано метод, який дозволяє спрогнозувати контрольні точки планових етапів доставки вантажів з урахуванням умов реальної експлуатаційної роботи. Аналіз відхилень у тривалості проходження різних етапів процесу транспортування можна надавати диспетчерському персоналу для прийняття керівних рішень, а також використовувати під час створення інтелектуальних транспортних систем.

У статті [2] розглянуто можливість у межах визначеного залізничного напрямку скоординувати технологічні та інфраструктурні можливості всіх підрозділів АТ «Українська залізниця» для формування раціональної системи просування спеціалізованих вагонопотоків. Ця робота підтверджує перспективність подальших досліджень у цьому напрямі.

Колектив авторів у роботі [3] розробив технологію, яка дозволяє зменшити величину експозиції, що є інтегральним показником ризику, тобто кількісним параметром, який описує можливість виникнення аварій і настання негативних наслідків, пов'язаних з обробкою вагонів із небезпечними вантажами на сортувальних станціях. Доцільність впровадження інтелектуальних технологій управління в перевізний процес обумовлюється зниженням експлуатаційних витрат і підвищенням рівня безпеки виконання технологічних процесів на станціях в умовах обробки спеціалізованих вагонопото-

ків. Учені в дослідженні [13] запропонували заходи щодо підвищення надійності роботи поїзних дільниць, що сприятимуть прискореному пропуску вагонопотоків.

У дослідженнях щодо організації інтермодальних транспортних коридорів особливе місце посідає розробка інтегрованих математичних моделей, що враховують особливості поїздопотоків за їх спеціалізацією, роботу залізничних терміналів та портів з урахуванням інтересів усіх учасників перевізного процесу [9, 15].

За таких умов актуальним є вирішення завдання пошуку балансу витрат на просування поїздопотоків із різних залізничних напрямків на кінцеву опорну станцію та витрат одержувача вантажу шляхом встановлення інтенсивності руху поїздопотоків з урахуванням обмежених ресурсів тягового рухомого складу.

### Мета

Основною метою статті є встановлення раціонального варіанта прямування спеціалізованих поїздопотоків на залізничних напрямках шляхом управління ризиками та визначення залежності інтервалу руху поїздів від парку локомотивів і локомотивних бригад.

Досягнути поставленої мети можна шляхом установа послідовності стадій генетичного алгоритму для реалізації математичної моделі визначення інтенсивності руху спеціалізованих поїздопотоків на залізничних напрямках.

### Методика

Уведемо поняття ризику – це оцінка можливих витрат, що пов'язані з невизначеністю в процесах руху поїздів на залізничних коридорах, у роботі опорної сортувальної станції та станцій, які примикають до неї, у режимах роботи вантажно-розвантажувальних фронтів. Це дасть нам можливість провести оцінку невизначеності досліджуваного процесу. Ураховуючи вищесказане, перед нами постає задача створення математичної моделі, яка дозволяє визначити оптимальний момент часу прибуття поїздів (тобто визначити раціональну інтенсивність руху поїздопотоків на залізничних коридорах) в умовах ризиків [8]. Для цієї моделі необхідно використовувати статистичні дані за

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

попередні періоди щодо відхилень часу прибуття поїздів на кінцеву (опорну) станцію та часу надходження вагонів на вантажні fronti.

Вибір раціонального інтервалу прямування між поїздами на залізничних коридорах є вкрай важливим, тому що дозволяє здійснювати пропуск спеціалізованих вантажопотоків більш ефективно з позиції витрат на виконання доставки в кінцевий (опорний) пункт та швидкості цієї доставки. Це набуває особливої актуальності в умовах жорсткої конкуренції з автомобільними перевезеннями. Установлення раціонального інтервалу між рухом поїздів на залізничному коридорі дає можливість скоротити кількість локомотивів та локомотивних бригад, які їх обслуговують, порівняно з наявним варіантом організації руху. Крім того, від цього інтервалу залежать і витрати вантажовласників. Знаходження раціонального інтервалу дозволить знайти баланс, так звану «золоту середину», витрат залізниці на тягові ресурси та витрат вантажовласників завдяки зменшенню непродуктивних простоїв усіх елементів логістичного ланцюга.

З урахуванням вищенаведеного формалізація цього процесу повинна носити оптимізаційний характер. Для обліку зазначеної невизначеності запропоновано застосувати апарат математичної статистики й теорії ймовірності.

У попередньому дослідженні було розроблено математичну модель, яка дозволяє знайти схеми обігу локомотивів з урахуванням дислокації парку за різними серіями на полігоні мережі та схеми роботи локомотивних бригад [7]. У межах постановки нової задачі для просування спеціалізованого вагонопотоку на залізничних коридорах будемо використовувати груповий графік обслуговування локомотивів на знайдених схемах їх обігу. Це означає, що спеціалізовані поїзди буде обслуговувати тільки визначена група локомотивів. Отже, у нових реаліях для кожного залізничного коридору визначальним фактором буде виступати інтервал між попутними спеціалізованими поїздами у так званому «вантажному напрямку» [10, 14]. Від цього інтервалу залежать витрати на експлуатацію необхідного локомотивного парку для обслуговування спеціалізованого вагонопотоку та кількість локомотивів. Це особливо важливо в умовах критичного зношення інвентарного

парку локомотивів, що перебувають на балансі АТ «Українська залізниця».

Тривалість періоду планування доцільно розглядати у тридобовому вимірі  $T = [0; 72]$  год, оскільки, згідно з дослідженням [4], для нормальних законів розподілу стійка робота порту встановлюється протягом 2–3 діб.

Аналізуючи задачу знаходження оптимального часу прибуття кожного спеціалізованого поїзда на кінцеву (опорну) станцію, приходимо до висновку, що вона передбачає зведення двох випадкових процесів до одного. Ці два випадкові процеси є незалежними один від одного та містять власні параметри розподілу, що врешті-решт обертаються різними сполученнями подій: запізнення часу прибуття спеціалізованого поїзда та запізнення в процесі забирання вагонів з опорної станції на вантажно-розвантажувальні fronti мають різні наслідки [1]. Окрім того, необхідно враховувати, що ці випадкові процеси відбуваються під впливом різноманітних факторів та визначених обмежень.

Схематичне уявлення виникнення двох випадкових подій – прибуття поїзда на опорну станцію та забирання вагонів з опорної станції для подальшого перевантаження вантажу представлено на рис. 1.

Із метою створення цільової функції математичної моделі визначення раціональних інтервалів прямування спеціалізованих поїздів, а отже, й інтервалів прибуття цих поїздів із різних залізничних коридорів, необхідно провести оцінку ризиків, що враховують різні ситуації здійснення вказаних подій.

Ще одними можливими ризиками, які необхідно враховувати під час створення цільової функції, є ризики накопичення надлишку вагонів на вантажно-розвантажувальних фронтах вантажовласника або на припортових станціях. Також можливі ризики, коли виникає дефіцит, тобто вантажно-розвантажувальні fronti простоють, тому що на припортових станціях відсутні вагони для розвантаження.

Змоделюємо випадок збігання відхилень цих процесів. У випадку пізнього надходження вагонів та пізнього прибуття морського судна до порту для їх навантаження розрахункова сума втрат зменшується. Але залежно від зміни запізнення кожного з цих двох процесів будуть

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

виникати витрати як на непродуктивний простій вагонів, так і витрати вантажовласника з причини ненадходження необхідних вагонів під вивантаження, тобто маємо простій морського судна без навантаження.

Схематичне представлення ситуації збігання в разі запізнення надходження груп вагонів на припортову станцію та забирання вагонів на причал наведено на рис. 2, де:

$(t_{m_{k,s}}^{i,заб} - \Delta t_{m_{k,s}}^i)$  – завчасне надходження групи вагонів на припортову станцію;  
 $(t_{m_{k,s}}^{i,0} + \Delta t_{m_{k,s}}^i)$  – запізнення в забиранні групи вагонів у порт через неготовність морського судна до навантаження;  $(t_{m_{k,s}}^{i,заб} + \Delta t_{m_{k,s}}^i)$  – запізнення прибуття вагонів на припортову станцію;  $(t_{m_{k,s}}^{i,0} - \Delta t_{m_{k,s}}^i)$  – готовність до раннього забирання групи вагонів у порт.

Аналогічні ризики будуть мати місце у випадку збігання завчасного надходження вагонів та моменту часу готовності морського судна під навантаження. Набагато більшими витрати будуть в разі незбігання характеру відхилень цих двох випадкових подій (рис. 3).

Обов'язково потрібно враховувати також можливі ризики, під час обрання оптимального інтервалу прямування спеціалізованих поїздів на залізничних коридорах, якими виступають витрати на експлуатацію необхідного локомотивного парку.

Розуміючи, що інтервал між спеціалізованими поїздами – це різниця між моментами прибуття другого та першого спеціалізованих поїздів, відхилення яких є за своєю природою випадковими величинами, саму величину інтервалу можна розглядати як складову детермінованого часу та випадкову складову його відхилення.

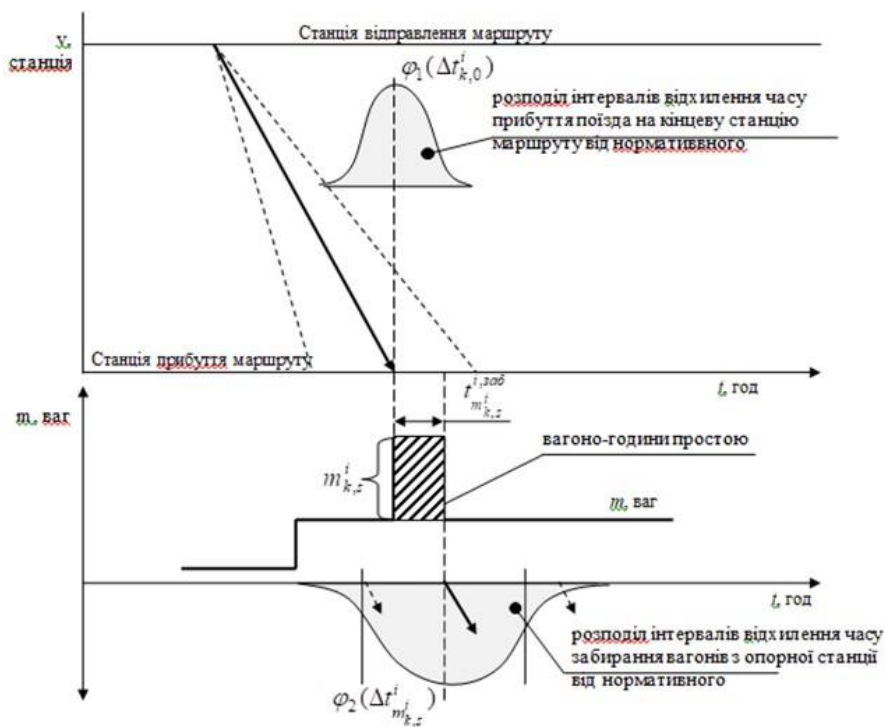


Рис. 1. Схема виникнення двох випадкових подій – прибуття поїзда на опорну станцію та забирання вагонів з опорної станції для перевантаження вантажу

Fig. 1. The scheme of occurrence of two random events – the train arrival at the base station and the removal of cars from the base station for cargo reloading

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

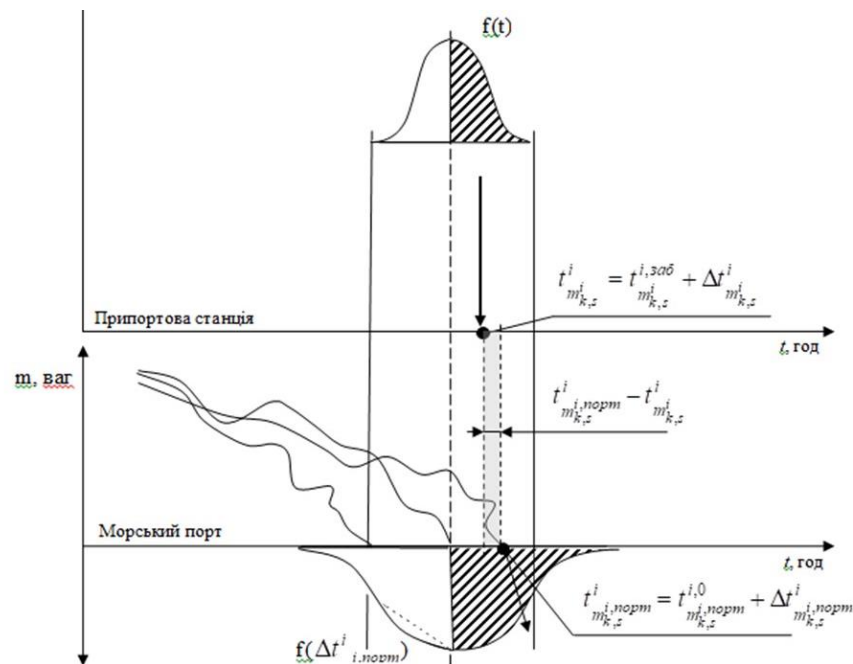


Рис. 2. Схема виникнення ситуації збігання подій у разі запізнення надходження груп вагонів на припортову станцію та забирання вагонів у порт під вивантаження

Fig. 2. The scheme of coincidence situation occurrence in case of delay of car groups arrival to the port station and removal of cars to the port for unloading

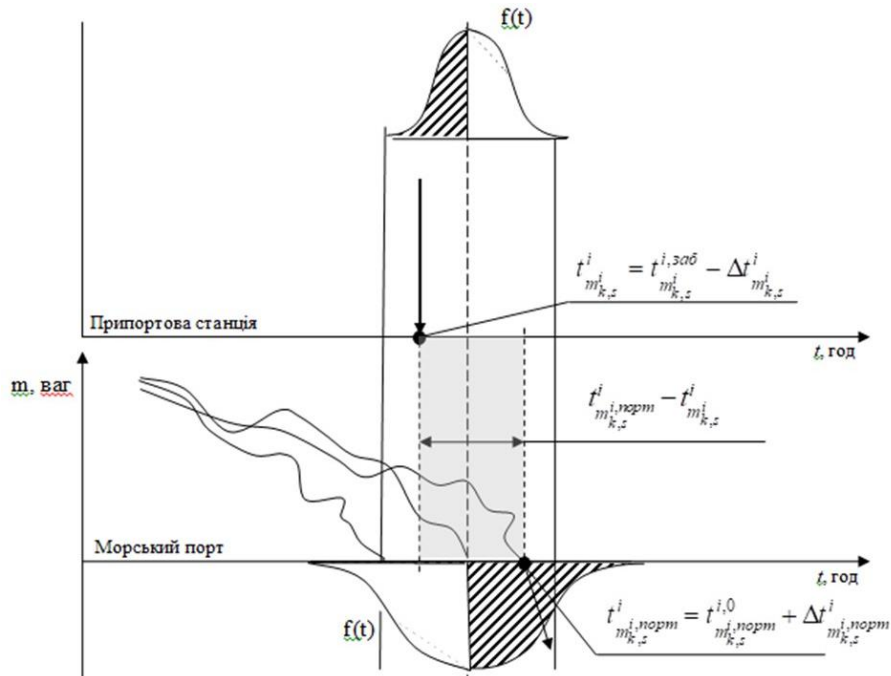


Рис. 3. Схема виникнення витрат на простій у випадку завчасного надходження групи вагонів на припортову станцію та запізнення їх забирання у порт у зв'язку з неготовністю судна до завантаження

Fig. 3. Scheme of downtime costs occurrence in case of early arrival of a car group at the port station and delay in its removal to the port due to the vessel unreadiness for loading

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Схематичне представлення інтервалу між двома поїздами на залізничному напрямку  $k$  наведено на рисунку 4.

Із метою реалізації оптимізаційної математичної моделі визначення інтенсивності руху спеціалізованих поїздопотоків на залізничних напрямках будемо використовувати генетичний

алгоритм із дійсним кодуванням (англ. Real-coded Genetic Algorithm, RGA) [5].

Загальну послідовність стадій реалізації генетичного алгоритму типу RGA для реалізації вищезазначеної математичної моделі можна представити у вигляді схеми, на рис. 5.

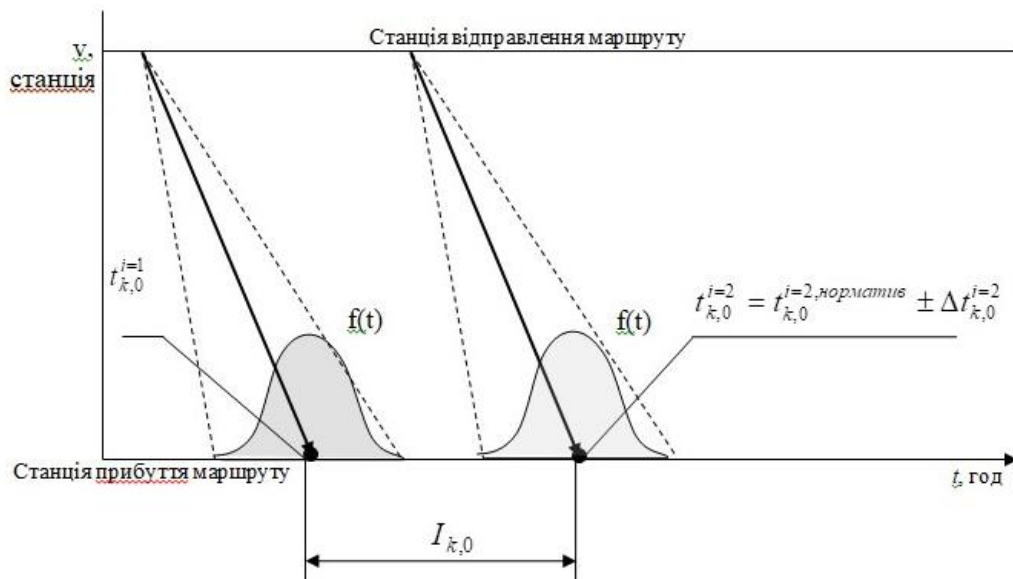


Рис. 4. Схема інтервалу між двома поїздами на залізничному напрямку  $k$

Fig. 4. Diagram of the interval between two trains in the railway direction  $k$

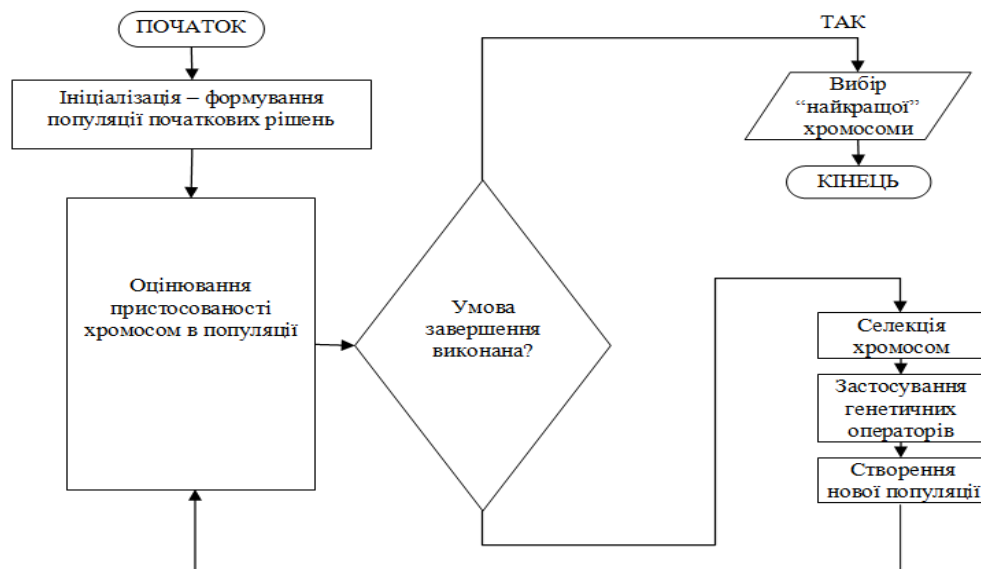


Рис. 5. Схема роботи генетичного алгоритму типу RGA

Fig. 5. Operation scheme of RGA genetic algorithm



### Результати

Вибір раціонального інтервалу прямування між поїздами на залізничних коридорах є вкрай важливим, тому що дозволяє здійснювати пропуск спеціалізованих вантажопотоків більш ефективно з позиції витрат на здійснення доставки в кінцевий (опорний) пункт та швидкості цієї доставки. Отриманий результат довів ефективність пошуку раціонального варіанта встановлення інтенсивності руху спеціалізованих поїздопотоків на залізничних напрямках з урахуванням витрат залізниці на тягу та витрат вантажоотримувачів.

На рисунку 6 представлено графік залежності кращих і середніх значень фітнес-функції від кількості ітерацій RGA у процесі знаходження рішення.

### Наукова новизна та практична значимість

У дослідженні вперше процес пропуску спеціалізованих поїздопотоків по залізничних коридорах розглянуто як складову єдиного логістичного ланцюга. До цього процесу ми підійшли саме з позиції управління ризиками, коли потрібно визначати час прибуття поїздів із різних напрямків за наявних технічних та технологічних обмежень. У результаті дослідження розроблено програмну реалізацію математичної моделі визначення інтенсивності руху спеціалізованих поїздопотоків на залізничних напрямках з урахуванням балансу витрат залізниці на тягові ресурси та витрат одержувача вантажу. Ця програма дозволяє моделювати вибір часу прибуття поїздів на кінцеву станцію маршрутів із різних напрямків в умовах невизначеності. Експертний аналіз отриманих результатів моделювання довів адекватність рішення.

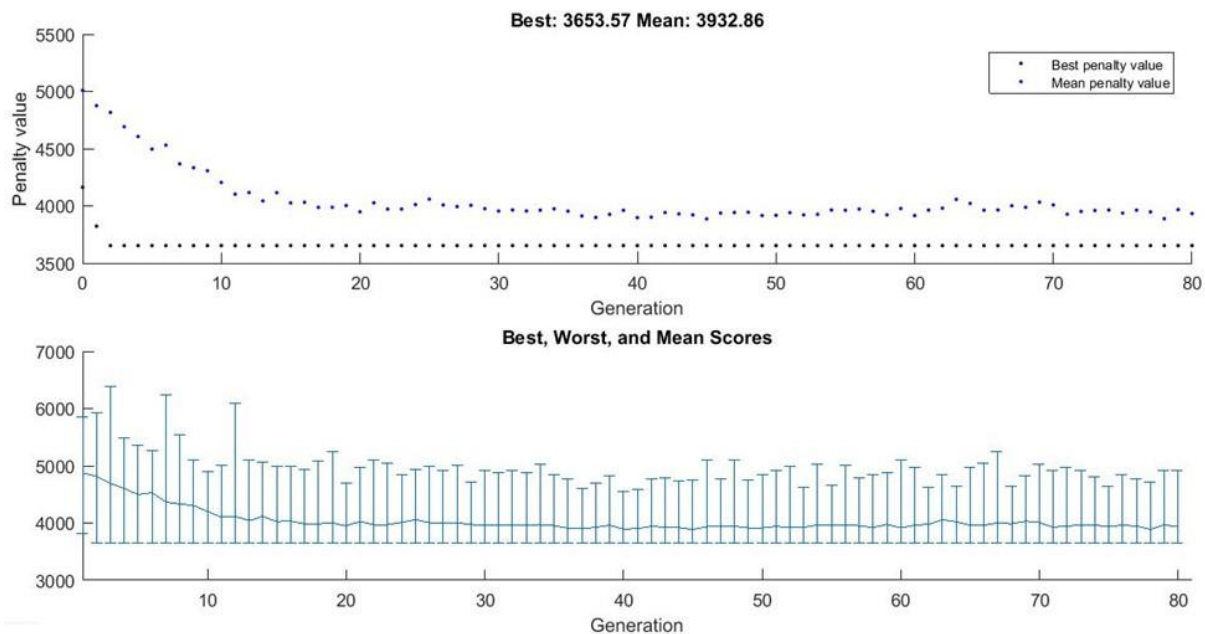


Рис. 6. Графік залежності кращих і середніх значень фітнес-функції від кількості ітерацій RGA у процесі знаходження рішення

Fig. 6. Dependence graph of the best and mean values of the fitness function on the number of RGA iterations in the process of finding a solution

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

## Висновки

Проведене дослідження дало можливість установити залежність інтервалу руху поїздів від парку локомотивів та локомотивних бригад. Пошук оптимального інтервалу прямування поїздопотоків за допомогою розробленої математичної моделі дозволяє управляти супутніми ризи-

ками та мінімізувати експлуатаційні витрати на просування спеціалізованого поїздопоток.

Подальші дослідження доцільно проводити в напрямі визначення моменту готовності спеціалізованих поїздів до відправлення, що дозволить розробити єдину логістичну технологію просування поїздопотоків безпосередньо від станції формування до кінцевої станції призначення.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Александров А. Э., Якушев Н. В. Стохастическая постановка динамической транспортной задачи с задержками с учетом случайного разброса времени доставки и времени потребления. *УБС*. 2006. № 12–13. С. 5–14.
2. Бутко Т. В., Ломотко Д. В., Прохорченко А. В., Олійник К. О. Формування логістичної технології просування вантажопотоків за жорсткими нитками графіка руху поїздів. *Зб. наук. пр. Укр. держ. акад. заліз. трансп.* Харків, 2009. Вип. 111. С. 23–30.
3. Бутко Т. В., Прохоров В. М., Чехунов Д. М. Інтелектуальне управління сортувальними станціями при перевезеннях небезпечних вантажів на основі багатоцільової оптимізації. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 5 (77). С. 59–70. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/145470>
4. Мишкурин П. Н., Рахмангулов А. Н. *Динамическая оптимизация вагонопотоков* : монография. Москва : РУСАЙНС, 2017. 110 с.
5. Панченко Т. В. *Генетические алгоритмы* : учебно-методическое пособие. Астрахань : Издательский дом «Астраханский университет», 2007. 87 с.
6. Прохорченко А. В., Тревогін О. І., Болкун О. Дослідження пропускної спроможності залізничної ділянки на основі побудови параметричних функцій залежності інтенсивності від щільності поїздопотоків. *Зб. наук. пр. Укр. держ. акад. заліз. трансп.* Харків, 2013. № 140. С. 44–48.
7. Butko T., Prokhorchenko A., Muzykin M. An improved method of determining the schemes of locomotive circulation with regard to the technological peculiarities of railcar traffic. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 5. Iss. 3 (83). P. 47–55. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.80471>
8. Butko T., Muzykin M., Prokhorchenko A., Nesterenko H., Prokhorchenko H. Determining the Rational Motion Intensity of Train Traffic Flows on the Railway Corridors with Account for Balance of Expenses on Traction Resources and Cargo Owners. *Transport and Telecommunication Journal*. 2019. Vol. 20. Iss. 3. P. 215–228. DOI: <https://doi.org/10.2478/tjt-2019-0018>
9. Crainic T. G., Kim K. H. Transportation. *Handbooks in Operations Research and Management Science*. 2007. Vol. 14. P. 467–537. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(06\)14008-6](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(06)14008-6)
10. Kasalica S., Mandić D., Vukadinović V. Locomotive Assignment Optimization Including Train Delays. *PROMET – Traffic & Transportation*. 2013. Vol. 25. Iss. 5. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.7307/ptt.v25i5.1402>
11. Kyrychenko H., Statyva Yu., Strelko O., Berdnychenko Y., Nesterenko Kh. Assessment of cargo delivery quality using fuzzy set apparatus. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7. Iss. 4.3. P. 262–265. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19800>
12. Kyrychenko H., Nesterenko H., Avramenko S., Lytvynenko S., Yanovsky P., Lytvynenko L. Use of cargo delivery process model for the assessment of logistics service quality. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7. Iss. 4. P. 4514–4518.
13. Nesterenko H. I., Bech P. V., Muzykin M. I., Avramenko S. I. Improvement of Supervisory Control of Train Movement by Means of Introduction of Operational Zones. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 6 (78). С. 59–70. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154060>
14. Sivilevičius H. Modelling the interaction of transport system elements. *Transport*. 2011. Vol. 26, No. 1. P. 20–34. DOI: <https://doi.org/10.3846/16484142.2011.560366>
15. Zhu E., Crainic T. G., Gendreau M. Scheduled Service Network Design for Freight Rail Transportation. *Operations Research*. 2014. Vol. 62. Iss. 2. P. 383–400. DOI: <https://doi.org/10.1287/opre.2013.1254>

М. И. МУЗЫКИН<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Компьютерные информационные технологии», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (095) 251 53 14, эл. почта mihailmuzykin@gmail.com, ORCID 0000-0003-2938-7061

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ДВИЖЕНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПОЕЗДОПОТОКОВ В УСЛОВИЯХ РИСКОВ

**Цель.** Исследование направлено на установление рационального варианта следования специализированных поездопотоков на железнодорожных направлениях путем управления рисками и определения зависимости интервала движения поездов от парка локомотивов и локомотивных бригад. Достичь поставленной цели можно путем установления последовательности стадий генетического алгоритма для реализации математической модели определения интенсивности движения специализированных поездопотоков на железнодорожных направлениях. **Методика.** В исследовании рассмотрен процесс пропуска специализированных поездопотоков по железнодорожным коридорам как составляющую единой логистической цепи. К этому процессу мы подошли с позиции управления рисками, когда нужно определить время прибытия поездов с различных направлений при имеющихся технологических ограничениях. Выбор рационального интервала следования между поездами на железнодорожных коридорах крайне важен, так как позволяет осуществлять пропуск специализированных грузопотоков более эффективно с точки зрения расходов на выполнение доставки в конечный (опорный) пункт и скорости этой доставки. С целью реализации оптимизационной математической модели определения интенсивности движения специализированных поездопотоков на железнодорожных направлениях использовано генетический алгоритм с действительным кодированием (RGA). **Результаты.** Проведенный анализ доказал эффективность поиска рационального варианта установления интенсивности движения специализированных поездопотоков на железнодорожных направлениях с учетом расходов железной дороги на тягу и расходов грузополучателей. Представлен график зависимости лучших и средних значений фитнес-функции от количества итераций RGA в процессе нахождения решения. **Научная новизна.** В результате исследования разработана программная реализация математической модели определения интенсивности движения специализированных поездопотоков на железнодорожных направлениях с учетом баланса расходов железной дороги на тяговые ресурсы и расходов получателя груза. Эта программа позволяет моделировать выбор времени прибытия поездов на конечную станцию маршрутов с различных направлений в условиях неопределенности. Экспертный анализ полученных результатов моделирования доказал адекватность решения. **Практическая значимость.** Данное исследование позволяет установить зависимость интервала движения поездов от парка локомотивов и локомотивных бригад. Поиск оптимального интервала следования поездопотоков с помощью разработанной математической модели позволяет управлять сопутствующими рисками и минимизировать эксплуатационные расходы на продвижение специализированного поездопотока.

**Ключевые слова:** поездопоток; интенсивность движения; тяговый подвижной состав; риски; генетический алгоритм

М. I. MUZYKIN<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Computer Information Technology», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (095) 251 53 14, e-mail mihailmuzykin@gmail.com, ORCID 0000-0003-2938-7061

## RESEARCH OF MOTION INTENSITY OF SPECIALIZED TRAIN TRAFFIC VOLUMES UNDER RISKS CONDITIONS

**Purpose.** The study aims to establish a rational variant for running of specialized train traffic volumes by managing risks and determining the dependence of the train motion interval on locomotive fleet and locomotive crews. It is possible to achieve this purpose by establishing the sequence of stages of the genetic algorithm for implementing

Creative Commons Attribution 4.0 International  
doi: <https://doi.org/10.15802/stp2020/203424>

© М. И. Музыкин, 2020

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

a mathematical model for determining the movement intensity of specialized train traffic volumes. **Methodology.** The study examined the process of passing specialized train traffic volumes along railway corridors as part of a single logistics chain. We approached this process from the perspective of risk management when it is necessary to determine the train arrival time from different directions with the existing technological restrictions. The choice of rational interval between the trains running along the railway corridors is extremely important, since it allows the passage of specialized freight traffic volumes more efficiently in terms of delivery costs to the destination and the speed of this delivery. In order to implement an optimization mathematical model for determining the motion intensity of specialized train traffic volumes in railway directions, a real-coded genetic algorithm (RGA) was used. **Findings.** The analysis proved the search efficiency of the rational option for establishing the motion intensity of specialized train traffic volumes, taking into account the railway costs for traction and the costs of consignees. A graph of the best and mean values of fitness function on the number of RGA iterations in the process of finding a solution is presented. **Originality.** As a result of the study, a software implementation of the mathematical model for determining the intensity of specialized train traffic volumes in the railway directions was developed taking into account the balance of rail costs for traction resources and the costs of consignee. This program allows you to simulate the choice of time of trains' arrival to the final station of from different directions in the uncertainty conditions. An expert analysis of the obtained simulation results proved the adequacy of the solution. **Practical value.** This study allows us to establish the dependence of train motion interval on the locomotive fleet and locomotive crews. The search for the optimal interval of train traffic volumes using the developed mathematical model makes it possible to manage the associated risks and minimize operating costs on the specialized train traffic volumes.

**Keywords:** train traffic volume; motion intensity; traction rolling stock; risks; genetic algorithm

## REFERENCES

1. Aleksandrov A. E., & Yakushev, N. V. (2006). Stokhasticheskaya postanovka dinamicheskoy transportnoy zadachi s zaderzhkami s uchetom sluchaynogo razbrosa vremeni dostavki i vremeni potrebleniya. *Large-Scale Systems Control*, 12-13, 5-14. (in Russian)
2. Butko, T. V., Lomotko, D. V., Prokhorchenko, A. V., & Olijnyk, K. O. (2009). Formuvannia lohystychnoi tekhnologii prosvannia vantazhopotokiv za zhorstkymy nytkamy hrafika rukhu poizdiv. *Collected scientific works of Ukrainian State Academy of Railway Transport*, 111, 23-30. (in Ukrainian)
3. Butko, T. V., Prokhorov, V. M., & Chekhunov, D. M. (2018). Intelligent control of marshalling yards at transportation of dangerous goods based on multiobjective optimization. *Science and Transport Progress*, 5(77), 41-52. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/145470> (in Ukrainian)
4. Mishkurov, P. N., & Rakhmangulov, A. N. (2017). *Dinamicheskaya optimizatsiya vagonopotokov: monografiya*. Moscow: RUSAYNS. (in Russian)
5. Panchenko, T. V. (2007). *Geneticheskie algoritmy: uchebno-metodicheskoe posobie*. Astrakhan: Izdatelskiy dom «Astrakhanskiy universitet». (in Russian)
6. Prokhorchenko, A. V., Trevohin, O. I., & Bolkun, O. (2013). Doslidzhennia propusknoi spromozhnosti zaliznychnoi dilnytsi na osnovi pobudovy parametrychnykh funktsii zalezhnosti intensyvnosti vid shchilnosti poizdopotokiv. *Collection of scientific works of the Ukrainian State Academy of Railway Transport*, 140, 44-48. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.146.2014.73748> (in Ukrainian)
7. Butko, T., Prokhorchenko, A., & Muzykin, M. (2016). An improved method of determining the schemes of locomotive circulation with regard to the technological peculiarities of railcar traffic. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(3(83)), 47–55. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.80471> (in English)
8. Butko, T., Muzykin, M., Prokhorchenko, A., Nesterenko, H., & Prokhorchenko, H. (2019). Determining the Rational Motion Intensity of Train Traffic Flows on the Railway Corridors with Account for Balance of Expenses on Traction Resources and Cargo Owners. *Transport and Telecommunication Journal*, 20(3), 215-228. DOI: <https://doi.org/10.2478/tjt-2019-0018> (in English)
9. Crainic, T. G., & Kim, K. H. (2007). *Transportation*. Handbooks in Operations Research and Management Science, 14, 467-537. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(06\)14008-6](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(06)14008-6) (in English)
10. Kasalica, S., Mandić, D., & Vukadinović, V. (2013). Locomotive Assignment Optimization Including Train Delays. *PROMET – Traffic & Transportation*, 25(5), 421-429. DOI: <https://doi.org/10.7307/ptt.v25i5.1402> (in English)

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

11. Kyrychenko, H., Statyvka, Y., Strelko, O., Berdnychenko, Y., & Nesterenko, Kh. (2018). Assessment of Cargo Delivery Quality Using Fuzzy Set Apparatus. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.3), 262. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19800> (in English)
12. Kyrychenko, H., Nesterenko, H., Avramenko, S., Lytvynenko, S., Yanovsky, P. & Lytvynenko, L. (2018). Use of cargo delivery process model for the assessment of logistics service quality. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4), 4514-4518. (in English)
13. Nesterenko, H. I., Bech, P. V., Muzykin, M. I., & Avramenko, S. I. (2018). Improvement of supervisory control of train movement by means of introduction of operational zones. *Science and Transport Progress*, 6(78), 59-70. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154060> (in English)
14. Sivilevičius, H. (2011). Modelling the interaction of transport system elements. *Transport*, 26(1), 20-34. DOI: <https://doi.org/10.3846/16484142.2011.560366> (in English)
15. Zhu, E., Crainic, T. G. & Gendreau M. (2014) Scheduled Service Network Design for Freight Rail Transportation. *Operations Research*, 62(2), 383-400. DOI: <https://doi.org/10.1287/opre.2013.1254> (in English)

Надійшла до редколегії: 22.11.2019

Прийнята до друку: 25.03.2020

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

УДК 625.143:620.192

С. В. ВОРОНІН<sup>1\*</sup>, Б. С. АСАДОВ<sup>2\*</sup>, В. О. СТЕФАНОВ<sup>3\*</sup>, Д. В. ОНОПРЕЙЧУК<sup>4\*</sup>,  
О. О. ГУБІН<sup>5\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Будівельні, колійні та вантажно-розвантажувальні машини», Український державний університет залізничного транспорту, майд. Феєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 66, ел. пошта voronin.sergey@ukr.net, ORCID 0000-0001-8443-3222

<sup>2\*</sup>Закрите акціонерне товариство «Азербайджанські залізниці», вул. Діляри Алієвої, 230, Баку, Азербайджан, AZ1010, тел. +38 (057) 730 10 72, ел. пошта asadovbs@ukr.net, ORCID 0000-0002-6475-0623

<sup>3\*</sup>Каф. «Будівельних, колійних та вантажно-розвантажувальних машин», Український державний університет залізничного транспорту, майд. Феєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 72, ел. пошта vstef@ukr.net, ORCID 0000-0002-7947-2718

<sup>4\*</sup>Каф. «Будівельні, колійні та вантажно-розвантажувальні машини», Український державний університет залізничного транспорту, майд. Феєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 72, ел. пошта dmytroonopriychuk@ukr.net, ORCID 0000-0002-6314-3936

<sup>5\*</sup>Каф. «Будівельні, колійні та вантажно-розвантажувальні машини», Український державний університет залізничного транспорту, майд. Феєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 72, ел. пошта sash.gubin95@gmail.com, ORCID 0000-0001-8451-5236

### АНАЛІЗ РОЗВИТКУ ОСНОВНИХ ДЕФЕКТІВ І ТЕОРЕТИЧНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ РЕЙОК В УМОВАХ МАЩЕННЯ

**Мета.** Дослідження спрямовано на виявлення закономірностей впливу навантаження на рейку та параметрів двошарового мащення на розвиток основних дефектів рейки, а саме - бокового зносу у кривих ділянках залізничної колії. **Методика.** Для розподілу основних дефектів рейок використано результати експертних оцінок служби колії Азербайджанської залізниці щодо виміру дефектних параметрів та строків служби рейок за окремими ділянками. Для встановлення закономірностей впливу навантаження та параметрів двошарового мащення на інтенсивність зношування рейок та їх ресурсу у кривих використано основні положення механіки контактної взаємодії, трибології та хімотології. **Результати.** Автори довели: 1) основними дефектами рейок у кривих ділянках колії є дефекти, пов'язані з низькою контактної-втомною міцністю сталі та високими контактними напруженнями й силами тертя; 2) згідно із встановленим розподілом, до основних дефектів рейок у кривих слід відносити: боковий знос головки, викришування металу по боковій поверхні, наявність поперечних тріщин у головці; 3) застосування двошарового мащення призводить до збільшення фактичної площі контакту колеса та рейки, зменшення контактної тиску на рейку та, у сукупності, до уповільнення бокового зношування та збільшення ресурсу рейок. **Наукова новизна.** Автори вперше виконали систематизацію результатів вимірювань параметрів дефектів рейок у кривих та на цій основі отримали розподіл основних дефектів залежно від радіуса кривої. Також автори вдосконалили математичну модель для розрахунку ресурсу рейок у кривих, яка, на відміну від наявних, урахує товщину мастильної плівки та концентрацію твердої антифрикційної добавки в оливі під час виконання мащення бокової поверхні. **Практична значимість.** Отримані результати дозволяють виконувати прогнозні розрахунки ресурсу рейок у кривих ділянках залежно від навантаження від колеса для різних експлуатаційних умов, а саме за сухого контакту колеса рейкою та в умовах їх двошарового мащення. Реалізація двошарового мащення рейок на залізничному транспорті з урахуванням впливу досліджених параметрів призведе до підвищення ресурсу рейок у кривих на 55, 50 та 45 % за розрахункової маси рухомого складу 60, 70 та 80 т.

**Ключові слова:** залізничний транспорт; рейка; вагон; колесо; контакт; навантаження; дефект; боковий знос; ресурс; мащення



## Вступ

Досвід експлуатації залізниць установлює одним з основних завдань упровадження технологій уповільнення розвитку основних дефектів рейок, особливо в кривих ділянках вантажонапружених перегонів [1–4]. До передових методів запобігання з розвитку основних дефектів належать поліпшення контактної-втомної міцності рейкової сталі, попереджувальне та планове шліфування, а також рейкозмащування [9–14]. Найменш опрацьованим, але перспективним, є рейкозмащування, яке в деяких країнах світу широко застосовують, однак у більшості країн колишнього СРСР перебуває на початковій стадії розвитку. Це пов'язано з коливаннями якості рейкової сталі, зимовими умовами, підсіпанням піску, низькою ефективністю дешевих змащувачів, високою вартістю імпортованих комп'ютеризованих систем, людським фактором, як наслідок, відсутністю наукових засад раціонального впровадження методу змащування рейок [3, 13, 14].

## Мета

Дослідження ставить за мету отримання закономірностей впливу навантаження на рейку та параметрів двошарового мащення на розвиток основних дефектів рейок, їх боковий знос і ресурс у кривих ділянках колії. Завданнями дослідження є:

- виконання аналізу розподілу дефектів рейок та встановлення на цій основі залежності зміни ресурсу рейок від радіусів кривих;
- удосконалення математичної моделі розрахунку ресурсу рейок у кривих та отримання цільових закономірностей.

## Методика

Для розподілу основних дефектів рейок за типами та ділянками колії використано результати експертних оцінок служби колії Азербайджанської залізниці щодо виміру дефектних параметрів рейок за окремими ділянками. Для

встановлення закономірностей впливу навантаження та параметрів двошарового мащення на інтенсивність бокового зношування рейок та їх ресурс у кривих використано основні положення механіки контактної взаємодії за пружного та пластичного контакту, а також трибології та хімотології.

*Аналіз розподілу дефектів рейок.* На рис. 1 наведено дані оцінок дефектів рейок на 174 кривих ділянках магістральних колій Азербайджанської залізниці. На рис. 1, а наведено дані щодо розподілу дефектів за видами по однотипних групах ділянок. Кольорами відзначено види дефектів за класифікацією, поданою в інструкції ЦП–0285 [5]. На рис. 1, б показано загальний (сумарний) розподіл по всіх ділянках за окремими видами дефектів.

Як видно з рис. 1, мають місце дефекти різних видів, однак для кривих ділянок переважають дефекти, як по мірі зменшення їх частки поділяють на такі:

- 44.1–2, боковий знос головки рейки, складає 26 % від загальної кількості;
- 11.1–2, викришування металу на боковій робочій викружці, складає 25 % від загальної кількості;
- 10.1–2, викришування й відшарування металу на поверхні кочення, складає 24 % від загальної кількості;
- 21.1–2, поперечні тріщини в головці, складають 13 % від загальної кількості;
- 37.1–2, горизонтальне розшарування головки, складає 11 % від загальної кількості.

Відзначимо, що такі дефекти як боковий знос (44.1–2) та викришування металу на боковій робочій поверхні (11.1–2), характерні переважно для рейок у кривих ділянках колії, що було зазначено в попередніх дослідженнях [4, 8, 10]. Отримані дані свідчать про недостатню зносостійкість та контактну-втомну міцність рейкової сталі, що підтверджується значним боковим зносом робочої поверхні рейки у кривих. Це потребує пошуку експлуатаційних методів запобігання з розвитку дефектів.

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

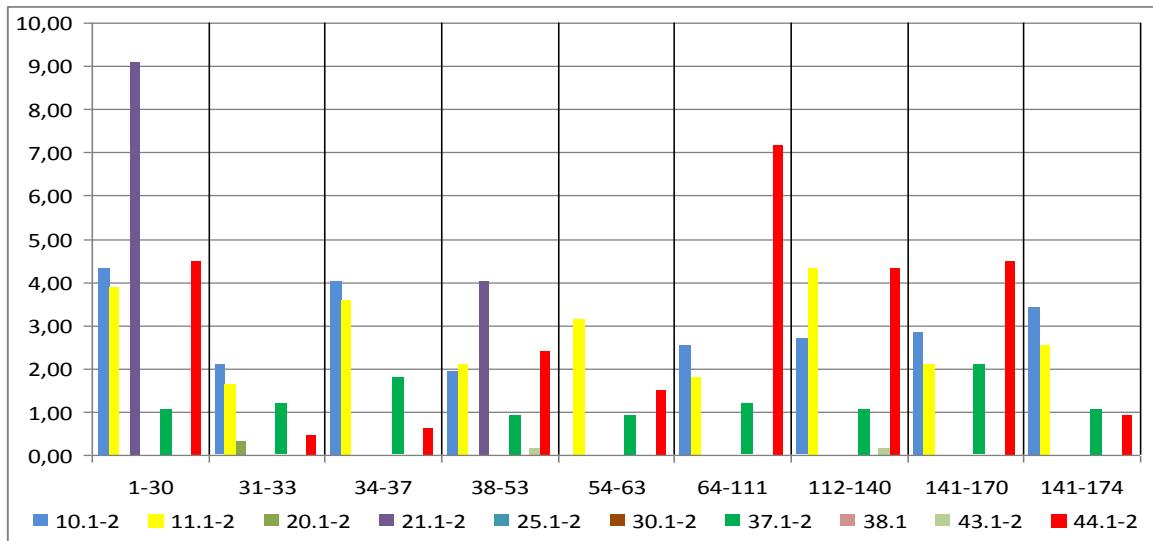
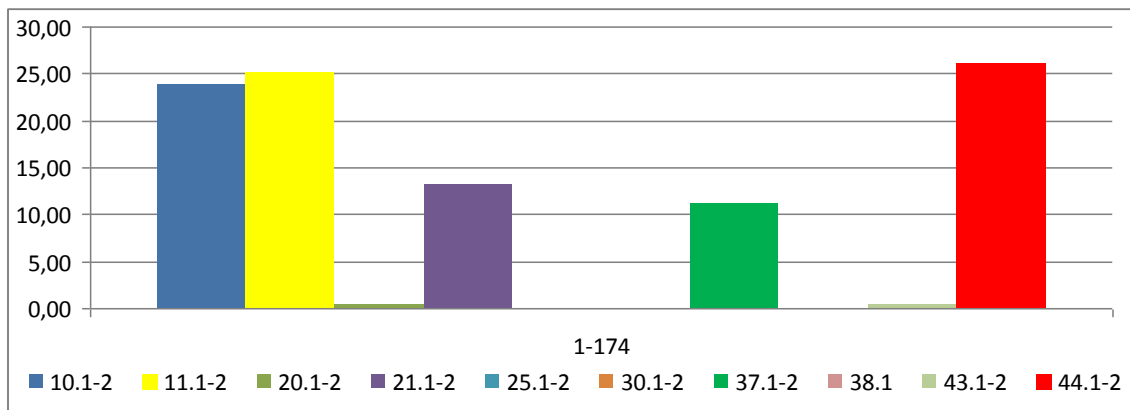
*a – a**б – б*

Рис. 1. Розподіл дефектів рейок (у %) по кривих ділянках залізниці:  
*a* – за видами по однотипних групах ділянок;  
*б* – загальний для всіх ділянок за видами дефектів, згідно з класифікацією ЦП–0285

Fig. 1. Distribution of rail defects (in %) over curved sections of railway:  
*a* – by types by same groups of sections;  
*b* – common for all sections by types of defects, according to the ЦП–0285 classification

Нижче, на рис. 2, наведено результати статистичного аналізу визначення інтенсивності зношування та ресурсу рейок у досліджуваних кривих ділянках.

На рис. 2, *a* наведено дані щодо розподілу інтенсивності бокового зношування рейок у кривих ділянках. Окремим кольором позначено діапазони радіусів кривих, від 300 до 1 200 м, за якими згруповані ділянки. Такі дані дозволили встановити середній ресурс рейок залежно від діапазону радіуса кривих, як пока-

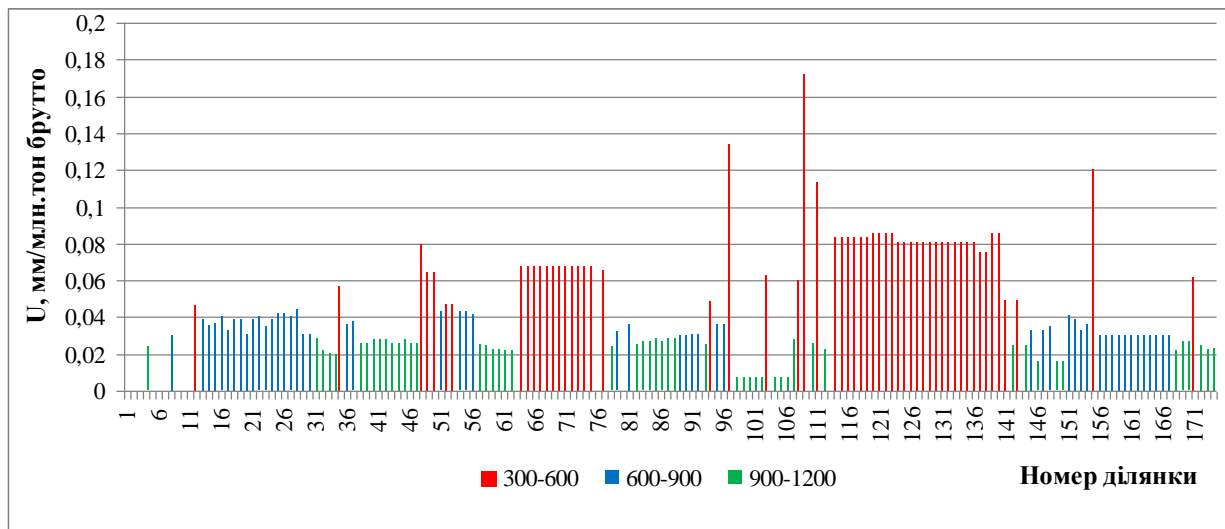
зано на рис. 2, *б*. У цьому випадку ресурс по окремій ділянці визначено як відношення встановленого граничного бокового зносу рейки до інтенсивності зношування, після чого отримані дані усереднено за кожним діапазоном, до якого входить та чи інша група ділянок. Як видно з рис. 2, *б*, ресурс рейок у кривих нелінійно залежить від радіуса та складає 170 млн т бруто для кривих 300–600 м; 450 млн т бруто для кривих 600–900 м; 560 млн т бруто для кривих 900–1 200 м. Отримані дані свідчать про досить

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

низький ресурс рейок, навіть для кривих великого радіуса, що потребує, як було сказано вище, пошуку методів зменшення інтенсивності бокового зношування рейок. Одним із перспек-

тивних, однак найменш вивчених, є метод змащування рейок, саме тому подальші дослідження спрямовані на прогнозування ресурсу рейок в умовах змащування.

*a – a*



*b – b*

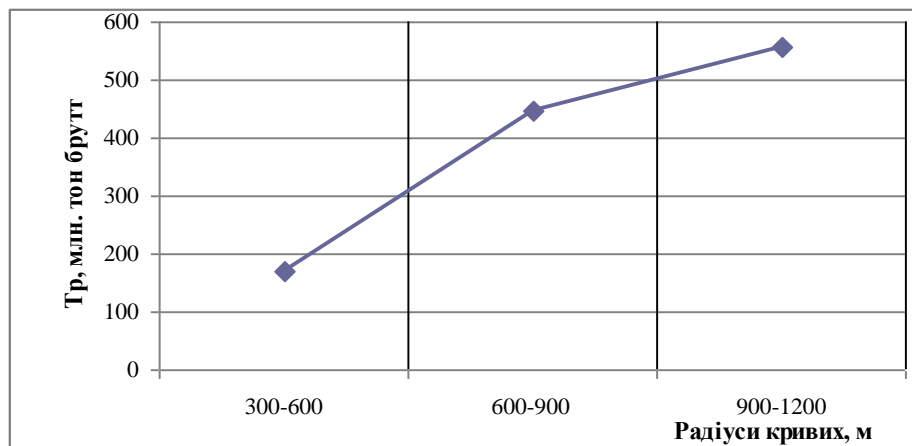


Рис. 2. Інтенсивність зношування та ресурс рейок з кривих ділянках залізниці:

*a* – інтенсивність зношування по досліджених ділянках, які згруповані за трьома діапазонами радіусів кривих;  
*b* – залежність усередненого ресурсу рейок від радіуса кривих

Fig. 2. Wear intensity and service life of the rails on the curved sections of the railway:

*a* – wear intensity on the investigated sections, which are grouped by three ranges of the curve radius;  
*b* – dependence of the average rail service life on the curve radius

*Модель прогнозування ресурсу рейок.* Під час розробки моделей прогнозування ресурсу на основі вивчення процесу зношування слід спиратися на відомі підходи в галузі трибології, з урахуванням механізму контактної взаємодії

рейки та колеса по бічній поверхні [6, 8]. У цьому дослідженні розглянуто вплив параметрів двошарового мащення рейки на величину фактичної площі контакту, тиск у контакті, інтенсивність зношування та, як наслідок, ре-

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

сурс. Згідно з попередніми роботами авторів та інших дослідників, під двошаровим мащенням слід розуміти нанесену на робочу поверхню рейки мастильну плівку, яка складається з першого (нижнього) шару твердої антифрикційної добавки, наприклад, графіту, та другого (верхнього) шару, який являє собою полімолекулярний граничний шар, утворений із молекул оливи [7, 13, 14]. Перший шар заповнює нерівності поверхні, збільшуючи тим самим фактичну площу контакту, що має антифрикційні властивості. Другий шар – квазікристалічний, він демпфує зовнішнє навантаження і також має добрі антифрикційні властивості. Виходячи з цих міркувань, можна запропонувати розрахункову схему для побудови моделі прогнозування ресурсу, яка наведена на рис. 3.

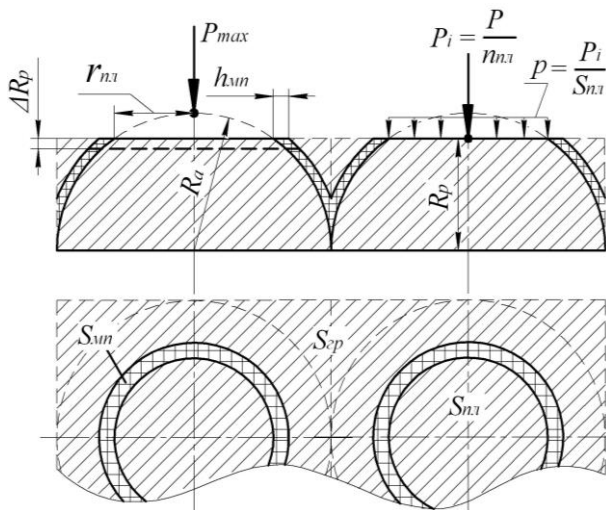


Рис. 3. Розрахункова схема контакту в разі двошарового мащення

Fig. 3. Calculated contact scheme for two-layer oiling

На схемі, згідно з рис. 3, узяті такі позначення:  $P_{\max}$  – максимальне бокове навантаження від колеса на рейку, Н;  $P_i$  – навантаження на одиничну нерівність, Н;  $p$  – контактний тиск, МПа;  $n_{\text{пл}}$  – кількість нерівностей на контурній площі контакту;  $S_{\text{пл}}$  – одинична площа контакту після пластичної деформації з урахуванням плівок, м<sup>2</sup>;  $r_{\text{пл}}$  – радіус у плані одиничної площі контакту після пластичної деформації, без урахування плівок, м;  $h_{\text{мп}}$  – товщина мастильної плівки (другого шару), м;  $R_a$  – початковий середній радіус нерівностей, м;  $R_p$  – середня висота нерівностей після їх пластичного дефор-

мування, м;  $\Delta R_p$  – зона пружних деформацій, м;  $S_{\text{мп}}$  – площа, яку займає мастильна плівка товщиною  $h_{\text{мп}}$ , м<sup>2</sup>;  $S_{\text{гр}}$  – площа поверхні, що може бути заповнена графітом, м<sup>2</sup>.

Критеріями двошарового мащення є концентрація графіту в оливі  $c_{\text{гр}}$  та товщина мастильної плівки  $h_{\text{мп}}$  – другий шар. У загальному вигляді ресурс рейок, у млн т брутто, може бути визначений як:

$$T(m_{\text{ваг}}, c_{\text{гр}}) = \frac{I_{\text{ЛМ}}}{I_{\text{іс}}(m_{\text{ваг}}, c_{\text{гр}}) \cdot n_{\text{кп}}} \cdot m_{\text{ваг}}, \quad (1)$$

де  $I_{\text{ЛМ}}$  – граничний ваговий знос, кг;  $m_{\text{ваг}}$  – маса вагона, т;  $n_{\text{кп}}$  – число колісних пар вагона;  $I_{\text{іс}}$  – вагова інтенсивність зношування, кг/цикл.

Граничний ваговий знос дорівнює

$$I_{\text{ЛМ}} = S_{\text{кон}} \cdot h_{\text{ЛМ}} \cdot \rho_{\text{ст}}, \quad (2)$$

де  $S_{\text{кон}}$  – контурна площа контакту, м<sup>2</sup>;  $h_{\text{ЛМ}}$  – граничний лінійний (боковий) знос, м;  $\rho_{\text{ст}}$  – щільність рейкової сталі, кг/м<sup>3</sup>.

Основним фактором, що впливає на ресурс рейки, є інтенсивність зношування  $I_{\text{іс}}$ , яка залежить від зовнішніх навантажень, механічних властивостей сталі та параметрів мащення. У нашому випадку змінним параметром мащення є концентрація графіту в оливі  $c$ , тоді залежність для визначення інтенсивності зношування має такий вигляд:

$$I_{\text{іс}}(m_{\text{ваг}}, c_{\text{гр}}) = \Delta V_{\text{сег}}(m_{\text{ваг}}, c_{\text{гр}}) \cdot n_{\text{пл}} \cdot \rho_{\text{ст}}, \quad (3)$$

де  $\Delta V_{\text{сег}}$  – об'єм зношеного матеріалу на 1-й нерівності від проходження 1-ї колісної пари, м<sup>3</sup>;  $n_{\text{пл}}$  – кількість нерівностей на контурній площі контакту, шт.

Об'єм зношеного матеріалу однієї нерівності за один цикл навантаження визначаємо з урахуванням теорій пружності, пластичності та малоциклової втоми:

$$\Delta V_{\text{сег}}(m_{\text{ваг}}, c_{\text{гр}}) = \pi \cdot \int_{R_p(m_{\text{ваг}}) - \Delta R_p(m_{\text{ваг}})}^{R_p(m_{\text{ваг}})} (Ra^2 - x^2) dx. \quad (4)$$

Якщо

$$\Delta R_p(m_{\text{ваг}}, c_{\text{гр}}) = \frac{P_i(m_{\text{ваг}}, c_{\text{гр}}) \cdot R_p(m_{\text{ваг}})}{E \cdot S_{\text{пл}}(m_{\text{ваг}}) \cdot n_{\text{іс}}(m_{\text{ваг}}, c_{\text{гр}})}, \quad (5)$$

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

де  $E$  – модуль пружності рейкової сталі, МПа, а  $n_{IC}$  – кількість циклів навантаження деформованого об'єму нерівності до руйнування, тоді  $\Delta V_{сег}$  – це частина об'єму пружно деформованої нерівності, що зношується від проходження по ній одного колеса. Відзначимо, що  $R_p$  є початковою висотою «припрацьованих» нерівностей, яка утворюється шляхом пластичної деформації нерівностей нової рейки з висотою  $Ra$ , після чого контакт рейки та колеса розглядаємо як пружний дискретний контакт по всіх нерівностях у межах контурної площі.

Початкова висота  $R_p$  дорівнює

$$R_p = \sqrt{Ra^2 - \frac{P_{\max}}{\pi \cdot \sigma_{ст}}}, \quad (6)$$

де  $\sigma_{ст}$  – межа плинності рейкової сталі, МПа, а одинична площа контакту після пластичної деформації  $S_{пл}$  дорівнює:

$$S_{пл}(m_{ваг}) = \pi(Ra^2 - R_p(m_{ваг})^2) + \pi((Ra + h_{мп})^2 - Ra^2). \quad (7)$$

Залежність (7) урахує другий параметр двошарового мащення – товщину мастильної плівки  $h_{мп}$ .

Максимальне бокове навантаження  $P_{\max}$  залежить від маси вагона й кількості колісних пар та, згідно з [2, 9, 11], складає 60 % від вертикального навантаження, що приблизно відповідає радіусам кривих 600 м та середній швидкості руху складу 80 км/год:

$$P_{\max} = \frac{m_{ваг}^{\max} \cdot 10^3 \cdot g}{n_{кп} \cdot 2} \cdot 0,6, \quad (8)$$

а навантаження на одиничну нерівність  $P_i$ :

$$P_i(m_{ваг}, c_{гр}) = \frac{m_{ваг} \cdot 10^3 \cdot g}{n_{кп} \cdot 2 \cdot n_{пл}} \cdot 0,6 - \sigma_{гр} \cdot S_{гр}, \quad (9)$$

де  $\sigma_{гр}$  – межа міцності графіту, МПа.

Площа  $S_{гр}$ , що може бути заповнена графітом, дорівнює:

$$S_{гр}(m_{ваг}, c_{гр}) =$$

$$= \sqrt{S_{грф}(m_{ваг})^2 - \left( S_{грф}(m_{ваг}) - S_{грф}(m_{ваг}) \cdot \frac{c_{гр}}{c_{ЛИМ}(m_{ваг})} \right)^2}, \quad (10)$$

де  $S_{грф}$  – поточна площа заповнення графітом за певної концентрації, м<sup>2</sup>, яку визначаємо так:

$$S_{грф}(m_{ваг}) = 4 \cdot Ra^2 - \pi(Ra^2 - R_p(m_{ваг})^2); \quad (11)$$

$c_{ЛИМ}$  – гранична концентрація графіту, за якої буде заповнений весь об'єм на контурній площі контакту, %:

$$c_{ЛИМ}(m_{ваг}) = \frac{4 \cdot Ra^2 \cdot R_p(m_{ваг}) - \pi \left( \int_0^{R_p(m_{ваг})} (Ra - x)^2 dx \right)}{16 \cdot Ra^2 \cdot R_p(m_{ваг})} \cdot 100. \quad (12)$$

Кількість циклів до руйнування пружно деформованого об'єму нерівності, за теорією малоциклової втоми, є ступеневою функцією відношення  $\sigma_{ст}$  до тиску в контакті [7, 10]:

$$n_{IC}(m_{ваг}, c_{гр}) = \left( \frac{\sigma_{ст}}{P_i(m_{ваг}, c_{гр}) / S_{пл}(m_{ваг})} \right)^6. \quad (13)$$

Залежності (4) – (13) у явному вигляді розкривають залежність (3) для інтенсивності зношування та дозволяють вести розрахунки як окремих характеристик контакту, так і ресурсу рейок, з урахуванням параметрів двошарового мащення, зовнішніх навантажень, геометрії контакту та міцності рейкової сталі.

На рис. 4 наведено результати розрахунку основних характеристик контакту, зношування та ресурсу рейок. Розрахунок виконано в програмному комплексі Mathcad за таких вихідних даних:  $m_{ваг}^{\max} = 90$  т; розрахунковий діапазон маси вагонів  $m_{ваг} = 60 \dots 80$  т;  $h_{ЛИМ} = 0,013$  м;  $h_{мп} = 0,1 \times 10^{-6}$  м;  $c_{гр} = 0 \dots 3$  %.

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

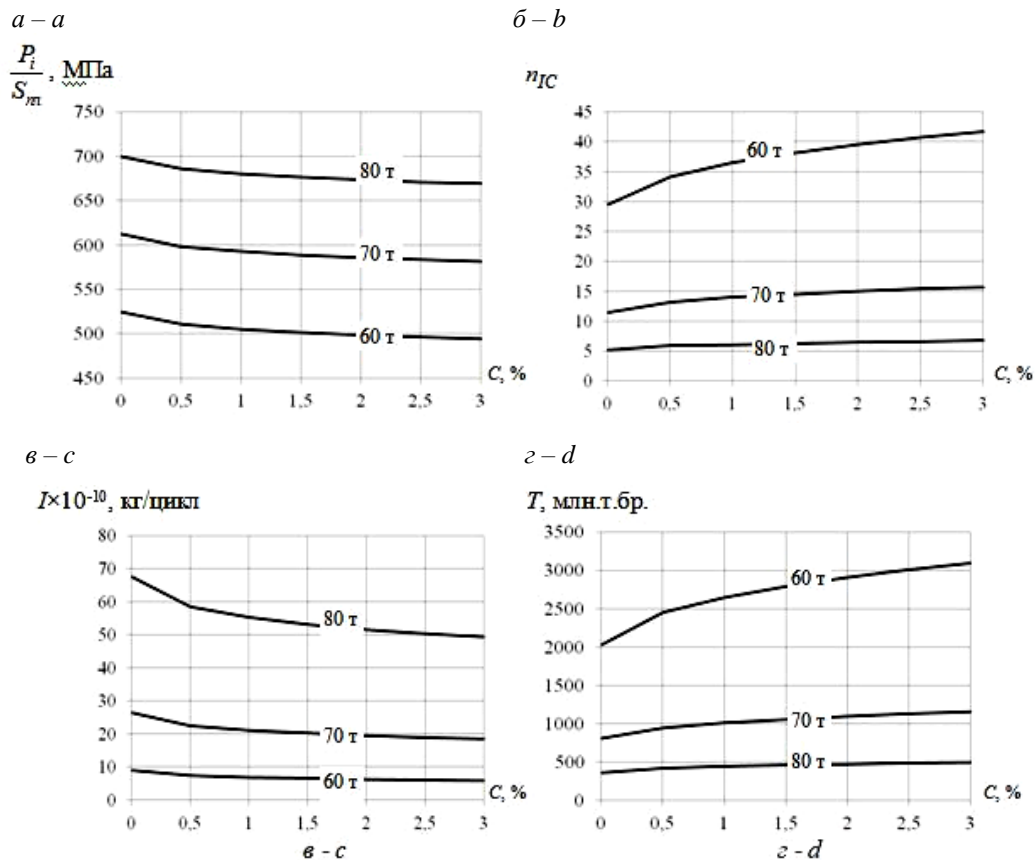


Рис. 4. Результати розрахунків:

*a* – тиск на фактичній площі контакту; *b* – кількість циклів до руйнування пружно деформованого об'єму нерівності; *в* – інтенсивність зношування рейки; *г* – ресурс рейки

Fig. 4. Results of calculations:

*a* – pressure on the actual contact area; *b* – number of cycles to destruction of elastically deformed volume of inequality; *c* – wear intensity of rail; *d* – rail service life

Слід відзначити, що отримані розрахункові залежності (1) – (13) та результати розрахунків, наведені на рис. 4, не враховують швидкості руху вагонів, що робить математичну модель «статичною». Це є її головним недоліком, однак, зважаючи на відсутність аналогічних моделей для прогнозування ресурсу рейок в умовах двошарового мащення, отримані залежності є єдиними за своїм призначенням, а достовірність отриманих результатів достатньо висока, як буде показано нижче під час зіставлення фактичних та розрахункових значень ресурсу.

### Результати

У першій частині дослідження на основі аналізу фактичного стану рейок Азербайджанських залізниць встановлено, що домінуючими дефек-

тами рейок у кривих є дефекти, пов'язані з низькою зносостійкістю та контактнo-втомною міцністю сталі, а саме боковий знос і тріщиноутворення з викришуванням металу на боковій робочій викружці. Інтенсивність розвитку вказаних дефектів установлює величину ресурсу рейок, що складає 170 млн т бруто для кривих 300–600 м; 450 млн т бруто для кривих 600–900 м; 560 млн т бруто для кривих 900–1 200 м.

У другій частині дослідження виконано побудову залежностей для прогнозування ресурсу рейок у кривих в разі реалізації їх двошарового мащення. Установлено, що у випадку застосування двошарового мащення тиск на фактичній площі контакту зменшується приблизно на 5 % (рис. 4, *a*), а число циклів навантаження до руйнування деформованих об'ємів нерівностей



## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

зростає в 1,4 раза, як показано на рис. 4, б. Такі фізичні явища сприяють зменшенню інтенсивності зношування рейок у кривих, як наслідок, підвищенню їх ресурсу. Наприклад, згідно з рис. 4, в, інтенсивність зношування рейок зменшується в середньому на 34 % для досліджуваного діапазону маси вагонів. Відповідно, зі збільшенням концентрації графіту в оливі ресурс рейок зростає на 55 % для вагонів масою 60 т, на 50 % для вагонів масою 70 т і на 43 % для вагонів масою 80 т, як показано на рис. 4, г. Розрахункові значення ресурсу рейок у разі їх мащення чистою оливою (без графіту) складають від 350, 800, 2 000 млн т бруто для вагонів масою 80, 70, 60 т відповідно. Отримані значення близькі до фактичних значень першої частини досліджень – 170...560 млн т бруто для кривих різних радіусів, що говорить про високу достовірність розрахунків за отриманими залежностями.

#### Наукова новизна та практична значимість

Автори вперше виконали систематизацію результатів вимірювань параметрів дефектів рейок у кривих та на цій основі отримали розподіл основних дефектів залежно від радіуса кривої. Також автори вдосконалили математичну модель для розрахунку ресурсу рейок у кривих, яка на відміну від наявних, ураховує товщину мастильної плівки та концентрацію твердої антифрикційної добавки в оливі під час виконання двошарового мащення бокової робочої поверхні рейки.

Отримані результати дозволяють виконувати прогностичні розрахунки ресурсу рейок у кривих ділянках залежно від навантаження від колеса для різних експлуатаційних умов, а саме за сухого контакту колеса з рейкою та в умовах їх двошарового мащення за змінної концентрації графіту в оливі. Реалізація двошарового мащення рейок на залізничному транспорті,

з урахуванням впливу досліджених параметрів, призведе до підвищення ресурсу рейок у кривих на 55, 50 та 45 % за розрахункової маси рухомого складу 60, 70 та 80 т.

#### Висновки

Установлений розподіл основних дефектів та ресурс рейок у кривих ділянках, а також розрахунки за запропонованою удосконаленою математичною моделлю прогнозування ресурсу рейок в умовах їх двошарового мащення дозволили зробити такі висновки:

– домінуючими дефектами рейок у кривих магістральних колій Азербайджанських залізниць є боковий знос та викришування металу на боковій робочій викрутці;

– інтенсивність розвитку вказаних дефектів обмежує ресурс рейок на рівні 170 млн т бруто для кривих 300–600 м; 450 млн т бруто для кривих 600–900 м; 560 млн т бруто для кривих 900–1 200 м, що є недостатнім із точки зору ефективної експлуатації залізниць;

– запропонована математична модель прогнозування ресурсу рейок дозволяє виконувати розрахунки основних характеристик контакту та ресурсу рейок в умовах їх двошарового мащення, яке є найбільш перспективним із точки зору зменшення бокового зносу;

– згідно з виконаними розрахунками, двошарове мащення рейок суттєво підвищує їх ресурс, зі 170 до 350 млн т бруто за нульової концентрації графіту в оливі та до 500 млн т бруто за концентрації 3 %, що підтверджує високу ефективність такого мащення;

– одним із актуальних напрямів подальших досліджень, із точки зору вдосконалення запропонованого методу прогнозування ресурсу рейок, є врахування швидкості руху рухомого складу, тобто врахування впливу динамічних навантажень на характеристики контакту та інтенсивність зношування.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Балановский А. Е. *Конец системы колесо-рельс и вновь начало* : монография. Иркутск : ИрГТУ, 2011. 1010 с.
2. Богданов В. М., Захаров С. М. Современные проблемы системы колесо – рельс. *Железные дороги мира*. 2004. № 1. С. 57–62.

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

3. Воронин С. В., Коростелев Е. Н. Анализ существующих способов уменьшения бокового износа рельсов в паре трения «колесо-рельс» в кривых участках пути. *ІКСЗТ*. 2014. № 3. С. 22–27.
4. Дацишин О. П., Марченко Г. П., Глазов А. Ю. Про поверхневе руйнування головок залізничних рейок. *Наука та прогрес транспорту*. 2017. № 4 (70). С. 41–49. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/109539>
5. Класифікація та каталог дефектів і пошкоджень рейок на залізницях України : ЦП-0285. [Чинний від 2013-02-27 № 050-Ц/од]. Київ : ТОВ «Інпрес», 2013. 194 с.
6. Сосновский Л. А. *Основы трибофатики* : учебн. пособ. : в 2-х т. Гомель : БелГУТ, 2003. Т. 1. 246 с.
7. Фуке Г. И. Адсорбция и смазочная способность масел. *Трение и износ*. 1983. Т. 4. № 3. С. 398–412.
8. Чичинадзе А. В., Хебда М. *Справочник по триботехнике* : в 3 т. Москва : Машиностроение, 1990. Т. 2 : *Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения*. 419 с.
9. Keropyan A., Gorbatiyuk S. Impact of Roughness of Interacting Surfaces of the Wheel-Rail Pair on the Coefficient of Friction in their Contact Area. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 406–410. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.753>
10. Kuziak R., Zygmunt T. A New Method of Rail Head Hardening of Standard- Gauge Rails for Improved Wear and Damage Resistance. *Steel research international*. 2013. Vol. 84. Iss. 1. P. 13–19. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.201200140>
11. Ma L., He C. G., Zhao X. J., Guo J., Zhu Y., Wang W. J., ... Jin X. S. Study on wear and rolling contact fatigue behaviors of wheel/rail materials under different slip ratio conditions. *Wear*. 2016. Vol. 366. P. 13–26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.04.028>
12. Uddin M. G., Chattopadhyay G., Rasul M. Development of effective performance measures for wayside rail curve lubrication in heavy haul lines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F : Journal of Rail and Rapid Transit*. 2014. Vol. 228. Iss. 5. P. 481–495. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409713482678>
13. Voronin S., Hrunyk I., Asadov B., Onopreychuk D. Study of the process of lubricant application on the friction surface using aerosol lubricators. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7. Iss. 4.3. P. 20–24. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19546>
14. Voronin S., Skoryk O., Stefanov V., Onopreychuk D. Study of the predominant defect development in rails of underground systems after preventive grinding and lubrication. *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 116. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711603005>

С. В. ВОРОНИН<sup>1\*</sup>, Б. С. АСАДОВ<sup>2\*</sup>, В. А. СТЕФАНОВ<sup>3\*</sup>, Д. В. ОНОПРЕЙЧУК<sup>4\*</sup>,  
А. А. ГУБИН<sup>5\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Строительные, путевые и погрузочно-разгрузочные машины», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 10 66, эл. почта [voronin.sergey@ukr.net](mailto:voronin.sergey@ukr.net), ORCID 0000-0001-8443-3222

<sup>2\*</sup>Закрывое акционерное общество «Азербайджанские железные дороги», ул. Диляры Алиевой, 230, Баку, Азербайджан, AZ1010, тел. +38 (057) 730 10 72, эл. почта [asadovbs@ukr.net](mailto:asadovbs@ukr.net), ORCID 0000-0002-6475-0623

<sup>3\*</sup>Каф. «Строительные, путевые и погрузочно-разгрузочные машины», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 10 72, эл. почта [vstef@ukr.net](mailto:vstef@ukr.net), ORCID 0000-0002-7947-2718

<sup>4\*</sup>Каф. «Строительные, путевые и погрузочно-разгрузочные машины», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 10 72, эл. почта [dmytroonoprychuk@ukr.net](mailto:dmytroonoprychuk@ukr.net), ORCID 0000-0002-6314-3936

<sup>5\*</sup>Каф. «Строительные, путевые и погрузочно-разгрузочные машины», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 10 72, эл. почта [sash.gubin95@gmail.com](mailto:sash.gubin95@gmail.com), ORCID 0000-0001-8451-5236

## АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ОСНОВНЫХ ДЕФЕКТОВ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА РЕЛЬСОВ В УСЛОВИЯХ СМАЗКИ

**Цель.** Исследование направлено на выявление закономерностей влияния нагрузки на рельс и параметров двухслойной смазки на развитие основных дефектов рельса, а именно - бокового износа в кривых участках железнодорожного пути. **Методика.** Для распределения основных дефектов рельсов использованы результаты экспертных оценок службы пути Азербайджанской железной дороги касательно измерений дефектных параметров и сроков службы рельсов по отдельным участкам. Для установления закономерностей влияния

Creative Commons Attribution 4.0 International  
doi: <https://doi.org/10.15802/stp2020/203112>

© С. В. Воронин, Б. С. Асадов,  
В. О. Стефанов, Д. В. Онопрейчук, О. О. Губин, 2020

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

нагрузки и параметров двухслойной смазки на интенсивность бокового изнашивания рельсов и их ресурс в кривых использованы основные положения механики контактного взаимодействия, трибологии и химмотологии. **Результаты.** Авторы доказали: 1) основными дефектами рельсов в кривых участках пути являются дефекты, связанные с низкой контактно-усталостной прочностью стали и высокими контактными напряжениями и силами трения; 2) согласно полученному распределению, к основным дефектам рельсов в кривых следует относить: боковой износ головки, выкрашивание металла по боковой поверхности, наличие поперечных трещин в головке; 3) использование двухслойной смазки приводит к увеличению фактической площади контакта колеса и рельса, снижению контактного давления на рельс и, в совокупности, к замедлению бокового изнашивания и повышению ресурса рельсов. **Научная новизна.** Авторы впервые провели систематизацию результатов измерений параметров дефектов рельсов в кривых и на этой основе получили распределение основных дефектов в зависимости от радиуса кривой. Также авторы усовершенствовали математическую модель для расчета ресурса рельсов в кривых, которая, в отличие от существующих, учитывает толщину смазочной пленки и концентрацию твердой антифрикционной добавки в масле при проведении смазывания боковой поверхности. **Практическая значимость.** Полученные результаты позволяют выполнять прогнозные расчеты ресурса рельсов в кривых участках в зависимости от нагрузки от колеса для разных эксплуатационных условий, а именно при сухом контакте колеса с рельсом и в условиях их двухслойной смазки. Реализация двухслойной смазки рельсов на железнодорожном транспорте с учетом влияния исследованных параметров приведет к повышению ресурса рельсов в кривых на 55, 50 та 45 % при расчетной массе подвижного состава 60, 70 и 80 т.

**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт; рельс; вагон; колесо; контакт; нагрузка; дефект; боковой износ; ресурс; смазка

S. V. VORONIN<sup>1\*</sup>, B. S. ASADOV<sup>2\*</sup>, V. O. STEFANOV<sup>3\*</sup>, D. V. ONOPREICHUK<sup>4\*</sup>,  
O. O. GUBIN<sup>5\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Construction, Track and Cargo-Handling Machines», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Square, 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 66, e-mail voronin.sergey@ukr.net, ORCID 0000-0001-8443-3222

<sup>2\*</sup>Closed Joint-Stock Company «Azerbaijan Railways», Diliary Aliievoi St., 230, Baku, Azerbaijan, AZ1010, tel. +38 (057) 730 10 72, e-mail asadovbs@ukr.net, ORCID 0000-0002-6475-0623

<sup>3\*</sup>Dep. «Construction, Track and Cargo-Handling Machines», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Square, 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 72, e-mail vstef@ukr.net, ORCID 0000-0002-7947-2718

<sup>4\*</sup>Dep. «Construction, Track and Cargo-Handling Machines», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Square, 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 72, e-mail dmytroonopriychuk@ukr.net, ORCID 0000-0002-6314-3936

<sup>5\*</sup>Dep. «Construction, Track and Cargo-Handling Machines», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Square, 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 72, e-mail sash.gubin95@gmail.com, ORCID 0000-0001-8451-5236

## DEVELOPMENT ANALYSIS OF MAIN DEFECTS AND THEORETICAL FORECAST OF RAIL SERVICE LIFE IN THE CONDITIONS OF LUBRICATION

**Purpose.** The study is aimed at identifying the patterns of the load influence on the rail and the parameters of the two-layer lubrication on the development of the main rail defects, namely, lateral wear in the curved track sections. **Methodology.** To establish the distribution of the main rail defects by type and sections of the track, expert estimates of the track service of the Azerbaijan Railway were used with respect to the results of measurements of defective parameters and rail service life on individual sections. To establish the load influence patterns and the parameters of the two-layer lubrication on the intensity of lateral wear of the rails and their service life in the curves, we used the main provisions of the contact interaction mechanics, as well as tribology and chemmotology. **Findings.** The authors proved: 1) the leading rail defects in the curved track sections are defects associated with low contact fatigue strength of steel, high contact stresses and friction forces along the lateral surface; 2) according to the obtained distribution, the main rail defects in the curves should include: lateral wear of the head, metal shelling along the lateral surface, transverse cracks in the head in the subsurface area; 3) the use of a two-layer lubrication leads to an increase in the actual contact area of the wheel and the rail, a decrease in the contact pressure on the rail, and in aggregate, to a decrease in lateral wear and an increase in the rail service life. **Originality.** The authors first

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

systematized the results of measurements of the rail defects parameters in curves and, on this basis, obtained a distribution of the main defects depending on the curve radius. The authors improved the mathematical model for calculating the service life of rails in curves, which, unlike the existing ones, takes into account the thickness of the lubricating film and the concentration of the solid anti-friction additive in the oil when lubricating the lateral surface. **Practical value.** The obtained results allow us to perform predictive calculations of the rail service life in curved sections depending on the load from the wheel for different operating conditions, namely, with dry contact of the wheel with the rail and in the conditions of their two-layer lubrication. The implementation of two-layer lubrication in railway transport, taking into account the influence of the studied parameters, will lead to an increase in the rail service life in the curves by 55%, 50% and 45% with an estimated rolling stock mass of 60, 70 and 80 tons.

**Keywords:** railway transport; rail; car; wheel; contact; load; defect; lateral wear; resource; lubrication

## REFERENCES

1. Balanovskij, A. E. (2011). *Konec sistemy koleso-rel's i vnov' nachalo*: monohrafiia. Irkutsk: Irkutsk State Technical University. (in Russian)
2. Bohdanov, V. M., & Zakharov, S. M. (2004). Sovremennyye problemy sistemy koleso–rels. *Zheleznye dorogi mira*, 1, 57-62. (in Russian)
3. Voronin, S. V., & Korostelyov, J. M. (2014). The analysis of existing methods of horizontal wear reduction in «wheel-rail» friction pair on curved tracks. *Railway transport information and control systems*, 3, 22-27. (in Russian)
4. Datsyshyn, O. P., Marchenko, G. P., & Glazov, A. Y. (2017). About superficial destruction of heads of railway rails. *Science and transport progress*, 4(70), 41-49. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/109539> (in Russian)
5. *Klasyfikatsiia ta katalog defektiv i poskodzhen reiok na zaliznytsiakh Ukrainy: TsP-0285, № 050-Ts/od*. (2013). Kyiv. (in Ukrainian)
6. Sosnovskij, L. A. (2003). *Osnovy tribofatiki*. T. 1: Navchalnyi posibnyk. Gomel: Belarusian State University of Transport. (in Russian)
7. Fuks, G. I. (1983). Adsorbciya i smazochnaya sposobnost masel. *Trenie i iznos*, 4(3), 398-412. (in Russian)
8. Chichinadze, A. V., & Khebda, M. (1990). *Spravochnik po tribotekhnike. T.2 : Smazochnye materialy, tehnika smazki, opory skolzheniya i kacheniya*. Moscow: Mashinostroenie. (in Russian)
9. Keropyan, A., & Gorbatyuk, S. (2016). Impact of Roughness of Interacting Surfaces of the Wheel-Rail Pair on the Coefficient of Friction in their Contact Area. *Procedia Engineering*, 150, 406-410. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.753> (in English)
10. Kuziak, R., & Zygmunt, T. (2012). A New Method of Rail Head Hardening of Standard-Gauge Rails for Improved Wear and Damage Resistance. *Steel Research International*, 84(1), 13-19. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.201200140> (in English)
11. Ma, L., He, C. G., Zhao, X. J., Guo, J., Zhu, Y., Wang, W. J., ... Jin, X. S. (2016). Study on wear and rolling contact fatigue behaviors of wheel/rail materials under different slip ratio conditions. *Wear*, 366-367, 13-26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.04.028> (in English)
12. Uddin, M. G., Chattopadhyay, G., & Rasul, M. (2013). Development of effective performance measures for wayside rail curve lubrication in heavy haul lines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 228(5), 481-495. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409713482678> (in English)
13. Voronin, S., Hrunyk, I., Asadov, B., & Onoprychuk, D. (2018). Study of the process of lubricant application on the friction surface using aerosol lubricators. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.3), 20-24. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19546> (in English)
14. Voronin, S., Skoryk, O., Stefanov, V., & Onoprychuk, D. (2017). Study of the predominant defect development in rails of underground systems after preventive grinding and lubrication. *MATEC Web of Conferences*, 116, 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711603005> (in English)

Надійшла до редколегії: 25.11.2019

Прийнята до друку: 27.03.2020

UDC 625.46:625.14-044.342:[519.145]

V. JOVER<sup>1\*</sup>, L. GASPAR<sup>2\*</sup>, S. FISCHER<sup>3\*</sup><sup>1\*</sup>Dep. «Transport Infrastructure and Water Resources Engineering», Szechenyi Istvan University, Egyetem Sq., 1, Gyor, Hungary, 9026, tel. +36 (96) 61 35 44, e-mail vivi.jover@gmail.com, ORCID 0000-0003-4593-853X<sup>2\*</sup>Institute of Transport Sciences Ltd (KTI), Than Karoly St., 3-5, Budapest, tel. +36 (1) 37 19 36, e-mail gaspar@kti.hu, ORCID 0000-0002-0574-4100<sup>3\*</sup>Dep. «Transport Infrastructure and Water Resources Engineering», Szechenyi Istvan University, Egyetem Sq., 1, Gyor, Hungary, 9026, tel. + 36 (96) 61 35 44, e-mail fischersz@sze.hu, ORCID 0000-0001-7298-9960

## INVESTIGATION OF GEOMETRICAL DETERIORATION OF TRAMWAY TRACKS

**Purpose.** The authors' aim is to demonstrate their results of analysis of deterioration of tramway tracks' geometry. **Methodology.** This article is a start of a PhD research. At first, the superstructure systems and the used instrument were summarized, after that the examination of running track, tramway stops, crossings and turnouts. **Findings.** The authors examined separately the running track, tramway stops, level crossings and turnouts. In case of examination of running track, we evaluated the measurement results according to two methods. To clarify the superstructure systems' deterioration factor the authors had to do further measurements on other tramway lines too. **Originality.** The fulfilled analysis is the first step to the complex method that can consider and determine the optimisation of life-cycle costs of tramway superstructures. For this goal a lot of parameters, factors have to be taken into consideration in the future. There are available methods and models for different civil engineering areas, e.g. there is very complex methodology related to road pavements, but there is no special one related neither to railway tracks, nor tramway tracks. **Practical value.** The authors tried to construct a calculation and evaluation method that can assess the examined 6 different tramway superstructure types on the tramway line No. 1 in Hungarian capital (Budapest). It is a very new reconstructed tramway line that is the second longest one in Budapest. The authors showed which type of superstructure system is the «best» and the «worst» based on own made measurements and calculation-evaluation methods. The next aim of the authors is to start a PhD research in the Multidisciplinary Doctoral School at Szechenyi Istvan University (Győr, Hungary) with the continuation of this topic.

**Keywords:** superstructure systems; deterioration; geometrical analysis; tramway; assessment

### Purpose

The aim of this paper is to demonstrate research results related to analysis of deterioration of tramway tracks' geometry. This paper deals with the 7 different superstructure systems in Hungary, and with these deteriorations in a chosen tramway line.

This research is our first step to diagnose the several superstructure systems' life cycle cost managements.

This paper is based on the MSc thesis of V. Jóvér (one of the authors of this article) [5], the defense was in 2020 February. She would like to start her PhD study in 2020 September with the topic of «Optimisation of life-cycle costs of tramway superstructures».

The authors made a short literature review related to life time engineering and life cycle cost calculation [4], tramway tracks' superstructure types [3], calculation of vertical deformation of railway

tracks [2, 8], as well as turnouts [6, 10, 11, 12, 13, 14, 15] and crossings [1]. In the following the author summarize the relevant point from them.

Kurhan [8] analysed the processes of emergence and development of irregularities in the area of unequal vertical elasticity of railway track using mathematical modelling. He adopted model consists of a wheel set moving on inertia-free beam and resting on individual supports. It is described by Lagrange differential equations. The work introduced the hypothesis that the level of permanent strain is distributed in proportion to the dynamic deflection derivative. In [2] Kurhan investigated an entropy based deformation (accumulative) calculation method for railway tracks. These are very important in the area of tramway tracks, too, mainly for ballasted types tramway tracks, too, mainly for ballasted types.

In tramway tracks there are a lot of special turnouts. The literature [6, 10, 11, 12, 13, 14, 15] investigated the turnouts, mainly the common crossings

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

and the frogs, as well as frog noses. The research team applied mainly dynamic measurements techniques that are important in case of tramway tracks, too. They dealt with the material, geometry, traffic loading, etc. of special elements in turnouts. In Hungary according to tramway tracks, turnouts constructed with Vignol and grooved rail profiles are applied [7].

In case the level crossings are investigated, there is an interested article [1]. In [1] the authors performed statistical analysis showed a steady trend of growth of inequalities in the area of the railway crossings. Generally, the level of inequalities in the vertical plane increases in 1.3-3.2 times and in 1.2-2.0 times in the horizontal plane (compared with areas that are outside crossing). During the deflection lines of action in the area of railroad crossing concrete slabs work as ribs that limit deflections of rail-tie grating. When placing the wheels of the bogie before (or after) and within crossing the calculated modulus of elasticity under the rail base, brought to the point of wheels contact can vary up to 3 times.

Gáspár et al. [4] introduced the main factors related to lifetime of different transport infrastructure elements (road pavements, railway tracks and bridges). There are many factors that influence the real and prognosed lifetime, e.g. plans, traffic types and modes, construction method, materials, maintenance, environment, etc.

### Methodology

The invention of electricity has taken a huge turn in development of public transport. The first Hungarian tramway was opened in Budapest (capital of Hungary) in 1887, it was only one kilometer long. Since then the public transport organizations which build in the tramways are constantly developing.

In case of tramways, 7 different superstructure systems (types) can be differentiated in Hungary. They are chosen for each project, depending on factors such as the installation site, the track closure and the geometric characteristics. The 7 types are the following:

- ballasted track (Fig. 1-2);
- concreted ballasted track (Fig. 3-4);
- concrete slab track (Fig. 5-6);
- ESCRБ I. track system track (ESCRБ means elastically supported continuous rail bedding

system, in Hungarian RAFS abbreviation is applied) (Fig. 7-8);

- ESCRБ II. track system (Fig. 9-10);
- ESCRБ III. track system (Fig. 11-12);
- «large slab» («big panel») superstructure (Fig. 13-14) [7].

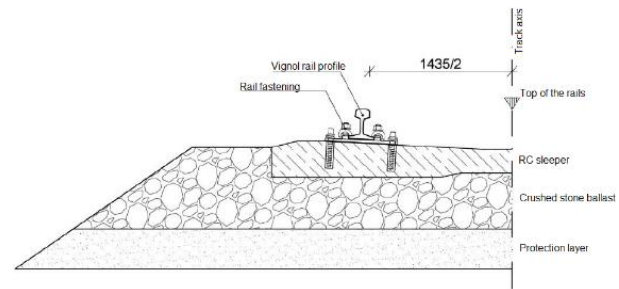


Fig. 1. Cross-section of ballasted track [7]

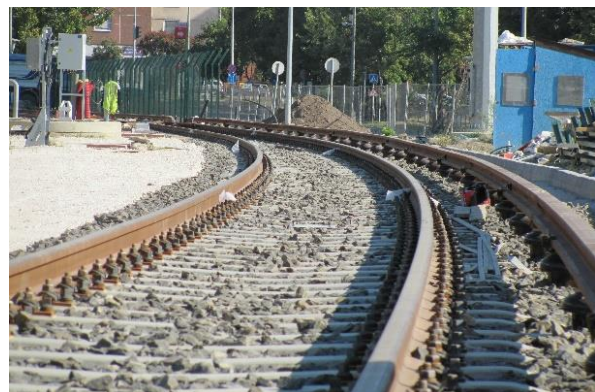


Fig. 2. Ballasted track superstructure

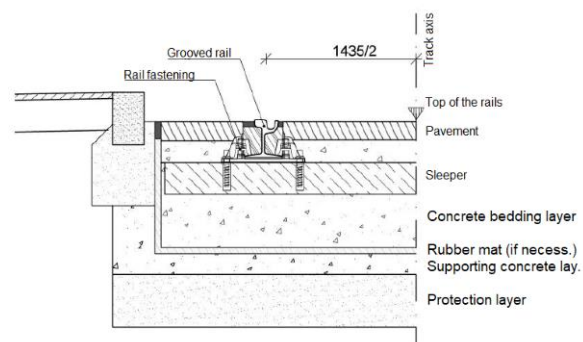


Fig. 3. Cross-section of concreted ballasted track [7]



## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ



Fig. 4. Concreted ballasted track superstructure during construction

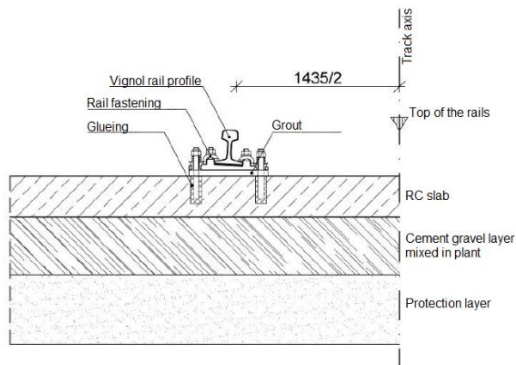


Fig. 5. Cross-section of concrete slab track [7]



Fig. 6. Concrete slab track during construction

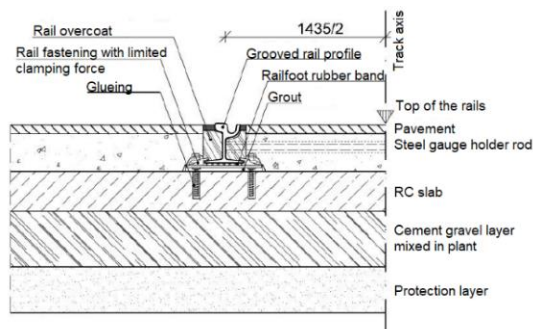


Fig. 7. Cross-section of ESCR I track system [7]



Fig. 8. ESCR I track system during construction

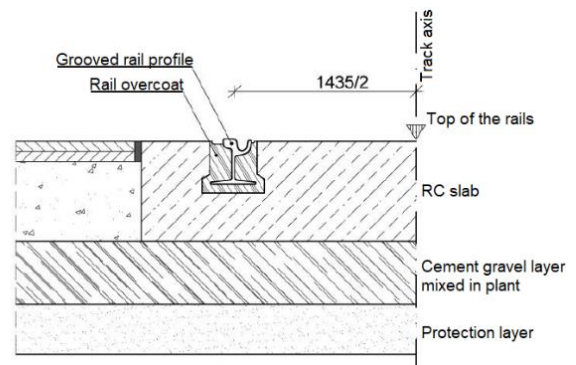


Fig. 9. ESCR II track system [7]



Fig. 10. ESCR II track system during construction



## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

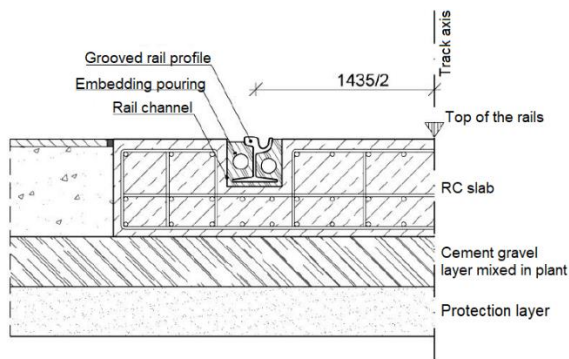


Fig. 11. Cross-section of ESCRБ III. track system [7]



Fig. 12. ESCRБ III. track system

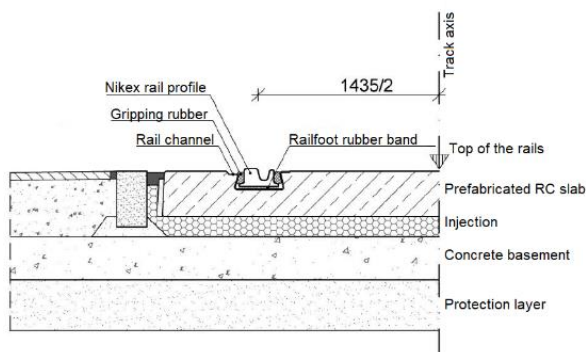


Fig. 13. Cross-section of «large slab» («big panel») superstructure [7]



Fig. 14. «Large slab» superstructure

The aim of the authors' research was to investigate all the varieties (types) of tramway superstructure systems in Hungary. The most important task during choosing the right tramway line (or track) for the analysis was equal allowable load and the more varieties of superstructure systems at the same tramway. The authors selected the tramway line No. 1 in the Hungarian capital (Budapest) where six different types of tramway superstructure systems were able to be investigated.

The tramway line No. 1 in Budapest was built for several years, applied the most modern technical upgrades. The tramway was completed in 2019 and became the longest tramway line in Budapest. It is 18.2 kilometers long and contains 32 tramway stops, 35 crossings and 22 turnouts.

#### Tramway tracks' geometry measurements

Geometrical measurements were executed in the right track at nights, between 0:30 AM and 3:30 AM with TrackScan 4.01 instrument (see Fig. 15). This instrument can measure the following parameters simultaneously:

- track gauge;
- flange gauge;
- superelevation;
- direction;
- settlement;
- length of the railway section;
- twist [9].

The authors were able to evaluate the measurement data with TrackScan Desktop software where they applied the so called «B – maintenance limit» category in accordance with Hungarian regulations related to tramway tracks.

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

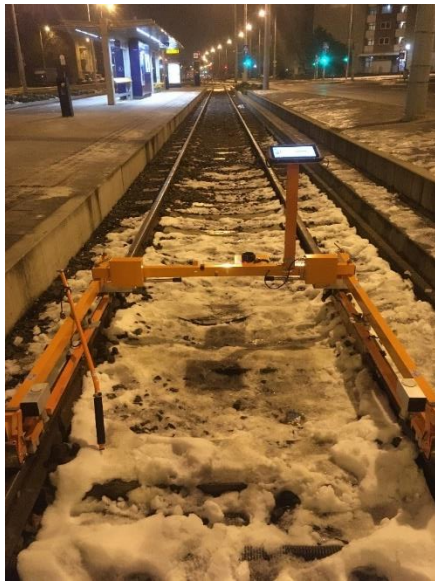


Fig. 15. TrackScan 4.01 Instrument

**Examination of deterioration of superstructure systems**

To evaluate the measurement data, a subjective scoring system was made with the following parameters:

- the type of the default;
- the length of the default;
- geometric characteristics;
- the length of superstructures;
- speed of trams;
- load of trams;
- unit costs;
- life-span.

Connecting to these parameters the authors have assigned so called «weights», from which they were able to calculate the «deterioration factor». The higher the deterioration factor of a superstructure system, the more intense, faster the track geometric deterioration.

**Examination of running track**

The evaluation of measurement data of running track manifested 140 defaults, they were the followings (Fig. 16):

- broadening of track gauge;
- narrowing of track gauge;
- twist;
- superelevation.

After the evaluation the authors had to check the length of defaults. In many cases, the appearance of local defaults was caused by contaminated of grooved rail profiles.

In case of superelevation defaults two cases had to be considered:

- the final tramway geometry plans do not contain superelevation values but the measurement results exceed the «B – maintenance limit» values, or
- the final tramway geometry plans contain superelevation values but the measurement results also exceed the «B – maintenance limit» values.

The authors assessed the measurement results of running track according to two methods detailed in the «Findings» Chapter.

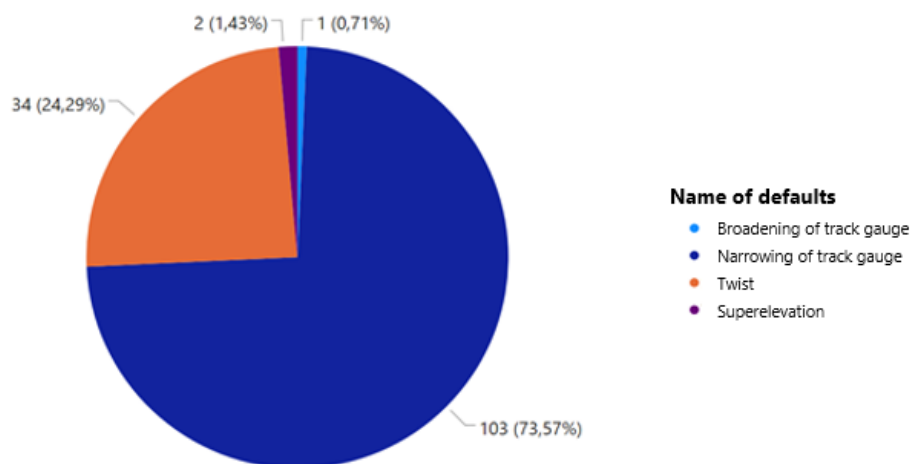


Fig. 16. The occurrence of defaults, as measured by «B – maintenance limit»

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

## Findings

In this Chapter the authors summarize the results of the investigation related to the different calculation and evaluation methods.

**Evaluation of measurement results – case #1**

According to the case #1 the authors applied the following parameters:

- the type of the default;
- geometric characteristics;
- the length of superstructures;
- speed of trams;
- load of trams;
- unit costs;
- life-span.

In this case instead of the length of the default the total length of each superstructure system to the number of defaults they contain was considered and compared.

Using the subjective scoring system, the results are shown in Fig. 17. Figure 17 shows the percentage of the deterioration factors of the various superstructure systems. The benchmark is based on the most common superstructure system on the tramway line which is grooved rail profile, ESCRБ on RC slab, with asphalt pavement. Its deterioration factor is 100% (see Fig. 17). It seems the deterioration of the superstructure type with Vignol 48 rail profile, crushed stone ballast, and concrete sleepers is outstanding. The type of the defaults is mostly narrowing of the track gauge.

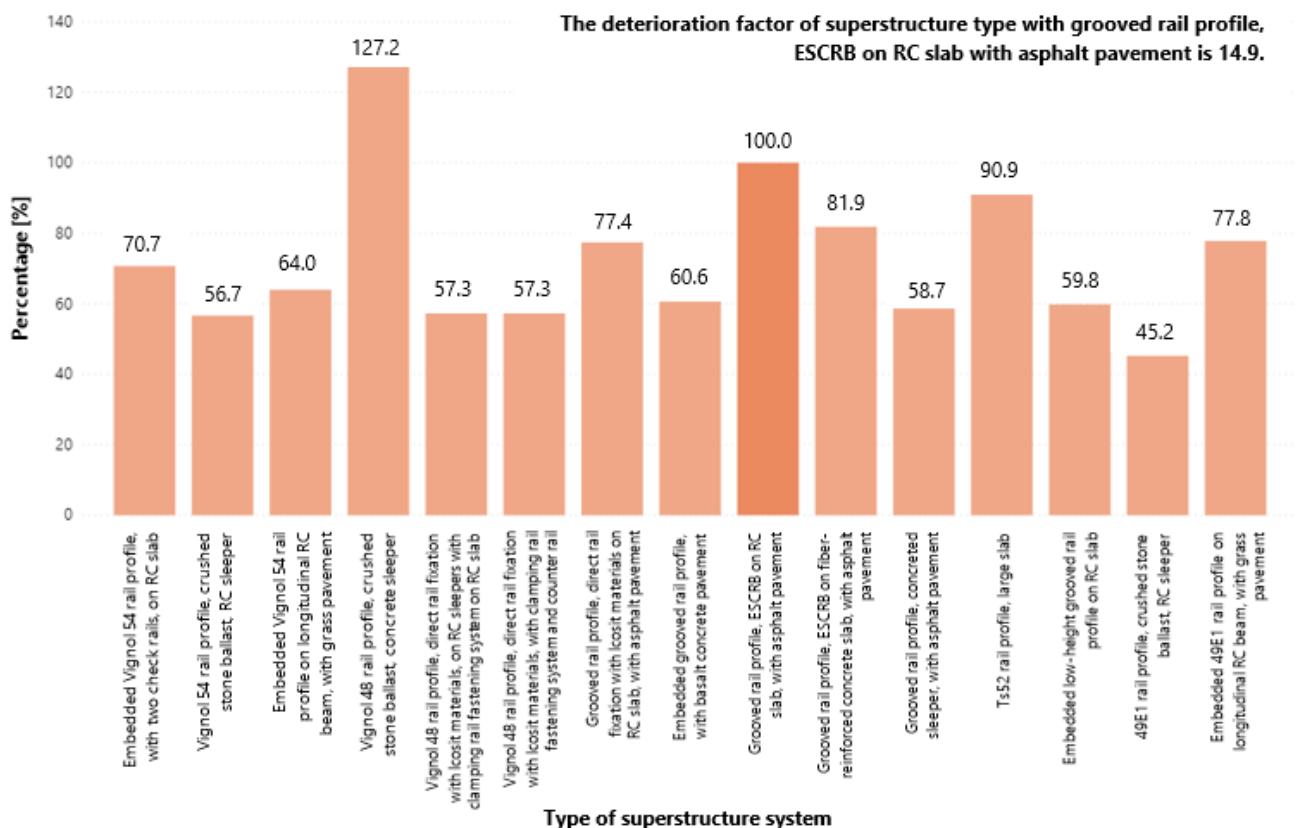


Fig. 17. The percentage of deterioration factors relative to each other – first version

**Evaluation of measurement results – case #2**

According to the case #2 the authors applied the parameters below:

- the type of the default;
- the length of the default;

- geometric characteristics;
- speed of trams;
- load of trams;
- unit costs;
- life-span.

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

In this case instead of the length of the superstructures the authors considered the length of the defaults as follows:

$$\frac{\text{maximum default value} \times \text{length of the default}}{\text{total length of the given superstructure system}}$$

The analysis of the measurement results shows that as in case #1, the deterioration of the superstructure type constructed with Vignol 48 rail profile, crushed stone ballast, and concrete sleepers has the highest value – 14% higher than the benchmark grooved rail profile, ESCRB on RC slab, with asphalt pavement superstructure system (Fig. 18).

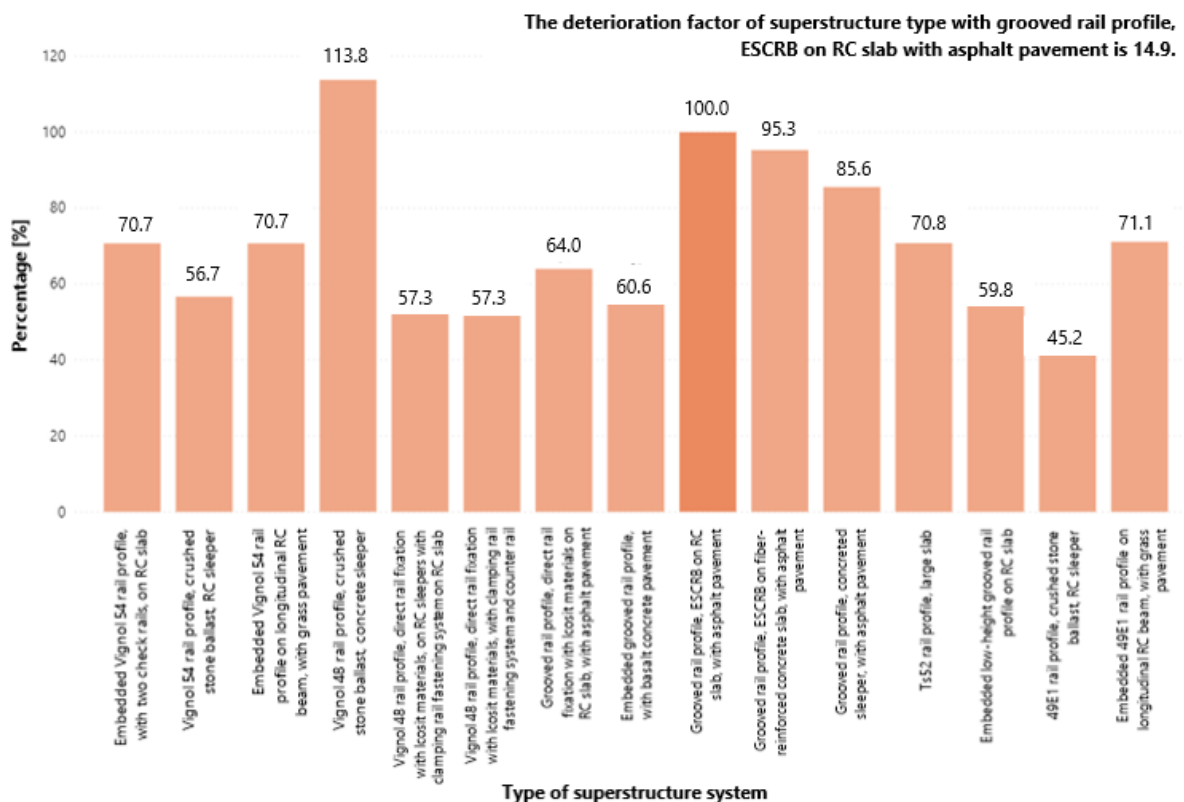


Fig. 18. The percentage of deterioration factors relative to each other – second version

Comparing the results from cases #1 and #2, it is noticeable that by modifying the parameters, the values of deterioration factors for each superstructure system have also been modified (Fig. 19). This can be explained by the fact that these superstructure system types are only found in small lengths over the entire tramway line, but many defaults have occurred since they were constructed.

It is also important to investigate the deterioration of different types of superstructure systems as

a function of elapsed time. The authors' measurements indicate a specific date and there isn't other measurement date since the construction, in this way the relationship between deterioration of superstructure system and elapsed time since construction is not able to be assessed, yet. The authors assume that in practice this relation would produce an exponential function that accelerates in time – but they have to prove this by further measurements, calculations, investigations and evaluations.



## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

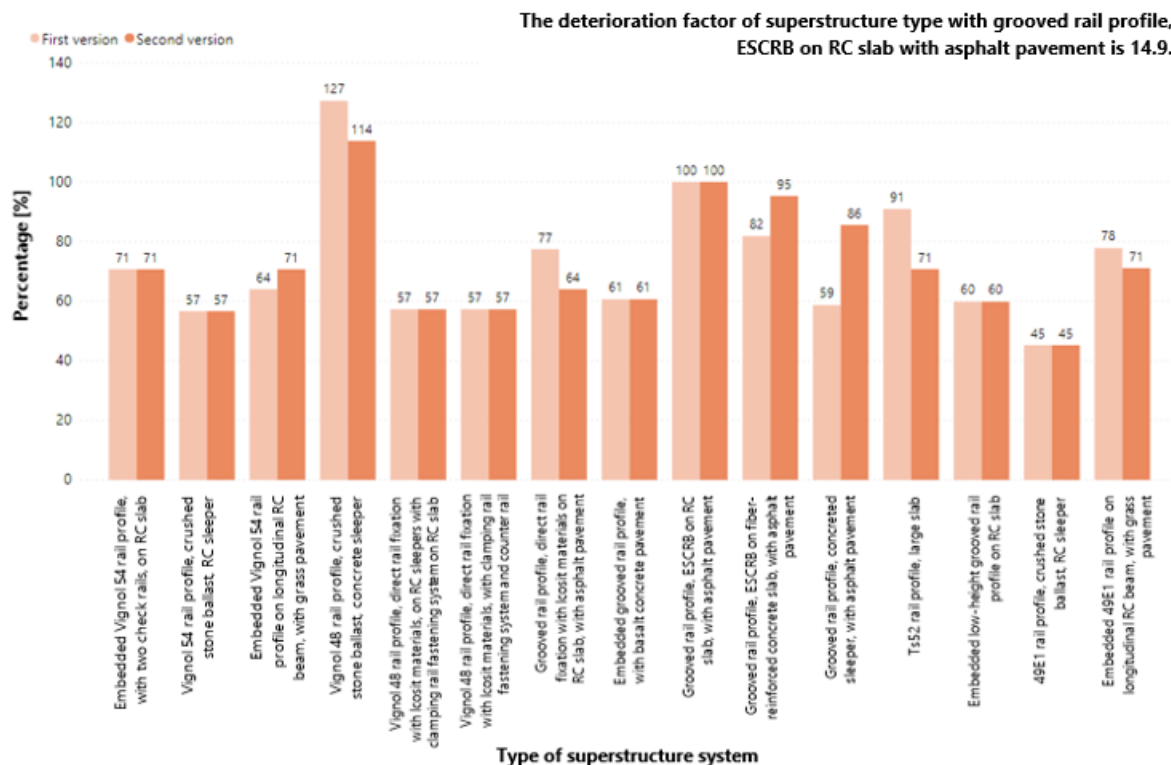


Fig. 19. The percentage of deterioration factors relative to each other – first and second version

### Evaluation of superelevation values

In case of superelevation defaults two cases had to be examined:

- the final tramway geometry plans do not contain superelevation values but the measurement results exceed the «B – maintenance limit» values, or
- the final tramway geometry plans contain superelevation values but the measurement results also exceed the «B – maintenance limit» values.

Based on the analysis of the results the authors noticed that superelevation defaults appeared at considerable lengths where the values should be 0 mm.

The ratio of the length of the given superstructure system to the superelevation defaults on that is also evaluated. This value is compared to the average of the deterioration factors (average of cases #1 and #2), it should be noticed that the deterioration of the superstructure type with grooved rail profile, direct rail fixation with Icosit materials on RC slab, with asphalt pavement is outstanding (Fig. 20).

### Examination of tramway stops

Related to the evaluation of tramway stops the authors used the following parameters:

- geometric characteristics;
- speed of trams;
- load of trams;
- unit costs;
- life-span.

Furthermore, the cumulate lengths of platforms with the same superstructure system were examined and they were compared to the cumulate number of defaults they contain.

Using the subjective scoring system, it should be noticed that the deterioration of the superstructure type with Vignol 48 rail profile, crushed stone ballast, as well as concrete sleepers is outstanding – as in the case of running track (Fig. 21). The benchmark is based on the most common superstructure system on the tramway line which is grooved rail profile, ESCRБ on RC slab, with asphalt pavement. Its deterioration factor is 100%.

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

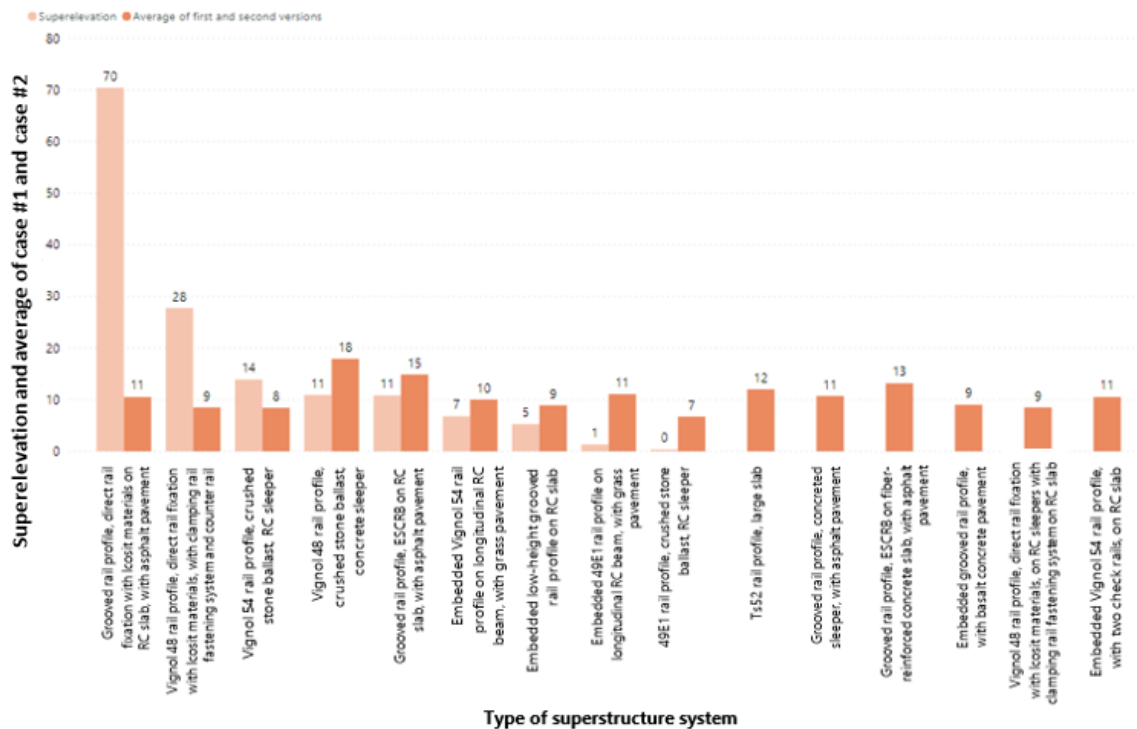


Fig. 20. The joint analysis of length of superelevation defaults and average of first and second versions' deterioration factors

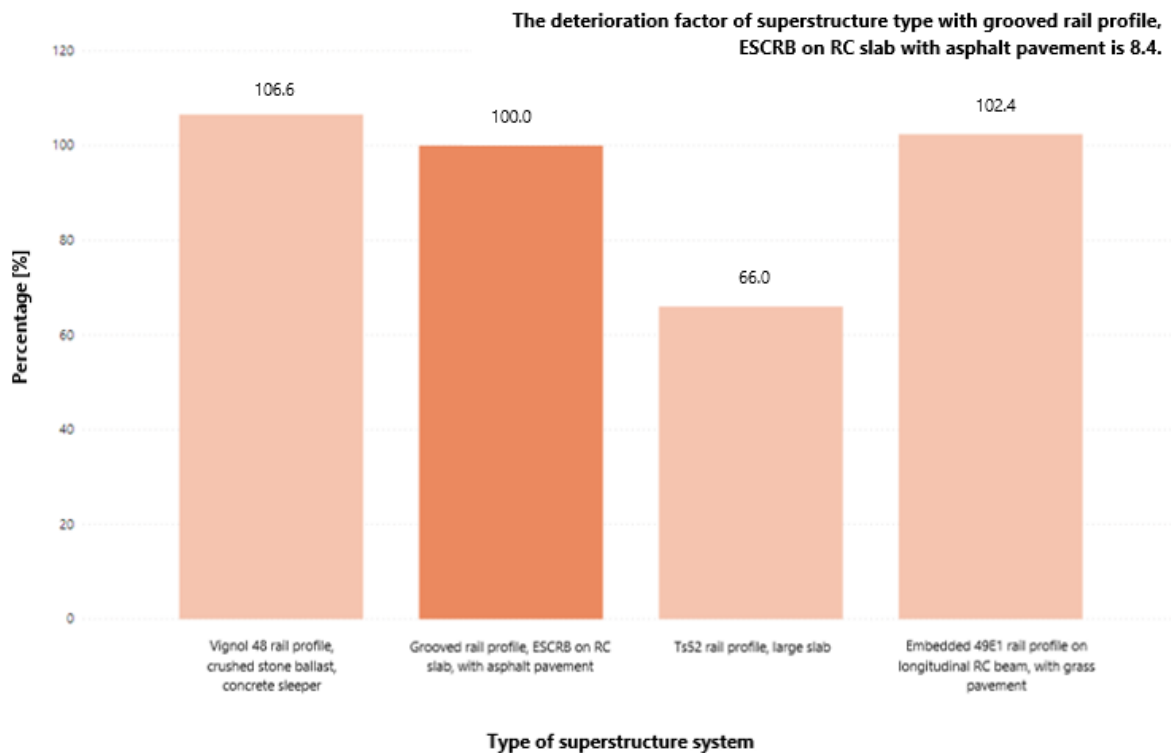


Fig. 21. The percentage of deterioration factors relative to each other at tramway stops

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

**Examination of level crossings**

Related to the evaluation of level crossing the authors used the following parameters:

- geometric characteristics;
- speed of trams;
- load of trams;
- unit costs;
- life-span.

Furthermore, the authors examined the cumulate lengths of crossings with the same superstructure system and then compared it to the cumulate number of defaults they contain.

The results show that the deterioration of the grooved rail profile, ESCRБ on RC slab, with asphalt pavement superstructure system is outstanding (Fig. 22.). In this case, the benchmark is the grooved rail profile, ESCRБ on RC slab, with basalt concrete pavement superstructure system.

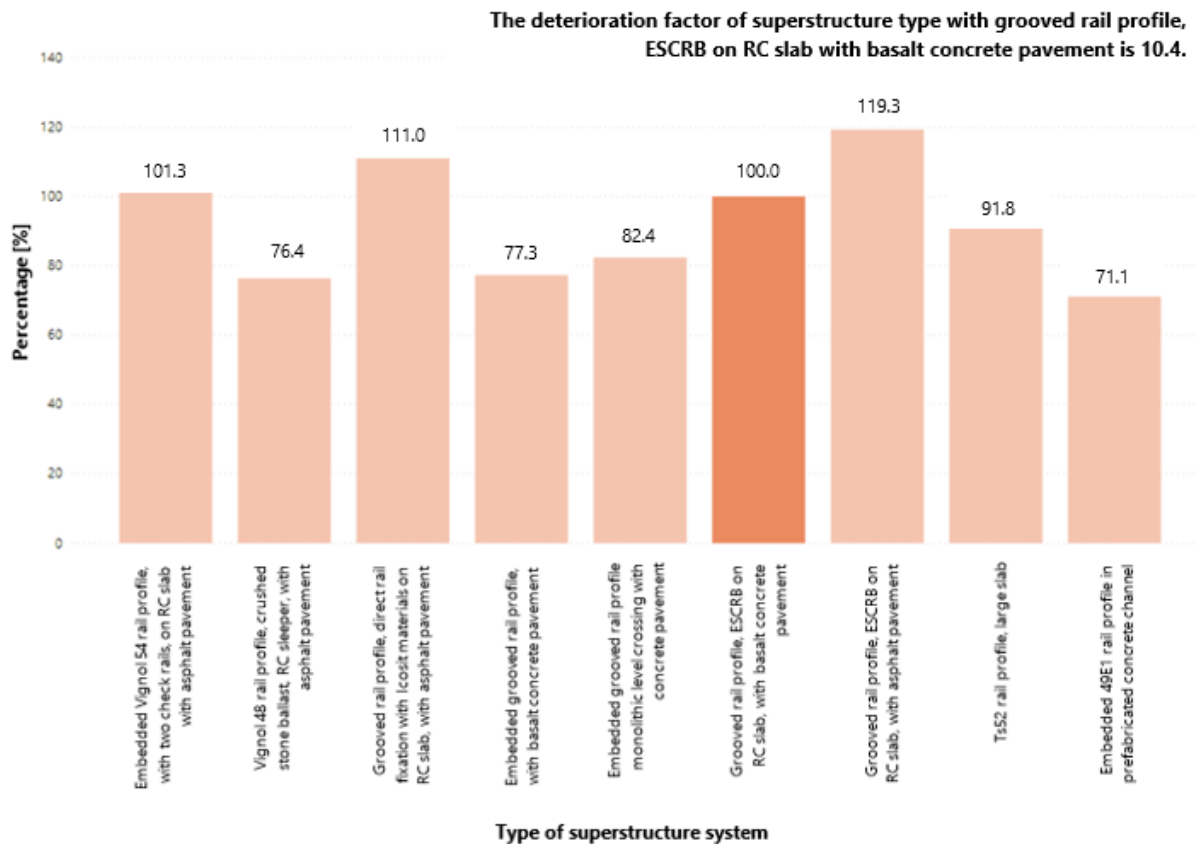


Fig. 22. The percentage of deterioration factors relative to each other – in level crossings

**Examination of turnouts**

The tramway line No. 1 in Budapest contains 22 pieces of turnouts in the right track, with both grooved and Vignol rail profiles.

Generally, they are in good condition, only two of them has superelevation defaults. In the first case, the Phoenix 50/50 type turnout has 13.7 mm superelevation default value on average. In the second case, the B48 100/100e type turnout has 10.5 mm superelevation default value on average.

**Originality and practical value**

The authors investigated the deterioration of tramway track geometry based on example of tramway line No. 1 in Hungarian capital, Budapest. This tramway line was reconstructed in the past few years and it contains 6 different superstructure types from the 7, that can be applied in Hungary [7].

Because of this tramway line works with the highest tram traffic in Budapest, as well as the superstructures are relatively new, geometric meas-



## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

urements were executed on the whole line in November and December 2019. The measurement instrument was a Trackscan apparatus [9]. Based on the measurements the authors made calculations and assessments according to two cases (#1 and #2). They considered not only the running tracks, but the tramway stops, level crossings, as well as the turnouts, too.

In the analyses several parameters were taken into consideration, e.g. the type of the default, geometric characteristics, the length of superstructures, speed of trams, load of trams, unit costs, and lifespan. The authors calculated deterioration factors according to the previous parameters and made evaluations where they compared the different tramway superstructure types in running tracks, tramway stops, level crossings, turnouts.

The authors determined – according to their measurements and calculations – that the 49E1 rail profile, crushed stone ballast, RC sleeper type superstructure is almost the ‘best’ and the Vignol 48 & rail profile, crushed stone ballast, and concrete

sleepers type superstructure is the «worst» for construction tramway tracks using a subjective scoring system.

The observation of geometrical deterioration of tramway tracks’ is a very important part of the railway tracks’ maintenance procedure. Because of it, the knowledge has to be improved and as many methods as possible has to be applied to learn more about tramway’s deterioration.

To clarify the superstructure systems’ deterioration factor the authors have to execute further measurements on other tramway lines, too. They can be Hungarian tramway lines, as well as examples from abroad.

The next aim is to sentence research plan related to one of the authors (Vivien Jóvér), and start her PhD research at Széchenyi István University (Hungary). Hopefully, she can submit her dissertation in 2024 or 2025.

### Acknowledgements

The publishing of this paper was supported by EFOP 3.6.1-16-2016-00017 project.

### LIST OF REFERENCE LINKS

1. Курган М. Б., Курган Д. М., Лужицкий О. Ф. Дослідження нерівностей колії в межах залізничних переїздів. *Наука та прогрес транспорту*. 2015. № 5 (59). С. 84–96. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/55341>
2. Курган Д. М. Моделирование накопления деформаций железнодорожной колее на основе энтропии системы. *Наука та прогрес транспорту*. 2015. № 4 (58). С. 99–109. DOI: <https://doi.org/10.15802/STP2015/49215>
3. Case studies in railway construction. Modern tramway superstructures. URL: [http://www.sze.hu/~fischersz/Education/Case%20studies%20in%20railway%20construction/CSRC\\_Topic%20006\\_Modern%20tramway%20superstructures.pdf](http://www.sze.hu/~fischersz/Education/Case%20studies%20in%20railway%20construction/CSRC_Topic%20006_Modern%20tramway%20superstructures.pdf) (date of access 14.01.2020).
4. Gáspár L., Horvát F., Lublóy L. *Közlekedési létesítmények élettartama*. Universitas-Győr Nonprofit Kft. Győr, 2011, 324 p.
5. Jóvér V. Közúti vasúti felépítmény-szerkezetek komplex elemzése. MSc thesis. Széchenyi István Egyetem. Győr, 2019. 82 p. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16467.53284>
6. Kovalchuk V., Sysyn M., Gerber U., Nabochenko O., Zarour J., Dehne S. Experimental investigation of the influence of train velocity and travel direction on the dynamic behavior of stiff common crossings. *Facta Universitatis. Series : Architecture and Civil Engineering*. 2019. № 3 (17). P. 345–356. DOI: <https://doi.org/10.22190/FUME190514042K>
7. Közúti vasúti infrastruktúra tervezési irányelvek. URL: [https://static.bkv.hu/ftp/ftp/fajlok/sarga\\_konyv/15.pdf](https://static.bkv.hu/ftp/ftp/fajlok/sarga_konyv/15.pdf) (date of access 14.01.2020).
8. Kurhan D. M. Modeling of development vertical deformation of railway track. *Наука та прогрес транспорту*. 2016. № 1 (61). P. 100–108. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/61003>
9. Metalelektro Railway Diagnostic. Track Geometry Measurement. URL: <https://www.metalelektro.eu/track-geometry> (date of access 14.01.2020).
10. Sysyn M., Nabochenko O., Gerber U., Kovalchuk V., Petrenko O. Common crossing condition monitoring with on board inertial measurements. *Acta Polytechnica*. 2019. Vol 4. Iss. 59. P. 423–434. DOI: <https://doi.org/10.14311/AP.2019.59.0423>

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

11. Sysyn M., Gerber U., Nabochenko O., Kovalchuk V. Common crossing fault prediction with track based inertial measurements: statistical vs. mechanical approach. *Pollack Periodica*. 2019. Vol. 2. Iss. 14. P. 15–26. DOI: <https://doi.org/10.1556/606.2019.14.2.2>
12. Sysyn M., Kluge F., Gruen D., Kovalchuk V., Nabochenko O. Experimental analysis of rail contact fatigue damage on frog rail of fixed common crossing 1:12. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2019. Vol. 21. Iss. 19. P. 1077–1092. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11668-019-00696-w>
13. Sysyn M. Improvement of inspection system for common crossings by track side monitoring and prognostics. *Structural Monitoring and Maintenance*. 2019. Vol. 3. Iss. 6. P. 219–235. DOI: <https://doi.org/10.12989/smm.2019.6.3.219>
14. Sysyn M., Gerber U., Nabochenko U., Li Y., Kovalchuk V. Indicators for common crossing structural health monitoring with track-side inertial measurements. *Acta Polytechnica*. 2019. Vol. 2. Iss. 59. P. 170–181. DOI: <https://doi.org/10.14311/AP.2019.59.0170>
15. Sysyn M., Gerber U., Kluge F., Nabochenko O., Kovalchuk U. Turnout remaining useful life prognosis by means of on-board inertial measurements on operational trains. *International Journal of Rail Transportation*. 2019. P. 1–23. DOI: <https://doi.org/10.1080/23248378.2019.1685918>

В. ЙОВЕР<sup>1\*</sup>, Л. ГАСПАР<sup>2\*</sup>, С. ФІШЕР<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Інфраструктура транспорту та гідротехніка», Університет Іштвана Сечені, пл. Університетська, 1, Дьєр, Угорщина, 9026, тел. +36 (96) 61 35 44, ел. пошта [vivi.jover@gmail.com](mailto:vivi.jover@gmail.com), ORCID 0000-0003-4593-853X

<sup>2\*</sup>ТОВ «Інститут транспортних наук», вул. Тан Кароли, 3-5, Будапешт, Угорщина, тел. +36 (1) 37 19 36, ел. пошта [gaspar@kti.hu](mailto:gaspar@kti.hu), ORCID 0000-0002-0574-4100

<sup>3\*</sup>Каф. «Інфраструктура транспорту та гідротехніка», Університет Іштвана Сечені, пл. Університетська, 1, Дьєр, Угорщина, 9026, тел. + 36 (96) 61 35 44, ел. пошта [fischersz@sze.hu](mailto:fischersz@sze.hu), ORCID 0000-0001-7298-9960

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПОГІРШЕННЯ ГЕОМЕТРІЇ ТРАМВАЙНИХ КОЛІЙ

**Мета.** Основною метою статті є демонстрація результатів аналізу погіршення геометрії трамвайних колій. **Методика.** Ця стаття є часткою дослідження в рамках кандидатської дисертації. Спочатку були узагальнені системи верхньої будови колії та інструменти, використані під час роботи, після чого була проведена перевірка колії, зупинок трамвая, перетинів колій і стрілочних переводів. **Результати.** Автори провели дослідження окремої трамвайної колії, зупинок трамвая, переїздів та стрілочних переводів. Під час дослідження колії оцінювали результати вимірювань відповідно до двох методик. Для визначення фактора зносу систем верхньої будови колії провели додаткові вимірювання також на інших трамвайних лініях. **Наукова новизна.** Виконаний аналіз є першим кроком складної методики, яку використовують під час розгляду й оптимізації витрат життєвого циклу верхньої будови трамвайної колії. Для досягнення цієї мети існує багато параметрів, факторів, які необхідно взяти до уваги в майбутньому. Наявні методи й моделі, які використовують у різних галузях цивільного будівництва, наприклад, дуже складна методика, пов'язана з дорожнім покриттям; але не існує спеціальної методики, що стосується залізничних або трамвайних колій. **Практична значимість.** Автори спробували розробити методику розрахунку й оцінки, за допомогою якої можна оцінити 6 різних типів верхньої будови трамвайної колії на лінії № 1 в столиці Угорщини (Будапешт). Це найновіша реконструйована трамвайна лінія, друга за довжиною в Будапешті. Визначили, який тип системи верхньої будови колії є «найкращим» і «найгіршим» на основі власних вимірювань і методів розрахунку та оцінки. Проведене дослідження авторів ляже в основу написання кандидатської дисертації в багатопрофільній аспірантурі при Університеті Іштвана Сечені (Дьєр, Угорщина).

**Ключові слова:** системи верхньої будови колії; погіршення; геометричний аналіз; трамвайні лінії; оцінка

В. ЙОВЕР<sup>1\*</sup>, Л. ГАСПАР<sup>2\*</sup>, С. ФІШЕР<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Інфраструктура транспорта и гидротехника», Университет Иштвана Сечени, пл. Университетская, 1, Дьєр, Венгрия, 9026, тел. +36 (96) 61 35 44, эл. почта [vivi.jover@gmail.com](mailto:vivi.jover@gmail.com), ORCID 0000-0003-4593-853X

<sup>2\*</sup>ООО «Институт транспортных наук», ул. Тан Кароли, 3-5, Будапешт, Венгрия, тел. +36 (1) 37 19 36, эл. почта [gaspar@kti.hu](mailto:gaspar@kti.hu), ORCID 0000-0002-0574-4100

<sup>3\*</sup>Каф. «Інфраструктура транспорта и гидротехника», Университет Иштвана Сечени, пл. Университетская, 1, Дьєр, Венгрия, 9026, тел. + 36 (96) 61 35 44, эл. почта [fischersz@sze.hu](mailto:fischersz@sze.hu), ORCID 0000-0001-7298-9960

## ИССЛЕДОВАНИЕ УХУДШЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ ТРАМВАЙНЫХ ПУТЕЙ

**Цель.** Основной целью статьи является демонстрация результатов анализа ухудшения геометрии трамвайных путей. **Методика.** Данная статья является частью исследования в рамках кандидатской диссертации. Сначала были обобщены системы верхнего строения пути и инструменты, использованные во время работы, после чего была проведена проверка пути, остановок трамвая, пересечений путей и стрелочных переводов. **Результаты.** Авторы провели исследование отдельного трамвайного пути, остановок трамвая, переездов и стрелочных переводов. Во время исследования пути оценивали результаты измерений в соответствии с двумя методиками. Для определения фактора износа систем верхнего строения пути провели дополнительные измерения также на других трамвайных линиях. **Научная новизна.** Выполненный анализ является первым шагом сложной методики, которую используют при рассмотрении и оптимизации затрат жизненного цикла верхнего строения трамвайного пути. Для достижения этой цели существует много параметров, факторов, которые необходимо принять во внимание в будущем. Существуют методы и модели, которые используют в различных областях гражданского строительства, например, очень сложная методика, связанная с дорожными покрытиями; но не существует специальной методики, касающейся железнодорожных или трамвайных путей. **Практическая значимость.** Авторы попытались разработать методику расчета и оценки, с помощью которой можно оценить 6 различных типов верхнего строения трамвайного пути на линии № 1 в столице Венгрии (Будапешт). Это самая новая реконструированная трамвайная линия, вторая по длине в Будапеште. Определили, какой тип системы верхнего строения пути является «лучшим» и «худшим» на основании собственных измерений и методов расчета и оценки. Проведенное исследование ляжет в основу написания кандидатской диссертации в многопрофильной аспирантуре при Университете Иштвана Сечени (Дьер, Венгрия).

**Ключевые слова:** системы верхнего строения пути; ухудшение; геометрический анализ; трамвайные линии; оценка

### REFERENCES

1. Kurhan, M. B., Kurhan, D. M., & Luzhytskyi, O. F. (2015). Inequalities research of the track at the railroad crossings. *Science and Transport Progress*, 5(59), 84-96. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/55341> (in Ukrainian)
2. Kurhan, D. M. (2015). Accumulated deformation modeling of permanent way based on entropy system. *Science and Transport Progress*, 4(58), 99-109. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/49215> (in Ukrainian)
3. Case studies in railway construction. Modern tramway superstructures. Retrieved from [http://www.sze.hu/~fischersz/Education/Case%20studies%20in%20railway%20construction/CSRC\\_Topic%2006\\_Modern%20tramway%20superstructures.pdf](http://www.sze.hu/~fischersz/Education/Case%20studies%20in%20railway%20construction/CSRC_Topic%2006_Modern%20tramway%20superstructures.pdf) (in English)
4. Jóvér, V. (2019). *Közúti vasúti felépítmény-szerkezetek komplex elemzése*. MSc thesis. Széchenyi István Egyetem. Győr. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16467.53284> (in Hungarian)
5. Kovalchuk, V., Sysyn, M., Gerber, U., Nabochenko, O., Zarour, J., & Dehne, S. (2019). Experimental investigation of the influence of train velocity and travel direction on the dynamic behavior of stiff common crossings. *Facta Universitatis. Series: Mechanical Engineering*, 17(3), 345-356. DOI: <https://doi.org/10.22190/FUME190514042K> (in English)
6. Gáspár, L., Horvát, F., & Lublóy, L. (2011). *Közlekedési létesítmények élettartama*. Universitas-Győr Nonprofit Kft. Győr. (in Hungarian)
7. Közúti vasúti infrastruktúra tervezési irányelvek. Retrieved from [https://static.bkv.hu/ftp/ftp/fajlok/sarga\\_konyv/15.pdf](https://static.bkv.hu/ftp/ftp/fajlok/sarga_konyv/15.pdf) (in Hungarian)
8. Kurhan, D. M. (2016). Modeling of development vertical deformation of railway track. *Science and Transport Progress*, 1(61), 100-108. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/61003> (in English)
9. Metalelektro Railway Diagnostic. Track Geometry Measurement. Retrieved from <https://www.metalelektro.eu/track-geometry> (in English)
10. Sysyn, M., Nabochenko, O., Gerber, U., Kovalchuk, V., & Petrenko, O. (2019). Common crossing condition monitoring with on board inertial measurements. *Acta Polytechnica*, 59(4), 423-434. DOI: <https://doi.org/10.14311/ap.2019.59.0423> (in English)

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

11. Sysyn, M., Gerber, U., Nabochenko, O., & Kovalchuk, V. (2019). Common crossing fault prediction with track based inertial measurements: statistical vs. mechanical approach. *Pollack Periodica*, 14(2), 15-26. DOI: <https://doi.org/10.1556/606.2019.14.2.2> (in English)
12. Sysyn, M., Kluge, F., Gruen, D., Kovalchuk, V., & Nabochenko, O. (2019). Experimental Analysis of Rail Contact Fatigue Damage on Frog Rail of Fixed Common Crossing 1:12. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 19(4), 1077–1092. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11668-019-00696-w> (in English)
13. Sysyn, M. (2019). Improvement of inspection system for common crossings by track side monitoring and prognostics. *Structural Monitoring and Maintenance*, 3(6), 219-235. DOI: <https://doi.org/10.12989/smm.2019.6.3.219> (in English)
14. Sysyn, M., Gerber, U., Nabochenko, U., Li, Y., & Kovalchuk, V. (2019). Indicators for common crossing structural health monitoring with track-side inertial measurements. *Acta Polytechnica*, 59(2), 170-181. DOI: <https://doi.org/10.14311/AP.2019.59.0170> (in English)
15. Sysyn, M., Gerber, U., Kluge, F., Nabochenko, O., & Kovalchuk, U. (2019). Turnout remaining useful life prognosis by means of on-board inertial measurements on operational trains. *International Journal of Rail Transportation*, 1-23. DOI: <https://doi.org/10.1080/23248378.2019.1685918> (in English)

Received: November 18, 2019

Accepted: March 19, 2020

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

UDC 004.7:[519.876.5:656.212.5]

V. M. PAKHOMOVA<sup>1\*</sup>, D. I. NAZAROVA<sup>2\*</sup>

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

<sup>2\*</sup>Dep. «Electronic Computing Machines», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 89, e-mail olkdi@outlook.com, ORCID 0000-0002-7134-9416

### ORGANIZING WIRELESS NETWORK AT MARSHALLING YARDS USING THE BEE METHOD

**Purpose.** In general, today wireless networks are widely used as an alternative to wired, allowing you to connect multiple devices, both among themselves in the local and global Internet. However, at the present stage in Ukraine there is no widespread use of a wireless network at rail transport, therefore it is advisable to conduct research on the deployment of such a network, in particular, at a marshalling yard. **Methodology.** Using LocBS-BeeCol program model written in Python according to the bee colony algorithm the optimal number of base stations (BS) of the wireless network and their location at the marshalling yards was determined, as well as research on the bee algorithm parameters was conducted. Input data of the LocBS-BeeCol model are as follows: marshalling yard parameters (area, number of clients that need to be connected to base stations); wireless network parameters (base station coverage radius, maximum number of clients for one base station); parameters of the bee colony algorithm (number of scout bees, number of attempts to find the optimal solution using one bee). **Findings.** For marshalling yards of various capacities (small, medium and high), the optimal number of base stations of the wireless network was obtained with restrictions on the coverage radius of the base station and the number of clients connected to it. Thus, for example, to connect 300 clients at medium-sized marshalling yards with an area of 2500x500 m<sup>2</sup>, 93 base stations with a coverage radius of 50 m are needed. **Originality.** The quality of the obtained solutions significantly depends on the choice of the bee colony algorithm parameters. A study of the base stations number of the wireless network and search time for finding the optimal solution for different number of bees and the number of attempts to find the optimal solution using the bee for marshalling yards of various capacities was carried out. It was determined that an increase in the number of bees (from 10 to 50) and the number of attempts to find the optimal solution by a bee (from 10 to 50) improves the quality of the optimal solution (decrease in the number of base stations by an average of 6.5% and 9.3%), respectively. In addition, increase in the bee number (from 10 to 50) reduces the search time for the optimal solution by bees by an average of 1.8 times, while increase in the number of attempts to find the optimal solution by a bee (from 10 to 50) will increase search time for the optimal solution on average 2.14 times. **Practical value.** An algorithm and its software implementation have been developed, which make it possible to determine the required number of base stations and their location when deploying a wireless network at a marshalling yards. For marshalling yards with high capacity, when the coverage radius of the base station is doubled (from 50 to 100 m), their number decreases by about half (from 136 to 64), while the time for finding the optimal solution by bees increases by 2.5 times (from 8.4 to 20.6 s).

**Keywords:** marshalling yard; wireless network; base station (BS); coverage radius; bee method; bees; attempts; search time

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

## Introduction

A wireless network is a connection of computers and other devices for information exchange without the use of wires; the connection is made through radio channels. The installation of a wireless network is necessary when the deployment of a cable system is impossible or economically impractical. Wireless networks have significant advantages over wired ones [5, 11–12]: they allow deploying the network in places where wires cannot be used and maintain a sufficient data transfer rate. Wireless networks also provide easy connection, user mobility, quick troubleshooting, and network equipment availability.

According to their size, the wireless networks are divided into (Fig. 1) [5, 11–12]: Wireless Personal Area Networks (WPAN) – up to 10 m; Wireless Local Area Networks (WLAN) – up to 100 m; Wireless Metropolitan Area Networks (WMAN) – up to 50 km; Wireless Wide Area Network (WWAN).

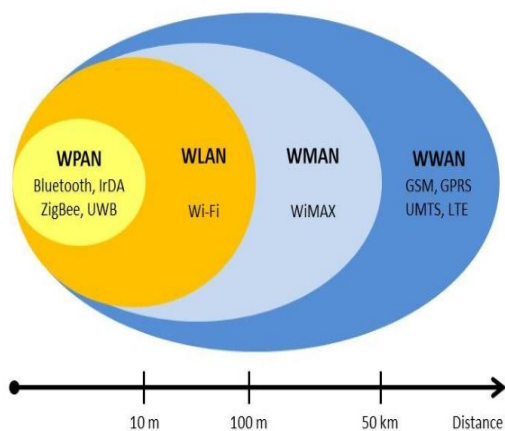


Fig. 1. Classification of wireless networks

According to the topology, wireless local area networks are divided into ad-hoc temporary networks (Independent Basic Service Set, IBSS); Basic Service Set (BSS); Extended Service Set (ESS). It is known that there are two main methodologies for WLAN deployment: wireless LAN with maximum service area; wireless LAN with maximum capacity [5, 11–12].

Scientists such as Ye. S. Skakov, V. M. Malysh, dealt with the planning of wireless networks [1]. To solve this problem, it is possible

to use intelligent methods of multiagent optimization, which include bee, ant, particle swarm, bat, fireflies and other algorithms [1, 2, 18]. The work [1] determines that the bee method is the most suitable for solving the problem of locating base stations of a wireless network.

The bee method has some modifications [7–8], one of which is BCOi (Bee Colony Optimization based on the improvement concept). Its peculiarity is that the work with complete solutions of the optimization problem is considered, not with partial ones, as in the classical BCO method [1].

Since 2008, the GSM-R (Global System for Mobile Communications – Railway) standard has been used in European railways to ensure secure wireless communication between railway services and trains [3, 6, 7, 16]. The GSM-R network is used to provide the European Train Control System (ETCS) [16]. In the UK, the GSM-R network has been fully operational since 2015 [16]. Today in Europe we are talking about transition to more modern technologies such as 4G/LTE and 5G [19]. In the future, the following new services are expected at railway transport: on-board and roadside HD video surveillance, multimedia dispatcher video streams, sensor information from railway infrastructure, including bridges, viaducts, tunnels, track defects, etc. Using infrared, sound and temperature sensors, information is collected and sent to a computation center [4].

At the present stage in Ukraine, research is being conducted on the information and telecommunication system (ITS) of railway transport using artificial intelligence methods [13–15, 20]: neural and fuzzy networks, ant and genetic methods. But the results of the introduction of wireless networks at railway transport are not sufficiently presented yet. The authors considered the possibility of using WLAN technology for the implementation of mobile communication at railway stations, made a base station state chart in the Distributed Coordination Function (DCF), which is mandatory and based on the protocol, providing Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA). Now it is expedient to conduct a study of the optimal number of base stations of the wireless network, in particular at the marshalling yard, which reaches the lower level (line enterprises) of the ITS of the railway transport of Ukraine.

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

**Purpose**

In our work, we plan to investigate the deployment of a wireless network and search for the optimal number of base stations according to the bee colony algorithm for marshalling yards of different capacities. Python language was chosen for software implementation.

**Methodology**

*Problem statement.* The marshalling yard (Fig. 2) includes arrival park, sorting park, hump and departure park. The most important part of the

technological process is the hump, the capacity of which (small, medium, high and increased) depends on the number of sorting sets (2, 3, 4, 6-8, respectively). At the object under study there are various technological areas (point section, speed measuring and cut acceleration in the section of 1–2 BP (brake position) and 3–4 BP, measuring cut parameters, uncoupling control, cut mass determination) with various ground equipment: track sensors and photodetectors; track circuits; weight measuring devices; radar velocity meters and others.

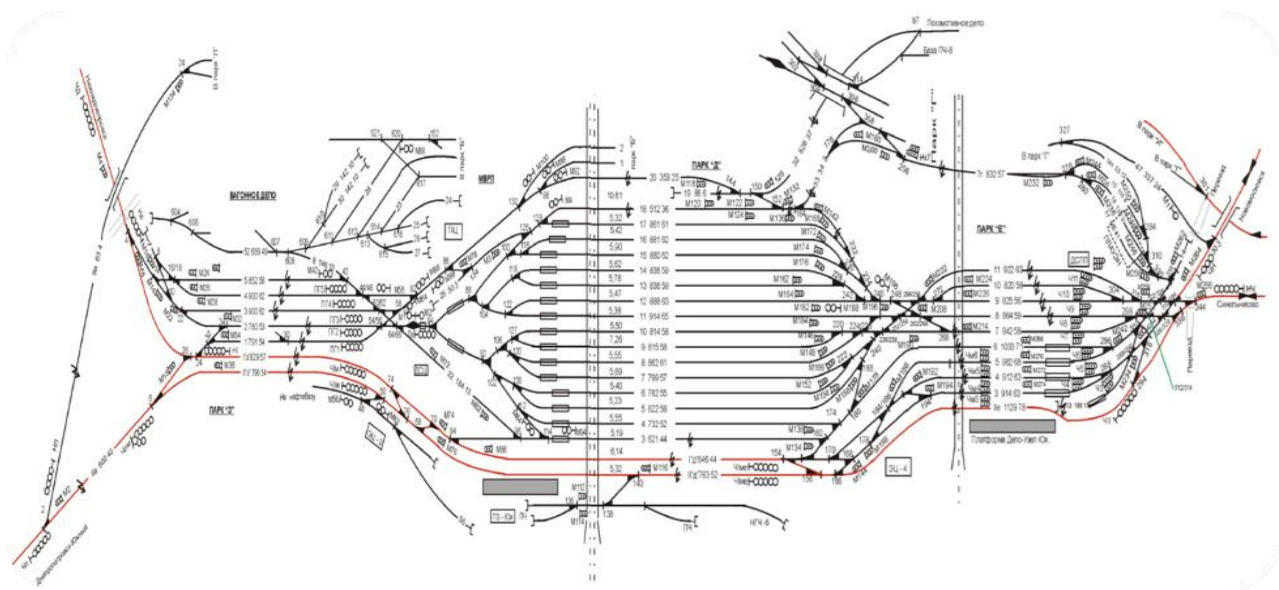


Fig. 2. Scheme of marshalling yard

Let  $L$  be the total number of clients to be connected to the wireless base station at the marshalling yard. Known  $M$  – are the candidate places where WLAN base stations can be installed. In addition, all clients must be connected to base stations.

Let us introduce the notation  $BS_i(r)^k$  – the  $i$ -th base station of the wireless network with a coverage radius  $r$ , to which  $k$  clients are connected, where  $i \in [1; M]$ ;  $k \in [1; L]$ . If  $BS_i(r)^k = 1$ , then  $i$ -th base station with  $k$ -clients is connected to the WLAN, in other case  $BS_i(r)^k = 0$ .

Let us consider the following function as a target one:

$$F = \sum_{i=1}^M BS_i(r)^k \rightarrow \min, \quad (1)$$

moreover, it is necessary to comply with the restrictions:

$$r \leq r_{\max}, \quad k \leq k_{\max}, \quad (2)$$

Where  $r_{\max}$  – is maximum coverage radius of the base station WLAN;  $k_{\max}$  – the maximum number of clients that are connected to the WLAN base station.

*Wireless network deployment at the marshalling yard.* Given the characteristics of the marshalling yard, in the future we are talking about WLAN planning.



## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

According to the IBSS topology (Fig. 3) [5, 11–12], client stations interact directly with each other without an access point. Ad Hoc mode requires minimum of equipment – a wireless adapter. This configuration does not require the creation of any network infrastructure. In this mode, each node participates in routing by sending data to other nodes, so determining which nodes send data is done dynamically based on the network connection and the routing algorithm used. Ad-Hoc mode is used mainly to create temporary networks.

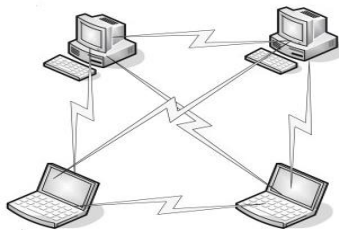


Fig. 3. IBSS topology

According to the BSS topology (Fig. 4) [5, 11–12], network nodes interact with each other not directly, but through an access point (AP), which can play the role of a bridge for connection to external cable network. All base stations in the network are interconnected by Distribution System (DS), which can be radio or infrared waves.

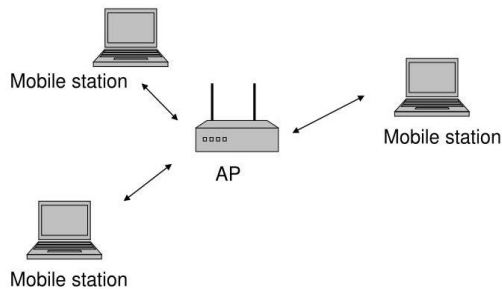


Fig. 4. BSS topology

The ESS topology (Fig. 5) [5, 11–12] makes it possible to combine several access points, i.e. connects several BSS networks. In this case, the access points can interact with each other. This topology is useful when you need to connect multiple users to a single network or connect multiple wired or wireless networks.

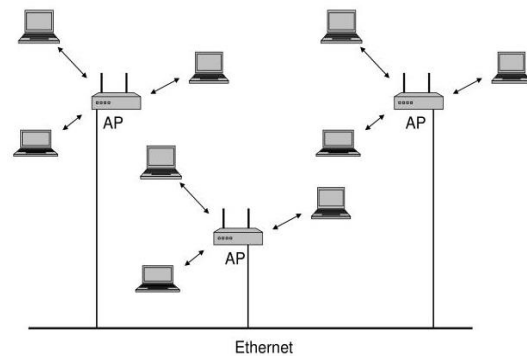


Fig. 5. ESS topology

It is advisable to use the ESS topology at the marshalling yard, as you can use several access points that interact with each other. In addition, there are wired networks at the marshalling yard, with which it is necessary to exchange information.

WLAN focused on the service area are developed taking into account the provision of maximum coverage with the minimum possible number of access points, Fig. 6. [5, 11–12].

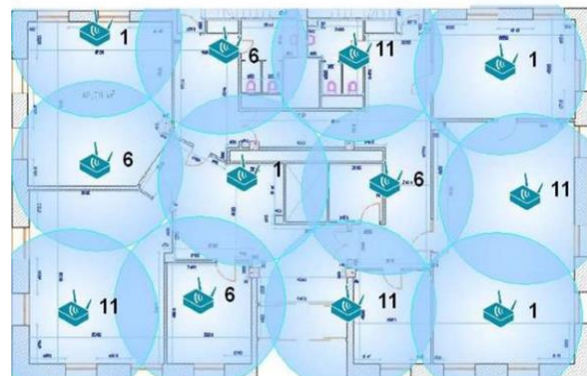


Fig. 6. Service area oriented WLAN

In a typical service area oriented network, the ratio of the number of users to the number of access points is 25:1. Some typical features of WLAN are focused on the maximum service area: the use of bursty applications with low packet rate, for example, those generating requests to databases; the need for low spectral bandwidth requirements, so that the data flow rate can be reduced to a minimum of 1 and 2 Mbps; ensuring easy maintenance, as WLAN maintenance staff is small. In service area oriented networks, typical programs have low packet rate and low spectral bandwidth requirements. This approach allows many users to immediately access WLAN services

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

while maintaining sufficient characteristics of the latter. Such options are common for small or medium-sized affiliates, when WLAN is chosen as an alternative to wired Ethernet. Easy-to-deploy WLAN provide basic LAN connections that are not required for file and printer sharing. Each WLAN access point serves approximately 25–30 users [5, 11–12].

Wireless LAN that focus on high bandwidth (Fig. 7) should provide maximum performance and packet rate for each BSS client.

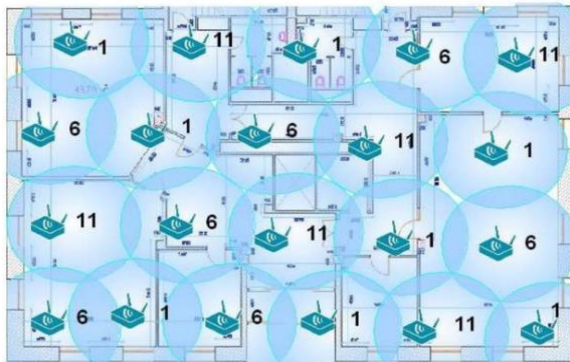


Fig. 7. WLAN focused on maximum spectral bandwidth

The cell size of the bandwidth-oriented WLAN is smaller than that of the WLAN, which focuses on the maximum service area, respectively, the location density of access points is higher. High-bandwidth-oriented WLAN are required when one uses applications that require high packet rates; uses applications that are sensitive to delays; deploys subnets of smaller scales (or several subnets in one service area); there is a high density of user placement. In such networks, the number of access points is several times greater than that for WLAN oriented on service area. The service area of each access point is much smaller than when building a network focused on the maximum service area. Each access point serves about 12 users [5, 11–12].

For a marshalling yard, it is advisable to use WLAN deployment methodologies that focus on maximum bandwidth, wireless LAN should provide maximum performance and packet rate for each client.

*Choice of organization algorithm of wireless network at marshalling yard.* Nowadays, there are many different swarm algorithms, which can be divided into [2, 18]: swarm algorithms based on the behavior of insects and animals; swarm algo-

rithms based on bacterial behavior and inanimate nature. The first include the following algorithms: particle swarm algorithm; ant algorithm; bee algorithm; fireflies algorithms; cuckoo search algorithm; bat algorithm. The second include gravitational search algorithm; intelligent drip algorithm; stochastic diffusion search; bacterial optimization.

Particle swarm algorithm is proposed to optimize continuous nonlinear functions. Ant algorithm is one of the most efficient polynomial algorithms for finding approximate solutions to route search problems on graphs. Bee algorithm is a relatively new algorithm for finding global extremums of complex multidimensional functions. According to the bee algorithm, bees explore areas that are near elite ones, which allows you to approximate the solution to optimal. The advantage of the algorithm is the possibility of efficient division into parallel processes and high speed [2].

*Biological bases of the bee method.* Bees in nature search for food by studying the space around their hive (Fig. 8) [17].

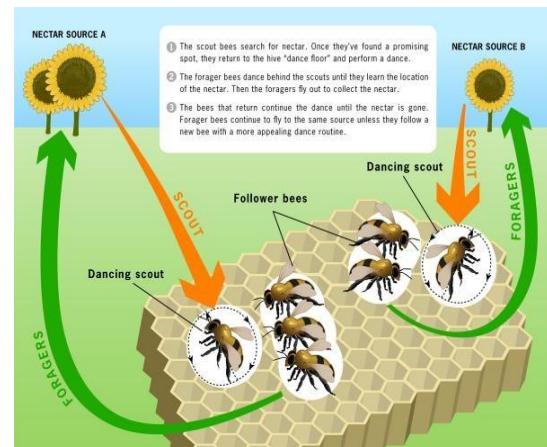


Fig. 8. Nature analogue

Review of the sources [1–2, 8–10] showed that, as a rule, at the initial stage, several scout bees study the environment. After the search, scout bees return to the hive and inform the other members of the swarm about the location, quantity and quality of available food sources that they have found. The information exchange takes place with the help of dance on a specially designated area. If a bee watching a skate dance decides to leave the hive and collect nectar, it will follow one of the scouts to one of the previously found food sources. Such a bee becomes a busy forager. It collects nectar,

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

while clarifying information about the amount of nectar near the source found. After collection, the forager returns to the hive and leaves the nectar there. It can then do one of the following: become a free forager, leaving its current source of nectar; continue extracting nectar from its source without recruiting free bees by dancing; continue extracting nectar from its source, while recruiting free bees.

Described process continues unabated, while the hive accumulates nectar and explores new areas with potential food sources.

*Bee colony algorithm*, the enlarged scheme of which is presented in Fig. 9 [10]. First the colony is initialized, then the solution is searched, after which the bees exchange information in the hive with the help of dance, then the colony is initialized again until the stopping criterion is found, after which the optimal solution is found.

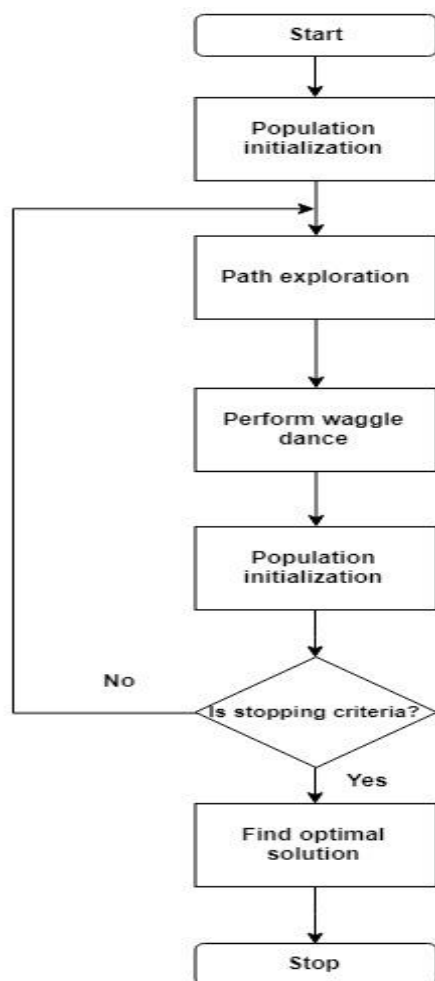


Fig. 9. Block diagram of the bee colony algorithm

*Software implementation of the bee colony algorithm* is performed in Python using standard libraries: Os – is responsible for interaction with the OS; Sys – is responsible for system functions; Random – is responsible for generating random numbers; Math – is responsible for mathematical operations; Datetime – is responsible for time conversion; Matplotlib – is responsible for plotting.

The structure of the LocBS-BeeCol software model includes the following user classes (Fig. 10): Log – used to debug the program and display the results, it is the parent for all classes; Field is a class for presenting a marshalling yard, where the search for base station location is performed; Hive is a hive class where bee-scouts exchange information and choose the optimal solution, the parent class is Field; Bee is a class of scout bees looking for coordinates of base stations, the parent class is Hive.

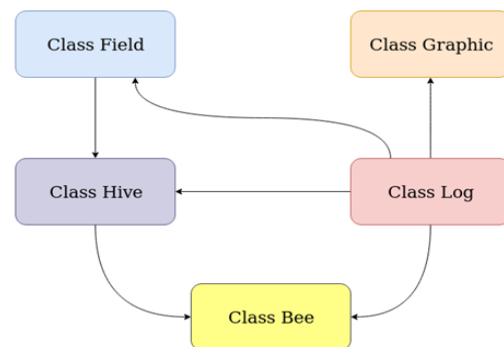


Fig. 10. Interaction of the main classes of LocBS-BeeCol

The location of base stations (BS) at the marshaling yard is based on the algorithm, which is the basis of the LocBS-BeeCol software model and the scheme of which is shown in Fig. 11. First, all classes are initialized. This is followed by a cycle with the premise: whether all customers are covered by base stations. If not, then it is performed the clearing of extremum values, detection of search area coordinates for each bee, then the search for clients in a certain area and the coordinates of the base station are determined, at the end of the cycle the found clients are deleted from the list of free clients. If all clients are covered by base stations, the result will be displayed as a dictionary, the volume of which is the number of BS (res[bs\_count]), and consists of structures whose fields are the location of the BS (new\_bs\_location),

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

the number of clients (clients\_in\_area) covered by this BS, and numbers of these clients with coordinates (clients\_in\_area\_list) in the form of dictionaries.

Fig. 12 shows a corresponding fragment of the program. In the For cycle (line 28) the required number of bees is created, according to the initial conditions. After creating everything necessary for the work of program, the implementation of the algorithm itself begins. Line 30 starts the While cycle until all clients are connected to the base stations. Inside, the For cycle (line 32) takes place, in

which the extremums and positions for each of the bees are reset to zero (lines 33–35). After specifying the search field (line 36), each bee makes a given number of attempts to find the optimal solution for the location of the base station (line 37). As a result of the cycle iteration, the global extremum, where it is more expedient to install the base station can be found, in this case it will be installed (line 40). Next, the client numbers that are connected to the BS (lines 41–42) are deleted from the general list, and the cycle returns to the beginning.

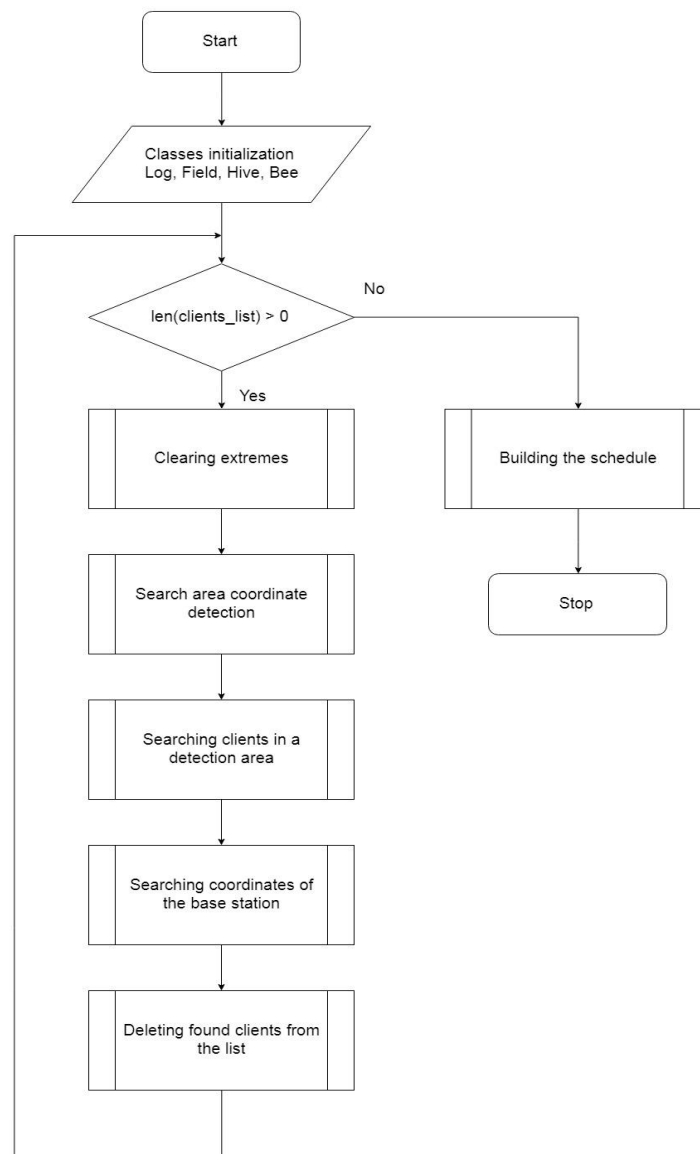


Fig. 11. LocBS-BeeCol model algorithm scheme



## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

```

28 bees = [bee(hive, log) for i in range(bees_count)]
29 iter_count = 0
30 while len(hive.clients_list) > 0:
31     log.stat("run".upper(), "### Iteration #" + str(iter_count) + " started. ##
    #")
32     for bee in bees:
33         bee.local_extremum = {}
34         bee.location = []
35         hive.global_extremum = {}
36         scouting_area = hive.set_scouting_area(field, bs_area_radius)
37         for _ in range(max_retries_count):
38             for bee in bees:
39                 bee.scout(scouting_area)
40                 bee.set_bs_location(hive.global_extremum)
41             for key, value in hive.global_extremum["clients_in_area_list"].items():
42                 hive.modify_clients_list({key: value})
43             iter_count += 1

```

Fig. 12. LocBS–BeeCol program model fragment

**Findings**

*Determining the number of BS at the marshalling yard of small capacity.* Input parameters: number of bees (bees\_count) = 10; maximum number of attempts to find the optimal solution (max\_retries\_count) = 10; number of clients (clients\_count) = 250; maximum number of clients covered by one WLAN base station (bs\_max\_clients\_count) = 12; coverage radius (bs\_area\_radius) = 50; field width (field\_width) = 2,000; field height (field\_height) = 400. The results of the model work are shown in Fig. 13.

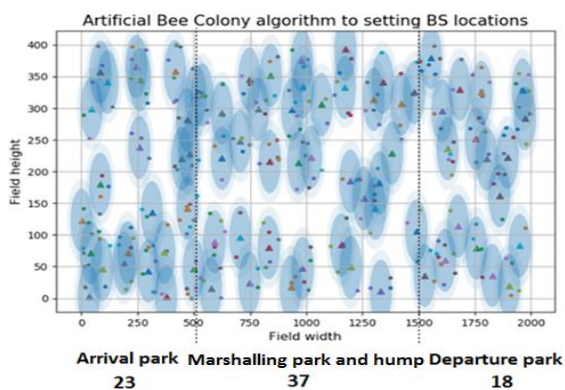


Fig. 13. BS location at the marshalling yard of small capacity

Thus, the recommended number of BS for a small-capacity marshalling yard is 78, 23 of which are in the arrival park, 37 – in the sorting park and the hump, 18 – in the departure park.

*Determining the number of BS at the marshalling yard of medium capacity.* Input parameters: number of bees (bees\_count) = 10; maximum number of attempts to find the optimal solution (max\_retries\_count) = 10; number of clients (clients\_count) = 300; maximum number of clients covered by one WLAN base station (bs\_max\_clients\_count) = 12; coverage radius (bs\_area\_radius) = 50; field width (field\_width) = 2 500; field height (field\_height) = 500. The results of the model work are shown in Fig. 14.

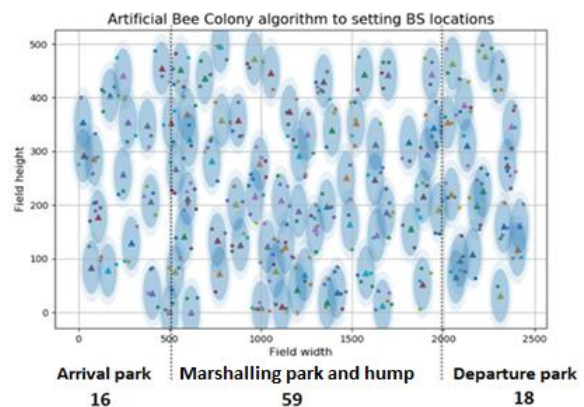


Fig. 14. BS location at the marshalling yard of medium capacity

Recommended number of BS for a medium-capacity marshalling yard is 93, 19 of which are in the arrival park, 59 – in the sorting park and the hump, 18 – in the departure park.

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

*Determining the number of BS at the marshalling yard of high capacity.* Input parameters: number of bees (bees\_count) = 10; maximum number of attempts to find the optimal solution (max\_retries\_count) = 10; number of clients (clients\_count) = 350; maximum number of clients covered by one WLAN base station (bs\_max\_clients\_count) = 12; coverage radius (bs\_area\_radius) = 50; field width (field\_width) = 3 000; field height (field\_height) = 600. The results of the model work are shown in Fig. 15.

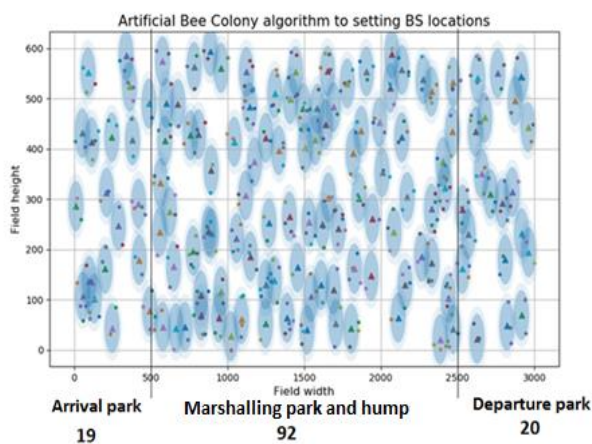


Fig. 15. BS location at the marshalling yard of high capacity

Recommended number of BS for a high-capacity marshalling yard is 131, 19 of which are in the arrival park, 92 – in the sorting park and the hump, 20 – in the departure park.

### Originality and practical value

*Investigation of algorithm parameters.* The quality of the obtained solutions largely depends on the choice of algorithm parameters. Therefore, a study was conducted to identify the dependences of the optimization results (the number of BS of wire network) and the time to find the optimal solution for different numbers of bees and attempts for marshalling yards (MS) of different capacity. The results are presented in Fig. 16–19.

Fig. 16–17 show that increase in the number of bees (from 10 to 50) and the number of attempts to find the optimal solution by one bee (from 10 to 50) leads to a decrease in the number of WLAN base stations by an average of 6.5 and 9.3% respectively.

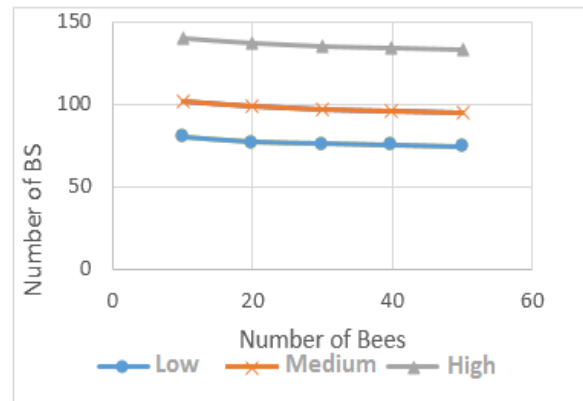


Fig. 16. Optimization results dependence (number of BS) on the number of bees for MS of different capacity

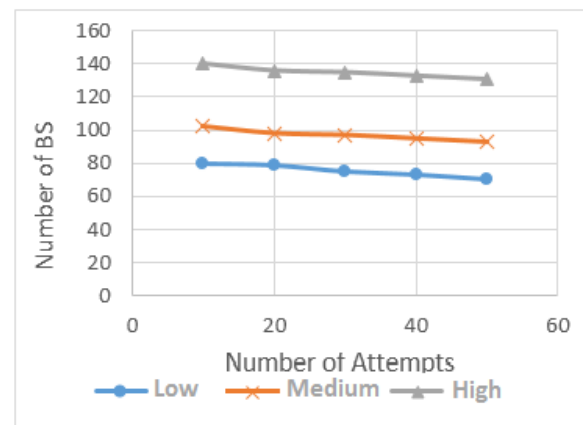


Fig. 17. Optimization results dependence (number of BS) on the number of attempts for MS of different capacity

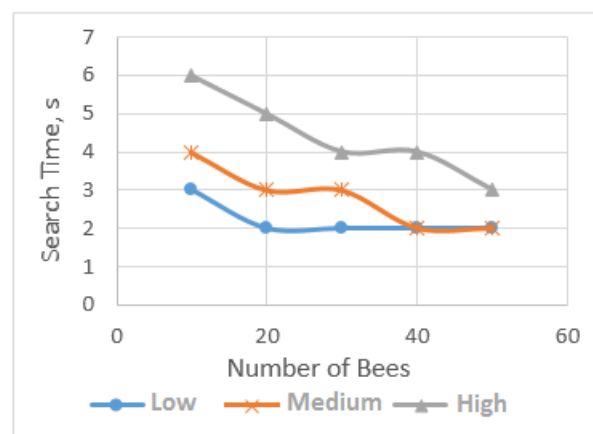


Fig. 18. Dependence of the optimal solution search time on the number of bees for MS of various capacity

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

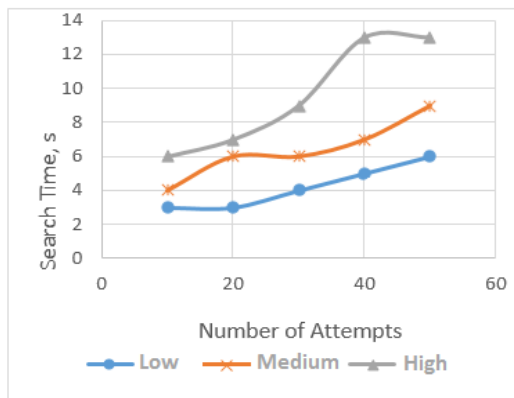


Fig. 19. Dependence of the optimal solution search time on the number of bees for MS of various capacity

Increasing the number of bees (from 10 to 50) reduces the search time for the optimal solution by bees by an average of 1.8 times (Fig. 18), while increasing the number of attempts to find the optimal solution for one bee (from 10 to 50) leads to an increase in the time to find the optimal solution by an average of 2.14 times (Fig. 19).

*Investigation of the coverage radius of the WLAN base station* was performed for a high-capacity marshalling yard. The obtained results on the LocBS-BeeCol software model are summarized in Tab. 1.

Table 1

**The investigation results for high-capacity marshalling yard**

No. of investigation	BS coverage radius, m	BS number	Solution search time, sec
1	50	135	22
2		135	20
3		133	19
4		140	22
5		138	20
	<b>Average:</b>	<b>136.2</b>	<b>20.6</b>
1	100	67	8
2		61	7
3		62	9
4		63	9
5		66	9
	<b>Average:</b>	<b>63.8</b>	<b>8.4</b>

The Table shows that twofold increase in the base station coverage radius (from 50 to 100 m) leads to a decrease in the number of BS approximately twice (from 136 to 64), while the search time for the solution of bees increases 2.5 times (from 8.4 to 20.6 sec). The study was conducted with the following parameters: the number of bees (bees\_count) = 10; maximum number of attempts to find the optimal solution (max\_retries\_count) = 10; number of clients (clients\_count) = 350; maximum number of clients covered by one base station (bs\_max\_clients\_count) = 12; field width (field\_width) = 3,000; field height (field\_height) = 600.

## Conclusions

1. Taking into account the topology of the marshalling yard and the peculiarities of the relevant technological process, it is advisable to use a wireless local area network of the ESS topology with WLAN deployment methodology, focused on maximum bandwidth.

2. Based on the results of the review of scientific sources to determine the optimal number of WLAN base stations and their location at the marshalling yard, the bee method was used, the advantages of which include the possibility of effective division into parallel processes; high speed work.

3. Based on the bee colony algorithm in Python, the corresponding LocBS-BeeCol software model was compiled, the input data of which are as follows: marshalling yard parameters (area, number of clients to be connected to base stations); WLAN parameters (base station coverage radius; number of clients served by the base station); the bee colony algorithm parameters (number of bees, number of attempts to find the optimal solution by the bee). For example, to connect 300 clients to a medium-capacity marshalling yard with an area of 2 500x500 m<sup>2</sup>, 93 base stations with a coverage radius of 50 m are required.

4. The quality of the obtained solutions largely depends on the choice of the bee colony algorithm parameters. A study of the number of WLAN base stations (solution search time by the bees) on the different number of bees (attempts to find the optimal solution by bees) for marshalling yards of different capacity. It is determined that increase in



## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

the number of bees and the number of attempts to find the optimal solution by the bee leads to an increase in the quality of the optimal solution – decrease in the number of base stations. In addition, increase in the number of bees leads to a decrease in the time to find the optimal solution and increase in the number of attempts will lead to an increase in the time to find the optimal solution by bees.

5. For a high-capacity marshalling yard in the case of increasing the coverage radius of the WLAN base station twice the number of BS is reduced by about two times, while the time to find the optimal solution for bees increases 2.5 times.

## LIST OF REFERENCE LINKS

1. Скаков Е. С., Малыш В. Н. Пчелиный алгоритм оптимизации для решения задачи планирования беспроводной сети. *Программные продукты и системы*. 2016. № 4 (67). С. 67–73. DOI: <https://doi.org/10.15827/0236-235X.115.067-073>
2. Смирнова О. С., Богорадникова А. В., Блинов М. Ю. Описание роевых алгоритмов, инспирированных неживой природой и бактериями, для использования в онтологической. *International Journal of Open Information Technologies*. 2015. Vol. 3, No. 12. С. 28–37.
3. Ahamed A., Islam N., Soikot M. A. S., Hossen M. S., Ahmed R., Hasan M. A. Train Collision Avoidance Using GPS and GSM Module. *2019 International Conference on Power Electronics, Control and Automation (ICPECA)*. 2019. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/icpeca47973.2019.8975543>
4. Ai B., Guan K., Rupp M., Kurner T., Cheng X., Yin X.-F., ... Ding J.-W. Future railway services-oriented mobile communications network. *IEEE Communications Magazine*. 2015. Vol. 53. Iss. 10. P. 78–85. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7295467>
5. A Brief Overview of the Wireless World. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/basic-service-set>. (date of access: 13.12.2019).
6. A Necessary GSM-R Mobile Upgrade. URL: <https://www.railengineer.co.uk/2019/03/13/a-necessary-gsm-r-mobile-upgrade>. (date of access: 13.12.2019).
7. Banerjee S., Hempel N., Sharif H. A Survey of Wireless Communication Technologies & Their Performance for High Speed Railways. *Journal of Transportation Technologies*. 2016. Vol. 06. Iss. 01. P. 15–29. DOI: <https://doi.org/10.4236/jtts.2016.61003>
8. Davidovic T., Teodorovic D., Selmic M. Bee Colony Optimization – Part I : The Algorithm Overview : Invited survey. *YJOR*. 2015. Vol. 25. Iss. 1. P. 33–56. DOI: <https://doi.org/10.2298/YJOR131011017D>
9. Hussein W. A., Sahran S., Sheikh Abdullah S. N. H. The variants of the Bees Algorithm (BA) : A survey. *Artificial Intelligence Review*. 2017. Vol. 47. Iss. 1. P. 67–121. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10462-016-9476-8>
10. Kumar K., Zindani D., Davim J. P. Bees Algorithm. *Optimizing Engineering Problems through Heuristic Techniques*. 2019. P. 43–50. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781351049580-5>
11. Nurmi J., Lohan E.-S., Wymeersch H., Seco-Granados G., Nykänen O. *Multi-Technology Positioning*. Springer International Publishing AG. 2017. 348 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-50427-8>
12. Osterhage W. Wireless Network Security. *Taylor & Francis Group*. 2018. P. 14–77. DOI: <https://doi.org/10.1201/978135106373-3>
13. Pakhomova V. M., Skaballanovich T. I., Bondareva V. S. Intelligent routing in the network of information and telecommunication system of railway transport. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 2 (80). P. 77–90. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/166092>
14. Pakhomova V. M., Tsykalo I. D. Optimal route definition in the network based on the multilayer neural model. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 6 (78). P. 126–142. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154443>
15. Pakhomova V. M., Mandybura Y. S. Optimal route definition in the railway information network using neural-fuzzy models. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 5 (83). P. 81–98. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/184385>
16. Sneps-Snepp M., Namiot D. Digital Railway and How to Move from GSM-R to LTE-R and 5G. *Convergent Cognitive Information Technologies*. 2018. P. 392–402. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37436-5\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37436-5_34)
17. Vaishali S. Nature – All Mathematics. URL: <http://thebridge.psgtech.ac.in/index.php/2014/11/12/nature-all-mathematics>. (date of access: 13.12.2019).
18. Ying Tan. Survey of swarm intelligence. *Swarm Intelligence Vol. 1 : Principles, current algorithms and methods*. 2018. P. 1–28. DOI: [https://doi.org/10.1049/pbce119f\\_ch1](https://doi.org/10.1049/pbce119f_ch1)

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

19. Zhong Z.-D., Ai B., Zhu G., Wu H., Xiong L., Wang F.-G., ... He R.-S. Key Issues for GSM-R and LTE-R. *Dedicated Mobile Communications for High-speed Railway*. 2018. P. 19–55.  
DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-662-54860-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-662-54860-8_2)
20. Zhukovyts'kyi I., Pakhomova V. Research of Token Ring network options in automation system of marshaling yard. *Transport Problems*. 2018. Vol. 13. Iss. 2. P. 149–158.  
DOI: <https://doi.org/10.20858/tp.2018.13.2.14>

В. М. ПАХОМОВА<sup>1\*</sup>, Д. І. НАЗАРОВА<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Електронні обчислювальні машини», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта [viknikpakh@gmail.com](mailto:viknikpakh@gmail.com), ORCID 0000-0002-0022-099X

<sup>2\*</sup>Каф. «Електронні обчислювальні машини», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта [olkdi@outlook.com](mailto:olkdi@outlook.com), ORCID 0000-0002-7134-9416

## ОРГАНІЗАЦІЯ БЕЗДРОТОВОЇ МЕРЕЖІ НА СОРТУВАЛЬНІЙ СТАНЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ БДЖОЛИНОГО МЕТОДУ

**Мета.** Сьогодні бездротові мережі широко використовують в якості альтернативи дротовим, що дозволяє підключити декілька пристроїв як між собою в локальну, так і до глобальної мережі Інтернет. Але на сучасному етапі в Україні немає масового використання бездротової мережі на залізничному транспорті, тому доцільно провести дослідження розгортання такої мережі, зокрема на сортувальній станції. **Методика.** На програмній моделі «LocBS–BeeCol», що створена мовою Python за алгоритмом бджолиної колонії, визначено оптимальну кількість базових станцій (БС) бездротової мережі та їх розташування на сортувальній станції, проведено дослідження параметрів алгоритму. Вхідні дані моделі «LocBS–BeeCol»: параметри сортувальної станції (площа, кількість клієнтів, яких потрібно підключити до базових станцій); параметри бездротової мережі (радіус покриття базової станції, максимальна кількість клієнтів для однієї базової станції); параметри алгоритму бджолиної колонії (кількість бджіл-розвідників, кількість спроб знайти оптимальне рішення одною бджолою). **Результати.** Для сортувальних станцій різної потужності (малої, середньої та великої) отримано оптимальну кількість базових станцій бездротової мережі за обмежень на радіус покриття базової станції та кількість клієнтів, що підключені до неї. Так, наприклад, для підключення 300 клієнтів на сортувальній станції середньої потужності, площа якої 2 500х500 м<sup>2</sup>, необхідно 93 базових станцій з радіусом покриття 50 м. **Наукова новизна.** Якість отриманих рішень значною мірою залежить від вибору параметрів алгоритму бджолиної колонії. Проведено дослідження кількості базових станцій бездротової мережі та часу пошуку оптимального рішення за різною кількістю бджіл та кількістю спроб знайти оптимальне рішення бджолою для сортувальних станцій різної потужності. Визначено, що збільшення кількості бджіл (із 10 до 50) та кількості спроб знаходження оптимального рішення бджолою (із 10 до 50) призводить до уточнення оптимального рішення (зменшення числа базових станцій у середньому на 6,5 та 9,3 % відповідно). Крім того, збільшення кількості бджіл (із 10 до 50) призводить до зменшення часу пошуку оптимального рішення бджолами в середньому в 1,8 раза, у той час як збільшення кількості спроб знаходження оптимального рішення бджолою (із 10 до 50) призведе до зростання часу пошуку оптимального рішення в середньому в 2,14 раза. **Практична значимість.** Розроблено алгоритм та його програмну реалізацію, які дозволяють визначити необхідну кількість базових станцій та їх розміщення під час розгортання бездротової мережі на сортувальній станції. Для сортувальної станції великої потужності в разі збільшення радіуса покриття базової станції удвічі (із 50 до 100 м) кількість БС зменшується приблизно в два рази (зі 136 до 64), при цьому час пошуку оптимального рішення бджолами збільшується в 2,5 раза (із 8,4 до 20,6 с).

**Ключові слова:** сортувальна станція; бездротова мережа; базова станція (БС); радіус покриття; бджолиний метод; бджоли; спроби; час пошуку

В. Н. ПАХОМОВА<sup>1\*</sup>, Д. І. НАЗАРОВА<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Електронні висчислювальні машини», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта viknikpakh@gmail.com, ORCID 0000-0002-0022-099X

<sup>2\*</sup>Каф. «Електронні висчислювальні машини», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта olkdi@outlook.com, ORCID 0000-0002-7134-9416

## ОРГАНИЗАЦИЯ БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ НА СОРТИРОВОЧНОЙ СТАНЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЧЕЛИНОГО МЕТОДА

**Цель.** Сегодня беспроводные сети широко используют в качестве альтернативы проводным, что позволяет подключить несколько устройств как между собой в локальную, так и к глобальной сети Интернет. Однако на современном этапе в Украине нет массового использования беспроводной сети на железнодорожном транспорте, поэтому целесообразно провести исследование развертывания такой сети, в частности, на сортировочной станции. **Методика.** На программной модели «LocBS–BeeCol», написанной на языке Python по алгоритму пчелиной колонии, определено оптимальное количество базовых станций (БС) беспроводной сети и их расположение на сортировочной станции, проведено исследование параметров алгоритма. Входные данные модели «LocBS–BeeCol»: параметры сортировочной станции (площадь, количество клиентов, которые нужно подключить к базовым станциям); параметры беспроводной сети (радиус покрытия базовой станции, максимальное количество клиентов для одной базовой станции); параметры алгоритма пчелиной колонии (количество пчел-разведчиков, количество попыток найти оптимальное решение одной пчелой). **Результаты.** Для сортировочных станций различной мощности (малой, средней и высокой) получено оптимальное количество базовых станций беспроводной сети при ограничениях на радиус покрытия базовой станции и количество клиентов, подключенных к ней. Так, например, для подключения 300 клиентов на сортировочной станции средней мощности, площадь которой 2 500х500 м<sup>2</sup>, необходимо 93 базовых станций с радиусом покрытия 50 м. **Научная новизна.** Качество полученных решений в значительной мере зависит от выбора параметров алгоритма пчелиной колонии. Проведено исследование количества базовых станций беспроводной сети и времени поиска оптимального решения при различном числе пчел и количестве попыток найти оптимальное решение пчелой для сортировочных станций различной мощности. Определено, что увеличение количества пчел (с 10 до 50) и количества попыток нахождения оптимального решения пчелой (с 10 до 50) приводит к уточнению оптимального решения (уменьшению числа базовых станций в среднем на 6,5 и 9,3 % соответственно). Кроме этого, увеличение количества пчел (с 10 до 50) приводит к уменьшению времени поиска оптимального решения пчелами в среднем в 1,8 раза, в то время как увеличение количества попыток нахождения оптимального решения пчелой (с 10 до 50) приведет к росту времени поиска оптимального решения в среднем в 2,14 раза. **Практическая значимость.** Разработан алгоритм и его программная реализация, позволяющие определить необходимое количество базовых станций и их размещение при развертывании беспроводной сети на сортировочной станции. Для сортировочной станции высокой мощности при увеличении радиуса покрытия базовой станции вдвое (с 50 до 100 м) количество БС уменьшается примерно в два раза (со 136 до 64), при этом время поиска оптимального решения пчелами увеличивается в 2,5 раза (с 8,4 до 20,6 с).

**Ключевые слова:** сортировочная станция; беспроводная сеть; базовая станция (БС); радиус покрытия; пчелиный метод; пчелы; попытки; время поиска

### REFERENCES

1. Skakov, E., & Malysh, V. (2016). Bee optimization algorithm for solving wireless network planning problem. *Software products and systems.*, 4(67), 67-73. DOI: <https://doi.org/10.15827/0236-235X.115.067-073> (in Russian)
2. Smirnova, O., Bogoradnikova, A. & Blinov, M. (2015). Description of swarm algorithms inspired by inanimate nature and bacteria for use in the ontological model. *International Journal of Open Information Technologies*, 3(12), 28-37. (in Russian)

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

3. Ahamed, A., Islam, N., Soikot, M. A. S., Hossen, M. S., Ahmed, R., & Hasan, M. A. (2019). Train Collision Avoidance Using GPS and GSM Module. *2019 International Conference on Power Electronics, Control and Automation (ICPECA)*, 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/icpeca47973.2019.8975543> (in English)
4. Ai, B., Guan, K., Rupp, M., Kurner, T., Cheng, X., Yin, X.-F., ... & Ding, J.-W. (2015). Future railway services-oriented mobile communications network. *IEEE Communications Magazine*, 53(10), 78-85. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7295467> (in English)
5. A Brief Overview of the Wireless World. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/basic-service-set>
6. A Necessary GSM-R Mobile Upgrade. Retrieved from <https://www.railengineer.co.uk/2019/03/13/a-necessary-gsm-r-mobile-upgrade>
7. Banerjee, S., Hempel, M., & Sharif, H. (2016). A Survey of Wireless Communication Technologies & Their Performance for High Speed Railways. *Journal of Transportation Technologies*, 06(01), 15-29. DOI: <https://doi.org/10.4236/jtts.2016.61003> (in English)
8. Davidovic, T., Teodorovic, D. & Selmic, M. (2015). Bee Colony Optimization – Part I: The Algorithm Overview: Invited survey. *Yugoslav Journal of Operations Research*, 25(1), 33-56. DOI: <https://doi.org/10.2298/YJOR131011017D> (in English)
9. Hussein, W. A., Sahran, S., & Sheikh Abdullah, S. N. H. (2017). The variants of the Bees Algorithm (BA): a survey. *Artificial Intelligence Review*, 47(1), 67-121 DOI: <https://doi.org/10.1007/s10462-016-9476-8> (in English)
10. Kumar, K., Zindani, D., & Davim, J. P. (2019). *Bees Algorithm*. Optimizing Engineering Problems through Heuristic Techniques. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781351049580-5> (in English)
11. Nurmi, J., Lohan, E.-S., Wymeersch, H., Seco-Granados, G., & Nykänen, O. (2017). *Multi-Technology Positioning*. Springer International Publishing AG. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-50427-8> (in English)
12. Osterhage, W. (2018). *Wireless Network Security*. Taylor & Francis Group, 14-77. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315106373-3> (in English)
13. Pakhomova, V. M., Skaballanovich, T. I., & Bondareva, V. S. (2019). Intelligent routing in the network of information and telecommunication system of railway transport. *Science and Transport Progress*, 2(80), 77-90. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/166092> (in English)
14. Pakhomova, V. M., & Tsykalo, I. D. (2018). Optimal route definition in the network based on the multilayer neural model. *Science and Transport Progress*, 6(78), 126-142. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154443> (in English)
15. Pakhomova, V. M., & Mandybura, Y. S. (2019). Optimal route definition in the railway information network using neural-fuzzy models. *Science and Transport Progress*, 5(83), 81-98. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/184385> (in English)
16. Sneps-Snepp, M., & Namiot, D. (2020). *Digital Railway and How to Move from GSM-R to LTE-R and 5G*. Convergent Cognitive Information Technologies, 392-402. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37436-5\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37436-5_34) (in English)
17. Vaishali, S. Nature-All-Mathematics. Retrieved from <http://thebridge.psgtech.ac.in/index.php/2014/11/12/nature-all-mathematics>
18. Ying, Tan. (2018). Survey of swarm intelligence. *Swarm Intelligence-Vol. 1: Principles, current algorithms and methods*, 1-28. DOI: [https://doi.org/10.1049/pbce119f\\_ch1](https://doi.org/10.1049/pbce119f_ch1) (in English)
19. Zhong, Z.-D., Ai, B., Zhu, G., Wu, H., Xiong, L., Wang, F.-G., ... & He, R.-S. (2017). *Key Issues for GSM-R and LTE-R*. Dedicated Mobile Communications for High-Speed Railway, 19-55. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-662-54860-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-662-54860-8_2) (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), 149-158. DOI: <https://doi.org/10.20858/tp.2018.13.2.1> (in English)

Received: November 19, 2019

Accepted: March 17, 2020

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.463.027.27-048.35

В. Г. РАВЛЮК<sup>1</sup>, М. Г. РАВЛЮК<sup>2</sup>, І. К. КИРИЧЕНКО<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Вагони», Український державний університет залізничного транспорту, майд. Феєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта ravvg@ukr.net, ORCID 0000-0003-4818-9482

<sup>2</sup>Каф. «Вагони», Український державний університет залізничного транспорту, майд. Феєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта ravmg@ukr.net, ORCID0000-0002-6021-660X

<sup>3</sup>Каф. «Фізико-математичні дисципліни», Національний університет цивільного захисту України, вул. Чернишевська, 94, Харків, Україна, 61023, тел. +38 (095) 4870238, ел. пошта ikir238@gmail.com, ORCID 0000-0001-7375-8275

### СТАТИСТИЧНЕ ОПРАЦЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗНОСУ ГАЛЬМОВИХ КОЛОДОК ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ

**Мета.** Це дослідження спрямоване на статистичне опрацювання контрольованих в експлуатації геометричних параметрів зносу колодок модернізованих гальмових систем візків вантажних вагонів. **Методика.** Застосовано статистичний підхід до побудови графічної залежності зносу гальмових колодок від пробігу вагонів на основі попередньо зібраних даних щодо зносу в контрольних точках, що регламентовано вимогами планово-попереджувального ремонту (ППР). Теоретично-експлуатаційні дослідження, які стосуються зменшення ненормативного зносу гальмових колодок, виконано за методикою регресійного аналізу на підставі експериментальних даних дослідної експлуатації модернізованих пристроїв гальмових систем візків вантажних вагонів. Обґрунтовано «паліативний» підхід до вирішення цього завдання. **Результати.** Установлено, що на практиці мають місце випадки, коли колодки не забезпечують свого регламентованого пробігу, унаслідок чого їх передчасно замінюють через клинодуальний знос. А це, з точки зору економіки та безпеки їх використання, призводить до зниження гальмової ефективності в триангельних гальмових системах. Експериментально-науковими дослідженнями виявлено, що під час виконання плану вантажних перевезень до 95 % колодок вагонів, за умови використання типових пристроїв гальмування, мають шкідливий подвійний фрикційний знос, що потребує їх заміни у гарантований міжремонтний період. Під час обстеження в умовах експлуатації явищ зносу гальмових колодок для модернізованих пристроїв візків на основі регресійного аналізу виконано прогнозування їхнього залишкового ресурсу, результатом якого є використання колодок на увесь міжремонтний період експлуатації вантажних вагонів. **Наукова новизна.** Уперше адаптовано для побудови регресійної залежності модель зносу колодок модернізованих пристроїв гальмових систем візків залежно від пробігу вагонів. За отриманими результатами натурного експерименту проведено обробку зібраних даних про знос колодок за відсутності нормального закону статистичного розподілу. Перевірку відповідності експериментально-теоретичних розрахунків щодо вимірювань зносу колодок оцінено за тестом Кохрена. Запропоновано «паліативний» підхід для статистичного аналізу зносу колодок в умовах експлуатації, що дає змогу спрогнозувати їхній залишковий ресурс з позиції їх використання на увесь міжремонтний період експлуатації вантажних вагонів. **Практична значимість.** Результати проведених досліджень апробовано на дослідному рухомому складі з модернізованими пристроями для рівномірного зносу гальмових колодок у візках. Отримано патент на винахід, який рекомендовано до втілення під час проектування нових і модернізації наявних гальмових систем візків вантажних вагонів.

**Ключові слова:** гальмова колодка; знос; гальмова важільна передача (ГВП); вагон; аналіз; модель; статистичні дослідження; вибірка

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

**Вступ**

За останні роки на залізничному транспорті спостерігається істотне погіршення технічного стану гальмових систем вантажних вагонів, від яких у першу чергу залежить безпека руху поїздів. Поширеною відмовою є клинодуальний знос гальмових колодок вантажних вагонів, спричинений недосконалою конструкцією важільної передачі візка, модернізацію якої не виконували багато десятиліть.

Зібрана інформація в процесі наукового дослідження про зміну геометричних параметрів гальмових колодок залежно від пробігу вантажних вагонів в умовах експлуатації підлягає ретельній обробці. За допомогою методів статистичної обробки можна уявити загальну картину про гальмові системи візків вантажних вагонів, створюючи тим самим сприятливі умови для подальшого серійного впровадження оновлених конструкцій гальмових важільних передач (ГВП) у виробництво на вагонобудівних заводах або їх модернізації на вагоноремонтних підприємствах АТ «Укрзалізниця».

У роботі [4] було запропоновано один із підходів до подібних статистичних досліджень. Автори оцінювали такі параметри, як сила натискання гальмових колодок на колеса, твердість матеріалу колодок тощо, під час встановлення величини гальмового шляху залежно від швидкості руху, ухилу рейкової колії й радіуса кривої в разі гальмування рухомого складу. Статистично встановлені критичні ухили величини гальмового шляху у випадку повного службового гальмування рухомого складу. Проте в роботі не розглянуто умови, коли зменшується гальмова площа контакту колодки з колесом за дуального зносу колодок, тому оцінювати гальмову ефективність поїзда позитивно не можна.

Під час виконаних досліджень у праці [8] було розроблено регресійну модель тертя колодок і коліс локомотивів промислового транспорту в умовах структурної невизнаності за великої кількості складності входних змінних у моделях параметрів, тобто з урахуванням значення коефіцієнта тертя. Виключити нестійкі рішення в такій багато параметричній моделі складно, хоча автор запропонував своє бачення проблеми. Однак головний параметр – знос ко-

лодок за товщиною, який у системі планово-попереджувального ремонту (ППР) обмежує застосування всіх типів гальмових колодок (із точки зору безпеки їх використання) для ідентифікації моделі не було враховано.

У проведеному дослідженні [12] встановлено причину шкідливого дуального зносу колодок і визначено можливості ліквідації вказаного недоліку, що призводить до передчасної заміни гальмових колодок, які не використали свій ресурс робочої маси в межах планових міжремонтних пробігів. У цьому дослідженні було використано статистичний підхід планування експериментів за дослідної експлуатації вантажних вагонів із типовими й модернізованими ГВП, які були включені в один склад. Але завдання щодо прогнозування термінів їх експлуатації не ставилося.

Інший підхід було запропоновано колективом авторів у роботі [9]. На прикладі ненормативного зносу гальмових колодок розглянуто питання про нерівномірний знос пар тертя колодок із колесами, що належать до одного вагона, їх динамічні процеси, які описано складною моделлю. Але тут мова йшла про випадки, коли величини досліджуваних параметрів підпорядковуються нормальному закону розподілу.

Як доводить практика, ненормативний знос гальмових колодок виникає через непрофесійні дії робітників, які виконують технічне обслуговування й ремонт вантажних вагонів із порушенням нормативних технічних документів [5], тобто в деяких випадках на свій розсуд встановлюють колодки, які були раніше зняті з вагонів. Тому їх знос, вочевидь, не може відповідати нормальному закону розподілу, та подібні дослідження [14, 15, 21–23] не мають сенсу.

**Мета**

Це дослідження спрямоване на статистичне опрацювання контрольованих в експлуатації геометричних параметрів зносу гальмових колодок модернізованих гальмових систем візків вантажних вагонів.

Для реалізації мети дослідження необхідно вирішити такі завдання:

– виконати експериментально-наукове обстеження гальмових колодок в умовах експлуа-



## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

тації вантажних вагонів шляхом вимірювання їх зносу в контрольних точках і зібрати статистичні відомості про вимірний знос;

– обґрунтувати вигляд залежності зносу гальмових колодок за їх товщиною від пробігу вантажного вагона шляхом застосування регресійного аналізу за результатами зібраних статистичних даних;

– здійснити перевірку статистичних гіпотез щодо характеру розподілу випадкових величин зносу гальмових колодок і їх взаємозв'язок за належністю даних до однієї генеральної сукупності, за значимістю відмінностей тощо;

– розглянути підстави щодо прогнозування залишкового ресурсу гальмових колодок у модернізованих пристроях для рівномірного зносу колодок у візках на увесь гарантований міжремонтний період експлуатації вантажних вагонів.

## Методика

В роботі [11] досліджується явище зносу гальмових колодок вантажних вагонів залежно від їх пробігу для модернізованих пристроїв рівномірного відведення колодок й утримування їх на нормативній відстані. На рис. 1 наведено модель технічної системи (МТС) модернізованої конструкції вантажного візка з ГВП в загальному вигляді для статистичних досліджень зносу колодок.

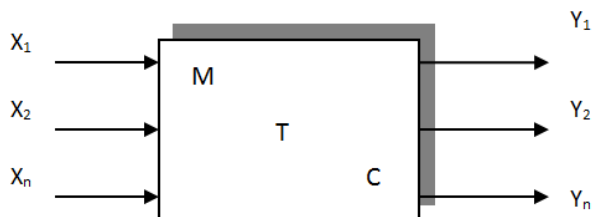


Рис. 1. Модель технічної системи

Fig. 1. Model of the technical system

Модель має такі складові: вхідний вектор  $\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ; вектор вихідних параметрів  $\vec{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_m)$  і сукупність процедур відображень досліджуваних параметрів ( $T$ ). Відображення

$T: \vec{X} \rightarrow \vec{Y}$  містить усі функціональні процедури, які виконує технічна система.

У нашому завданні є два масиви вхідних і вихідних параметрів:  $N = 2$  – виміри зверху  $X_B$  та знизу  $X_H$  колодок, що взаємодіють із колесами дослідних вагонів;  $M = 2$  – знос верхньої  $Y_B$  чи нижньої  $Y_H$  частин колодок після пробігу  $L$ ;  $i = 7$  – кількість вимірювань (у контрольній точці) для кожного дослідного вагона, які зведено до табл. 1 і 2:  $Y$  – дані експериментів,  $\hat{Y}$  – статистичні заміри зносу гальмових колодок.

Розрахунки виконано для середнього значення зносу всіх дослідних вагонів із модернізованими пристроями [17].

Як відомо зі статистичної теорії [3, 6, 13, 16], під час розгляду будь-якого завдання з використанням законів математичної статистики є два джерела інформації. Перше джерело – результати спостережень (експериментів). Причому процес спостережень може корегуватися на підставі попередніх результатів (так званий послідовний аналіз). Друге джерело – апріорна інформація про властивості досліджуваного об'єкта, тобто це накопичений на цей момент знос за визначений пробіг вагона. Цю інформацію відображають у моделі, що обрана для розгляду завдання.

Виходячи з теорії статистичних висновків [1, 3, 19], за даними табл. 1 і 2 визначаємо величину  $\sum n_i / 2$ , де  $n_i$  – середнє значення зносу колодок для всіх вагонів. Її значення дорівнює 60,27 для верху і 58,19 для низу колодок, тому медіанним є інтервал 24,1–74,1 із частотою, яка дорівнює 15,98 для верху і 15,22 для низу колодок.

Медіану отримуємо за формулою:

$$M_e = x_{Me} + \frac{\sum n_i / 2 - sn_{Me-1}}{n_{Me}} \cdot h, \quad (1)$$

де  $x_{Me}$  – початок медіанного інтервалу;  $n_{Me}$  – частота медіанного інтервалу;  $sn_{Me-1}$  – накопичена частота інтервалу, що передує медіанному.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Таблиця 1

Усереднені значення вимірюваного зносу у верхній частині гальмової колодки

Table 1

Averaged values of measured wear at the top of the brake pad

Інвентарний номер дослідного вагона	Послідовність зменшення товщини у верхній частині гальмових колодок $U_i$ (мм) зі збільшенням пробігу вагона $L$ (тис. ваг. км)						
	4,6	16,2	24,1	74,1	121,3	164,6	197,8
61138707	0,75	3,63	5,75	17,38	25,5	33,25	40,63
61139481	0,5	3,13	5,88	16	23,63	32,75	40,63
61138970	0,5	4,13	6,75	13,63	22	29,75	37,13
61139168	0,13	2,88	6,25	16	24,25	33,13	39,5
61139317	0,88	3,25	6,13	16,13	23,88	31,63	38,25
61139176	1,13	3,63	6,88	16	24,88	32,38	38,38
61139556	0,25	3,25	5,38	15,13	22,75	30,63	37,25
61139531	0,25	3	6,25	16	22,75	31,25	39,25
61140083	1,13	3,88	6,25	17,5	25	33,25	39,63
61140307	0,38	3	5,63	16	23,38	30,63	37,38
Середнє значення для всіх вагонів	<b>0,59</b>	<b>3,38</b>	<b>6,12</b>	<b>15,98</b>	<b>23,8</b>	<b>31,87</b>	<b>38,8</b>

Таблиця 2

Усереднені значення вимірюваного зносу в нижній частині гальмової колодки

Table 2

The average values of the measured wear at the bottom of the brake pad

Інвентарний номер дослідного вагона	Послідовність зменшення товщини в нижній частині гальмових колодок $U_i$ (мм) зі збільшенням пробігу вагона $L$ (тис. ваг. км)						
	4,6	16,2	24,1	74,1	121,3	164,6	197,8
61138707	0,5	3,25	5,25	13,25	20,63	29,5	36,5
61139481	0,63	3,25	6,25	15,88	23,38	31,75	39,38
61138970	0,63	4	7	14	22,38	30,25	37
61139168	0,38	3,38	6,13	15,38	23,63	31,38	38,25
61139317	0,63	3,25	5,88	14,5	22,25	29,75	36,38
61139176	0,38	2,63	6	14,75	22,25	29,75	36,5
61139556	0,63	3,13	5,88	15,38	23,13	30,88	38
61139531	0,63	2,88	5,5	18	25,88	33,25	40,5
61140083	0,38	2,5	5,13	14,88	22,75	30,63	37,5
61140307	0,88	3,13	5,88	16,13	24,13	30,75	37,25
Середнє значення для всіх вагонів	<b>0,57</b>	<b>3,14</b>	<b>5,89</b>	<b>15,22</b>	<b>23,04</b>	<b>30,79</b>	<b>37,73</b>

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

За результатами розрахунку побудовано гістограми відносних частот (рис. 2 і 3) варіаційного ряду, тобто східчаста фігура, що складається із прямокутників, основами яких є часткові інтервали довжиною  $h$ , а висоти дорівнюють щільностям відносної частоти  $f_i$ . Площу  $i$ -го часткового прямокутника визначаємо за формулою:

$$hf_i = h \left( \frac{\omega_i}{h} \right) = \omega_i, \quad (2)$$

де  $\omega_i$  – відносна частота варіантів, що потрапили в  $i$ -й інтервал. Площа гістограми відносних частот дорівнює сумі всіх відносних частот, тобто 1,0.

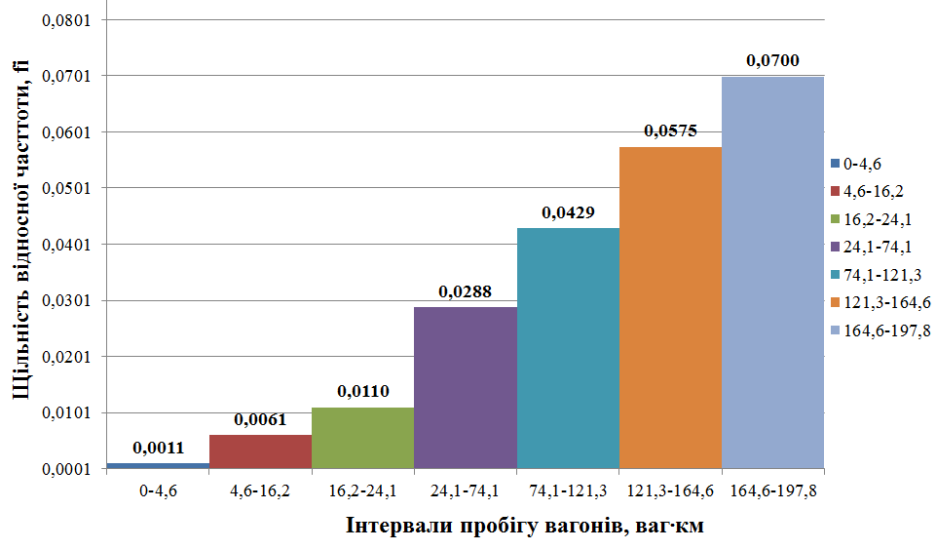


Рис. 2. Гістограма щільності розподілу середнього зносу для верху гальмових колодок залежно від пробігу дослідних вагонів

Fig. 2. Distribution density histogram of average wear for the top of the brake pads, depending on the run of the test cars

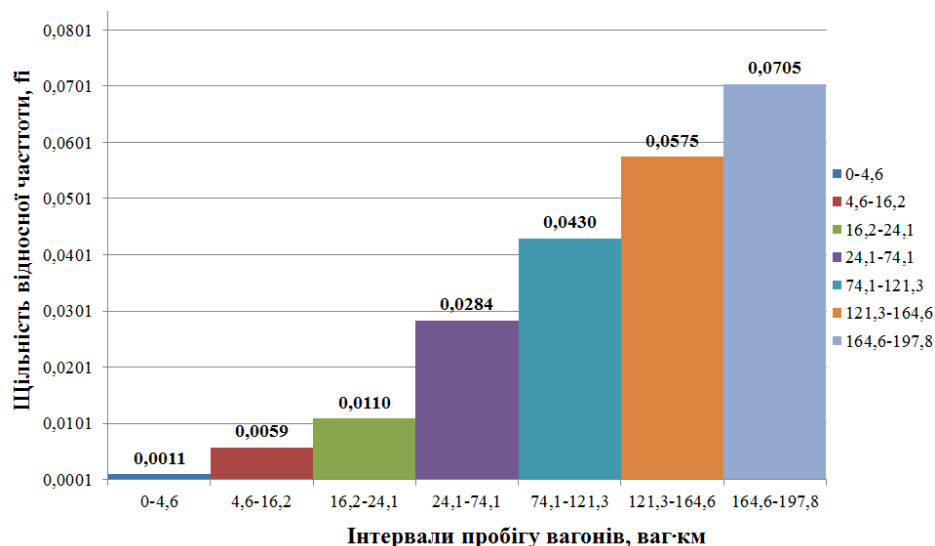


Рис. 3. Гістограма щільності розподілу середнього зносу для низу гальмових колодок залежно від пробігу дослідних вагонів

Fig. 3. Distribution density histogram of average wear for the bottom of the brake pads, depending on the run of the test cars

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Усі розрахунки виконано за допомогою зведених до табл. 3 і табл. 4.  
комп'ютерної програми EXEL, а їх результати

Таблиця 3

Результати розрахунку середнього зносу для верху гальмових колодок за модернізованого пристрою

Table 3

## Results of the calculation of average wear for the top of the brake pads with the upgraded device

Інтервали	$a_{i-1}$	$a_i$	$x_i$	$n_i$	$x_i n_i$	$x_i^2 n_i$	$\omega_i$	$f_i$	$s n_i$	$s \omega_i$
0–4,6	0	4,6	2,3	0,59	1,36	3,12	0,0049	0,0011	0,59	0,0049
4,6–16,2	4,6	16,2	10,4	3,38	35,15	365,58	0,028	0,0061	3,97	0,0329
16,2–24,1	16,2	24,1	20,2	6,12	123,62	2497,2	0,0508	0,011	10,09	0,0837
24,1–74,1	24,1	74,1	49,1	15,98	784,62	38 524,74	0,1326	0,0288	26,07	0,2163
74,1–121,3	74,1	121,3	97,7	23,8	2 325,3	227 177,9	0,1974	0,0429	49,87	0,4137
121,3–164,6	121,3	164,6	143	31,87	4 557,4	651 709,6	0,2644	0,0575	81,74	0,6781
164,6–197,8	164,6	197,8	181,2	38,8	7 030,6	1 273 937	0,3219	0,07	120,54	1
Усього				120,54	14 858	2 194 216	1			

Примітка:  $a_{i-1}$  – ліві границі пробігу вагонів;  $a_i$  – праві границі пробігу вагонів;  $x_i$  – середня величина пробігу вагонів;  $n_i$  – середнє значення зносу колодок для всіх вагонів;  $x_i n_i$  – ваги статистичного розподілення;  $x_i^2 n_i$  – ваги квадрата статистичного розподілення;  $\omega_i$  – відносна частота;  $f_i$  – щільність відносної частоти;  $s n_i$  – накопичені частоти;  $s \omega_i$  – накопичені відносні частоти. Ширина інтервалу  $h' = 4,6$ ; вибіркє середнє арифметичне значення вибірки  $x'_{cp} = 123,26$ ; середнє арифметичне квадратів значень вибірки  $x'^2_{cp} = 18203$ ; вибіркє дисперсія  $D'_B = 3010,2$ ; вибіркє середнє квадратичне відхилення  $\sigma'_B = 54,865$ ; мода  $M'_o = 6,283$ ; медіана  $M'_e = 1,1332$ .

Таблиця 4

Результати розрахунку середнього зносу для низу гальмових колодок за модернізованого пристрою

Table 4

## Results of the calculation of the average wear for the bottom of the brake pads with the upgraded device

Інтервали	$a_{i-1}$	$a_i$	$x_i$	$n_i$	$x_i n_i$	$x_i^2 n_i$	$\omega_i$	$f_i$	$s n_i$	$s \omega_i$
0–4,6	0	4,6	2,3	0,57	1,31	3,02	0,0049	0,0011	0,57	0,0049
4,6–16,2	4,6	16,2	10,4	3,14	32,66	339,62	0,027	0,0059	3,71	0,0319
16,2–24,1	16,2	24,1	20,2	5,89	118,98	2 403,36	0,0506	0,011	9,6	0,0825
24,1–74,1	24,1	74,1	49,1	15,22	747,3	36 692,53	0,1308	0,0284	24,82	0,2133
74,1–121,3	74,1	121,3	97,7	23,04	2 251	219 923,5	0,198	0,043	47,86	0,4113
121,3–164,6	121,3	164,6	143	30,79	4 403	629 624,7	0,2646	0,0575	78,65	0,6759
164,6–197,8	164,6	197,8	181,2	37,73	6 836,7	1 238 806	0,3242	0,0705	116,38	1,0
Усього				116,38	14 391	2 127 792	1			

Примітка: ширина інтервалу  $h'' = 4,6$ ; вибіркє середнє арифметичне значення вибірки  $x''_{cp} = 123,26$ ; середнє арифметичне квадратів значень вибірки  $x''^2_{cp} = 18203$ ; вибіркє дисперсія ; вибіркє середнє квадратичне відхилення  $\sigma''_B = 54,865$ ; мода  $M''_o = 6,283$ ; медіана  $M''_e = 1,1332$ .

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Для характеристики властивостей статистичного розподілу розраховано емпіричну функцію розподілу за формулою:

$$F^*(x) = \frac{n_x}{n}. \quad (3)$$

Емпіричну функцію  $F^*(x)$  використано для оцінки теоретичної функції розподілу генеральної сукупності. Відмінність між ними полягає в тому, що теоретична функція  $F(x)$  визначає ймовірність події  $X < x$ , а емпірична функція  $F^*(x)$  – відносну частоту цієї події.

Емпірична функція розподілу прагне до теоретичної за ймовірністю (сходиться за ймовірністю до  $F^*(x)$ ) в разі великого обсягу вибірки:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(|F^*(x) - F(x)| < \varepsilon) = 1; \quad \forall x; \quad \forall \varepsilon > 0. \quad (4)$$

За результатами розрахунку  $D_B'' = 3010,2$  (табл. 3 і 4) для верху і низу гальмових колодок дослідних вагонів побудовано емпіричну функцію розподілу (рис. 4 і 5).

Зараз існує досить багато різноманітних програмних продуктів, які дають можливість реалізувати на ЕОМ метод найменших квадратів (МНК). Їх застосування дуже різноманітне:

статистика, економетрія, оцінка похибок вимірювань тощо [3, 6, 7, 18, 20].

Для розуміння практичної реалізації одного з них розглянемо наше завдання – визначення та прогнозування зносу гальмових колодок вантажних вагонів із використанням МНК.

Аналіз отриманих результатів експериментів, за допомогою яких оцінюють, достовірно чи ні підібрана апроксимуюча залежність зносу колодок від пробігу вагона, обраний так, що відповідна аналітична функція в інтервалі вимірювань підпорядковується відомій теоремі Вейерштрасса. При цьому число членів поліноміального ряду визначено з реальних можливостей проведення планово-попереджувального ремонту (ППР) вагонів, хоча це й може бути причиною неузгодження за критеріями Фішера, Стюдента та ін. Загалом близько половини фахівців статистів вважають [3, 18, 19], що з точки зору узгодженості результатів обчислень багато з критеріїв не завжди дають позитивний висновок, хоча в підсумку дослідження підтверджується практикою. Тому апроксимуючий вигляд функції до регресійного аналізу можна вибирати довільно, виходячи зі зручностей її подальшого використання. Інші фахівці, навпаки, вважають, що вигляд цієї функції слід обґрунтовувати.

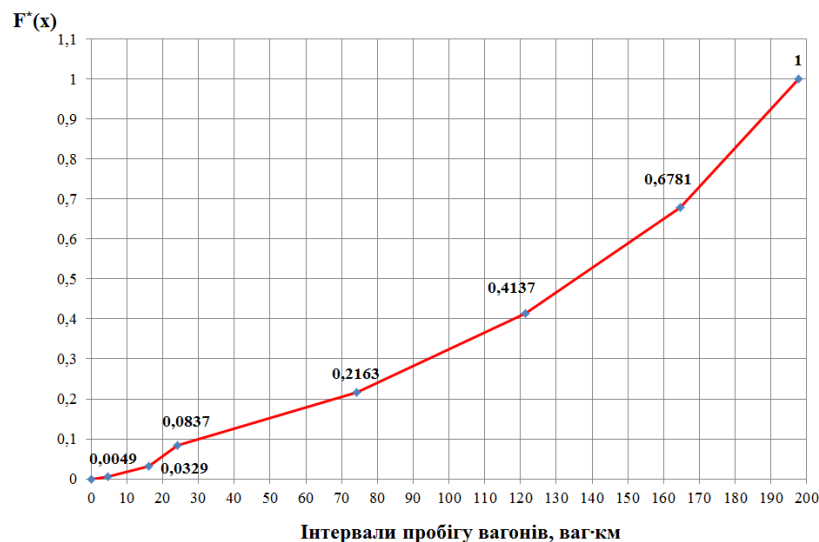


Рис. 4. Графік емпіричної функції розподілу середнього зносу для верху гальмових колодок залежно від пробігу дослідних вагонів

Fig. 4. Graph of the empirical function of the average wear distribution for the top of the brake pads, depending on the run of the test cars

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

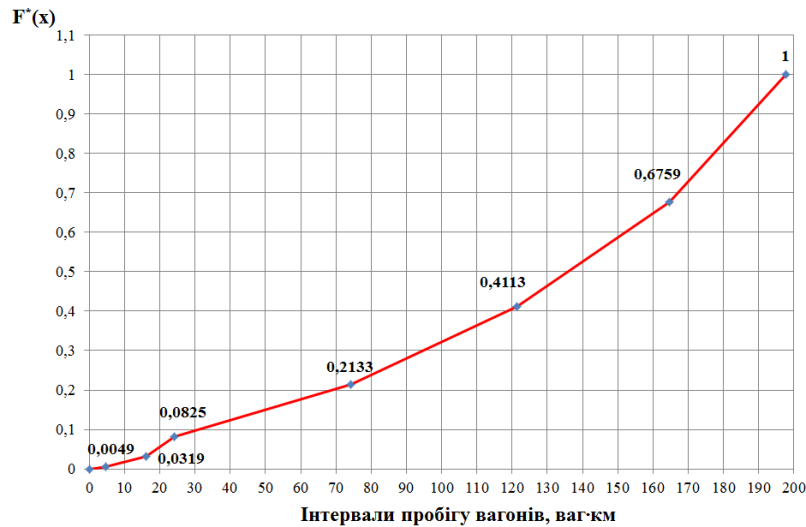


Рис. 5. Графік емпіричної функції розподілу середнього зносу для низу гальмових колодок залежно від пробігу дослідних вагонів

Fig. 5. Graph of the empirical function of the average wear distribution for the bottom of the brake pads depending on the run of the test cars

У нашому дослідженні обрано деякий поєднаний підхід до цього питання. Припустимо, після попереднього аналізу процесу, дослідженого на основі статистичних даних. Таким чином, математична модель цього процесу має вигляд:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2. \quad (5)$$

Це нелінійна модель другого ступеня. У значній кількості випадків вибору типу моделей апроксимації процесів гальмування вагонів має місце отримання достовірної залежності зносу колодок від пробігу, що відповідає лінійній моделі регресійного аналізу [3, 20], яка задовільно описує процес досліджуваного зносу колодок під час гальмування. Тому зведемо вираз (5) до лінійності. Для цього візьмемо  $x_1 = x$  і  $x_2 = x^2$ . У результаті отримаємо лінійну модель (для лінійних моделей існують потужні алгебраїчні засоби щодо їх дослідження), яка матиме вигляд:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2. \quad (6)$$

Між розрахованими за моделлю значеннями  $\hat{y}$  й експериментальними розрахунками  $\hat{y}_i$  будуть спостерігатися відхилення. Позначимо їх як

$$\hat{u}_i = y_i - \hat{y}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

Далі будемо називати їх залишками. Вони включають вплив неврахованих факторів – змінних, випадкових перешкод, помилок спостереження тощо. Їхні значення можуть змінюватися від одного спостереження до іншого.

Метод найменших квадратів дає змогу знайти такі значення (оцінки)  $b_0, b_1, b_2$  вихідних параметрів  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$  моделі, для якої (це пов'язано з тим, що необхідний критерій для підбору коефіцієнтів моделі повинен враховувати ту обставину, за якої одержана функція регресії), якщо її представити на графіку, вони будуть якомога ближче проходити між експериментально отриманими змінними:

$$U = \sum_{i=1}^n U_i^2 \rightarrow \min. \quad (8)$$

У подальшому таку модель будемо записувати у вигляді:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2. \quad (9)$$

Беручи частинні похідні за значеннями  $b_0, b_1, b_2$  і прирівнюючи їх до нуля, одержимо систему з трьох рівнянь із трьома невідомими  $b_0, b_1, b_2$ , розв'язком якої і є визначені значення оцінок. У нашому випадку, оскільки



## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

$$U = \sum_{i=1}^n U_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1 x_{i1} - b_2 x_{i2})^2 \Rightarrow .(10)$$

одержимо:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial b_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - b_1 x_{i1} - b_2 x_{i2}) = 0, \\ \frac{\partial U}{\partial b_1} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - b_1 x_{i1} - b_2 x_{i2}) x_{i1} = 0, \\ \frac{\partial U}{\partial b_2} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - b_1 x_{i1} - b_2 x_{i2}) x_{i2} = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Із наведеної вище системи отримуємо таку систему алгебраїчних рівнянь

$$\begin{cases} b_0 n + b_1 \sum_{i=1}^n x_{i1} + b_2 \sum_{i=1}^n x_{i2} = \sum_{i=1}^n y_i, \\ b_0 \sum_{i=1}^n x_{i1} + b_1 \sum_{i=1}^n x_{i1}^2 + b_2 \sum_{i=1}^n x_{i1} x_{i2} = \sum_{i=1}^n x_{i1} y_i, \\ b_0 \sum_{i=1}^n x_{i2} + b_1 \sum_{i=1}^n x_{i1} x_{i2} + b_2 \sum_{i=1}^n x_{i2}^2 = \sum_{i=1}^n x_{i2} y_i. \end{cases} \quad (12)$$

Розв'язуючи дану систему рівнянь, знаходимо невідомі коефіцієнти  $b_0, b_1, b_2$ :

$$b_2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i2} - \bar{x}_2)(y_i - \hat{y}) \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)^2}{\sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)^2 \sum_{i=1}^n (x_{i2} - \bar{x}_2)^2 - \left( \sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)(x_{i2} - \bar{x}_2) \right)^2} - \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)(y_i - \hat{y}) \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)(x_{i2} - \bar{x}_2)}{\sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)^2 \sum_{i=1}^n (x_{i2} - \bar{x}_2)^2 - \left( \sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)(x_{i2} - \bar{x}_2) \right)^2}. \quad (13)$$

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)(y_i - \hat{y}) \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i2} - \bar{x}_2)^2}{\sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)^2 \sum_{i=1}^n (x_{i2} - \bar{x}_2)^2 - \left( \sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)(x_{i2} - \bar{x}_2) \right)^2} - \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i2} - \bar{x}_2)(y_i - \hat{y}) \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)(x_{i2} - \bar{x}_2)}{\sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)^2 \sum_{i=1}^n (x_{i2} - \bar{x}_2)^2 - \left( \sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)(x_{i2} - \bar{x}_2) \right)^2}. \quad (14)$$

$$b_0 = \hat{y} - b_1 \bar{x}_1 - b_2 \bar{x}_2. \quad (15)$$

Підставивши їх значення в загальний вигляд регресії, отримуємо так звану лінію регресії з коефіцієнтами  $b_1$  і  $b_2$ , які називаються коефіцієнтами регресії  $\hat{y}$  за  $x_1$  і  $\hat{y}$  за  $x_2$  відповідно.

Знайдена точка  $(b_0, b_1, b_2)$  є точкою, яка задовольняє згаданих умові. Але в математичному аналізі є теорема, яка дає змогу визначити достатні умови екстремуму функції, у нашому випадку – мінімум функції  $U(b_0, b_1, b_2)$ .

На рис. 6 і 7 наведено графіки лінійної регресії, побудовані за результатами обробки

експериментальних даних (табл. 5 і 6), які дають можливість спрогнозувати залишковий ресурс гальмових колодок за їх граничної товщини 10 мм [5] для модернізованих пристроїв у випадку їх використання на увесь міжремонтний період експлуатації вантажних вагонів. За умови встановлення таких пристроїв середній пробіг вантажного вагона в разі рівномірного зносу гальмових колодок може досягти 284 тис. км.

Із графіків лінійної регресії (рис. 6 і 7) видно, що замінювати гальмову колодку за можливості використання модернізованих пристроїв для рівномірного відведення колодок не потріб-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

бно у міжремонтний період експлуатації вагона. Комбінований критерій у дослідженнях підтверджує, що пробіг вантажних вагонів, які ремонтують за нормативною періодичністю, після

останнього деповського ремонту повинен бути 110 тис. км, а для останнього капітального – 160 тис. км [2].

Таблиця 5

## Результати розрахунку середнього зносу для верху гальмових колодок модернізованого пристрою

Table 5

## Results of the calculation of average wear for the top of the brake pads of the upgraded device

$x$	$\hat{y}$	$x^2$	$x\hat{y}$	$y_{\text{лін}}$	$d_{\text{від}x}$	$d^2$
0	0	0	0	0,46936	-0,4694	0,22029
4,6	0,59	21,16	2,714	1,3607	-0,7707	0,59397
16,2	3,38	262,44	54,756	3,60843	-0,2284	0,05218
24,1	6,12	580,81	147,492	5,13921	0,98079	0,96195
74,1	15,98	5490,81	1184,12	14,8277	1,15229	1,32777
121,3	23,8	14713,7	2886,94	23,9737	-0,1737	0,03016
164,6	31,87	27093,2	5245,8	32,3639	-0,4939	0,24393
197,8	38,8	39124,8	7674,64	38,7971	0,00295	8,7E-06
<b>602,7</b>	<b>120,54</b>	<b>87287</b>	<b>17196</b>	–	–	<b>3,4303</b>

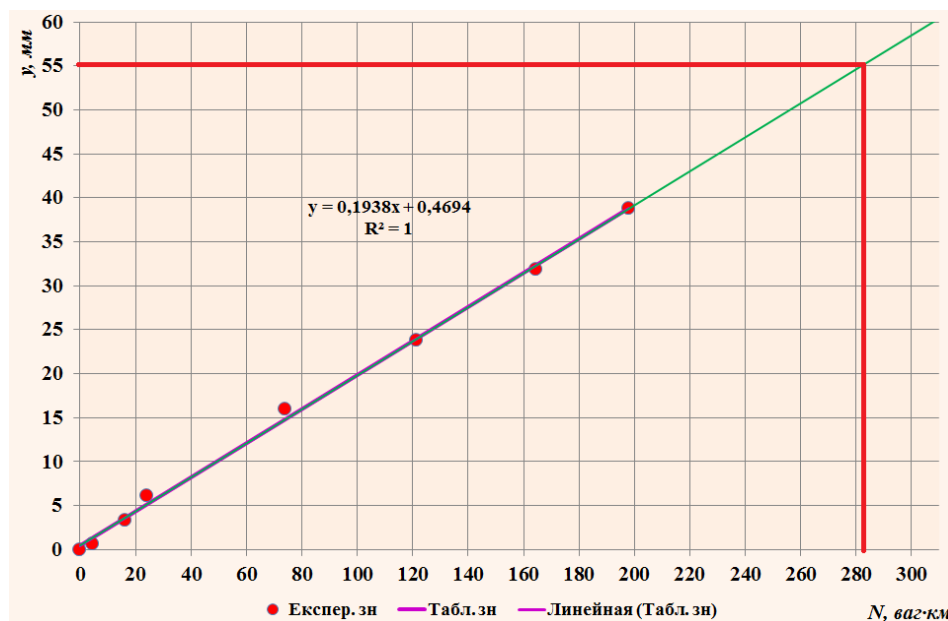


Рис. 6. Графік лінійної регресії з прогнозом подовження ресурсу гальмових колодок залежно від їх середнього зносу зверху з урахуванням пробігу дослідних вагонів

Fig. 6. The graph of linear regression with the prediction of the service life extension of the brake pads, depending on their average wear at the top, taking into account the run of the test car

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Таблиця 6

Результати розрахунку середнього зносу для низу гальмових колодок за модернізованого пристрою

Table 6

Results of the calculation of the average wear for the bottom of the brake pads with the upgraded device

$x$	$\hat{y}$	$x^2$	$x\hat{y}$	$y_{\text{лін}}$	$d_{\text{відх}}$	$d^2$
0	0	0	0	0,37035	-0,3704	0,13716
4,6	0,57	21,16	2,622	1,23599	-0,666	0,44354
16,2	3,14	262,44	50,868	3,4189	-0,2789	0,07778
24,1	5,89	580,81	141,949	4,90553	0,98447	0,96917
74,1	15,22	5490,81	1127,8	14,3146	0,90538	0,8197
121,3	23,04	14713,7	2794,75	23,1968	-0,1568	0,02459
164,6	30,79	27093,2	5068,03	31,3451	-0,5551	0,30811
197,8	37,73	39124,8	7462,99	37,5927	0,13728	0,01885
<b>602,7</b>	<b>116,38</b>	<b>87287</b>	<b>16649</b>	—	—	<b>2,7989</b>

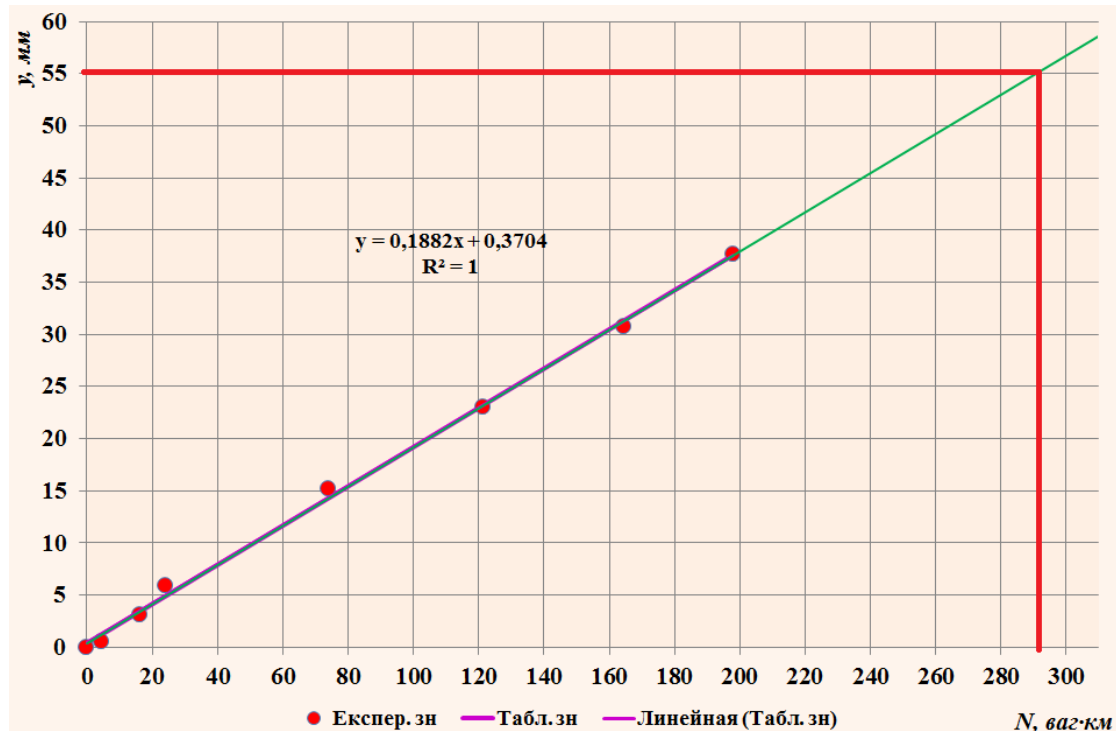


Рис. 7. Графік лінійної регресії з прогнозом подовження ресурсу гальмових колодок залежно від їх середнього зносу знизу з урахуванням пробігу дослідних вагонів

Fig. 7. Graph of linear regression with prediction of service life extension of brake pads depending on their average wear at the bottom, taking into account the run of the test cars

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Схожу методику застосовують у випадку знаходження  $m$  коефіцієнтів регресії  $b_0, b_1, b_2, \dots, b_m$ .

Щоб оцінити щільність зв'язку між  $x$  та  $y$ , використовують коефіцієнт кореляції та коефіцієнт детермінації, які показують, наскільки варіація змінної  $x$  пояснює варіацію  $y$ . Щоб оцінити, наскільки добре лінія регресії пояснює зв'язок між  $x$  та  $y$ , використовують стандартну помилку залишків, яка показує відхилення емпіричних значень від лінії регресії.

Для побудови регресійної моделі перевіряють гіпотезу про її адекватність. Для цього можна використовувати  $F$ -критерій Фішера [10, 19, 20]. Під час оцінки параметрів регресії перевіряють гіпотези, чи статистично значимі вони, чи відрізняються від нуля. Для цього варто застосовувати  $t$ -тест Стюдента. Побудовану регресійну модель можна використовувати для прогнозування величини результативної ознаки  $y$  за заданого значення факторної ознаки  $x$ , при цьому бажано будувати інтервал довіри для прогнозу.

$F$ -критерій Фішера для перевірки моделі на відповідність критерію з достатньою точністю визначаємо за виразом:

$$F_{1,n-2} = \frac{(n-2) \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}. \quad (16)$$

Спостережуване значення  $t$ -критерію Стюдента для перевірки значущості коефіцієнта кореляції визначаємо за виразом:

$$t_{n-2} = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}. \quad (17)$$

Спостережуване значення  $t$ -критерію Стюдента для перевірки гіпотези:

$$H_0: b_i = \beta_i \quad (H_1: b_i \neq \beta_i): \quad t_{n-2} = \frac{b_i - \beta_i}{\hat{\sigma}_{b_i}}, \quad i = 0, 1.$$

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_{b_0} &= \hat{\sigma}_\varepsilon \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}, \\ \hat{\sigma}_{b_1} &= \frac{\hat{\sigma}_\varepsilon}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}, \\ \hat{\sigma}_\varepsilon^2 &= \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2}. \end{aligned} \quad (18)$$

Спостережуване значення  $t$ -критерію Стюдента для перевірки гіпотези:

$$H_0: b_i = 0 \quad (H_1: b_i \neq 0) \quad t_{n-2} = \frac{b_i}{\hat{\sigma}_{b_i}}.$$

Якщо пряму лінію розташувати так, щоб точки приблизно однаково знаходилися по обидва боки від неї, тоді параметри лінійного рівняння можна визначити достатньо просто.

Для визначення параметрів рівняння вигляду  $\bar{y} = kx + b$  найчастіше використовують МНК. При цьому обов'язковою є умова, щоб сума квадратів відхилень (відстаней) усіх досліджених точок від ординат, обчислених за рівнянням прямої  $\varepsilon_i$ , була мінімальною. Інакше кажучи, пряма повинна проходити якомога ближче до вершин емпіричної лінії регресії. Це означає, що параметри  $k$  і  $b$  рівняння регресії треба визначити з виразу:

$$\varepsilon_i = \sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i) = \min, \quad (19)$$

де  $y_i$  – ординати досліджуваних точок;  $\tilde{y}_i$  – ординати розрахункових точок, визначені за рівнянням регресії  $\bar{y} = kx_i + b$  таким чином:

$$\varepsilon_i = \sum_{i=1}^n [y_i - (kx + b)]^2 = F(k, b) \min. \quad (20)$$

Необхідною умовою екстремуму цієї функції є рівність нулю частинних похідних, узятих за параметрами  $k$  і  $b$ :

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

$$\frac{\partial F}{\partial k} = 0 \text{ і } \frac{\partial F}{\partial b} = 0, [F(u)]' = F_u(u) * u'. \quad (21)$$

Звідси:

$$\frac{\partial F}{\partial k} = -2 \sum_{i=1}^n [y_i - (kx_i + b)] x_i = 0, \quad (22)$$

$$\frac{\partial F}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n [y_i - (kx_i + b)] = 0.$$

Спростивши ці вирази, отримаємо систему лінійних рівнянь:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n y_i x_i &= k \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i, \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i &= k \sum_{i=1}^n x_i + b n. \end{aligned} \quad (23)$$

Підставивши в систему чисельні значення відповідних величин, знайдемо параметри  $k$  і  $b$ .

Залишаючи поза увагою чисельні перевірки за критеріями Стюдента та ін., які в цій задачі не можуть дати позитивні висновки, здійснимо аналогічні обчислення з використанням критерію якості Кохрена, однак при цьому збільшимо число точок вимірювань до 53. Результати розрахунків описані нижче без зведення їх до таблиці.

Згідно з критерієм Кохрена, для перевірки відповідності нульової гіпотези візьмемо відношення максимально виправленої дисперсії до суми всіх виправлених дисперсій:

$$\begin{aligned} G_{\text{набл}} &= \frac{S_{\text{max}}^2}{S_1^2 + S_2^2} = \\ &= \frac{116,65}{116,65 + 109,66} = 0,5154. \end{aligned} \quad (24)$$

Розподілення цієї випадкової величини залежить від числа ступенів вільності  $k = n - 1 = 52$ , де  $n$  – обсяг вибірки, що дорівнює 53.

Знаходимо за таблицею додатка [3], за рівнем значущості 0,05, число ступенів вільності 52 і значення вибірки  $l = 2$  (знос зверху і знизу) критичну точку  $G_{\text{крит}}(0,05; 52; 2) = 0,6543$ .

Оскільки  $G_{\text{крит}} > G_{\text{набл}}$  і різниця між ними не значна, немає підстав відкидати нульову гіпотезу. Тому за умовою однорідності дисперсій остаточно встановлюємо генеральну дисперсію:

$$D(x) = \frac{1}{2}(S_1^2 + S_2^2). \quad (25)$$

Таким чином, виправлені дисперсії практично рівні –  $S_1^2 \approx S_2^2$ .

Оскільки дані в завданні вибірки зносу гальмових колодок зверху і знизу однакового обсягу, розглянемо порівняння двох середніх нормальних генеральних сукупностей [3, 20]. Введемо позначення  $d_i = (X_1)_i - (X_2)_i$ , тоді виправлене середнє квадратичне відхилення буде дорівнювати:

$$s_d = \sqrt{\frac{\sum d_i^2 - \frac{[\sum d_i]^2}{n}}{n-1}} = 0,342598. \quad (26)$$

Для того, щоб для заданого рівня значущості  $\alpha = 0,05$  перевірити нульову гіпотезу, потрібно визначити значення критерію, що спостерігається:

$$T_{\text{набл}} = \frac{\bar{d} \cdot \sqrt{n}}{s_d} = 13,90331, \quad (27)$$

де  $\bar{d} = \sum d_i / n$  – середня різниця.

За критичних точок розподілення, заданого рівня значущості  $\alpha = 0,05$  і числа ступенів вільності  $k = n - 1 = 52$  знаходимо значення критичної точки  $t_{\text{двост. кр}} = 2,01$ . Якщо  $|T_{\text{набл}}| > t_{\text{двост. кр}}$ , тоді отримані результати є підтвердженням того, що в середньому знос гальмових колодок зверху і знизу має різні значення.

## Результати

Установлено, що на практиці мають місце випадки, коли колодки не забезпечують свого регламентованого пробігу, унаслідок чого їх передчасно замінюють через клинодуальний знос. А це з точки зору економіки та безпеки їх використання призводить до зниження гальмо-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

вої ефективності в триангельних гальмових системах. Експериментально-науковими дослідженнями встановлено, що в разі виконання плану вантажних перевезень до 95 % колодок вагонів, за умови використання типових пристроїв гальмування, мають шкідливий подвійний фрикційний знос, що потребує їх заміни в гарантований міжремонтний період. Шляхом обстеження в умовах експлуатації явищ зносу гальмових колодок для модернізованих пристроїв візків на основі регресійного аналізу виконано прогнозування залишкового ресурсу колодок, результатом якого є їх використання на увесь міжремонтний період вантажних вагонів.

За результатом розрахунків доведено, що неоднорідність дисперсії тут не залежить від кількісного показника вибірки цього експерименту. Ураховуючи, що в критерій Кохрена входить поняття числа ступенів вільності  $k = n - 1$ , де  $n$  – обсяг вибірки, установлюємо, що залежність від  $n$  існує, але вона незначна. Крім того, згідно з тестом Кохрена, для рівних обсягів вибірки  $n$  маємо  $G_{крит} > G$ . Тому підстав відкидати нульові гіпотези немає. За умови однорідності дисперсій остаточно маємо практично рівні виправлені дисперсії:  $S_1^2 \approx S_2^2$ .

#### Наукова новизна та практична значимість

Уперше адаптовано для побудови регресійної залежності модель зносу колодок модернізованих пристроїв гальмових систем візків залежно від пробігу вагонів. За отриманими результатами натурного експерименту проведено обробку зібраних даних про знос колодок за відсутності нормального закону статистичного розподілу. Перевірку відповідності експериментально-теоретичних розрахунків щодо вимірювань зносу колодок оцінено за тестом Кохрена. Запропоновано «паліативний» підхід для статистичного аналізу зносу колодок в умовах експлуатації, що дає змогу спрогнозувати їхній залишковий ресурс з позиції їх використання на увесь міжремонтний період експлуатації вантажних вагонів.

Результати проведених досліджень апробовано на дослідному рухомому складі з модернізованими пристроями для рівномірного зносу

гальмових колодок у візках. Отримано патент на винахід, який рекомендовано до втілення під час проектування нових і модернізації наявних гальмових систем візків вантажних вагонів.

#### Висновки

1. В умовах експлуатації вантажних вагонів здійснено обстеження гальмових колодок модернізованих пристроїв гальмових систем візків вантажних вагонів шляхом вимірювання їх зносу в контрольних точках.

2. Теоретично обґрунтовано графічну залежність лінійного вигляду зносу гальмових колодок за товщиною залежно від пробігу вантажного вагона шляхом застосування регресійного аналізу для дослідження поведінки зібраних статистичних даних.

3. Здійснено перевірку статистичних гіпотез відповідно до характеру розподілу випадкових величин зносу гальмових колодок і їх взаємозв'язку щодо належності даних до однієї генеральної сукупності. Побудовані регресійні моделі були перевірені на адекватність за гіпотезою F–критерію Фішера. Так само під час оцінювання параметрів регресії були перевірені гіпотези на їх статистичну значимість за t–критерієм Стюдента.

4. Виконано перевірку відповідності експериментально-теоретичних розрахунків за критерієм Кохрена й отримано підтвердження, що в середньому знос гальмових колодок зверху і знизу має різні значення.

5. Створено графічні залежності на основі регресійного аналізу зносу гальмових колодок, які дають можливість спрогнозувати їхній залишковий ресурс за умови використання модернізованих пристроїв на увесь гарантований вагоноремонтним підприємством і нормативно-технічними документами міжремонтний період експлуатації вантажних вагонів.

6. Теоретично визначено, що за умови встановлення на вантажні вагони модернізованих пристроїв середній пробіг вагона за рівномірного зносу гальмових колодок може досягати 280 тис. км.

7. Результати, отримані в роботі, будуть на майбутнє враховувати для розв'язання проблемних завдань щодо ненормативного зносу колодок у гальмових системах візків вантажних вагонів.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бакарджієв Р. О., Комаров А. О. Попередня оцінка і обробка даних при регресійному аналізі. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2015. № 28. С. 255–260.
2. Вагони вантажні. Система технічного обслуговування та ремонту за технічним станом: *СТП 04 – 010:2018* [Чинний від 2019-08-08 № 519-Ц]. Київ, 2018. 25 с.
3. Гребенникова И. В. *Методы математической обработки экспериментальных данных: учебно-метод. пособие*. Екатеринбург : Уральский университет. 2015. 124 с.
4. Жаров И. А., Макас А. А. Методы статистической обработки результатов измерения тормозных путей при оценке эффективности тормозных средств подвижного состава. *Вестник ВНИИЖТ*. 2009. № 5. С. 29–33.
5. *Інструкція з експлуатації гальм рухомого складу на залізницях України: ЦТ-ЦВ-ЦЛ-0015*. [Чинний від 1997-10-28 № 264-Ц]. Київ : ТОВ НВП «Поліграфсервіс», 2004. 146 с.
6. Камкіна Л. В., Надточій А. А., Гришин А. М., Стогній Ю. Д. *Основи наукових досліджень: навчальний посібник* (російською мовою). Дніпропетровськ : НМетАУ, 2013. 89 с.
7. Карпычев В. А., Никитин Г. Б., Андреев П. А. К вопросу оценки и контроля тормозных нажатий колодок на колеса в зависимости от положений рычагов при регулировке рычажной передачи тележки 18-100. *Вестник ВНИИЖТ*. 2013. № 5. С. 43–47.
8. Коптовец А. Н. Идентификация состояния тормоза шахтных локомотивов в условиях структурной неопределенности. *Геотехническая механика*. 2014. № 119. С. 241–246.
9. Коропець П. А., Черніков В. Д., Костюкевич А. І. Про нерівномірний знос рухомих фрикційних пар. *Вісник СНУ ім. Даля*. 2010. № 5 (147). С. 41–45.
10. Ловська А. О. Особливості комп'ютерного моделювання навантаженості контейнера з пружно-в'язкими зв'язками у фітінгах при експлуатаційних режимах. *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій : Серія «Транспортні системи і технології»*. 2019. Вип. 33. Т. 2. С. 28–37. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-33-2-3>
11. *Підсилюючий пристрій до паралельного відведення колодок від коліс у гальмівній системі візків вантажних вагонів*: пат. 121889 Україна: МПК51 В60Т 1/02 (2006.01), В61Н 15/00, В61Н 13/00; заявл. 24.04.17; опубл. 26.12.17, Бюл. № 24. 12 с.
12. Равлюк В. Г. Дослідження особливостей дуального зносу колодок у гальмовій системі вантажних вагонів. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 2 (80). С. 111–126. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/166114>
13. Шпачук В. П., Пушня В. О., Рубаненко О. І., Гарбуз А. О. *Теоретична механіка. Динаміка* : консп. лекцій. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016. 222 с.
14. Gorobchenko O., Tkachenko V. Statistical analysis of locomotive traction motors performance. *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 287. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928704002>
15. Fomin O., Lovska A., Masliyev V., Tsybaliuk A., Burlutski O. Determining strength indicators for the bearing structure of a covered wagon's body made from roundpipes when transported by a railroad ferry. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 1. Iss. 1 (97). P. 33–40. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154282>
16. Leng L., Zhu W. Compound Regression and Constrained Regression: Nonparametric Regression Frameworks for EIV Models. *The American Statistician Journal*. Vol. 134. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1080/00031305.2018.1556734>
17. Ravlyuk V., Ravlyuk M., Hrebenuk V., Bondarenko V. Research of the calculation scheme for the brake lever transmission and construction of the load model for the brake pads of freight cars. *IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012026>
18. Sharma B. Processing of data and analysis. *Biostatistics and Epidemiology International Journal*. 2018. Vol. 1. Iss. 1. P. 3–5. DOI: <https://doi.org/10.30881/beij.00003>
19. Sarma K. V. S., Vardhan R. V. *Vishnu. Multivariate Statistics Made Simple. A Practical Approach*. New York, 2018. 258 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429465185>
20. Thrane C. *Applied Regression Analysis. Doing, Interpreting and Reporting*. London, 2019. 202 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780429443756>

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

21. Vakkalagadda M. R. K., Srivastava D. K., Mishra A., Racherla V. Performance analyses of brake blocks used by Indian Railways. *Wear*. 2015. Vol. 328–329. P. 64–76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.044>.
22. Vineesh K. P., Vakkalagadda M. R. K., Tripathi A. K., Mishra A., Racherla V. Non-uniformity in braking in coaching and freight stock in Indian Railways and associated causes. *Engineering Failure Analysis*. 2016. Vol. 59. P. 493–508. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.11.023>
23. Zhang Y., Zhang M. The application status of unit brakes on metro vehicles in China. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*. 2018. Vol. 3 (15). P. 17–23. DOI: <https://doi.org/10.9790/1684-1503031723>

В. Г. РАВЛЮК<sup>1</sup>, М. Г. РАВЛЮК<sup>2</sup>, И. К. КИРИЧЕНКО<sup>3</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 [ravgv@ukr.net](mailto:ravgv@ukr.net), ORCID 0000-0003-4818-9482

<sup>2</sup>Каф. «Вагоны», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61500, тел. +38 (057) 730 10 35, эл. почта [ravgm@ukr.net](mailto:ravgm@ukr.net), ORCID 0000-0002-6021-660X

<sup>3</sup>Каф. «Физико-математические дисциплины», Национальный университет гражданской защиты Украины, ул. Чернышевская, 94, Харьков, Украина, 61023, тел. +38 (095) 4870238, эл. почта [ikir238@gmail.com](mailto:ikir238@gmail.com), ORCID 0000-0001-7375-8275

## СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПАРАМЕТРОВ ИЗНОСА ТОРМОЗНЫХ КОЛОДОК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

**Цель.** Это исследование направлено на статистическую обработку контролируемых в эксплуатации геометрических параметров износа колодок модернизированных тормозных систем тележек грузовых вагонов.

**Методика.** Применен статистический подход к построению графической зависимости износа тормозных колодок от пробега вагонов на основе предварительно собранных данных износа в контрольных точках, что регламентировано требованиями планово-предупредительного ремонта (ППР). Теоретико-эксплуатационные исследования, касающиеся уменьшения ненормативного износа тормозных колодок, выполнены по методике регрессионного анализа на основании экспериментальных данных опытной эксплуатации модернизированных устройств тормозных систем тележек грузовых вагонов. Обосновано «паллиативный» подход к решению этой задачи. **Результаты.** Установлено, что на практике имеют место случаи, когда колодки не обеспечивают своего регламентированного пробега, вследствие чего их преждевременно заменяют по причине клинодуального износа. А это, с точки зрения экономики и безопасности их использования, приводит к снижению тормозной эффективности в триангельных тормозных системах. Экспериментально-научными исследованиями выявлено, что при выполнении плана грузовых перевозок до 95% колодок вагонов, при использовании типовых устройств торможения, имеют вредный двойной фрикционный износ, что требует их замены в гарантированный межремонтный период. При обследовании в условиях эксплуатации явлений износа тормозных колодок для модернизированных устройств тележек на основе регрессионного анализа выполнено прогнозирование их остаточного ресурса, результатом которого является использование колодок на весь межремонтный период эксплуатации грузовых вагонов.

**Научная новизна.** Впервые адаптировано для построения регрессионной зависимости модель износа тормозных модернизированных устройств тормозных систем тележек в зависимости от пробега вагонов. По полученным результатам натурного эксперимента проведена обработка собранных данных об износе колодок при отсутствии нормального закона статистического распределения. Проверку соответствия экспериментально-теоретических расчетов по измерениям износа колодок оценено по тесту Кохрена. Предложено «паллиативный» подход для статистического анализа износа колодок в условиях эксплуатации, что позволяет спрогнозировать их остаточный ресурс с позиции их использования на весь межремонтный период эксплуатации грузовых вагонов. **Практическая значимость.** Результаты проведенных исследований апробированы на опытном подвижном составе с модернизированными устройствами для равномерного износа тормозных колодок в тележках. Получен патент на изобретение, рекомендованный к воплощению при проектировании новых и модернизации существующих тормозных систем тележек грузовых вагонов.

**Ключевые слова:** тормозная колодка; износ; тормозная рычажная передача (ТРП); вагон; анализ; модель; статистические исследования; выборка

V. G. RAVLYUK<sup>1</sup>, M. G. RAVLIUK<sup>2</sup>, I. K. KIRICHENKO<sup>3</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<sup>2</sup>Dep. «Cars», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61500,  
tel. +38 (057) 730 10 35, e-mail ravmg@ukr.net, ORCID 0000-0002-6021-660X<sup>3</sup>Dep. «Physical and Mathematical Sciences», National University of Civil Defence of Ukraine, Chernyshevskoho St., 94,  
Kharkiv, Ukraine, 61023, tel. +38 (095) 4870238, e-mail iikir238@gmail.com, ORCID 0000-0001-7375-8275

## STATISTICAL PROCESSING OF BRAKE PADS WEAR PARAMETERS OF FREIGHT CARS

**Purpose.** This study is aimed at the statistical processing of the geometric parameters of pad wear of the modernized brake systems of freight cars' bogies. **Methodology.** A statistical approach to the construction of the graphical dependence of the brake pad wear on the car run was applied based on the previously collected wear data at checkpoints, which is regulated by the requirements of routine preventive repair. In this sense, theoretical and operational studies concerning the reduction of the non-standard wear of the brake pads were performed according to the regression analysis method based on the experimental data of the experimental operation of the upgraded devices of the brake systems of freight car bogies. The palliative approach to solution of this task is substantiated. **Findings.** It has been established that in practice there are cases when the pads do not provide their regulated run, as a result of which they are replaced prematurely for reasons of wedge-shaped wear. From the point of view of the economy and safety of their use, it leads to a decrease in brake efficiency in triangular brake systems. Experimental and scientific studies have found that when performing freight transportations plan, up to 95% of the car brake pads at standard braking devices have harmful double friction wear. This requires pads replacement in the warranty inter-repair period. It is established that during the inspection in the conditions of operation of brake shoe wear phenomena for the upgraded bogie devices based on the regression analysis, the prediction of the residual life of the pads was performed, the result of which is their use for the whole inter-repair period of freight cars. **Originality.** For the first time, the model of brake pad wear for upgraded devices of the bogie brake systems, depending on the car run, is adapted to build the regression dependence. Based on the results of the full-scale experiment, processing of the collected data on the pads wear in the absence of a normal law of statistical distribution was performed. Correspondence check of experimental and theoretical calculations according to the measurements of the pads wear was evaluated by Kochran's test. A «palliative» approach is proposed for statistical analysis regarding the wear of pads in the operating conditions, allowing to predict the residual life of the brake pads for their use for the whole inter-repair period of freight wagons operation. **Practical value.** The results of the studies were tested on experimental rolling stock with upgraded devices for uniform wear of brake pads in the bogies. A patent for an invention was obtained, which is recommended for implementation during the design of new and modernization of the existing brake systems for freight car bogies.

**Keywords:** brake pad; wear; brake rigging; car; analysis; model; statistical studies; sampling

### REFERENCES

1. Bakardzhyiev, R. O., & Komarov, A. O. (2015). Preliminary assessment and data processing in regression analysis. Collected Works of Kirovohrad National Technical University. *Machinery in agricultural production, industry machine building, automation*, 28, 255-260. (in Ukrainian)
2. Vahonyvantazhni. *Systema tekhnichnohoo bslyhovuvannia ta remontu zatekhnich nymstanom: STP 04 – 010:2018, № 519-Ts*. (2018). Kyiv. (in Ukrainian)
3. Grebennikova, I. V. (2015). *Metody matematiches koyobra botkieksper imentalny khdannnykh: uchebno-metodicheskoe posobie*. Yekaterinburg: Uralski yuniversitet. (in Russian)
4. Zharov, A., & Makas, A. (2009). Methods of statistical processing results of brake distance measurement when evaluating efficiency of rolling stock brake systems. *Vestnik VNIIZHT*, 5, 29-33. (in Russian)
5. *Instruktsiia z ekspluatatsi ihalmruk homohos kladun azaliznytsiakh Ukrainy: TsT-TsV-TsL-0015, No. 264-Ts*. (2004). Kyiv. (in Ukrainian)
6. Kamkina, L. V., Nadtochii, A. A., Hryshyn, A. M., & Stohnii, Yu. D. (2013). *Osnovy naukovykh doslidzhen: navchalnyi posibnyk*. Dnipropetrovsk: NMetAU. (in Russian)

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

7. Karpichev, V. A., Nikitin, G. B., & Andreyev, P. A. (2013). Assessment and Control of Pressure Exerted by Brake Shoes on Wheels as Dependent on the Brake Beams Adjusted Position of the 18-100 Bogie. *Vestnik VNIIZHT*, 5, 43-47. (in Russian)
8. Koptovec, A. N. (2014). Identification of mine locomotive brake state in terms of structural uncertainty. *Geo-Technical Mechanics*, 119, 241-246. (in Russian)
9. Koropets, P. A., Chernikov, V. D., & Kostiukevych, A. I. (2010). Pro neriv nomirnyi znosruk homy khfryktsi-nykh par. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian national university*, 5(147), 41-45. (in Ukrainian)
10. Lovska, A. O. (2019). Features of the computer modeling of loading of container with elastic-related connections in the fittings in operating modes. *Transport Systems and Technologies: Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technologies*, 33(2), 28-37.  
DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-33-2-3> (in Ukrainian)
11. Ravlyuk, V. G., & Nechvoloda, S. I. (2017). *UA Patent № 121889 Ukrainskiyi instytut intelektual noivlasnosti* (Ukrpatent)
12. Ravlyuk, V. G. (2019). Investigation of features of dual wear of pads in brake system of freight cars. *Science and Transport Progress*, 2(80), 11-126. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/166114> (in Ukrainian)
13. Shpachuk, V. P., Pushnia, V. O., Rubanenko, O. I., & Harbuz, A. O. (2016). *Teoretychna mekhanika. Dynamika: Konspektlekcij*. Kharkiv: KhNUMGhim. O. M. Beketova. (in Ukrainian)
14. Gorobchenko, O., & Tkachenko, V. (2019). Statistical analysis of locomotives traction motors performance. *MATEC Web of Conferences*, 287, 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928704002> (in English)
15. Fomin, O., Lovska, A., Masliyev, V., Tsymbaliuk, A., & Burlutski, O. (2019). Determining strength indicators for the bearing structure of a covered wagon's body made from round pipes when transported by a railroad ferry. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(7(97)), 33-40.  
DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154282> (in English)
16. Leng, L., & Zhu, W. (2019). Compound Regression and Constrained Regression: Nonparametric Regression Frameworks for EIV Models. *The American Statistician*, 134, 1-13.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/00031305.2018.1556734> (in English)
17. Ravlyuk, V., Ravliuk, M., Hrebenuk, V., & Bondarenko, V. (2019). Research of the calculation scheme for the brake lever transmission and construction of the load model for the brake pads of freight cars. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 708, 1-8.  
DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012026> (in English)
18. Sharma, B. (2018). Processing of data and analysis. *Biostatistics and Epidemiology International Journal*, 1(1), 3-5. DOI: <https://doi.org/10.30881/beij.00003> (in English)
19. Sarma, K. V. S., & Vardhan, R. V. (2018). *Multivariate Statistics Made Simple. A Practical Approach*. New York. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429465185> (in English)
20. Thrane, C. (2019). *Applied Regression Analysis. Doing, Interpreting and Reporting*. London.  
DOI: <https://doi.org/10.4324/9780429443756> (in English)
21. 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: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.044> (in English)
22. Vineesh, K. P., Vakkalagadda, M. R. K., Tripathi, 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: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.11.023> (in English)
23. Zhang, Y., & Zhang, M. (2018) The application status of unit brakes on metro vehicles in China. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 3(15), 17-23.  
DOI: <https://doi.org/10.9790/1684-1503031723> (in English)

Надійшла до редколегії: 25.11.2019

Прийнята до друку: 26.03.2020

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.463.62

О. В. ФОМІН<sup>1</sup>, А. О. ЛОВСЬКА<sup>2\*</sup><sup>1</sup>Каф. «Вагони та вагонне господарство», Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, Київ, Україна, 04071, тел. +380 (67) 813 97 88, ел. пошта fomin1985@ukr.net, ORCID 0000-0003-2387-9946<sup>2\*</sup>Каф. «Вагони», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Феєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта alyonalovskaya.vagons@gmail.com, ORCID 0000-0002-8604-1764

## ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ НЕСУЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ ВАГОНА-ПЛАТФОРМИ ЗЧЛЕНОВАНОГО ТИПУ З КРУГЛИХ ТРУБ

**Мета.** Це дослідження спрямоване на визначення показників міцності несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу з круглих труб. **Методика.** Створено комп'ютерну модель несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу з круглих труб. Для дослідження динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи проведено математичне моделювання. Розрахунок виконано в плоскій системі координат. До уваги взяті коливання посмикування, галопування та підсакування. Розв'язок диференціальних рівнянь руху здійснено в програмному забезпеченні MathCad. Проведено розрахунок на міцність несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу. **Результати.** Встановлено, що прискорення, які припадають на несучу конструкцію першої секції вагона-платформи, складають 38,2 м/с<sup>2</sup>, а другої – близько 37,5 м/с<sup>2</sup>. Отримані величини прискорень ураховано для визначення показників міцності несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу. Розрахунок проведено за методом скінченних елементів у програмному забезпеченні CosmosWorks. Ураховано, що кожна секція вагона-платформи завантажена двома 20-футовими контейнерами. Результати проведених розрахунків дозволили зробити висновок, що максимальні еквівалентні напруження виникають у консольних частинах хребтової балки та складають близько 200 МПа, тобто не перевищують допустимі. Максимальні переміщення у вузлах конструкції зафіксовано в середніх частинах секцій та складають 3,8 мм, максимальні деформації складають  $2,3 \cdot 10^{-3}$ . **Наукова новизна.** Розроблено комп'ютерну модель для визначення міцності несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу з круглих труб. Модель дозволяє визначити показники міцності несучої конструкції вагона-платформи за поздовжньої навантаженості конструкції. **Практична значимість.** Проведені дослідження сприятимуть підвищенню ефективності експлуатації комбінованих перевезень та створенню рекомендацій щодо проектування сучасних конструкцій вагонів-платформ зчленованого типу.

**Ключові слова:** вагон-платформа; зчленований вагон; несуча конструкція; динамічна навантаженість; міцність; контейнерні перевезення

### Вступ

Підвищення обсягів перевезень вантажів через міжнародні транспортні коридори зумовлюють необхідність введення в експлуатацію контейнерних перевезень. Перевезення контейнерів залізницею здійснюють на вагонах-платформах. В останні роки для підвищення ефективності контейнерних перевезень використовують вагони-платформи зчленованого типу. Особливістю таких вагонів є те, що їх несуча конструкція складається з двох секцій, які опираються на три візки.

На сучасному етапі розвитку залізничної галузі на стадії проектування вагонів-платформ зчленованого типу необхідним є впровадження нових інноваційних рішень щодо їх конструк-

ційного виконання. Це дозволить зменшити матеріаломісткість несучих конструкцій вагонів-платформ, а відповідно, і витрати на їх виготовлення в разі забезпечення умов міцності та експлуатаційної надійності.

Під час проектування сучасних конструкцій вагонів-платформ зчленованого типу важливим є врахування уточнених величин навантажень, що можуть діяти на них в експлуатації. Наявна нормативна база не висвітлює в повній мірі особливостей навантаженості несучих конструкцій вагонів-платформ зчленованого типу за основних експлуатаційних режимів. Це викликає необхідність проведення відповідних досліджень у цьому напрямі для формування рекомендацій щодо проектування сучасних конструкцій вагонів-платформ зчленованого типу.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Визначення впливу поздовжнього й поперечного зміщення центра тяжіння великовагового вантажу на вагонах-платформах проведено в [14]. У ході виконання досліджень отримано залежності основних динамічних показників з огляду на величину швидкості руху.

Аналіз несучої конструкції вагона-платформи проведено в [17]. Особливістю вагона-платформи є можливість регулювання корисної довжини залежно від габаритів вантажу, який на ньому перевозять.

Важливо зазначити, що в розглянутих роботах дослідженню поздовжньої динамічної навантаженості несучих конструкцій вагонів за експлуатаційних режимів уваги не було приділено.

Дослідження динамічної навантаженості несучої конструкції кузова вагона під час перевезень на залізничному поромі наведено в [5, 6]. Результати математичного моделювання підтверджено комп'ютерним.

Питання динамічної навантаженості та міцності вагонів-платформ зчленованого типу в роботах не розглянуто.

Перспективи застосування матеріалів нового покоління під час виготовлення залізничних вагонів висвітлено в [10]. Зазначено переваги використання магнієвих сплавів у несучих системах вагонів. Проте автори не вказали особливостей динамічної навантаженості вагонів, виготовлених із таких матеріалів, за експлуатаційних режимів.

Конструкційні особливості довгобазового вагона-платформи висвітлено в [15]. Особливістю вагона є відсутність хребтової балки за довжиною рами. Наведено результати розрахунку на міцність несучої конструкції вагона-платформи, реалізовані в програмному середовищі ANSYS. Однак при цьому автори не проводили математичного моделювання динамічної навантаженості вагона-платформи, а під час розрахунків на міцність ураховували нормативні величини навантажень.

Удосконалення несучої конструкції вантажного вагона висвітлено в [16]. Наведено результати розрахунку на міцність несучої конструкції вагона.

Під час проведення розрахунків автори обмежилися нормативними значеннями навантажень, які діють на вагон. Тобто моделювання динамічної навантаженості несучої конструкції вагона в цих роботах не було проведено.

Визначення динамічної навантаженості вагонів під час перевезень на залізничних пороміях проведено в [11]. Отримані величини динамічних навантажень враховано в розрахунках на міцність несучих конструкцій вагонів.

Дослідження динамічної навантаженості вагонів зчленованого типу в роботі не виконано.

Розрахунок на міцність вагона-платформи для перевезення контейнерів наведено в [19]. Ураховано, що на вагоні-платформі знаходяться два 40-футових контейнери. Чисельні значення розрахункових навантажень, які діють на вагон-платформу, узяті відповідно до чинних нормативів.

Обґрунтування доцільності експлуатації вагонів-платформ для перевезення контейнерів подано в [7]. За конструкцією вагон-платформа має вантажопідйомність 73 т та може здійснювати перевезення контейнерів типорозміру 1СС, 1С, а також 1СХ.

Особливості модернізації несучих конструкцій вагонів для забезпечення їх міцності в експлуатації розглянуто у [12]. Наведено результати розрахунку на міцність кузовів вагонів з урахуванням запропонованих рішень.

Однак у розглянутих роботах не висвітлено особливостей навантаженості несучих конструкцій вагонів за експлуатаційних режимів.

### Мета

Основною метою статті є визначення показників міцності несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу з круглих труб. Для досягнення зазначеної мети визначено такі завдання:

1. запропонувати модель несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу з круглих труб;

2. скласти математичну модель динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу з круглих труб за основних експлуатаційних режимів;



## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

3. створити комп'ютерну модель для визначення міцності несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу з круглих труб;

4. визначити показники міцності несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу з круглих труб.

**Методика**

Для зменшення матеріаломісткості вагонів-платформ запропоновано виготовлення несучих елементів їх конструкцій із труб круглого перерізу. При цьому вдосконалена несуча конструкція вагона-платформи має тару на 5 % меншу за тару вагона-прототипу (вагон-платформа моделі 13–401).

Для підвищення ефективності експлуатації вагона спроектовано модель несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу (рис. 1). Несуча конструкція складається з двох секцій, які спираються на три візки. Взаємодія секцій між собою здійснюється через пристрій зчленування SAC–1. Для визначення діаметрів труб, з яких складається конструкція, використано метод оптимізації за критерієм мінімуму матеріаломісткості. При цьому шворнева балка має конструкцію, ідентичну до тієї, яка використана на вагоні-прототипі. З боку спирання се-

кцій на середній візок шворнева балка замінена на балку круглого перерізу.

Для можливості перевезення контейнерів на вагоні-платформі передбачено постановку відкидних фітингових упорів у середній частині секцій, що дозволяє здійснювати перевезення контейнерів різного типорозміру.

Для дослідження динамічної навантаженості вагона-платформи зчленованого типу використано математичну модель, розроблену проф. Г. І. Богомазом. Цю модель було доопрацьовано шляхом урахування переміщень двох секцій за експлуатаційних режимів навантаження. Також у моделі скасовано пружні зв'язки між контейнерами та несучою конструкцією вагона-платформи [3].

Ураховано, що вагон-платформа завантажений контейнерами типорозміру 1СС. Дослідження коливань вагона-платформи з контейнерами здійснено у плоскій системі координат.

Під час складання математичної моделі враховано, що кожна секція вагона-платформи має власну ступінь вільності. Це припущення обґрунтовано тим, що конструкційні особливості пристрою зчленування дозволяють здійснювати такі переміщення.

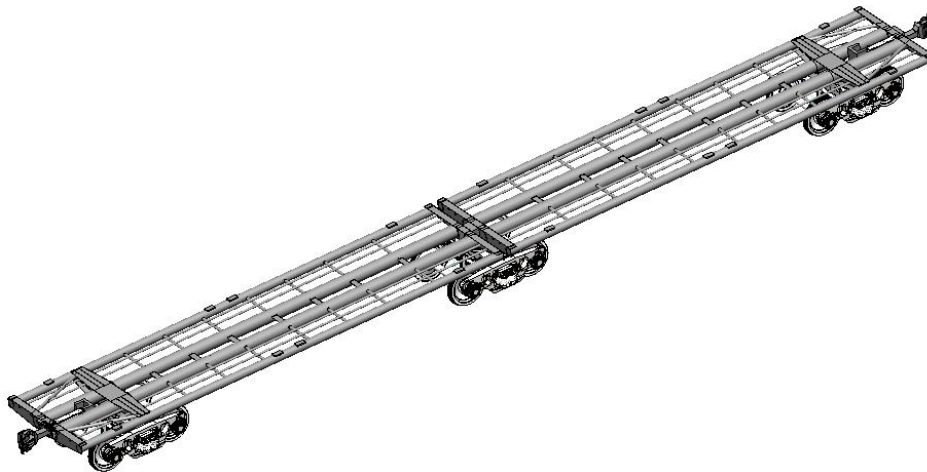


Рис. 1. Вагон-платформа зчленованого типу з труб круглого перерізу

Fig. 1. Articulated flatcar of round pipes

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

## Результати

Розрахункову схему вагона-платформи зчленованого типу з контейнерами під дією по-

здовжньої сили на несучу конструкцію наведено на рис. 2.

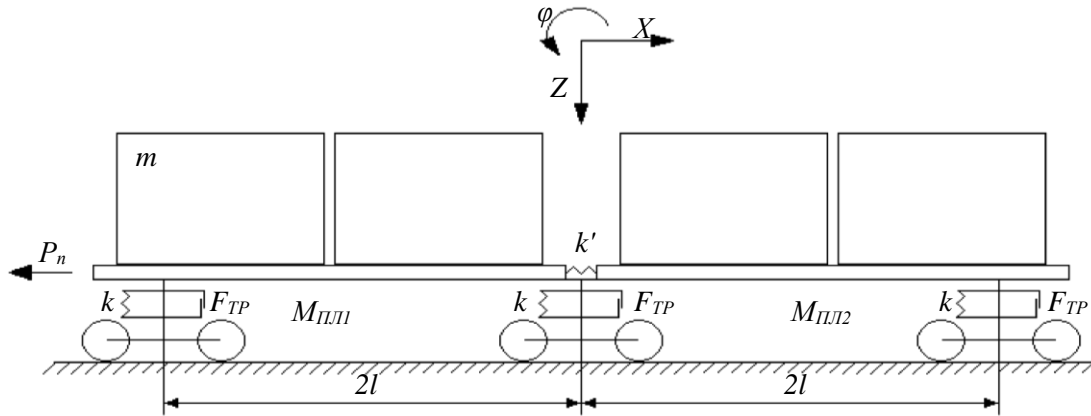


Рис. 2. Розрахункова схема вагона-платформи зчленованого типу

Fig. 2. Calculation scheme of the articulated flatcar

$$M'_{ПЛ1} \cdot \ddot{x}_{ПЛ1} + M_{ПЛ1} \cdot h \cdot \ddot{\phi}_{ПЛ1} + k'(x_{ПЛ1} - x_{ПЛ2}) = P_n, \quad (1)$$

$$I_{ПЛ1} \cdot \ddot{\phi}_{ПЛ1} + M_{ПЛ1} \cdot h \cdot \ddot{x}_{ПЛ1} - g \cdot \phi_{ПЛ1} \cdot M_{ПЛ1} \cdot h = l \cdot F_{TP} (\text{sign} \dot{\Delta}_1^{ПЛ1} - \text{sign} \dot{\Delta}_2^{ПЛ1}) + l(k_1 \cdot \dot{\Delta}_1^{ПЛ1} - k_2 \cdot \dot{\Delta}_2^{ПЛ1}); \quad (2)$$

$$M_{ПЛ1} \cdot \ddot{z}_{ПЛ1} = k_1 \cdot \Delta_1^{ПЛ1} + k_2 \cdot \Delta_2^{ПЛ1} - F_{TP} (\text{sign} \dot{\Delta}_1^{ПЛ1} - \text{sign} \dot{\Delta}_2^{ПЛ1}); \quad (3)$$

$$m_i \cdot \ddot{x}_{ПЛ1} + (m_i \cdot z_{ci}) \cdot \ddot{\phi}_{ПЛ1} = 0; \quad (4)$$

$$I_i \cdot \ddot{\phi}_{ПЛ1} + (m_i \cdot z_{ci}) \cdot \ddot{x}_{ПЛ1} - g \cdot (m_i \cdot z_{ci}) \cdot \phi_{ПЛ1} = 0; \quad (5)$$

$$m_i \cdot \ddot{z}_{ПЛ1} = 0; \quad (6)$$

$$M'_{ПЛ2} \cdot \ddot{x}_{ПЛ2} + M_{ПЛ2} \cdot h \cdot \ddot{\phi}_{ПЛ2} - k'(x_{ПЛ1} - x_{ПЛ2}) = 0; \quad (7)$$

$$I_{ПЛ2} \cdot \ddot{\phi}_{ПЛ2} + M_{ПЛ2} \cdot h \cdot \ddot{x}_{ПЛ2} - g \cdot \phi_{ПЛ2} \cdot M_{ПЛ2} \cdot h = l \cdot F_{TP} (\text{sign} \dot{\Delta}_1^{ПЛ2} - \text{sign} \dot{\Delta}_2^{ПЛ2}) + l(k_1 \cdot \dot{\Delta}_1^{ПЛ2} - k_2 \cdot \dot{\Delta}_2^{ПЛ2}); \quad (8)$$

$$M_{ПЛ2} \cdot \ddot{z}_{ПЛ2} = k_1 \cdot \Delta_1^{ПЛ2} + k_2 \cdot \Delta_2^{ПЛ2} - F_{TP} (\text{sign} \dot{\Delta}_1^{ПЛ2} - \text{sign} \dot{\Delta}_2^{ПЛ2}); \quad (9)$$

$$m_i \cdot \ddot{x}_{ПЛ2} + (m_i \cdot z_{ci}) \cdot \ddot{\phi}_{ПЛ2} = 0; \quad (10)$$

$$I_i \cdot \ddot{\phi}_{ПЛ2} + (m_i \cdot z_{ci}) \cdot \ddot{x}_{ПЛ2} - g \cdot (m_i \cdot z_{ci}) \cdot \phi_{ПЛ2} = 0; \quad (11)$$

$$m_i \cdot \ddot{z}_{ПЛ2} = 0, \quad (12)$$

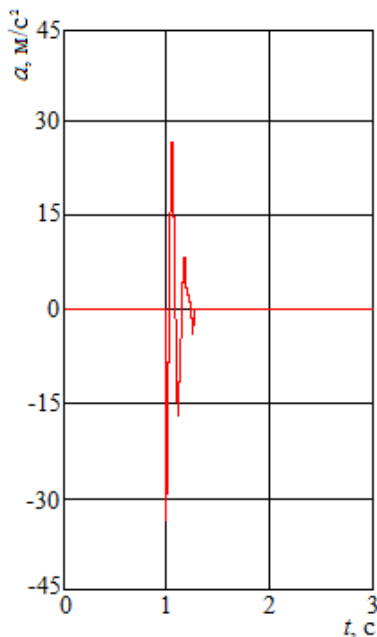
де  $\Delta_1^i = z_{ПЛi} - l \cdot \phi_{ПЛi}$ ;  $\Delta_2^i = z_{ПЛi} + l \cdot \phi_{ПЛi}$ ;  $i$ -ої секції вагона-платформи;  $I_{ПЛi}$  – момент інерції  $i$ -ої секції вагона-платформи;  $P_n$  – величина повздовжньої сили, що діє на автозцеп;  $l$  –

$M'_{ПЛi}$  – маса-брутто  $i$ -ої секції вагона-платформи;  $M_{ПЛi}$  – маса несучої конструкції

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

половина бази секції вагона-платформи;  $F_{\text{тр}}$  – абсолютне значення сили сухого тертя в ресорному комплекті;  $k'$  – жорсткість зв'язку між секціями;  $k_1, k_2$  – жорсткість пружин ресорних комплектів візків вагона-платформи (візок моделі 18–100);  $m_i$  – маса контейнера;  $z_{ci}$  – висота центра ваги контейнера;  $I_i$  – момент інерції  $i$ -го контейнера;  $x_i, \varphi_i, z_i$  – координати, що визначають переміщення секцій вагона-платформи відносно відповідних осей.

$a - a$



$b - b$

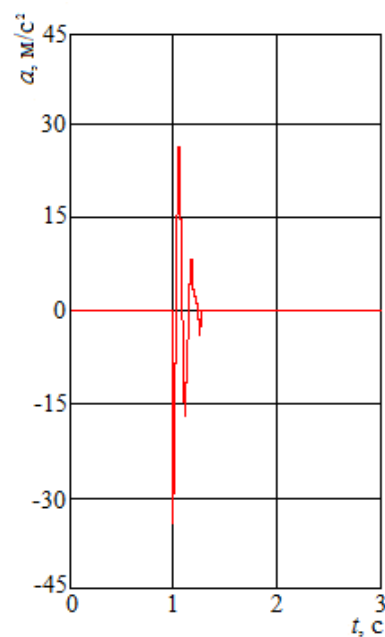


Рис. 3. Прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи зчленованого типу:

$a$  – перша з боку дії поздовжньої сили секція вагона-платформи;

$b$  – друга з боку дії поздовжньої сили секція вагона-платформи

Fig. 3. Accelerations acting on the load-bearing structure of the articulated flatcar:

$a$  – the first flatcar section on the side of longitudinal force;

$b$  – the second flatcar section on the side of longitudinal force

Наступним етапом у рамках цього дослідження є визначення показників міцності несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу.

Для визначення показників міцності несучої конструкції вагона-платформи з круглих труб складено комп'ютерну модель. Розрахунок проведено з використанням методу скінченних елементів у середовищі програмного забезпечення CosmosWorks [4, 18]. Розрахункову схему несучої конструкції вагона-платформи за

Поздовжнє навантаження, яке діє на несучу конструкцію вагона-платформи, узято рівним 2,5 МН [1, 2]. Розв'язання диференціальних рівнянь (1) – (12) здійснено в середовищі MathCad [8, 20].

Результати розрахунку показали, що прискорення, які діють на несучу конструкцію першої з боку сили секції вагона-платформи, складають 38,2 м/с<sup>2</sup>, а другої – близько 37,5 м/с<sup>2</sup> (рис. 3).

розрахункового режиму I (ривок) наведено на рис. 4. При цьому до передніх упорів прикладено поздовжнє навантаження у 2,5 МН [1, 2].

Ураховано, що кожна секція вагона-платформи завантажена двома 20-футовими контейнерами. Вертикальне навантаження від контейнерів було прикладено до горизонтальних поверхонь фітингових упорів у вигляді дистанційного навантаження з урахуванням центра ваги контейнерів [9, 13].

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

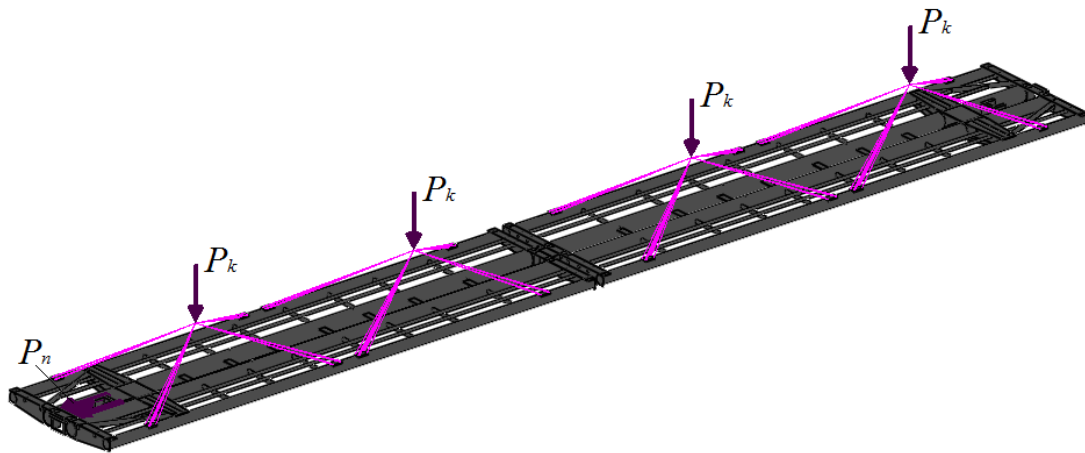


Рис. 4. Розрахункова схема несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу

Fig. 4. Calculation scheme of the load-bearing structure of the articulated flatcar

Для складання скінченно-елементної моделі несучої конструкції вагона-платформи використано просторові ізопараметричні тетраедри. Оптимальну кількість елементів сітки визначено з використанням графоаналітичного методу. При цьому кількість елементів сітки склала 5 406 526, вузлів – 1 538 366. Максимальний розмір елемента сітки дорівнює 15 мм, мінімальний – 3 мм, максимальне співвідношення боків елементів – 3 078,9; відсоток елементів зі співвідношенням боків менше трьох – 87,6; більше десяти – 0,212. Кількість елементів у колі – 8. Співвідношення збільшення розміру елемента – 1,7.

Закріплення моделі здійснено в зонах спинання несучої конструкції на ходові частини.

Результати розрахунку на міцність несучої конструкції вагона-платформи наведено нижче.

Максимальні еквівалентні напруження при цьому виникають у консольних частинах хребтової балки та складають близько 200 МПа, тобто не перевищують допустимі (рис. 5) [1, 2].

Максимальні переміщення у вузлах конструкції зафіксовано в середніх частинах секцій, вони складають 3,8 мм (рис. 6), максимальні деформації складають  $2,3 \cdot 10^{-3}$ .

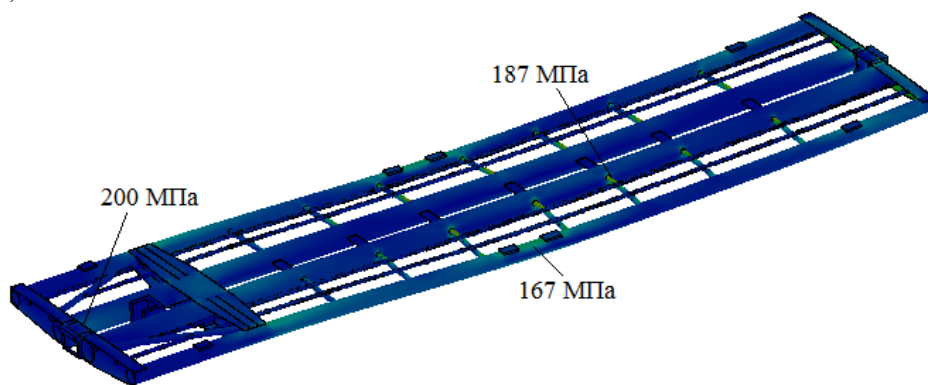


Рис. 5. Напружений стан секції зчленованого вагона-платформи

Fig. 5. The stress state of the articulated flatcar's section

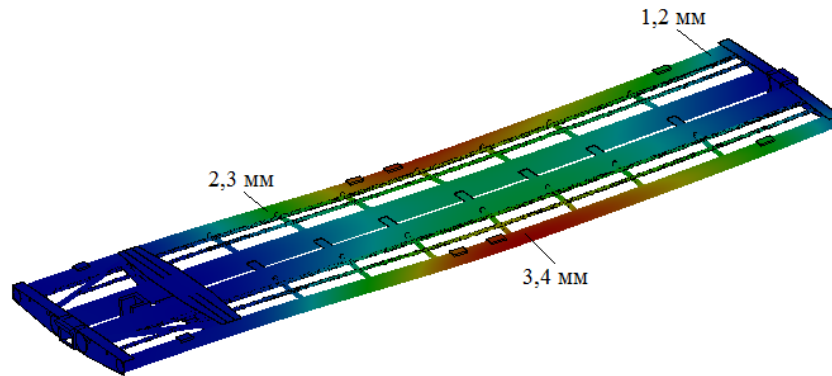


Рис. 6. Переміщення у вузлах секції зчленованого вагона-платформи

Fig. 6. Displacements in the section nodes of the articulated flatcar

### Наукова новизна та практична значимість

Розроблено комп'ютерну модель для визначення міцності несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу з круглих труб. Модель дозволяє визначити показники міцності несучої конструкції вагона-платформи за поздовжньої навантаженості конструкції (розтягнення – ривок).

Результати проведених досліджень можуть бути корисними під час створення сучасних конструкцій вагонів-платформ зчленованого типу.

### Висновки

Під час проведення цього дослідження:

1. Створено модель несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу з круглих труб. Для можливості перевезення контейнерів на вагоні-платформі передбачено постановку фітингових упорів. У середній частині рами розміщено відкидні фітингові упори, що дозволяє здійснювати перевезення контейнерів різного типорозміру.

2. Складено математичну модель динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи з круглих труб за основних експлуатаційних режимів. Під час складання математичної моделі враховано, що кожна секція вагона-платформи має власну ступінь вільності, оскільки конструкційні особливості пристрою зчленування дозволяють здійснювати їх пере-

міщення у просторі.

Результати досліджень дозволили зробити висновок, що прискорення, які припадають на несучу конструкцію першої з боку дії сили секції вагона-платформи, складають  $38,2 \text{ м/с}^2$ , а другої – близько  $37,5 \text{ м/с}^2$ .

3. Створено комп'ютерну модель для визначення міцності несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу з круглих труб. При цьому розрахунок проведено за розрахункового режиму I (ривок), тобто до передніх упорів прикладено поздовжнє навантаження. Враховано, що вагон-платформа завантажений чотирма контейнерами типорозміру 1СС. Вертикальне навантаження від контейнерів прикладено до горизонтальних поверхонь фітингових упорів у вигляді дистанційного навантаження.

4. Визначено показники міцності несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу з круглих труб. Розрахунок проведено за методом скінченних елементів. Установлено, що максимальні еквівалентні напруження виникають у консольних частинах хребтової балки та не перевищують допустимі. Максимальні переміщення у вузлах конструкції зафіксовано в середніх частинах секцій.

Проведені дослідження сприятимуть підвищенню ефективності експлуатації комбінованих перевезень та створенню рекомендацій щодо проєктування сучасних конструкцій вагонів-платформ зчленованого типу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. [Действие от 2016-07-01]. Москва, 2016. 54 с.
2. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). [Чинний від 2015-07-01]. Київ, 2015. 250 с.
3. Ловська А. О. Удосконалення несучої конструкції вагона-платформи для підвищення ефективності контейнерних перевезень. *Наука та прогрес транспорту*. 2017. № 1 (67). С. 168–183. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.164.2016.92508>
4. Bofang Z. *The finite element method : Fundamentals and Applications in Civil, Hydraulic, Mechanical and Aeronautical engeneering*. China : China Institute of water resources and gidropower research, 2018. 872 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119107323>
5. Fomin O., Lovska A., Kulbovskiy I., Holub H., Kozarchuk I., Kharuta V. Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2. Iss. 7 (98). P. 6–12. DOI: <https://doi.org/10.15587/17294061.2019.160456>
6. Fomin O., Lovska A., Masliyev V., Tsymbaliuk A., Burlutski O. Determining strength indicators for the bearing structure of a covered wagon's body made from round pipes when transported by a railroad ferry. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 1. Iss. 7 (97). P. 33–40. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154282>
7. Ishchenko V. M., Fedosov-Nikonov D. V. Long Wheelbase Flat Wagons : Structural Strength. *Metallurgical and Mining Industry*. 2017. No. 8. P. 26–31.
8. Kondratiev A. V., Gaidachuk V. E., Kharchenko M. E. Relationships between the ultimate strengths of polymer composites in static bending, compression, and tension. *Mechanics of Composite Materials*. 2019. Vol. 52/ Iss. 2. P. 259–266. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11029-019-09808-x>
9. Kurowski P. *Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2019*. SDC Publications, 2019. 606 p. DOI: <https://doi.org/10.4271/9781630572372>
10. Lee W. G., Kim J.-S., Sun S.-J., Lim J.-Y. The next generation material for lightweight railway car body structures: Magnesium alloys. *Proceeding of the institution of Mechanical Engineers Part F : Journal of Rail and Rapid Transit*. 2016. Vol. 232. Iss. 1. P. 25–42. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409716646140>
11. Lovska A. Simulation of loads on the carrying structure of an articulated flat car in combined transportation. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7. Iss. 4.3. P. 140–146. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19724>
12. Płaczek M., Wróbel A., Buchacz A. A concept of technology for freight wagons modernization. *IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 161. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757899X/161/1/012107>
13. Reyes A. *Beginners guide to SolidWorks 2018*. SDC Publications, 2017. 757 p.
14. Shatunov O. V., Shvets A. O. Study of dynamic indicators of flat wagon with load centre shift. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 2 (80). С. 127–143. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/165160>
15. Šťastniak P., Kurčík P., Pavlík A. Design of a new railway wagon for intermodal transport with the adaptable loading platform. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 235. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823500030>
16. Vatulina G., Falendysh A., Orel Y., Pavliuchenkov M. Structural improvements in a tank wagon with modern software packages. *Procedia engineering*. 2017. Vol. 187. P. 301–307. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.379>
17. WBN Waggonbau Niesky GmbH : *Developing a flexible platform of freight wagons*. Intern. Edition. 2016. № 1. P. 46.
18. Weber M., Verma G. *SolidWorks Simulation 2015*. Black Book. Cadcamcae Works. 2015. 398 p.
19. Wiesław K., Tadeusz N., & Michał S. Innovative project of prototype railway wagon and intermodal transport system. *Transport research procedia*. 2016. Vol. 14. P. 615–624. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.307>
20. Zhai W., Han Z., Chen Z., Ling L., & Zhu S. Train–track–bridge dynamic interaction : a state-of-the-art review. *Vehicle System Dynamics. International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*. 2019. Vol. 57. Iss. 7. P. 984–1027. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2019.1605085>

А. В. ФОМИН<sup>1</sup>, А. А. ЛОВСКАЯ<sup>2</sup><sup>1</sup>Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Государственный университет инфраструктуры и технологий, ул. Кирилловская, 9, Киев, Украина, 04071, тел. +380 (67) 813 97 88, эл. почта fomin1985@ukr.net, ORCID 0000-0003-2387-9946<sup>2</sup>\*Каф. «Вагоны», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61500, тел. +38 (057) 730 10 35, эл. почта alyonalovskaya.vagons@gmail.com ORCID 0000-0002-8604-1764

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ ВАГОНА-ПЛАТФОРМЫ СОЧЛЕНЕННОГО ТИПА ИЗ КРУГЛЫХ ТРУБ

**Цель.** Данное исследование направлено на определение показателей прочности несущей конструкции вагона-платформы сочлененного типа из круглых труб. **Методика.** Создана компьютерная модель несущей конструкции вагона-платформы сочлененного типа из круглых труб. Для исследования динамической нагруженности несущей конструкции вагона-платформы проведено математическое моделирование. Расчет проведен в плоской системе координат. Во внимание приняты колебания подергивания, галопирования и подпрыгивания. Решение дифференциальных уравнений движения осуществлено в программном обеспечении MathCad. **Результаты.** Установлено, что ускорения, которые приходятся на несущую конструкцию первой секции вагона-платформы, составляют 38,2 м/с<sup>2</sup>, а второй – около 37,5 м/с<sup>2</sup>. Полученные величины ускорений учтены при определении показателей прочности несущей конструкции вагона-платформы сочлененного типа. Расчет проведен по методу конечных элементов в программном обеспечении CosmosWorks. Учтено, что каждая секция вагона-платформы загружена двумя 20-футовыми контейнерами. Результаты проведенных расчетов позволили сделать вывод, что максимальные эквивалентные напряжения возникают в консольных частях хребтовой балки и составляют около 200 МПа, то есть не превышают допускаемые. Максимальные перемещения в узлах конструкции зафиксированы в средних частях секций и составляют 3,8 мм, максимальные деформации составляют  $2,3 \cdot 10^{-3}$ . **Научная новизна.** Разработана компьютерная модель для определения прочности несущей конструкции вагона-платформы сочлененного типа из круглых труб. Модель позволяет определить показатели прочности несущей конструкции вагона-платформы при продольной нагруженности конструкции. **Практическая значимость.** Проведенные исследования будут способствовать повышению эффективности эксплуатации комбинированных перевозок и созданию рекомендаций по проектированию современных конструкций вагонов-платформ сочлененного типа.

**Ключевые слова:** вагон-платформа; сочлененный вагон; несущая конструкция; динамическая нагруженность; прочность; контейнерные перевозки

O. V. FOMIN<sup>1</sup>, A. O. LOVSKA<sup>2</sup><sup>1</sup>Dep. «Cars and Car Facilities», State University of Infrastructure and Technologies, Kyrylivska St., 19, Kyiv, Ukraine, 04071, tel. +38 (067) 813 97 88, e-mail fomin1985@ukr.net, ORCID 0000-0003-2387-9946<sup>2</sup>\*Dep. «Cars», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61500, tel. +38 (057) 730 10 35, e-mail alyonalovskaya.vagons@gmail.com, ORCID 0000-0002-8604-1764

## STRENGTH DETERMINATION OF LOAD-BEARING STRUCTURE OF ARTICULATED FLATCAR OF ROUND PIPES

**Purpose.** This study aims to determine the strength of the load-bearing structure of the articulated flatcar of round pipes. **Methodology.** A computer model of the load-bearing structure of an articulated flatcar of round pipes has been created. To study the dynamic loading of the load-bearing structure of the flatcar, mathematical modeling was performed. The calculation is made in a flat coordinates. The oscillations of twitching, pitching and bouncing are taken into account. The motion differential equations are solved in MathCad software. **Findings.** It was established that the accelerations that fall upon the load-bearing structure of the first section of the flatcar are 38.2 m/s<sup>2</sup>, and the second – about 37.5 m/s<sup>2</sup>. The obtained acceleration values are taken into account when determining the strength indicators of the flatcar load-bearing structure. The calculation is done using the finite element method in



## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

CosmosWorks software. It is taken into account that each section of the flatcar is loaded by two 20-foot containers. The results of the calculations made it possible to conclude that the maximum equivalent stresses occur in the cantilever parts of center sill and are about 200 MPa, i.e., they do not exceed the allowable ones. The maximal displacements in the structural node are fixed in the middle parts of the sections and are 3.8 mm, the maximum deformations are  $2,3 \cdot 10^{-3}$ . **Originality.** A computer model has been developed to determine the strength of the load-bearing structure of articulated flatcar made of round pipes. The model allows determining the strength indicators of the flatcar load-bearing structure with longitudinal loading of the structure. **Practical value.** The conducted research will increase operation efficiency of combined transportations and create recommendations on modern designing of articulated flatcars.

**Keywords:** flatcar; articulated car; load-bearing structure; dynamic load; strength; container transportation

## REFERENCES

1. *Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam, 54 GOST 33211-2014* (2016). (in Russian)
2. *Vagoni vantazhni. Zagalni vimogi do rozrahunkiv ta proektuvannya novih i modernizovanih vagoniv koliyi 1520 mm (nasamohidnih)*, 250 DSTU 7598:2014 (2015). (in Ukrainian)
3. Lovska, A. O. (2017). Improvement of the supporting structure of platform car for higher efficiency of container transportations. *Science and Transport Progress*, 1(67), 168-183. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.164.2016.92508> (in Ukrainian)
4. Bofang, Z. (2018). *The finite element metod: Fundamentals and Applications in Civil, Hydraulic, Mechanical and Aeronautical engeneering*. China: China Institute of water resources and gidropower research. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119107323> (in English)
5. Fomin, O., Lovska, A., Kulbovskiy, I., Holub, H., Kozarchuk, I., & Kharuta, V. (2019). Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(7(98)), 6-12. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160456> (in English)
6. Fomin, O., Lovska, A., Masliyev, V., Tsymbaliuk, A., & Burlutski, O. (2019). Determining strength indicators for the bearing structure of a covered wagon's body made from round pipes when transported by a railroad ferry. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(7(97)), 33-40. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154282> (in English)
7. Ishchenko, V. M., Fedosov-Nikonov, D. V. (2017). Long Wheelbase Flat Wagons: Structural Strength. *Metallurgical and Mining Industry*, 8, 26-31. (in English)
8. Kondratiev, A. V., Gaidachuk, V. E., & Kharchenko, M. E. (2019). Relationships Between the Ultimate Strengths of Polymer Composites in Static Bending, Compression, and Tension. *Mechanics of Composite Materials*, 55(2), 259-266. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11029-019-09808-x> (in English)
9. Kurowski, P. (2019). *Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2019*. SDC Publications. DOI: <https://doi.org/10.4271/9781630572372> (in English)
10. Lee, W. G., Kim, J.-S., Sun, S.-J., & Lim, J.-Y. (2016). The next generation material for lightweight railway car body structures: Magnesium alloys. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 232(1), 25-42. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409716646140> (in English)
11. Lovska, A. (2018). Simulation of Loads on the Carrying Structure of an Articulated Flat Car in Combined Transportation. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.3), 140-146. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19724> (in English)
12. Placzek, M., Wróbel, A., & Buchacz, A. (2016). A concept of technology for freight wagons modernization. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 161, 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/161/1/012107> (in English)
13. Reyes, A. (2017). *Beginners guide to SolidWorks 2018*. SDC Publications. (in English)
14. Shatunov, O. V., & Shvets, A. O. (2019). Study of dynamic indicators of flat wagon with load centre shift. *Science and Transport Progress*, 2(80), 127-143. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/165160> (in English)
15. Šťastniak, P., Kurčík, P., & Pavlík, A. (2018). Design of a new railway wagon for intermodal transport with the adaptable loading platform. *MATEC Web of Conferences*, 235, 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823500030> (in English)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

---

16. Vatulia, G., Falendysh, A., Orel, Y., & Pavliuchenkov, M. (2017). Structural Improvements in a Tank Wagon with Modern Software Packages. *Procedia Engineering*, 187, 301-307.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.379> (in English)
17. WBN Waggonbau Niesky GmbH. (2016). *Developing a flexible platform of freight wagons*. Niesky: WBN Waggonbau Niesky GmbH. (in English)
18. Weber, M., & Verma, G. (2015). *SolidWorks Simulation 2015*. Black Book. Cadcamcae Works.
19. Wiesław, K., Tadeusz, N., & Michał, S. (2016). Innovative Project of Prototype Railway Wagon and Intermodal Transport System. *Transportation Research Procedia*, 14, 615-624.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.307> (in English)
20. Zhai, W., Han, Z., Chen, Z., Ling, L., & Zhu, S. (2019). Train–track–bridge dynamic interaction: a state-of-the-art review. *Vehicle System Dynamics*, 57(7), 984-1027.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2019.1605085> (in English)

Надійшла до редколегії: 03.01.2020

Прийнята до друку: 30.04.2020

УДК 629.46-026.564:625.14

А. О. ШВЕЦЬ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</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](mailto:angela_Shvets@ua.fm), ORCID 0000-0002-8469-3902

## ВИЗНАЧЕННЯ СТІЙКОСТІ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ З УРАХУВАННЯМ ПАРАМЕТРІВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

**Мета.** Для перспективного підвищення швидкостей у роботі передбачено розглянути складні умови динамічної взаємодії залізничної колії з рухомих складом. Характер і рівень цієї взаємодії залежать як від конструкції одиниці рухомого складу, її стану та швидкості руху, так і від конструкції та стану самої колії. **Методика.** Оцінку можливого впливу на колію рухомого складу досліджено аналітичним методом. Напружений стан колії визначено розрахунковим способом із застосуванням залежностей між силовими факторами та характеристиками напружено-деформованого стану колії. Під час визначення статичного тиску колеса на рейку розглянуто вплив перекосів рухомого складу в рейковій колії за схемою «ялинка», за якої додатковий боковий вплив колісних пар візків на колійну структуру є максимальним. **Результати.** У ході проведення теоретичних досліджень отримано залежності коефіцієнта запасу стійкості від витискання поздовжніми силами з урахуванням різних видів сил інерції від нерівностей як на колесі, так і на рейковій нитці. Також отримано величини коефіцієнта тертя в контакті колеса та рейки від швидкості руху. **Наукова новизна.** Уперше поєднано правила розрахунку залізничної колії на міцність і визначення динамічної навантаженості рейкового екіпажу. Наведене вдосконалення дає можливість розраховувати величину конструкційної швидкості вагона на основі осьових навантажень, сил інерції від нерівностей на колесі та рейках, а також урахувати поздовжні квазістатичні сили, які виникають в поїзді за режимів гальмування. **Практична значимість.** Визначення коефіцієнта запасу стійкості від витискання з використанням наведеної методики дозволить більш ретельно розглянути та обґрунтувати причину сходження колісних пар із рейок. Застосування означеної методики розрахунку сприятиме визначенню міцності залізничної колії та баластного шару з урахуванням нерівномірності навантаження рейкових ниток у разі перекосів вантажного рухомого складу під дією стисканих квазістатичних поздовжніх сил.

**Ключові слова:** безпека руху; коефіцієнт запасу стійкості від витискання; поздовжні сили; розрахунок колії на міцність; швидкість руху

### Вступ

Наявний вагонний парк вітчизняних залізниць за своїми конструктивними особливостями, технічними характеристиками та станом вирізняється досить великою неоднорідністю. Як вантажний, так і пасажирський парки мають у своєму складі поряд із сучасними в конструктивному значенні одиницями велику кількість вагонів зі значним терміном експлуатації. Хоча ці вагони за технічним станом ще цілком працездатні, їх наявність у поїзді в ряді випадків викликає необхідність обмеження швидкості руху.

Максимально допустиму швидкість поїзда на ділянках мережі визначають із техніко-економічних міркувань. Однак для окремого

екіпажу, зокрема вагона, установлення максимально допустимої швидкості є суто технічним завданням, пов'язаним із визначенням його конструкційної швидкості. Максимальну швидкість безпечного руху сучасних несамохідних вагонів визначають виключно за умовами динамічної взаємодії колії та ходових частин. Звідси випливає, що поняття «конструкційна» швидкість вагона є умовним, оскільки без урахування конструкції і стану колії воно позбавлене практичного сенсу [1, 4, 5].

Конструкційною швидкістю вважають таку максимальну швидкість, за якої забезпечується необхідна міцність, стійкість і плавність ходу вагона на прямій ділянці колії сучасної типової конструкції, яка повністю задовольняє встановленим нормам утримання. Для колії менш дос-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

коналої конструкції або з низькими показниками технічного стану, для кривих ділянок, стрілок і т. под. встановлюють найбільш допустиму швидкість вагона, яка в ряді випадків нижча за конструкційну.

Із визначення конструкційної швидкості впливає, що її перевищення призводить до порушення вимог безпеки руху вагона або до появи прискорень і вібрацій, недопустимих за впливом на організм людини або вантажі. З огляду на те, що реальна колія, причому найдосконалішої конструкції, у процесі експлуатації може перебувати в різному стані, найбільш допустиму швидкість вагона навіть для прямої ділянки слід установлювати нижчу за конструкційну. Ступінь зниження допустимої швидкості відносно конструкційної потрібно встановлювати з урахуванням впливу на динаміку вагона допустимих відхилень від норм поточного утримання колії. Рівень конструкційної швидкості встановлюють для технічно справного вагона з урахуванням допустимих відступів і зносів, обумовлених нормами утримання [1, 4, 7, 10].

### Мета

Для більш точного перспективного планування підвищення швидкостей у роботі передбачено поєднати методики правил розрахунку залізничної колії на міцність та визначення динамічної навантаженості рейкового екіпажу. Це дозволить розраховувати величину конструкційної швидкості вагона на основі осьових навантажень, сил інерції від нерівностей на колесі та рейках, а також урахувати поздовжні квазістатичні сили, які виникають у поїзді за режимів гальмування.

### Методика

До визначення величини конструкційної швидкості вагонів підходять по-різному. Найчастіше її встановлюють за результатами випробувань, але іноді за результатами розрахунків. У будь-якому випадку визначають головним чином поперечні (бокові) сили взаємодії ходових частин екіпажу та колії, а також прискорення та переміщення частин екіпажу в горизонтальному поперечному і вертикальному напрямках [1, 6–10].

Установлення максимальної швидкості здійснюють порівнянням бокових сил і прискорень із допустимими значеннями. Ураховують також, що значне розвантаження коліс за наявності великої поперечної сили може служити причиною сходження рухомого складу з рейок. Величину конструкційної швидкості вагона встановлюють розрахунково-експериментальним шляхом із застосуванням теоретико-ймовірнісного методу на основі допустимих значень запасів стійкості проти перекидання та сходження з рейок, міцності несучих частин екіпажу, допустимих показників плавності ходу.

За динамічними показниками, які визначають розрахунковим та експериментальним методами, обчислюють коефіцієнти запасу стійкості колеса проти сходження з рейок через вкочування гребеня колеса на головку рейки. Значення коефіцієнтів динаміки порівнюють із прийнятими за нормами для розрахунку вагонів на міцність та встановлюють фактичні запаси міцності несучих частин екіпажу. Крім того, за значеннями коефіцієнтів динаміки оцінюють вплив вагона на колію.

Залізнична колія хоча і являє собою зовні просту інженерну споруду, але працює в надзвичайно складних умовах динамічної взаємодії з рухомих складом. Характер і рівень цієї взаємодії залежать від конструкції одиниці рухомого складу, її стану та швидкості руху, а також від конструкції і стану самої колії. Справна залізнична колія – це єдина комплексна конструкція, усі елементи якої працюють спільно, взаємно обумовлюючи загальний напружений стан. У динамічному відношенні його слід розглядати як частину загальної динамічної системи «екіпаж – колія» [1, 4, 5].

Сили впливу на колію коліс рухомого складу в місцях контакту з головою рейки викликають високі контактні напруження, а також вигин і кручення рейкових ниток. Крім вертикальних і поперечних горизонтальних сил, на колію діють поздовжні сили – це сили гальмування або прискорення під час розгону, сили угону та температурні сили [7, 8].

Загальний рівень динамічного впливу рухомого складу на колію за всіх інших рівних умов залежить від величин осьових навантажень та

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

швидкостей руху. Останні чинять досить істотний вплив на роботу колії, зокрема на її стабільність та напружений стан. Однак робота колії за тривалий період часу, накопичення в ній залишкових деформацій і виникнення різних пошкоджень утомного характеру залежать не тільки від рівня динамічного впливу, а здебільшого від кількості таких впливів за певний відрізок часу, тобто від вантажонапруженості.

У ряді випадків, наприклад, для оцінки можливого впливу на колію спроектованого рухомого складу, максимальні швидкості руху доводиться визначати розрахунковим способом. Розрахунки необхідні і для переходів від експериментальних результатів, отриманих щодо певної конструкції колії, до оцінки напруженого стану колії іншої потужності. У цьому випадку можна застосувати «Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість», у яких використано залежності між силовими факторами й характеристиками напружено-деформованого стану колії.

Вплив коливань у системі «колесо – колія» і вплив нерівностей на колії та колесі враховують силами інерції, що виникають під час взаємодії означеної системи, при цьому визначають чотири різновиди додаткових вертикальних сил, котрі виникають у системі, додатково до дії статичних сил [1, 2, 4, 5]:

$P_p$  – додаткова сила коливань надресорної будови, кН;  $P_{рн}$  – інерційне зусилля, яке виникає за рахунок руху колеса по плавній нерівності рейкової нитки, кН;  $P_{інк}$  – сила інерції необресореної маси екіпажу, колесо якого має ізольовану нерівність, кН;  $P_{бнк}$  – сила інерції необресореної маси екіпажу, колесо якого має безперервну нерівність, кН.

За розрахункове динамічне навантаження беремо максимальне ймовірне значення від сукупності дій постійної статичної та змінних динамічних сил:

$$P_{розр} = P_{дин}^{max} = \bar{P} + \lambda_{\phi} \cdot S, \quad (1)$$

де  $\bar{P}$  – середнє значення динамічної сили, кН;  $S$  – середньоквадратичне відхилення, кН;  $\lambda_{\phi}$  – нормуючий множник ( $\lambda_{\phi} = 2,5$ ) для заданого рівня імовірності  $\Phi = 0,994$ .

В практичних розрахунках колії на міцність середньоквадратичне відхилення сили  $S$ , що діє від колеса на рейку, визначаються за наступною залежністю [1, 2, 4, 5]:

$$S = \sqrt{S_p^2 + S_{рн}^2 + 0,05 \cdot S_{інк}^2 + 0,95 \cdot S_{бнк}^2}, \quad (2)$$

де  $S_p$ ,  $S_{рн}$ ,  $S_{інк}$ ,  $S_{бнк}$  – середньоквадратичні відхилення відповідних сил.

Середнє значення динамічного навантаження визначається за формулою:

$$\bar{P} = P_{ст} + \bar{P}_p, \quad (3)$$

де  $P_{ст}$  – статичний тиск колеса на рейку, кН (береться з паспортних даних рухомого складу);  $\bar{P}_p$  – середнє значення сили інерції, що викликається коливаннями надресорної частини екіпажу, кН.

При визначенні динамічного навантаження від одиночного колеса на рейку враховується лише паспортна вага рейкового екіпажу. Загально відомо, що при квазістатичному стиканні поїзда вагони в процесі руху встановлюються з перекосами. Найчастіше такі перекоси виникають за схемою «ялинки», при якій додатковий боковий вплив колісних пар візків на колійну структуру є максимальним [3, 7, 8].

Зі збільшенням квазістатичного стискання поїзда перекоси (рис. 1, а, б) збільшуються, викликаючи збільшення бокового й вертикального впливу коліс ходових частин вагона на колійну структуру. Тобто під час визначення статичного тиску колеса на рейку необхідно враховувати вплив поздовжніх сил квазістатичного характеру, які виникають у зоні контакту колеса та рейки за режимів гальмування.

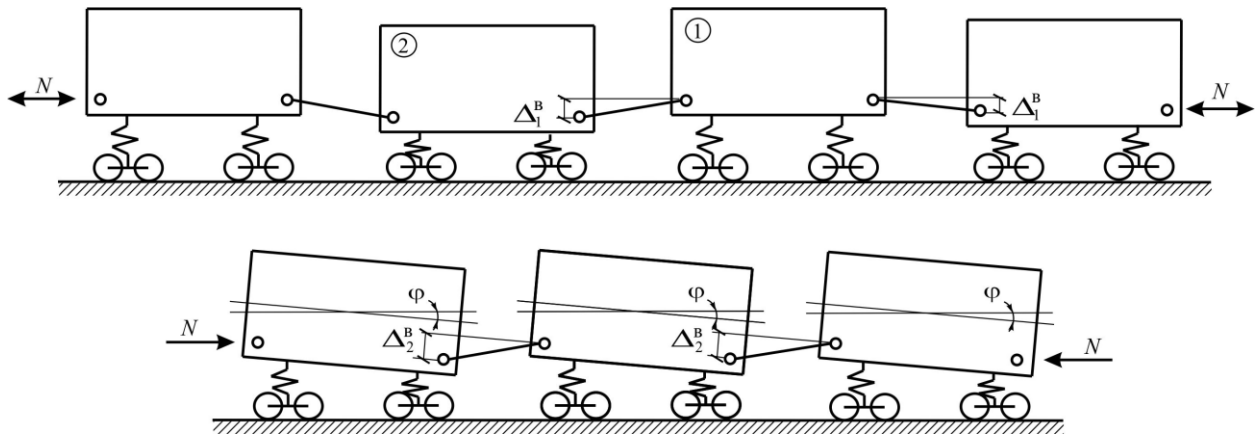
Основу методики визначення вертикальної та бокової реакції рейки на набігаючому колесі від дії поздовжніх сил складають дослідження, наведені в роботі [8]. Рух екіпажу в кривій досліджено за різних по обидві сторони вагона: кутах нахилу кузовів до площини колії  $\phi_1$  та  $\phi_2$ ; кутах повороту автозчеплень відносно осі колії  $\psi_1$  та  $\psi_2$ ; враховано поворот кузова вагона в межах зазору в колії на кут  $\psi$  та наявність ексцентриситету закріплення хвостової частини автозчеплення  $e$ . На вагон (рис. 2) діють стис-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

кні поздовжні сили, а сам екіпаж установлений у рейковій колії за схемою I – «ялинка», із відхиленням п'ятників поперек колії (в різні боки від початкового відхилення поздовжньої осі вагона) на величину  $\delta_0$ .

Сили, що діють на вагон спроектовані на площину колії та їй перпендикулярні – поздовжню відносно осі колії та поперечну. Наведені на рис. 2 позначення, а також параметри, які використовують за визначення коефіцієнта стійкості від витискання поздовжніми силами, зведені в табл. 1.

*a – a*



*b – b*

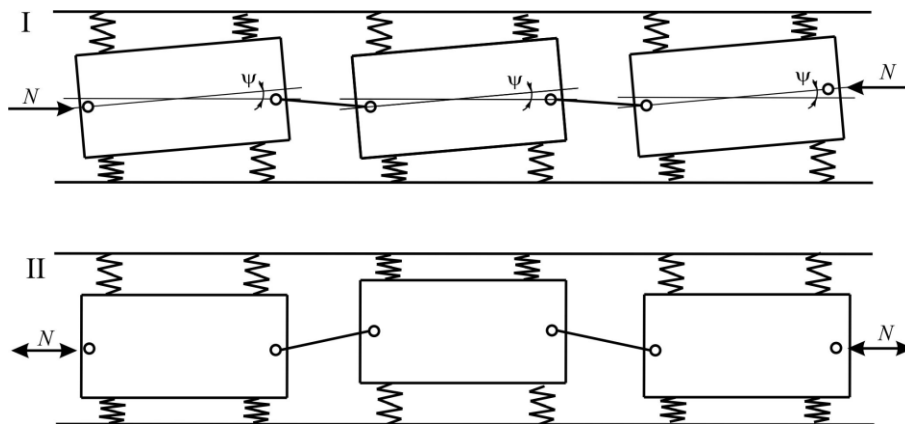


Рис. 1. Розташування вагонів у складі поїзда в разі передачі поздовжнього зусилля:

*a* – установка вагонів у вертикальній площині з перекосом;

*b* – у горизонтальній площині у випадку перекосу за схемою «ялинка» (схема I);  
хордове розташування (схема II)

Fig. 1. Arrangement of cars in the train in case of transmission of longitudinal force:

*a* – arrangement of cars in the vertical plane with a skew;

*b* – in the horizontal plane in the case of skew according to the herringbone pattern (scheme I);  
chordal arrangement (scheme II)

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

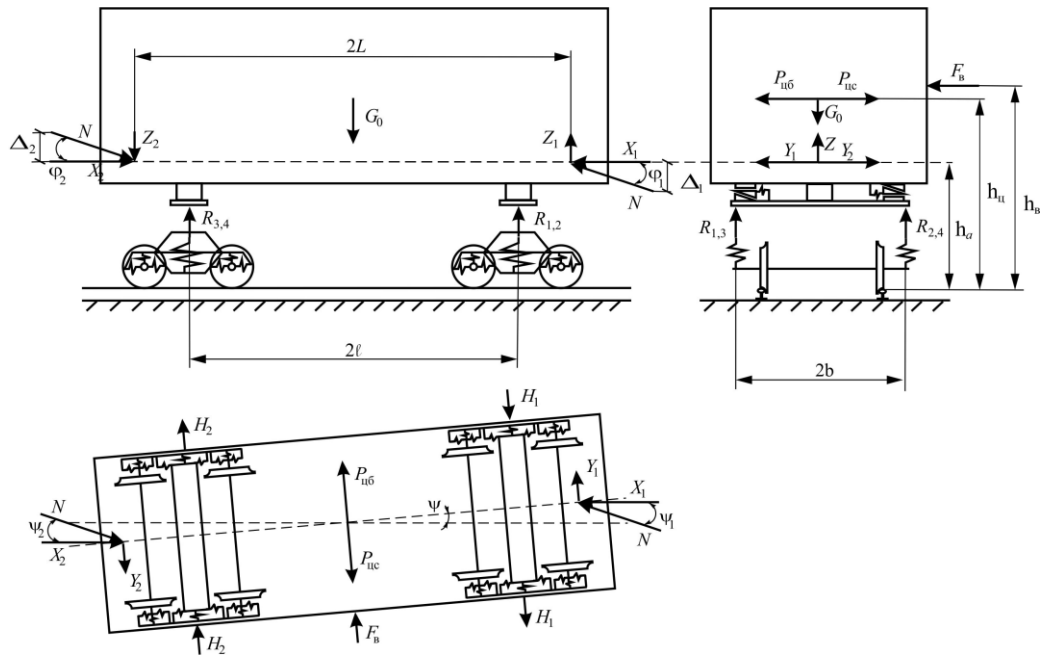


Рис. 2. Схема сил, що діють на вагон у випадку установки за схемою «ялинка»

Fig. 2. The scheme of forces acting on the car in case of arrangement according to the herringbone pattern

Таблиця 1

## Параметри для визначення коефіцієнта стійкості від витискання поздовжніми силами

Table 1

## Parameters for determining the car lift resistance coefficient by longitudinal forces

Позначення	Параметр	Розмірність
$N$	поздовжня квазістатична сила в автозчепленні в разі дії на вагон стискних сил	кН
$G_0$	вага кузова вагона	кН
$H_p$	рамна сила, що діє на колісну пару	кН
$G_{\text{віз}}$	вага візка	кН
$C_r$	горизонтальна жорсткість ресорного підвішування візка	кН/м
$C_b$	вертикальна жорсткість ресорного підвішування візка	кН/м
$\varphi_1, \varphi_2$	кути у вертикальній площині через різницю рівнів осей автозчеплень у з'єднанні двох вагонів	рад
$\psi$	кут повороту центральної осі кузова вагона в разі встановлення в колії з відхиленням п'ятників поперек колії	рад
$\psi_1, \psi_2$	кути в горизонтальній площині за стискання вагона в разі встановлення в колії з відхиленням п'ятників поперек колії	рад
$\Delta_1, \Delta_2$	різниця рівнів осей автозчеплень попереду й позаду вагона	м



## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Продовження таблиці 1

Continuation of Table 1

Позначення	Параметр	Розмірність
$e$	ексцентриситет хвостової частини автозчеплення в результаті відхилення від проєктного положення під час виготовлення	м
$2b$	відстань між центрами шийок осей колісних пар	м
$2\delta_0$	сумарний поперечний розбіг рами кузова вагона відносно осі колії в напрямному перетині за шкворнем	м
$2L_3$	довжина вагона за осями зчеплення	м
$2\ell$	база вагона	м
$2L$	відстань між упорними плитами автозчеплень	м
$R$	радіус кривої	м
$a$	довжина корпусу автозчеплення від осі зчеплення до кінця хвостовика	м
$2S$	відстань між колами кочення коліс	м
$h_a$	висота осі автозчеплення над рівнем головок рейок	м
$h_{bp}$	висота над рівнем площини головок рейок до верхньої площини центрального ресорного комплекту	м
$r$	радіус середнього зношеного колеса	м
$h_u$	висота центра ваги вагона над рівнем головок рейок	м
$h_b$	висота над рівнем площини головок рейок до центра ваги бокової верхньої кузова вагона	м
$a_{неп}$	непогашене прискорення	м/с <sup>2</sup>
$g$	прискорення вільного падіння	м/с <sup>2</sup>
$\mu$	коефіцієнт тертя між колесом і рейкою	
$\mu_2$	коефіцієнт тертя між колесом і рейкою на ненабігаючому колесі	
$\beta$	кут нахилу, утворений конусоподібною поверхнею гребеня колеса, до горизонтальної осі	

Зусилля, зображені на рис. 2, визначаємо відповідно до методики, наведеної в роботі [8]. З урахуванням сил інерції у кривій і тиску вітру

на бокову поверхню кузова вагона  $F_b$ , вертикальну та бокову реакції рейки на набігаючому колесі визначаємо таким чином:

$$P_b = \frac{1}{8} \cdot \left\{ P_{\text{ваг}}^{\text{ст}} + \frac{N^2}{C_r} \cdot \frac{\psi_a^2 \cdot h_{bp}}{(\delta_0 + e) \cdot S} + N \cdot \left[ 2\psi_a \cdot \frac{h_{bp}}{S} + \psi_{кр} \cdot \frac{h_a}{S} \right] \pm P_{\text{ін}} \cdot \frac{h_u}{S} \pm F_b \cdot \frac{h_b}{S} \right\}; \quad (4)$$

$$P_6 = \frac{1}{8} \cdot \left\{ \mu \cdot P_{\text{ваг}}^{\text{ст}} + \frac{N^2}{C_r} \cdot \frac{\psi_a^2}{(\delta_0 + e)} \cdot \left( 2 - \mu \cdot \frac{h_{bp}}{S} \right) + \right. \\ \left. + N \cdot \left[ 2\psi_a \cdot \left( 2 - \mu \cdot \frac{h_{bp}}{S} \right) + \psi_{кр} \cdot \left( 2 - \mu \cdot \frac{h_a}{S} \right) \right] \pm P_{\text{ін}} \cdot \left( 2 - \mu \cdot \frac{h_u}{S} \right) \pm F_b \cdot \left( 2 - \mu \cdot \frac{h_b}{S} \right) \right\}, \quad (5)$$

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

де  $P_{\text{ваг}}^{\text{ст}}$  – статичний тиск вагона (від колеса на-бігаючої колісної пари переднього візка (3) – (4)) на залізничну колію з урахуванням зневантаження від поздовжньої сили, кН, причому:

$$P_{\text{ваг}}^{\text{ст}} = P_{\text{ваг}} - N \cdot \varphi_e \cdot \frac{b}{S}, \quad (6)$$

тут  $P_{\text{ваг}} = G_o + 2G_{\text{віз}}$  – вага вагона, кН;  $\varphi_e$  – кут повороту кузова вагона у вертикальній площині, викликаний наявністю різниці рівнів осей автозчеплень попереду й позаду вагона, рад, який визначаємо за виразом:

$$\varphi_e = \varphi_1 \cdot \left( \frac{L}{\ell} + 1 \right) + \varphi_2 \cdot \left( \frac{L}{\ell} - 1 \right); \quad (7)$$

$P_{\text{ін}}$  – сила інерції від непогашеного прискорення, кН, що становить

$$P_{\text{ін}} = (G_o + 2 \cdot G_{\text{віз}}) \cdot \frac{a_{\text{неп}}}{g} = P_{\text{ваг}} \cdot \frac{a_{\text{неп}}}{g}; \quad (8)$$

$h_{\text{вр}} = r + r_{\text{ш}} \approx r$  – висота над рівнем площини головок рейок до верхньої площини центрального ресорного комплексу, м. Найчастіше цей параметр у ряді досліджень беруть рівним радіусу середньо зношеного колеса;  $\psi_a$  – кут, утворений поздовжньою віссю корпусу автозчеплення й віссю хребтової балки рами вагона в горизонтальній площині, рад, його можна встановити так:

$$\psi_a = \frac{(\delta_o + e) \cdot L}{\ell^2} \cdot \left( 2 + \frac{L}{a} \right), \quad (9)$$

– кут повороту вагона, який залежить від розташування у кривій, рад, причому

$$\psi_{\text{кр}} = \frac{2L_3}{R}. \quad (10)$$

Узявши статичний тиск колеса на рейку в залежності (3) тотожним та рівним вертикальній реакції рейки на набігаючому колесі, отриманій за залежністю (4), подальший розрахунок проведемо відповідно до нормативних методик, наведених в [1, 2, 4, 5].

Складні коливальні процеси, які виникають під час руху рухомого складу, визначають його

динамічний вплив на колію. Ці процеси обумовлені існуванням різного роду нерівностей на рейках, недосконалістю поверхонь кочення коліс, особливим характером руху жорстких баз екіпажів у колії, пружною деформованістю колії, ресор та інших елементів ходових частин. Під час теоретичних досліджень зазвичай із комплексного процесу виділяють окремі види коливань і розглядають їх із рядом спрощувальних передумов.

Відповідно до тривалого досвіду експлуатації залізниць та експериментальних досліджень встановлено, що під час вивчення вертикальної динаміки вагона необхідно враховувати в основному такі види періодичних нерівностей: довгі безперервні пологі нерівності уздовж рейкової ланки або її половини; короткі безперервні нерівності, викликані хвилеподібним зносом рейок, овальністю або ексцентричністю кола кочення коліс; короткі переривчасті (ізолювані) нерівності типу рейкових стиків із періодом повторень, рівним довжині рейкової ланки, і типу повзунів на колесах із періодом повторень, рівним довжині кола кочення колеса. Довжини хвиль та періоди повторюваності зазначених видів нерівностей практично заздалегідь відомі.

Максимальне значення сили та її середньоквадратичне відхилення від коливань надресорної ваги вагона (кузова) можна визначити такими засобами: через максимальний прогин ресор, через статичний прогин ресор або через коефіцієнт вертикальної динаміки:

$$S_p = 0,08 \cdot P_p^{\text{max}} = 0,08 \cdot k_d \cdot (P_{\text{ст}} - q_k);$$

$$k_d = 0,1 \div 0,2 \frac{v}{f_{\text{ст}}}, \quad (11)$$

де  $k_d$  – коефіцієнт вертикальної динаміки;  $q_k$  – вага необресореної частини екіпажу, віднесена до одного колеса, кН.

Середнє значення сили від коливань надресорної ваги екіпажу беремо як 75 % від її максимального значення:

$$\bar{P}_p = 0,75 \cdot P_p^{\text{max}} = 0,75 \cdot k_d \cdot (P_{\text{ст}} - q_k). \quad (12)$$

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Інерційне зусилля, яке виникає за рахунок руху колеса по плавній нерівності рейкової нитки  $P_{\text{рн}}$ , та середньоквадратичне відхилення сили від перекочування колеса по рейці з нерівністю  $S_{\text{рн}}$  визначаємо відповідно до:

$$P_{\text{рн}}^{\text{max}} = 2,56 \cdot 10^{-7} \alpha_1 \beta \gamma \varepsilon \ell_{\text{ш}} \bar{P} v \sqrt{\frac{U_z q_k}{k}}; \quad (13)$$

$$S_{\text{рн}} = 0,707 \cdot P_{\text{рн}}^{\text{max}}, \quad (14)$$

де  $\alpha_1$  – коефіцієнт, що залежить від типу шпал;  $\beta$  – коефіцієнт, що враховує вплив типу рейок на виникнення динамічної нерівності (залежить від моменту інерції рейки);  $\varepsilon$  – коефіцієнт, що залежить від типу шпал;  $\gamma$  – коефіцієнт, що залежить від виду баласту;  $\ell_{\text{ш}}$  – відстань між осями шпал, см;  $\bar{P}$  – середнє динамічне навантаження, кН;  $U_z$  – модуль пружності підрейкової основи, МПа;  $k$  – коефіцієнт відносної жорсткості основи та рейки,  $\text{см}^{-1}$ ;  $v$  – швидкість руху, км/год.

Силу інерції необресореної маси екіпажу, колесо якого має ізольовану нерівність  $P_{\text{інк}}$ , та її середньоквадратичне відхилення  $S_{\text{інк}}$  визначаємо за залежностями:

$$P_{\text{інк}}^{\text{max}} = 0,05 \cdot 10^3 \alpha_0 \frac{U_z}{k} e_0; \quad (15)$$

$$S_{\text{інк}} = 0,25 \cdot P_{\text{інк}}^{\text{max}}, \quad (16)$$

де  $\alpha_0$  – коефіцієнт, що залежить від типу шпал;  $e_0$  – глибина ізольованої нерівності на колесі, м.

Силу інерції необресореної маси екіпажу, колесо якого має безперервну нерівність  $P_{\text{бнк}}$ , та її середньоквадратичне відхилення  $S_{\text{бнк}}$  визначаємо за такими співвідношеннями:

$$P_{\text{бнк}}^{\text{max}} = \frac{0,231 \cdot 10^{-4} \alpha_0 U_z v^2 \sqrt{q_k}}{d^2 \sqrt{10^{-1} k U_z - 3,26 k^2 q_k \cdot 10^{-2}}}; \quad (17)$$

$$S_{\text{бнк}} = 0,225 \cdot P_{\text{бнк}}^{\text{max}}, \quad (18)$$

де  $d$  – діаметр колеса, м.

Максимальне еквівалентне навантаження для розрахунків напружень у рейках від дії згинального моменту визначаємо за залежністю:

$$P_{\text{екв}}^{\text{I}} = P_{\text{дин}}^{\text{max}} + \sum \bar{P}_i \cdot \mu_i. \quad (19)$$

Максимальне еквівалентне навантаження для розрахунків прогинів рейок, а також напружень і сил в елементах підрейкової основи визначаємо відповідно до:

$$P_{\text{екв}}^{\text{II}} = P_{\text{дин}}^{\text{max}} + \sum \bar{P}_i \cdot \eta_i. \quad (20)$$

Функції  $\mu_i$  та  $\eta_i$  знаходяться залежно від відстаней від розрахункового перерізу до кожного колеса. Згинальний момент у будь-якому перерізі  $M_{\text{дин}}$  та силу тиску рейки на опори  $Q_{\text{дин}}$  визначаємо за формулами:

$$M_{\text{дин}} = \frac{1}{4k} P_{\text{екв}}^{\text{I}} = \frac{1}{4k} (P_{\text{розр}} + \sum \bar{P}_i \cdot \mu_i); \quad (21)$$

$$Q_{\text{дин}} = \frac{k \ell_{\text{ш}}}{2} P_{\text{екв}}^{\text{II}} = \frac{k \ell_{\text{ш}}}{2} (P_{\text{розр}} + \sum \bar{P}_i \cdot \eta_i). \quad (22)$$

Напруження в рейках по осі головки та піддошви від дії згинального моменту визначаємо за залежностями:

$$\sigma_{\text{п}} = \frac{M_{\text{дин}}}{W_{\text{п}}} \cdot 10^3, \quad \sigma_{\text{г}} = \frac{M_{\text{дин}}}{W_{\text{г}}} \cdot 10^3, \quad (23)$$

де  $W_{\text{п}}$  та  $W_{\text{г}}$  – моменти опору рейки у вертикальній площині відповідно знизу та зверху головки,  $\text{см}^3$ .

Напруження зминання у шпалах під підкладкою визначаємо залежно від величини сили тиску рейки на опору  $Q_{\text{дин}}$ :

$$\sigma_{\text{ш}} = \frac{Q_{\text{дин}}}{\omega_{\text{ш}}} \cdot 10, \quad (24)$$

де  $\omega_{\text{ш}}$  – площа підкладки,  $\text{см}^2$ .

У результаті протидії сил тертя деформаціям на ділянці перед рухомих колесом балка не встигає набути обрисів ідеальної пружної лінії і має зменшені ординати, а на ділянці позаду колеса її ординати дещо збільшені. Вплив дисипативних сил позначається тим сильніше, чим вища швидкість руху. За високих швидкостей

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

тей руху починають відігравати суттєву роль і сили інерції розподіленої маси колії, тому стає винятково важливою вимогою рівномірності всіх елементів колії та її поздовжньої рівнопружності. Розрахунки показують, що більша частина всього динамічного додатку до статичного тиску викликана нерівнопружністю колії.

Нерівнопружність залізничної колії є одним із факторів ускладнення розрахунків напружено-деформованого стану. Останніми дослідженнями встановлено, що наявність локального зменшення пружності підрейкової основи (просадки) може збільшувати напруження в рейках на 25 % [5].

Із точки зору напруженого стану залізничної колії наведена на рис. 2 розрахункова схема вантажного вагона не є наднебезпечною. Кількість несприятливих варіантів установа вагонів у колії з урахуванням розтягувальних та стискових сил становить дев'ять [8]. У цих випадках залежність для визначення коефіцієнта запасу стійкості від витискання поздовжніми силами буде мати відмінності у виразах для визначення еквівалентного кута повороту  $\varphi_e$

$$K_{\text{стб}}^{\text{I,II}} = \frac{\text{tg}\beta - \mu}{1 + \mu \cdot \text{tg}\beta} \cdot \frac{P_{\text{ваг}}^{\text{ст}} + \frac{N^2}{C_r} \cdot \frac{\psi_a^2 \cdot h_{\text{вп}}}{(\delta_0 + e) \cdot S} + N \cdot \left[ 2\psi_a \cdot \frac{h_{\text{вп}}}{S} + \psi_{\text{кр}} \cdot \frac{h_a}{S} \right] \pm P_{\text{ін}} \cdot \frac{h_{\text{ц}}}{S} \pm F_{\text{в}} \cdot \frac{h_{\text{в}}}{S}}{\mu \cdot P_{\text{ваг}}^{\text{ст}} + \frac{N^2}{C_r} \cdot \frac{\psi_a^2}{(\delta_0 + e)} \cdot \left( 2 - \mu \cdot \frac{h_{\text{вп}}}{S} \right) + N \cdot \left[ 2\psi_a \cdot \left( 2 - \mu \cdot \frac{h_{\text{вп}}}{S} \right) + \psi_{\text{кр}} \cdot \left( 2 - \mu \cdot \frac{h_a}{S} \right) \right] \pm P_{\text{ін}} \cdot \left( 2 - \mu \cdot \frac{h_{\text{ц}}}{S} \right) \pm F_{\text{в}} \cdot \left( 2 - \mu \cdot \frac{h_{\text{в}}}{S} \right)}, \quad (25)$$

В основу визначення коефіцієнта запасу стійкості закладена статична розрахункова схема без урахування складного динамічного процесу взаємодії між окремими частинами рейкового екіпажу та між самим екіпажем і колійною

від дії вертикальних складових поздовжньої сили та статичного тиску вагона з урахуванням зневантаження від поздовжньої сили  $P_{\text{ваг}}^{\text{ст}}$  відповідно для переднього та заднього візків. Для розрахунків напружень у рейках від дії згинального моменту максимальне еквівалентне навантаження необхідно визначати за схемами, за яких колісні пари візків будуть значно довантажені поздовжньою силою [8].

Як було зазначено вище, розвантаження коліс за наявності поперечної сили може служити причиною сходження рухомого складу з рейок. Для дослідження впливу сил інерції від нерівностей на колесі та рейках застосовано схему (рис. 20, яка рекомендована нормативним документом [3].

У роботі [8] наведена залежність для визначення коефіцієнта запасу стійкості від витискання поздовжніми силами  $K_{\text{стб}}$  з урахуванням сил інерції  $P_{\text{ін}}$  і тиску вітру на бокову поверхню кузова вагона  $F_{\text{в}}$  у кривій ділянці залізничної колії:

структурою під час руху.

Уважаючи наведені вище сили інерції, що виникають під час взаємодії системи «вагон – колія», прикладеними в точці контакту колеса з рейкою, отримаємо таку залежність:

$$K_{\text{стб}}^{\text{I,II}} = \frac{\text{tg}\beta - \mu_1}{1 + \mu_1 \cdot \text{tg}\beta} \cdot \frac{P_{\text{в}} - (\cos\beta + \mu_1 \sin\beta) \cdot \sum P_{\text{ік1}} - \sum P_{\text{ік2}}}{P_0 - (\sin\beta - \mu_1 \cos\beta) \cdot \sum P_{\text{ік1}} + \mu_2 \cdot \sum P_{\text{ік2}}}, \quad (26)$$

де  $\sum P_{\text{ік1}}$ ,  $\sum P_{\text{ік2}}$  – сума вертикальних сил інерції додаткових до дії статичних сил, що виникають під час взаємодії системи «вагон – колія» відповідно на набігаючому та ненабігаючому колесі:

$$\sum P_{\text{ік1}} = \sum P_{\text{ік2}} = P_{\text{р}} + P_{\text{рн}} + P_{\text{інк}} + P_{\text{онк}}. \quad (27)$$

Такий підхід дозволить урахувувати різні види сил інерції від нерівностей як на колесі, так і на рейковій нитці. Вплив швидкості руху колісної пари на величину коефіцієнта тертя в контактні гребеня колеса та рейки на підставі експерименту враховано в роботі [8]:

$$\mu_1 = \mu_0 \cdot (1 - 0,002v). \quad (28)$$

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

де  $v$  – швидкість руху в км/год;  $\mu_0$  – коефіцієнт тертя на межі зчеплення за  $v=0$ , який у розрахунках для залізничного рухомого складу рекомендовано брати рівним  $\mu_0 = 0,3 \div 0,33$ .

## Результати

На рис. 3–4 наведено результати розрахунків величини коефіцієнта запасу стійкості від витискання поздовжніми силами під час руху порожнього й завантаженого піввагона моделі 12–532 по ділянці колії радіусом  $R=250$  м із піднесенням зовнішньої рейки  $h=150$  мм та поперечним розбігом рами кузова вагона відносно осі колії в напрямному перетині в 50 мм [3]. Вплив величини поздовжньої квазістатичної стискної сили показано без урахування сил тертя і з урахуванням тертя в контактній гребені колеса й рейки, а також за наявності вертикальних сил інерції додаткових до дії статичних сил, що виникають під час взаємодії системи «вагон – колія», відповідно на набігаючому та ненабігаючому колесі в інтервалі швидкості руху  $v=10 \div 120$  км/год. Під час розрахунків за залежністю (25) коефіцієнти тертя взято рівними  $\mu_1 = \mu_2 = 0,25$ , а за залежністю (27)  $\mu_1 = \mu_0 \cdot (1 - 0,002v)$  та  $\mu_2 = 0,25$ .

У кривій  $R=250$  м допустима швидкість руху становить 65 км/год, а допустиме значення коефіцієнта запасу стійкості колісної пари проти сходження з рейок у разі витискання становить  $[K_{\text{ств}}] = 1,2$  [3].

Для розрахунків ураховано різницю у висоті між поздовжніми осями автозчеплень у вантажному поїзді, яку допускають не більшою за  $\Delta_1 = 80$  мм попереду групи порожніх вагонів, розташованих за завантаженими вагонами у складі потяга [3]. Позаду досліджуваного вагона різницю рівнів осей автозчеплень узятю рівною  $\Delta_2 = 0$  мм. Сила тиску вітру на бокову поверхню кузова вагона  $F_v$  та ексцентриситет закріплення хвостової частини автозчеплення  $e$  в нашому дослідженні не враховано.

Параметри залізничної колії, необхідні для визначення сил за залежностями (12), (13), (15), (17), обрано відповідно до [1, 2, 4, 5] для рейок Р65, залізобетонних шпал на щебеневому бала-

сті, пори року – літо [2]. Під час визначення коефіцієнта запасу стійкості колісної пари проти сходження з рейок у разі витискання поздовжніми силами  $K_{\text{ств}}$  було враховано такі зусилля: сила інерції необресореної маси екіпажу, колесо якого має ізольовану нерівність  $P_{\text{інк}}$ ; інерційне зусилля, яке виникає за рахунок руху колеса по плавній нерівності рейкової нитки  $P_{\text{рн}}$ ; сила інерції необресореної маси екіпажу, колесо якого має безперервну нерівність  $P_{\text{бнк}}$ . Сили  $P_{\text{рн}}$ ,  $P_{\text{інк}}$  та  $P_{\text{бнк}}$  прикладено до набігаючого й ненабігаючого коліс першої колісної пари переднього візка вагона окремо й одночасно.

Отримані значення коефіцієнта запасу стійкості від витискання для порожнього піввагона (рис. 3, а, б) демонструють втрату запасу стійкості в разі 440 кН за залежністю (25) і в середньому в разі 360 кН за залежністю (26). Наявність сил  $P_{\text{рн}}$ ,  $P_{\text{інк}}$  та  $P_{\text{бнк}}$  на набігаючому колесі (рис. 3, в, г) за залежністю (25) не вносить значних змін у значення  $K_{\text{ств}}$ , а за залежністю (26), навпаки, запас стійкості зберігається до поздовжньої сили у 380 кН. Урахування означених зусиль на ненабігаючому колесі (рис. 3, д, е) показує значний вплив сил  $P_{\text{рн}}$ ,  $P_{\text{інк}}$  та  $P_{\text{бнк}}$  на значення коефіцієнта стійкості від витискання. Втрата запасу стійкості за залежністю (25) відбудеться під час руху з допустимою швидкістю у 65 км/год за 280 кН, а за залежністю (26) уже за 200 кН. Випадок одночасної наявності означених додаткових сил на обох колесах набігаючої колісної пари (рис. 3, ж, з) є малоймовірним, але результати розрахунків показують збереження тенденції переважного значення зусиль на ненабігаючому колесі. Залежність (26) у цьому випадку має навіть більші значення поздовжньої сили у 240 кН.

Досліджуваний піввагон у завантаженому режимі (рис. 4) зберігає встановлений запас стійкості для вантажних вагонів у разі дії допустимої нормативною документацією квазістатичної стискної сили величиною в 1 МН під час руху з допустимою швидкістю 65 км/год у всіх розглянутих варіантах розрахунку.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

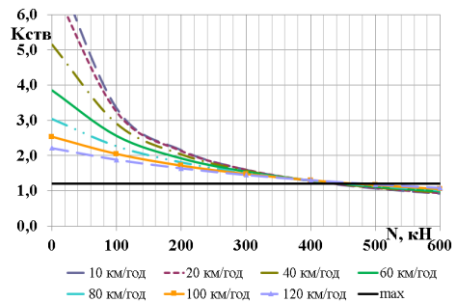
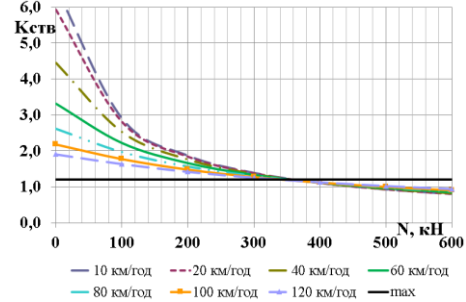
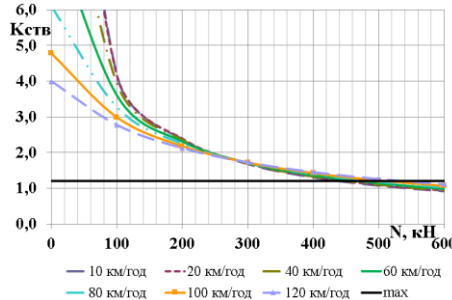
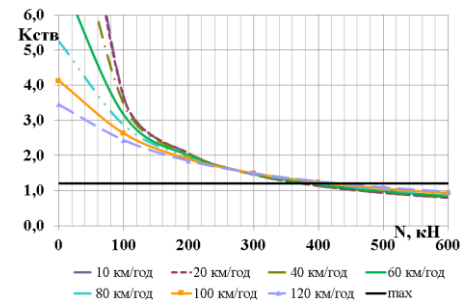
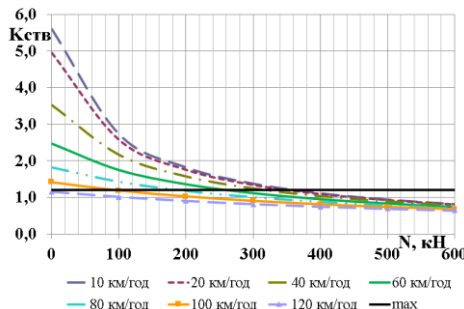
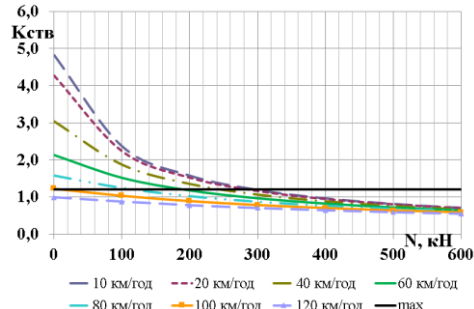
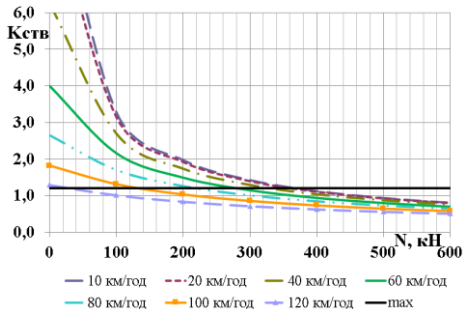
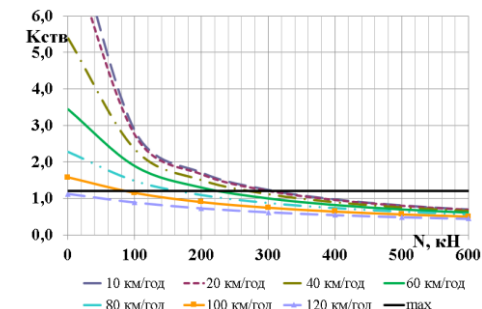
 $a - a$  $b - b$  $c - c$  $d - d$  $e - e$  $f - f$  $ж - ж$  $з - з$ 

Рис. 3. Коефіцієнт запасу стійкості від витискання порожнього піввагона з урахуванням і без урахування сил тертя в контактні гребеня колеса й рейки відповідно:

$a, b$  – без додаткових вертикальних сил інерції;  $c, d$  – із додатковими вертикальними силами інерції на набігаючому колесі;  $e, e$  – із додатковими вертикальними силами інерції на ненабігаючому колесі;  
 $ж, з$  – із додатковими вертикальними силами інерції на обох колесах набігаючої колісної пари одночасно

Fig. 3. Lift resistance coefficient of the empty gondola, taking into account and without taking into account the friction forces in the contact of the wheel flange and rail, respectively:

$a, b$  – without additional vertical forces of inertia;  $c, d$  – with additional vertical forces of inertia on the climbing wheel;  
 $e, f$  – with additional vertical forces of inertia on the non-climbing wheel;  $g, h$  – with additional vertical forces of inertia on both wheels of the climbing wheel set at the same time

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

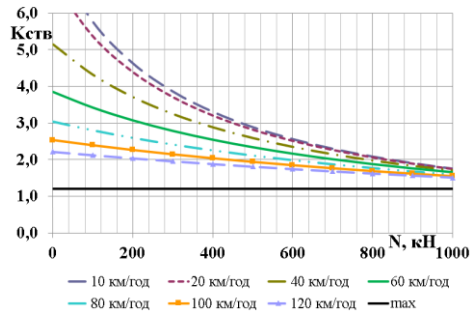
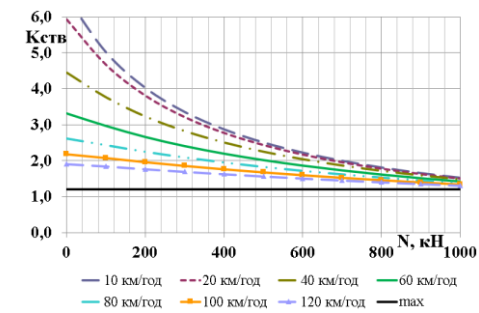
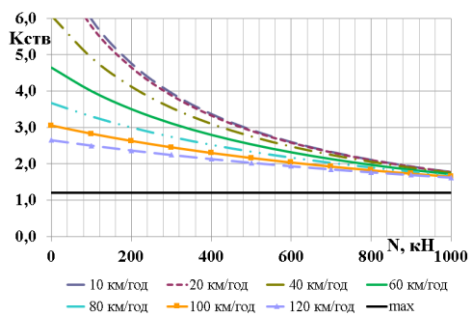
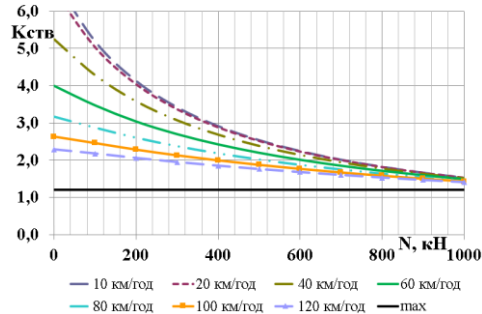
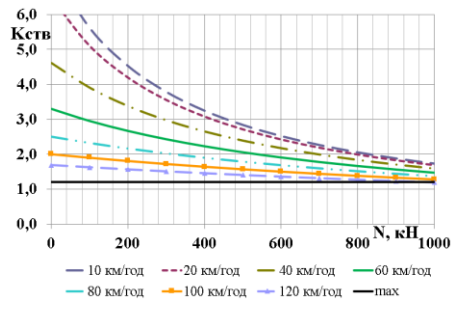
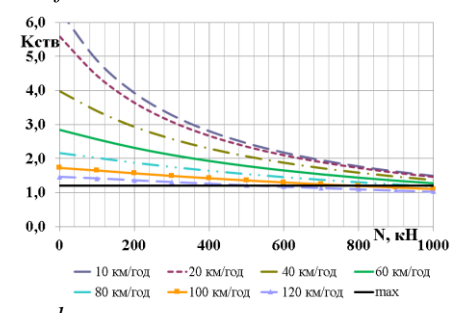
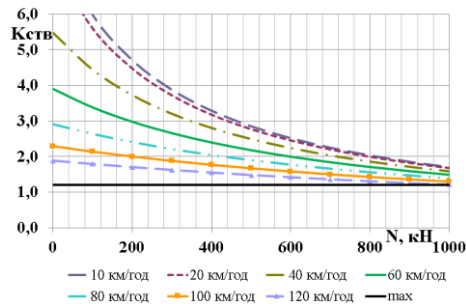
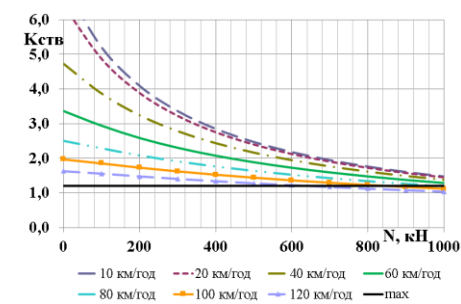
 $a - a$  $b - b$  $c - c$  $d - d$  $e - e$  $f - f$  $ж - ж$  $з - з$ 

Рис. 4. Коефіцієнт запасу стійкості від витискання завантаженого піввагона з урахуванням і без урахування сил тертя в контакті гребеня колеса і рейки відповідно:

$a, b$  – без додаткових вертикальних сил інерції;  $c, d$  – із додатковими вертикальними силами інерції на набігаючому колесі;  $e, f$  – із додатковими вертикальними силами інерції на ненабігаючому колесі;  $ж, з$  – із додатковими вертикальними силами інерції на обох колесах набігаючої колісної пари одночасно

Fig. 4. Lift resistance coefficient of the loaded gondola, taking into account and without taking into account the friction forces in the contact of the wheel flange and rail, respectively:

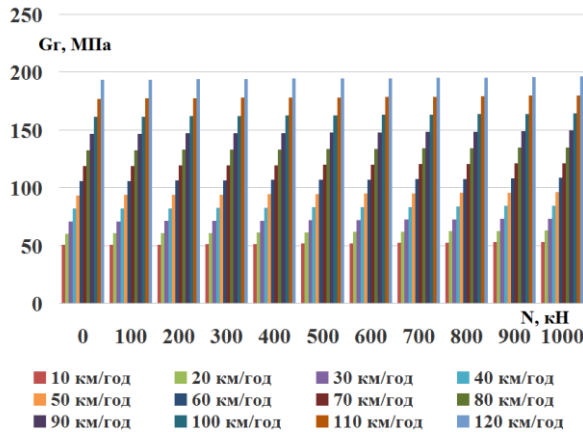
$a, b$  – without additional vertical forces of inertia;  $c, d$  – with additional vertical forces of inertia on the climbing wheel;  $e, f$  – with additional vertical forces of inertia on the non-climbing wheel;  $g, h$  – with additional vertical forces of inertia on both wheels of the climbing wheel set at the same time



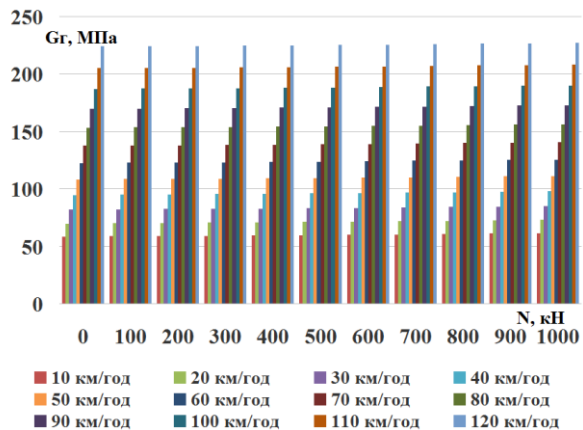
## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Значення напружень у рейках по осі головки та підшви від дії згинального моменту, отри-

*a – a*

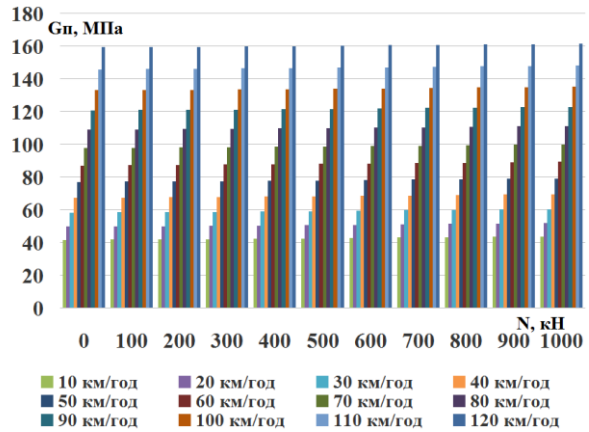


*b – c*



мані за залежностями (19), (21), (23), наведено на рис. 5.

*b – b*



*c – d*

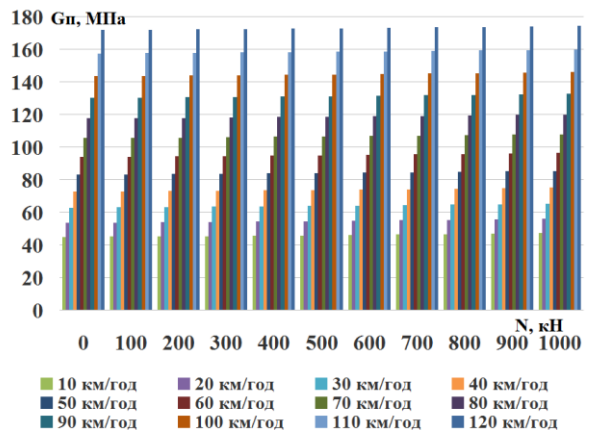


Рис. 5. Напруження в рейках по осі головки та підшви від дії згинального моменту:

*a, b* – приведений знос 0 мм; *в, г* – приведений знос 9 мм

Fig. 5. Stress in the rails along the head axis and base from the action of the deflection moment:

*a, b* – reduced deflection 0 mm; *c, d* – reduced deflection 9 mm

Розрахунки напружень у рейковій нитці виконано за залежностями (22) – (23) за приведених зносів 0 мм (рис. 5, *a, б*) та 9 мм (рис. 5, *в, г*). Як було зазначено вище, обрана розрахункова схема перекосу вантажного вагона в рейковій колії не є надбезпечною з точки зору міцності, але навіть у цьому випадку отримані результати демонструють значне збільшення напружень у разі підвищення швидкості руху. Отримані величини напружень у рейках можуть бути збільшені на 25 % за наявності локального зменшення пружності підрейкової осно-

ви (просадки).

Напруження зминання у шпалах під підкладкою, визначені за залежностями (22), (24), показали, що залізобетонна шпала зберігає встановлений запас міцності у 4 МПа. Отримані значення стосуються лише шпали під набігаючим колесом першої колісної пари переднього візка, яка перебуває під дією зневантаження від вертикальної складової поздовжньої стискної сили, та вказують на необхідність визначення напружень під кожним колесом окремо.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

**Наукова новизна та практична значимість**

У ході проведення теоретичних досліджень удосконалено залежність коефіцієнта запасу стійкості від витискання поздовжніми силами. Отримана залежність порівнянно з дійсною набула подальшого розвитку та дозволяє визначати стійкість колісної пари з урахуванням різних видів сил інерції від нерівностей як на колесі, так і на рейковій нитці, а також величини коефіцієнта тертя в контакті колеса та рейки від швидкості руху. Крім того, наведена методика, на відміну від наявної, дозволяє враховувати силу тиску вітру на бокову поверхню кузова вагона та ексцентриситет закріплення хвостової частини автозчеплення.

Застосування методики поєднання правил розрахунку залізничної колії на міцність та визначення динамічної навантаженості рейкового екіпажу дозволить розраховувати величину конструкційної швидкості вагона на основі осьових навантажень, сил інерції від нерівностей на колесі та рейках, а також враховувати поздовжні квазістатичні сили, які виникають у поїзді за режимів гальмування.

Визначення коефіцієнта запасу стійкості від витискання з використанням наведеної методики дозволить більш ретельно розглянути та обґрунтовувати причину сходження колісних пар із рейок. Крім того, застосування означеної ме-

тодики розрахунку дозволить визначати міцність залізничної колії та баластного шару з урахуванням нерівномірності навантаження рейкових ниток у разі перекосів вантажного рухомого складу під дією стискних квазістатичних поздовжніх сил.

**Висновки**

На підставі проведених теоретичних досліджень стійкості вантажного екіпажу можна зробити такі висновки:

– значний вплив на величину коефіцієнта запасу стійкості від витискання поздовжніми силами  $K_{\text{ств}}$  має наявність сил  $P_{\text{рн}}$ ,  $P_{\text{інк}}$  та  $P_{\text{бнк}}$  на ненабігаючому колесі;

– у завантаженому стані досліджуваний піввагон зберігає встановлений запас стійкості для вантажних вагонів у разі дії допустимої нормативною документацією квазістатичної стискної сили величиною в 1 МН під час руху з допустимою швидкістю 65 км/год у всіх розглянутих варіантах розрахунку;

– отримані результати розрахунків показали необхідність подальшого дослідження напружено-деформованого стану залізничної колії та підрейкової основи за наявності нерівномірності навантаження рейкових ниток у разі перекосів вантажного рухомого складу під дією поздовжніх сил.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Даніленко Е. І. *Залізнична колія* : підруч. для вищ. навч. закл. : у 2 т. Київ : Інпрес, 2010. Т. 2. 456 с.
2. *Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість* : ЦП-0117 : затв. наказом Укрзалізниці від 13.12.2004 р. № 960-ЦЗ Київ : ЦП УЗ, 2004. 64 с.
3. *ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних)*. [Чинний від 2015-07-01]. Київ : УкрНДНЦ, 2017. 158 с.
4. Курган Д. М. Визначення динамічного навантаження від колеса на рейку для швидкісних поїздів. *Наука та прогрес транспорту*. 2015. № 3 (57). С. 118–128. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/46069>
5. Курган Д. М. *Методологія розрахунків залізничної колії при взаємодії з швидкісним рухомих складом* : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.06, 27. Дніпро, 2017. 35 с.
6. Петренко В. Д., Тютюкін О. Л., Крисан В. І. Відновлення міцносних та деформативних характеристик земляного полотна та його основи армуванням ґрунтоцементними елементами. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2019. Вип. 16. С. 65–74. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2019/189681>
7. Швець А. О. Динаміка піввагонів від дії поздовжніх сил. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 6 (84). С. 142–155. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/195821>
8. Швець А. О. Стійкість вантажних вагонів при дії стискаючих поздовжніх сил. *Наука та прогрес транспорту*. 2020. № 1 (85). С. 119–137. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/199485>

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

9. Radkevych A. V., Petrenko V. D., Tiutkin O. L., Andrieiev V. S., Mukhina N. A. Comparative analysis of the parameters of the strength of the subgrade at the transition to the higher axial loading up to 25 t. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012024>
10. Kurhan D. Determination of Load for Quasi-static Calculations of Railway Track Stress-strain State. *Acta Technica Jaurinensis*. 2016. Vol. 9. Iss. 1. P. 83–96. DOI: <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.v9.n1.400>

А. А. ШВЕЦ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф «Теоретическая и строительная механика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (050) 214 14 19, эл. почта [angela\\_shvets@ua.fm](mailto:angela_shvets@ua.fm), ORCID 0000-0002-8469-3902

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

**Цель.** Для перспективного повышения скоростей в работе запланировано рассмотреть сложные условия динамического взаимодействия железнодорожного пути с подвижным составом. Характер и уровень этого взаимодействия зависят как от конструкции единицы подвижного состава, ее состояния и скорости движения, так и от конструкции и состояния самой колеи. **Методика.** Оценку возможного воздействия на путь подвижного состава исследовано аналитическим методом. Напряженное состояние колеи определено расчетным способом с применением зависимостей между силовыми факторами и характеристиками напряженно-деформированного состояния пути. При определении статического давления колеса на рельс рассмотрено влияние перекосов подвижного состава в рельсовой колее по схеме «елочка», при которой дополнительное боковое влияние колесных пар тележек на путевую структуру является максимальным. **Результаты.** В ходе проведения теоретических исследований получены зависимости коэффициента запаса устойчивости от выжимания продольными силами с учетом различных видов сил инерции от неровностей как на колесе, так и на рельсовой нити. Также получены величины коэффициента трения в контакте колеса и рельса от скорости движения. **Научная новизна.** Впервые объединены правила расчета железнодорожного пути на прочность и определения динамической нагруженности рельсового экипажа. Приведенное усовершенствование дает возможность рассчитывать величину конструкционной скорости вагона на основе осевых нагрузок, сил инерции от неровностей на колесе и рельсах, а также учитывать продольные квазистатические силы, возникающие в поезде при режимах торможения. **Практическая значимость.** Определение коэффициента запаса устойчивости от выжимания с использованием приведенной методики позволит более тщательно рассмотреть и обосновать причину схода колесных пар с рельсов. Применение указанной методики расчета будет способствовать определению прочности железнодорожного пути и балластного слоя с учетом неравномерности нагрузки рельсовых нитей в случае перекосов грузового подвижного состава под действием сжимающих квазистатических продольных сил.

**Ключевые слова:** безопасность движения; коэффициент запаса устойчивости от выжимания; продольные силы; расчет пути на прочность; скорость движения

А. О. SHVETS<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Theoretical and Structural Mechanics», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 214 14 19, e-mail [angela\\_shvets@ua.fm](mailto:angela_shvets@ua.fm), ORCID 0000-0002-8469-3902

## DETERMINATION OF THE STABILITY OF FREIGHT CARS TAKING INTO ACCOUNT THE RAILWAY TRACK PARAMETERS

**Purpose.** For prospective speed increase in the work is aimed to consider the complex conditions of the dynamic interaction of the railway track with rolling stock. The nature and level of this interaction depends both on the design of the unit of rolling stock, its state and speed, and on the design and condition of the track itself.

Creative Commons Attribution 4.0 International  
doi: <https://doi.org/10.15802/stp2020/203421>

© А. О. Швець, 2020

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

**Methodology.** Evaluation of the possible rolling stock impact on the track was investigated by the analytical method. The track stress state was determined by calculation using dependencies between force factors and the characteristics of the stress-strain state of the track. When determining the static pressure of the wheel on the rail, the influence of rolling stock skews in the rail track according to the “herringbone” scheme is considered, in which the additional lateral effect of the wheel pairs of the bogies on the track structure is maximal. **Findings.** When conducting theoretical studies, the dependencies of the lift resistance coefficient by longitudinal forces were obtained taking into account various types of inertia forces on irregularities both on the wheel and on the rail thread. The values of the friction coefficient in the wheel-rail contact on the movement speed were also obtained. **Originality.** For the first time, the rules for calculating the railway track for strength and determining the dynamic loading of the rail carriage are combined. This improvement will make it possible to calculate the structural speed of the car based on the axial loads, inertia forces due to the wheel and rails` irregularities, and also take into account the longitudinal quasistatic forces arising in the train during braking modes. **Practical value.** Determination of the car lift resistance coefficient using the above methodology will allow a more thorough consideration and justification of the cause of wheelset derailment. The application of this calculation method will allow us to determine the strength of the railway track and the ballast layer, taking into account the uneven load of rail threads in the case of distortions of the freight rolling stock under the action of compressive quasistatic longitudinal forces.

**Keywords:** traffic safety; lift resistance coefficient; longitudinal forces; track strength calculation; movement speed

## REFERENCES

1. Danilenko, E. I. (2010). *Zaliznychna kolia*. (Vol. 2). Kyiv: Inpres. (in Ukrainian)
2. *Pravyla rozrakhunkiv zaliznychnoi kolii na mitsnist i stiikist: TsP-0117: zatv. nakazom Ukrzaliznytsi vid 13.12.2004 r. №960-TsZ*. (2004). Kyiv: TsP UZ. (in Ukrainian)
3. *Vahony vantazhni. Zahalni vymohy do rozrakhunkiv ta proektuvannia novykh i modernizovanykh vahoniv kolii 1520 mm (nesamokhidnykh)*, 158 DSTU 7598:2014 (2017). (in Ukrainian)
4. Kurhan, D. M. (2015). Determination of Dynamic Loads from the Wheel on the Rail for High-Speed Trains. *Science and Transport Progress*, 3(57), 118-128. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/46069> (in Ukrainian)
5. Kurhan, D. M. (2017). *Methodology for Calculating the Railway Track at Interaction with Fast-speed Rolling Stock*. (Avtoreferat dysertatsii doktora tekhnichnykh nauk). Dnipro. (in Ukrainian)
6. Petrenko, V. D., Tiutkin, O. L., & Krysan, V. I. (2019). Restoring the Strength and Deformation Characteristics of the Subgrade and its Foundation by Reinforcing With Soil-Cement Elements. *Bridges and tunnels: Theory, Research, Practice*, 16, 65-74. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2019/189681> (in Ukrainian)
7. Shvets, A. O. (2019). Gondola cars dynamics from the action of longitudinal forces. *Science and Transport Progress*, 6(84), 142-155. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/195821> (in Ukrainian)
8. Shvets, A. O. (2020). Stability of freight wagons under the action of compressing longitudinal forces. *Science and Transport Progress*, 1(85), 119-137. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/199485> (in Ukrainian)
9. Radkevych, A. V., Petrenko, V. D., Tiutkin, O. L., Andrieiev, V. S., & Mukhina, N. A. (2019). Comparative analysis of the parameters of the strength of the subgrade at the transition to the higher axial loading up to 25 t. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 708, 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012024> (in English)
10. Kurhan, D. (2016). Determination of Load for Quasi-static Calculations of Railway Track Stress-strain State. *Acta Technica Jaurinensis*, 9(1), 83-96. DOI: <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.v9.n1.400> (in English)

Надійшла до редколегії: 27.11.2019

Прийнята до друку: 31.03.2020

## ЗМІСТ

### **ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА**

**Л. Ф. ДОЛИНА, Ю. О. ЖДАН, Д. А. ДОЛИНА**  
ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД В УМОВАХ КОСМОСУ ... 7

**В. Д. ПЕТРЕНКО, М. І. НЕТЕСА, О. Л. ТЮТЬКІН,  
О. В. ГРОМОВА, В. І. ШИНКАРЕНКО,  
В. А. КОЗАЧИНА**  
ЕКСПРЕС МОДЕЛЬ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ПРОЦЕСУ  
ОЧИЩЕННЯ ВОДИ..... 16

### **ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ**

**М. І. МУЗИКІН**  
ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ РУХУ  
СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ПОЇЗДОПОТОКІВ В УМОВАХ  
РИЗИКІВ ..... 24

### **ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ**

**С. В. ВОРОНІН, Б. С. АСАДОВ, В. О. СТЕФАНОВ,  
Д. В. ОНОПРЕЙЧУК, О. О. ГУБІН**  
АНАЛІЗ РОЗВИТКУ ОСНОВНИХ ДЕФЕКТІВ  
І ТЕОРЕТИЧНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ  
РЕЙОК В УМОВАХ МАЩЕННЯ ..... 35

**В. ЙОВЕР, Л. ГАСПАР, С. ФІШЕР**  
ДОСЛІДЖЕННЯ ПОГІРШЕННЯ ГЕОМЕТРІЇ  
ТРАМВАЙНИХ КОЛІЙ ..... 46

### **ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ**

**В. М. ПАХОМОВА, Д. І. НАЗАРОВА**  
ОРГАНІЗАЦІЯ БЕЗДРОТОВОЇ МЕРЕЖІ НА  
СОРТУВАЛЬНІЙ СТАНЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ  
БДЖОЛИНОГО МЕТОДУ ..... 60

### **РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ**

**В. Г. РАВЛЮК, М. Г. РАВЛЮК, І. К. КИРИЧЕНКО**  
СТАТИСТИЧНЕ ОПРАЦЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ  
ЗНОСУ ГАЛЬМОВИХ КОЛОДОК ВАНТАЖНИХ  
ВАГОНІВ ..... 74

**О. В. ФОМІН, А. О. ЛОВСЬКА**  
ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ НЕСУЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ  
ВАГОНА-ПЛАТФОРМИ ЗЧЛЕНОВАНОГО ТИПУ  
З КРУГЛИХ ТРУБ ..... 92

**А. О. ШВЕЦЬ**  
ВИЗНАЧЕННЯ СТІЙКОСТІ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ  
З УРАХУВАННЯМ ПАРАМЕТРІВ  
ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ..... 103

## СОДЕРЖАНИЕ

### **ЭКОЛОГИЯ И ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

**Л. Ф. ДОЛИНА, Ю. А. ЖДАН, Д. А. ДОЛИНА**  
ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД В УСЛОВИЯХ  
КОСМОСА..... 7

**В. Д. ПЕТРЕНКО, Н. И. НЕТЕСА, А. Л. ТЮТЬКИН,  
Е. В. ГРОМОВА, В. И. ШИНКАРЕНКО,  
В. А. КОЗАЧИНА**  
ЭКСПРЕСС МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОЦЕССА  
ОЧИСТКИ ВОДЫ ..... 16

### **ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА**

**М. И. МУЗЫКИН**  
ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ДВИЖЕНИЯ  
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПОЕЗДОПОТОКОВ  
В УСЛОВИЯХ РИСКОВ ..... 24

### **ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И АВТОМОБИЛЬНЫЕ ДОРОГИ**

**С. В. ВОРОНИН, Б. С. АСАДОВ,  
В. А. СТЕФАНОВ, Д. В. ОНОПРЕЙЧУК,  
А. А. ГУБИН**  
АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ОСНОВНЫХ ДЕФЕКТОВ  
И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА  
РЕЛЬСОВ В УСЛОВИЯХ СМАЗКИ ..... 35

**В. ЙОВЕР, Л. ГАСПАР, С. ФИШЕР**  
ИССЛЕДОВАНИЕ УХУДШЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ  
ТРАМВАЙНЫХ ПУТЕЙ..... 46

### **ИНФОРМАЦИОННО- КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

**В. Н. ПАХОМОВА, Д. И. НАЗАРОВА**  
ОРГАНИЗАЦИЯ БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ НА  
СОРТИРОВОЧНОЙ СТАНЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ПЧЕЛИНОГО МЕТОДА..... 60

### **ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА ПОЕЗДОВ**

**В. Г. РАВЛЮК, М. Г. РАВЛЮК, И. К. КИРИЧЕНКО**  
СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПАРАМЕТРОВ  
ИЗНОСА ТОРМОЗНЫХ КОЛОДОК ГРУЗОВЫХ  
ВАГОНОВ..... 74

**А. В. ФОМИН, А. А. ЛОВСКАЯ**  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ НЕСУЩЕЙ  
КОНСТРУКЦИИ ВАГОНА-ПЛАТФОРМЫ  
СОЧЛЕНЕННОГО ТИПА ИЗ КРУГЛЫХ ТРУБ..... 92

**А. А. ШВЕЦ**  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ГРУЗОВЫХ  
ВАГОНОВ С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРОВ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ..... 103

# CONTENTS

## ***ECOLOGY AND INDUSTRIAL SAFETY***

**L. F. DOLYNA, Y. O. ZHDAN, D. A. DOLYNA**  
WASTE WATER TREATMENT IN SPACE  
CONDITIONS ..... 7

**V. D. PETRENKO, M. I. NETESA, O. L. TIUTKIN,  
O.V. GROMOVA, V. A. KOZACHYNA**  
EXPRESS MODEL FOR WATER TREATMENT  
PROCESS CALCULATION ..... 16

## ***OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS***

**M. I. MUZYKIN**  
RESEARCH OF MOTION INTENSITY OF SPECIALIZED  
TRAIN TRAFFIC VOLUMES UNDER RISKS  
CONDITIONS ..... 24

## ***RAILROAD AND ROADWAY NETWORK***

**S. V. VORONIN, B. S. ASADOV, V. O. STEFANOV,  
D. V. ONOPREICHUK, O. O. GUBIN**  
DEVELOPMENT ANALYSIS OF MAIN DEFECTS AND  
THEORETICAL FORECAST OF RAIL SERVICE LIFE IN  
THE CONDITIONS OF LUBRICATION ..... 35

**V. JOVER, L. GASPAR, S. FISCHER**  
INVESTIGATION OF GEOMETRICAL  
DETERIORATION OF TRAMWAY TRACKS ..... 46

## ***INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL MODELLING***

**V. M. PAKHOMOVA, D. I. NAZAROVA**  
ORGANIZING WIRELESS NETWORK  
AT MARSHALLING YARDS USING THE BEE  
METHOD ..... 60

## ***ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION***

**V. G. RAVLYUK, M. G. RAVLIUK, I. K. KIRICHENKO**  
STATISTICAL PROCESSING OF BRAKE PADS WEAR  
PARAMETERS OF FREIGHT CARS ..... 74

**O. V. FOMIN, A. O. LOVSKA**  
STRENGTH DETERMINATION OF LOAD-BEARING  
STRUCTURE OF ARTICULATED FLATCAR  
OF ROUND PIPES ..... 92

**A. O. SHVETS**  
DETERMINATION OF THE STABILITY OF FREIGHT  
CARS TAKING INTO ACCOUNT THE RAILWAY  
TRACK PARAMETERS ..... 103



## 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 (86) 2020

(українською, російською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – О. В. Помінова

Комп'ютерне верстання – О. В. Помінова

Літературна обробка – С. П. Лагдан

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ум. друк. арк. 14,42. 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 (86) 2020

(на українском, русском и английском языках)

Ответственный за выпуск – О. В. Помінова

Компьютерная верстка – О. В. Помінова

Литературная обработка – С. П. Лагдан

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ус. печат. лист. 14,42. Тираж 100 экз. Зак. №02/02

**Дніпровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна**

*Адрес редакції, издателя:*

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 (86) 2020

(in Ukrainian, Russian and English languages)

Responsible for issue – О. В. Pominova

Desktop publishing – О. В. Pominova

Redaction – S. P. Lahdan

Format 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Conventional printed sheet 14,42. 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



