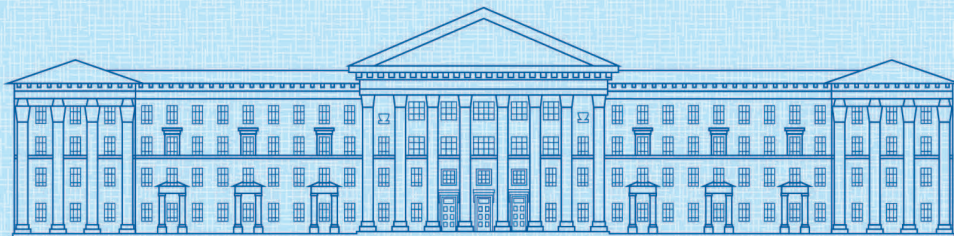




ISSN 2307-3489 (Print)
ISSN 2307-6666 (Online)



НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

№1 (91)

.. 2021 ..

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

№ 1 (91) 2021

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

2021

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

ГОЛОВА РЕДАКЦІЙНОЇ РАДИ УНІВЕРСИТЕТУ
ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛУ

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

ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА
ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР

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

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

Аврамовіс З. З., Белградський університет (Сербія); Бела І., Інститут логістики (Угорщина); Біляєв М. М., ДНУЗТ (Україна); Богдьявічус 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 держаний технічний університет (Україна); Жуковицький І. В., ДНУЗТ (Україна); Калівода Я., Чеський технічний університет (Чехія); Капіца М. І., ДНУЗТ (Україна); Капустян В. О., НТТУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Україна); Кершіс Р., Каунаський технологічний університет (Литва); Кузнецов В. Г., Науково-дослідний інститут залізниць (Польща); Манашкин Л., Незалежний вчений (США); Марущак П. О., Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (Україна); Мацюк В. І., Державний університет інфраструктури та технологій (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 категорії Б «Переліку наукових фахових видань України»
наказом Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020 р. (технічні науки).
Журнал зареєстровано в міжнародних наукових системах: Ulrichsweb™ Global Serials Directory, Crossref, Open Ukrainian Citation Index (OUCI), OCLC WorldCat, Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, Україніка наукова та ін.
Друкується за рішенням вченої ради університету від 25.02.2021 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 вул. Лазаряна, 2, кім. 267, Дніпро, Україна, 49010
та редакції тел.: +38 (056) 371-51-05; e-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua;
сайт журналу: <http://stp.diit.edu.ua/>

Видання публікується з 1936 р.:

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

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. 1 (91) 2021

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

2021

Founder:

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

Chairman of the Editorial Board of the University	Pshinko O. M., Doctor of Technical Sciences
Editor-in-Chief	Pichugov S. A., Doctor of Physics and Mathematics
Deputy Chief Editor	Kozachenko D. M., Doctor of Technical Sciences
Executive Secretary	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); 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); Matsiuk V. I., State University of Infrastructure and Technology (Ukraine); Pittman R., Antitrust Division of the USA. Department of Justice (USA); Raksha S. V., DNURT (Ukraine); Shinkarenko V. I., DNURT (Ukraine); Ślaskowski A., Politechnika Śląska w Gliwicach (Poland); Tiutkin O. L., DNURT (Ukraine); Vakulenko I. O., DNURT (Ukraine); Voronin S. V., UkrSURT (Ukraine); Zhukovitskiy I. V., DNURT (Ukraine)

Journal 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 category B «List of scientific specialized publications of Ukraine» by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine no. 409 from 17.03.2020 (technical sciences). Journal is registered in the International Catalogue of periodicals: Ulrichsweb™ Global Serials Directory, Crossref, Open Ukrainian Citation Index (OUCI), OCLC WorldCat, Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, Україніка наукова, etc. Published according to the Academic Council decision of the University from 25.02.2021, 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	Lazaryana St., 2, room 267, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.: +38 (056) 371-51-05; e-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua; journal site: http://stp.diit.edu.ua/

Edition is being published since 1936:

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

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

УДК 504.5:[621.643:661.53]

Л. В. АМЕЛІНА¹, М. М. БІЛЯЄВ², О. В. БЕРЛОВ^{3*}, О. О. ВЕРГУН⁴, Т. І. РУСАКОВА⁵

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

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

^{3*}Каф. «Безпека життєдіяльності», Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 756 34 57, ел. пошта berlov.oleksandr@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

⁴Каф. «Екологія та охорона навколишнього середовища», Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 756 33 71, ел. пошта vergun.oksana@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-4842-1069

⁵Каф. «Безпека життєдіяльності», Дніпровський національний університет імені О. Гончара, пр. Гагаріна, 18, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 394 52 14, ел. пошта rusakovati1977@gmail.com, ORCID 0000-0001-5526-3578

Моделювання забруднення довкілля в разі емісії аміаку з пошкодженого трубопроводу

Мета. Ця робота передбачає розробку гідралічної моделі для розрахунку нестационарного витоку аміаку з пошкодженого трубопроводу та імплементацію цієї моделі в чисельну модель прогнозу аварійного забруднення атмосфери. **Методика.** Для розв'язання поставленої задачі використано розрахункові залежності гідраліки напірних потоків. Для розрахунку процесу випарювання аміаку з пошкодженого трубопроводу також використано емпіричну модель. Для розрахунку процесу розповсюдження аміаку в атмосферному повітрі використано тривимірне рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки. Під час математичного моделювання розповсюдження аміаку з пошкодженого трубопроводу враховано зміну з висотою швидкості вітрового потоку, а також зміну з висотою вертикального коефіцієнта атмосферної дифузії, динаміку зміни з часом інтенсивності витоку аміаку з пошкодженого трубопроводу. Для чисельного розв'язання тривимірного диференціального рівняння переносу аміаку в атмосферному повітрі здійснено його фізичне розщеплення: виділено рівняння, що описує перенос домішки за рахунок конвекції, рівняння, що описує перенос домішки за рахунок атмосферної дифузії, та рівняння, що описує зміну концентрації аміаку в повітрі внаслідок дії джерела емісії. Для чисельного інтегрування рівняння конвективного переносу аміаку в повітрі використано метод Мак-Кормака, рівняння дифузійного переносу домішки – метод Річардсона, рівняння, що описує зміну концентрації аміаку під дією джерела емісії, – метод Ейлера. **Результати.** На основі розробленої моделі нестационарного витоку аміаку з пошкодженого трубопроводу та чисельної моделі розповсюдження аміаку в атмосферному повітрі проведено обчислювальний експеримент для оцінки рівня забруднення атмосферного повітря та підстильної поверхні у випадку аварійного витоку аміаку на ділянці, де аміакопровід «Тольятті – Одеса» перетинає річку Дніпро. Отримано дані щодо нестационарного забруднення довкілля. **Наукова новизна.** Розроблено математичну модель, що дозволяє розраховувати нестационарний процес витоку аміаку з пошкодженого трубопроводу. Запропоновано чисельну модель для визначення областей забруднення в разі аварійного витоку аміаку з аміакопроводу «Тольятті – Одеса». **Практична значимість.** На базі розробленої моделі створено код, що дозволяє оперативно прогнозувати динаміку забруднення навколишнього середовища за аварійного витоку аміаку. Запропонована математична модель може бути використана під час розробки плану ліквідації аварійної ситуації (ПЛАС) для хімічно небезпечних об'єктів.

Ключові слова: аміакопровід; хімічне забруднення атмосфери; аварійна емісія; математичне моделювання

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Вступ

Аварійний викид хімічно небезпечних речовин [1–5, 7–14], наприклад, із пошкоджених трубопроводів (рис. 1) створює загрозу інтенсивного забруднення навколишнього середовища та ризику ураження людей. Тому виникає проблема прогнозування наслідків такого витоку. Для прогнозування масштабу аварійного забруднення доцільно в разі аварійної емісії хімічно небезпечних речовин [1, 3, 4, 7–9] використовувати різного класу моделі: аналітичні, чисельні, модель Гауса, нормативну методичку, що розроблена для ДСНС (Державна служба України з надзвичайних ситуацій). Ці моделі зручні для практичного використання та дають можливість швидко визначити рівень хімічного забруднення навколишнього середовища. Під час застосування будь-якої прогнозувальної моделі вкрай важливо коректно визначити інтенсивність джерела емісії хімічно небезпечної речовини, що потрапляє в повітря з пошкодженого обладнання. Аналіз літературних джерел, присвячених прогнозуванню забруднення навколишнього середовища за аварійних емісій аміаку, показав, що прогнозування виконують із використанням постійного значення інтенсивності викиду аміаку Q , тобто процес викиду є стаціонарним із точки зору емісії небезпечної речовини. Такий підхід є досить спрощеним, оскільки не відображає фізику процесу викиду аміаку з трубопроводу, що перебуває під надлишковим тиском. У разі появи отвору в трубопроводі з часом має місце зниження надлишкового тиску ΔP_s . Унаслідок цього змінюється значення Q – інтенсивності викиду хімічно небезпечної речовини, оскільки $Q = f(\Delta P_s, t)$. Тобто процес емісії аміаку з трубопроводу є суттєво нестационарним.

Це значить, що залежно від часу має місце різне «навантаження» від викиду аміаку на забруднення навколишнього середовища. Тому для адекватної оцінки рівня забруднення навколишнього середовища за аварійного викиду аміаку з пошкодженого трубопроводу потрібно враховувати зміну тиску з часом в аміакопроводі. У цій роботі запропоновано модель, за допомогою якої це можна зробити. Побудову цієї моделі розглянуто в гідравлічному наближенні. Особливістю запропонованої моделі

є те, що вона враховує нестационарний процес витоку аміаку з трубопроводу, тобто зміну з часом витрати аміаку, що потрапляє в природне навколишнє середовище.



Рис. 1. Аварійний витік аміаку
[<https://www.mda.state.mn.us/ammonia-incident-summaries>]

Fig. 1. Emergency outflow of ammonia
[<https://www.mda.state.mn.us/ammonia-incident-summaries>]

Мета

Основною метою роботи є розробка методу розрахунку нестационарного витоку аміаку з пошкодженого трубопроводу та прогнозування рівня забруднення довкілля в разі пошкодження аміакопроводу «Тольятті – Одеса».

Методика

Розглянемо побудову методу розрахунку нестационарного витоку аміаку з пошкодженого трубопроводу. Відзначимо, що аміак у трубі являє собою перегріту рідину. Середній надлишковий тиск в аміакопроводі «Тольятті – Одеса» близько $\Delta P_s^n = 35 \text{ ат}$. У разі появи отвору в стінці трубопроводу під тиском почнеться інтенсивний витік аміаку. Процес викиду аміаку з труби будемо поділяти на два етапи:

1. Перший етап – напірний викид аміаку з трубопроводу внаслідок надлишкового тиску ΔP_s в ньому.

2. Другий етап – викид аміаку за рахунок його випарювання (після скидання надлишкового тиску).

Масу аміаку, який витікає з пошкодженого трубопроводу, подано так:

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

$$M = M_1 + M_2,$$

де M_1 – маса аміаку, що потрапить в атмосферу в разі напірного викиду з пошкодженого трубопроводу; M_2 – маса аміаку, що випаровується після напірного викиду аміаку.

Алгоритм розрахунку інтенсивності викиду аміаку (маси аміаку M_1 та інших параметрів) на першому етапі будемо виконувати в такій послідовності:

1. Визначаємо об'єм аміаку W в секції (довжина секції $L = 5$ км) за відсутності надлишкового тиску ΔP_s :

$$W = S \cdot L,$$

де $S = 0,785d^2$ – площа поперечного перерізу трубопроводу, $d = 0,355$ м – діаметр трубопроводу.

2. Розраховуємо масу аміаку M у трубі за умови, коли не було б надлишкового тиску та зріджений аміак заповнював би трубопровід як нестислива рідина:

$$M = W \cdot \rho,$$

де ρ – щільність ($0,68$ кг/м³).

3. Визначаємо «надлишковий» об'єм аміаку ΔW в секції за наявності надлишкового тиску ΔP_s :

$$\Delta W = \beta W \Delta P_s^n,$$

де β – коефіцієнт об'ємного тиску.

4. Визначаємо «надлишкову» масу аміаку ΔM в секції за надлишкового тиску ΔP_s :

$$\Delta M = \rho \Delta W.$$

5. Визначаємо об'єм аміаку, що виходить з отвору в трубопроводі за час Δt :

$$Q = \mu \cdot \omega \sqrt{2g \frac{\Delta P_s^n}{\gamma}} \Delta t, \quad (1)$$

де ω – площа отвору, з якого витікає аміак; μ – коефіцієнт витрати; γ – питома вага.

Відзначимо, що значення n відповідає значенню фізичного параметра на попередньому часовому кроці.

6. Визначаємо масу аміаку, що виходить з отвору в трубопроводі за час Δt :

$$\Delta m = \rho Q.$$

7. Визначаємо «надлишковий» об'єм та масу аміаку, що залишилася в трубі після часу Δt :

$$\Delta W^{n+1} = \Delta W - Q,$$

$$\Delta M^{n+1} = \rho \Delta M - \Delta m,$$

де позначка $n+1$ – відповідає значенню параметра на новому часовому кроці.

8. Визначаємо зміну надлишкового тиску в трубі внаслідок витoku аміаку за час Δt :

$$\Delta P_s^{n+1} = \Delta P_s^n - \Delta P,$$

де $\Delta P = \frac{\Delta W^{n+1}}{W \cdot \beta}$.

9. Далі процедуру розрахунку повторюємо, починаючи з п. 5, та визначаємо нові значення ΔW , Q , ΔM , ΔP на новому часовому кроці.

Розрахунок за цими залежностями закінчується, коли надлишковий тиск у пошкодженому трубопроводі буде дорівнювати нулю. На цей момент часу маса аміаку, викинута з пошкодженого трубопроводу, буде дорівнювати M_1 . У трубопроводі залишиться маса аміаку M_2 .

Слід підкреслити, що для розрахунку витрати аміаку на базі залежності (1) використано експериментальні значення коефіцієнта витрати отвору, отримані раніше [12].

У запропонованій методиці потрібно підкреслити ще одну перевагу – вона дає можливість розрахувати зміну з часом висоти h струменя аміаку, що викидається з трубопроводу. Для цього використовують відому гідрравлічну залежність:

$$h(t) = \frac{\Delta P(t)}{\gamma}. \quad (2)$$

Величина $h(t)$ змінюється з часом – вона зменшується (рис. 2), оскільки з часом зменшується величина надлишкового тиску $\Delta P_s(t)$ в аміакопроводі.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

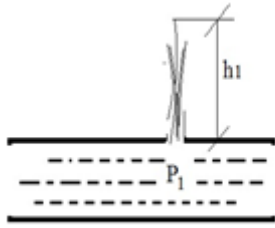
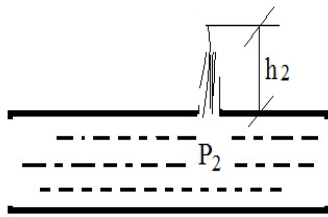
a – a*б – б*

Рис. 2. Схема зміни висоти викиду струменя аміаку в разі зміни тиску в трубопроводі:
a – великий тиск; *б* – малий тиск

Fig. 2. Scheme of the change in the height of the emission of an ammonia jet when the pressure in the pipeline changes:
a – high pressure; *b* – low pressure

Розрахунок параметра $h(t)$ є досить важливим, тому що його значення дає можливість у моделі відтворювати реальну фізику процесу викиду аміаку.

Також слід відзначити, що згідно з рівнянням Бернуллі в разі зміни геометричної висоти аміакопроводу z має місце зміна тиску P в трубопроводі (рис. 3). Тобто у двох сусідніх перерізах трубопроводу, що мають різні значення z_1 , z_2 , значення тиску P (висоти h_1 , h_2) буде різне.

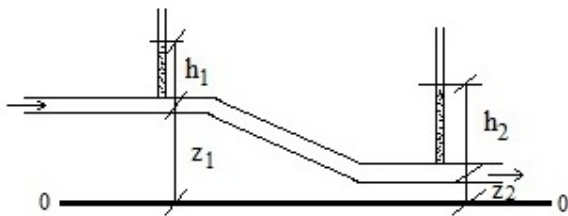


Рис. 3. Схема зміни тиску в трубопроводі в разі зміни геометричної висоти z

Fig. 3. Scheme of the change in pressure in the pipeline when changing the geometric height z

Для врахування цього потрібно до розробленої моделі внести дані щодо зміни геометричної висоти аміакопроводу на певній ділянці.

На другому етапі розрахунку інтенсивність потрапляння аміаку за одиницю часу за рахунок випарювання будемо визначати на базі емпіричної моделі [6]:

$$Q = (5,83 + 4,1 \cdot V) P \sqrt{G},$$

де V – швидкість повітря, G – молекулярна маса, P – тиск насичених парів.

Масу аміаку, що випарилася з трубопроводу за час dt , розраховуємо так:

$$M = Q \cdot S \cdot dt,$$

де S – площа отвору.

Процес розрахунку закінчується, коли $M = M_2$, тобто до моменту часу повного випарювання аміаку (тієї частини рідини, що залишилася після напірного викиду аміаку з пошкодженого трубопроводу).

Для проведення розрахунків на базі запропонованої моделі гідралічного витоку аміаку з пошкодженого трубопроводу як початкові дані слід задати:

- 1) площу отвору в аміакопроводі;
- 2) довжину секції труби;
- 3) надлишковий тиск в аміакопроводі на момент аварії;
- 4) розрахунковий крок за часом;
- 5) коефіцієнт витрати.

Програмна реалізація розглянутої моделі виконана алгоритмічною мовою FORTRAN. Розроблено програму PruD.exe. Результатом роботи програми PruD.exe є динаміка зниження надлишкового тиску в трубопроводі, зміна висоти струменя аміаку з часом, динаміка зміни з часом маси аміаку, що виходить з трубопроводу.

У наведених нижче таблицях показано розрахункові дані щодо зміни надлишкового тиску в аміакопроводі та маси аміаку, що викидається з нього у випадку появи отвору. Розрахунок виконано для площі отвору $S = 0,096 \text{ м}^2$, коефіцієнт витрати взято $0,18$ [1].

Таблиця 1

Сумарна кількість аміаку, викинута з трубопроводу за часом

Table 1

The total amount of ammonia emitted from the pipeline over time

Час	Маса
10 с	11 711 кг
50 с	54 461 кг
70 с	73 470 кг
257 с	171 146 кг
275 с	172 911 кг

Таблиця 2

Зміна надлишкового тиску в аміакопроводі

Table 2

Change in excess pressure in the ammonia pipe

Час	Надлишковий тиск
10 с	32,59 ат.
50 с	23,97 ат.
70 с	20,14 ат.
257 с	0,45 ат.
275 с	0,10 ат.

Як бачимо з наведених таблиць, із часом значення надлишкового тиску в аміакопроводі швидко змінюється, що впливає на кількість емітованого в повітря аміаку. Розрахунки показали, що перший етап викиду аміаку з пошкодженого трубопроводу (викид за рахунок надлишкового тиску) закінчується приблизно за 280 с, та починається другий етап – випарювання аміаку з пошкодженого трубопроводу. Із наведених результатів видно, що на першому етапі має місце дуже швидке потрапляння значної маси аміаку в навколишнє середовище. Це потрібно враховувати під час оцінки забруднення природного навколишнього середовища у випадку пошкодження аміакопроводу.

Результати

Прогнозування забруднення довкілля. Далі, використовуючи гідрравлічну модель нестационарного витоку аміаку з пошкодженого трубопроводу, наведену вище, ми виконали прогноз забруднення довкілля в разі аварійної емісії аміаку на аміакопроводі «Тольятті – Одеса». Для моделювання процесу поширення аміаку в повітрі використано рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки [2, 3, 5]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_g)C}{\partial z} + \sigma C = \text{div}(\mu \text{grad } C) + \sum_{i=1}^N Q_0(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i), \quad (3)$$

де C – концентрація аміаку; u, v, w – компоненти вектора швидкості вітрового потоку; $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i)$ – дельта-функція Дірака; $\mu = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$ – коефіцієнти турбулентної дифузії; x_i, y_i, z_i – координати джерела викиду аміаку; σ – коефіцієнт, що враховує хімічний розпад домішки, вимивання опадами; Q – інтенсивність викиду аміаку; w_g – швидкість гравітаційного осідання; t – час.

Крайові умови для рівняння (1) розглянуто в [2].

Під час використання моделювального рівняння (1) враховано нерівномірність швидкості повітря за висотою та вертикального коефіцієнта дифузії:

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

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

У розробленій чисельній моделі виходу струменя зрідженого аміаку величину $h(t)$ задаємо набором точкових джерел емісії у вигляді дельта-функцій Дірака. Сума точкових джерел дорівнює масі аміаку, що викинута з трубопроводу на розрахунковий час t .

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Для чисельного інтегрування цього рівняння здійснимо таке розщеплення:

$$\begin{aligned}\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} &= 0; \\ \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial vC}{\partial y} &= 0;\end{aligned}\quad (4)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (w - w_g)C}{\partial z} = 0;$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right); \quad (5)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \sigma C = 0; \quad (6)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \sum Q_i(t) \delta(x - x_i(t)) \delta(y - y_i(t)). \quad (7)$$

Це розщеплення має фізичний сенс: перші три рівняння (1)–(3) моделюють поширення аміаку за рахунок руху повітря. Рівняння (4) описує поширення аміаку в повітрі за рахунок турбулентної дифузії в атмосфері. Рівняння (5) описує зміну концентрації аміаку за рахунок вимивання опадами або за рахунок хімічних перетворень. Зміна концентрації аміаку внаслідок дії джерела емісії моделюється рівнянням (6). Для чисельного інтегрування перших трьох рівнянь використовують метод Мак-Кормака. Для чисельного розв'язання рівняння (4) використовують метод Річардсона, а рівнянь (5), (6) – метод Ейлера.

Результати чисельного моделювання. Нижче на рисунках показано результати розв'язання задачі з визначення зон забруднення в разі аварійної емісії аміаку з трубопроводу. Прогнозування виконано за таких додаткових даних: розміри розрахункової області 3 000x2 100x1 000 м; швидкість вітру на рівні $z = 10$ м дорівнює 7 м/с; значення коефіцієнтів дифузії розраховують на базі залежностей, наведених вище під час розгляду прогнозу моделі; напрям вітру південно-західний. Цей вітер дме в бік с. Вовниги, розташованого на правому березі р. Дніпро.



Рис. 4. Схема розрахункової області (аміакопровід «Тольятті – Одеса», що перетинає р. Дніпро), Google image 2020

Fig. 4. Computational domain (place where «Tolyatti – Odesa» ammonia pipe line crosses River Dnipro), Google image 2020

На наступних рисунках наведено зони забруднення атмосферного повітря (рівень $z = 6$ м).



Рис. 5. Зона забруднення, $t = 50$ с:
1 – $C = 2,5$ г/м³; 2 – $C = 5,9$ г/м³

Fig. 5. Contamination zone, $t = 50$ s:
1 – $C = 2.5$ g/m³; 2 – $C = 5.9$ g/m³



Рис. 6. Зона забруднення, $t = 80$ с:
1 – $C = 4,1$ г/м³; 2 – $C = 9,4$ г/м³

Fig. 6. Contamination zone, $t = 80$ s:
1 – $C = 4.1$ g/m³; 2 – $C = 9.4$ g/m³

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА



Рис. 7. Зона забруднення, $t = 320\text{ C}$:
1 – $C = 4,9\text{ г/м}^3$; 2 – $C = 11,6\text{ г/м}^3$

Fig. 7. Contamination zone, $t = 320\text{ C}$:
1 – $C = 4.9\text{ g/m}^3$; 2 – $C = 11.6\text{ g/m}^3$

На наступному етапі прогнозування здійснено розрахунок кількості аміаку G , що осів на різні ділянки, які потрапили під вплив джерела емісії. Розрахунок цієї величини базувався на розрахунку концентрації C аміаку на рівні підстильної поверхні, у чисельній моделі це була величина $z = 0,2\text{ м}$.

У табл. 3 показана кількість домішки, що осів на поверхню поля, розташованого біля с. Вовниги.

Таблиця 3

**Кількість аміаку, що потрапила
на поверхню полів**

Table 3

**The amount of ammonia that hit the surface
of the fields**

Час	Кількість аміаку
3 хв	$0,79 \times 10^3\text{ кг}$
5 хв	$0,23 \times 10^4\text{ кг}$
10 хв	$0,31 \times 10^5\text{ кг}$
20 хв	$0,11 \times 10^6\text{ кг}$
25 хв	$0,15 \times 10^6\text{ кг}$

Із даних таблиць бачимо, що з часом збільшується ступінь забруднення підстильної поверхні. Також потрібно відзначити, що до моменту часу приблизно $t = 4,6\text{ хв}$ припиняється напірний викид аміаку з пошкодженого трубопроводу, тобто припиняється активна фаза забруднення навколишнього середовища, а далі

починається потрапляння аміаку в повітря за рахунок випарювання крізь отвір у пошкодженому трубопроводі.

Відзначимо, що час розрахунку складає 4 с.

Наукова новизна та практична значимість

Розроблено математичну модель, що дозволяє розраховувати інтенсивність нестационарної емісії зрідженого аміаку з пошкодженого трубопроводу. Модель базується на використанні розрахункових залежностей гідравліки. Вона дозволяє проводити розрахунок динаміки витоку аміаку з урахуванням зміни надлишкового тиску в пошкодженому аміакопроводі. Також розроблено чисельну модель для оцінювання рівня забруднення довкілля в разі аварійної емісії аміаку з пошкодженого трубопроводу.

Побудовану гідравлічну модель аварійного витоку аміаку з пошкодженого трубопроводу імплементовано в розроблений код, що дозволяє визначити динаміку забруднення довкілля за аварійного витоку аміаку. Це дає можливість отримати науково обґрунтовану інформацію про динаміку забруднення довкілля в разі аварійного викиди аміаку.

Модель може бути використана під час проведення серійних розрахунків із визначення масштабу забруднення довкілля в разі аварій на аміако- або інших трубопроводах, що транспортують хімічно небезпечні речовини.

Висновки

1. Запропоновано математичну модель динаміки аварійного витоку аміаку з пошкодженого аміакопроводу.

2. Модель дозволяє оперативно визначити зміну з часом витрати аміаку, що потрапляє в повітря в разі розгерметизації аміакопроводу.

3. Використання побудованої моделі на практиці дозволяє науково обґрунтовано визначати інтенсивність емісії джерела забруднення, що необхідно знати під час застосування прогнозних моделей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Амелина Л. В., Беляев Н. Н., Пашенко А. В. Аварийная утечка из аммиакопровода «Тольятти-Одесса»: расчет зоны загрязнения реки Днепр на базе численной модели. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2011. № 62. С. 19–24.
2. Беляев Н. Н., Гулько Е. Ю., Кириченко П. С., Мунтян Л. Я. *Оценка техногенного риска при эмиссии опасных веществ на железнодорожном транспорте*. Кривой Рог : Р. А. Козлов, 2017. 127 с.
3. Беляев Н. Н., Гулько Е. Ю., Росточило Н. В. *Защита зданий от проникновения в них опасных веществ* : монография. Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. 136 с.
4. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. *Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде*. Киев : Наук. думка, 1997. 368 с.
5. Марчук Г. И. *Математическое моделирование в проблеме окружающей среды*. Москва : Наука, 1982. 320 с.
6. Мацак В. Г., Хоцянов Л. Г. *Гигиеническое значение скорости испарения и давления пара токсических веществ, применяемых в производстве*. Москва : Медгиз, 1959. 231 с.
7. Barret A. M. *Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense : Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness* : Degree of Doctor of Philosophy. Carnegie Mellon University, Pittsburg, Pennsylvania, 2009. 123 p.
8. Berlov O. V. Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo. *Наука та прогрес транспорту*. 2016. № 1 (61). Р. 48–54. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60953>
9. Biliaiev M. M., Kharytonov M. M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *NATO Science for Peace and Security. Series C : Environmental Security*. Dordrecht, 2012. P. 87–91. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15
10. Cao C., Li C., Yang Q., Zhang F. Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Allocation for Sustainable Disaster Supply Chain. *Sustainability*. 2017. Vol. 9. Iss. 11. P. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.3390/su9112103>
11. CEFIC Guidance on safety Risk Assessment for Chemical Transport Operations. *Croner-i*. URL: <http://clc.am/OnkmUw> (дата звернення: 05.01.2021).
12. Naserzadeh Z., Atabi F., Moattar F., Nejad N. M. Effect of barriers on the status of atmospheric pollution by mathematical modeling. *Bioscience Biotechnology Research Communication*. 2017. Vol. 10. Iss. 1. P. 192–204.
13. Protective Action Criteria : A Review of Their Derivation, Use, Advantages and Limitations. *Government of Alberta*. 2017. URL: <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> (дата звернення: 05.01.2021).
14. Tumanov A., Gumenyuk V., Tumanov V. Development of advanced mathematical predictive models for assessing damage avoided accidents on potentially-dangerous sea-based energy facility. *IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 90. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/90/1/012027>
15. Zavila O., Dobes P., Dlabka J., Bitta J. The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes. *The Science for Population Protection*. 2015. № 2. P. 1–9.

L. V. AMELINA¹, M. M. BILIAIEV², O. V. BERLOV^{3*}, O. O. VERHUN⁴, T. I. RUSAKOVA⁵

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

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

^{3*}Dep. «Life Safety», Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskoho St., 24a, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (056) 756 34 57, e-mail berlov.oleksandr@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

⁴Dep. «Ecology and Environmental Protection», Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture», Chernyshevskoho St., 24a, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (056) 756 33 71, e-mail vergun.oksana@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-4842-1069

⁵Dep. «Life Safety», Oles Honchar Dnipro National University, Haharina Av., 72, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 394 52 14, e-mail rusakovati1977@gmail.com, ORCID 0000-0001-5526-3578

Modeling of Environmental Pollution by Ammonia Emission from a Damaged Pipeline

Purpose. This work provides for the development of a hydraulic model for calculating the unsteady ammonia outflow from a damaged pipeline and the implementation of this model into a numerical model for predicting emergency air pollution. **Methodology.** To solve the problem, the calculated dependencies of the pressure flow hydraulics were used. An empirical model to calculate the evaporation of ammonia from a damaged pipeline was also used. To calculate the process of spreading ammonia in atmospheric air, a three-dimensional equation of convective-diffusion transfer of impurities was used. Mathematical modeling of the spread of ammonia from a damaged pipeline takes into account the change with height of the wind flow velocity, as well as the change with height of the vertical coefficient of atmospheric diffusion, the dynamics of changes over time in the intensity of ammonia leakage from the damaged pipeline. For the numerical solution of the three-dimensional differential equation for the transfer of ammonia in atmospheric air, its physical splitting is carried out: an equation that describes the transport of an impurity due to convection is singled out separately, an equation that describes the transport of an impurity due to atmospheric diffusion and separately an equation that describes a change in the ammonia concentration in air due to the action of the emission source. The McCormack method is used to numerically integrate the equation for the convective transfer of ammonia in air. The Richardson method is used to numerically integrate the equation of diffusion transfer of an impurity. The Euler method is used to numerically integrate the equation that describes the change in ammonia concentration under the influence of an emission source. **Findings.** Based on the developed model of unsteady ammonia outflow from the damaged pipeline and the created numerical model of ammonia propagation in the atmospheric air, a computational experiment was carried out to assess the level of atmospheric air and underlying surface pollution in the event of an emergency ammonia outflow in the section where the Tolyatti – Odessa ammonia pipeline crosses the Dnipro River. Data on non-stationary environmental pollution were obtained. **Originality.** A mathematical model that allows calculating the unsteady process of ammonia outflow from a damaged pipeline has been developed. A numerical model is proposed to determine the areas of contamination during an emergency ammonia outflow from the Tolyatti – Odessa ammonia pipeline. **Practical value.** Based on the developed model, a code has been created that makes it possible to promptly predict the environmental pollution dynamics during an emergency ammonia outflow. The proposed mathematical model can be used in the development of emergency response plan for chemically hazardous facilities.

Keywords: ammonia pipeline; chemical atmosphere pollution; emergency emission; mathematical modeling

REFERENCES

1. Amelina, L. V., Biliaiev, N. N., & Pashhenko, A. V. (2011). Avariynaya utechka iz ammiakoprovoda «Tolyatti-Odessa»: raschet zony zagryazneniya reki Dnepr na baze chislennoy modeli. *Construction, materials science, mechanical engineering*, 62, 19-24. (in Russian)
2. Belyaev, N. N., Gunko, Y. Y., Kirichenko, P. S., & Muntyan, L. Y. (2017). *Otsenka tekhnogenogo riska priemissii opasnykh veshchestv na zheleznodorozhnom transporte*. Krivoi Rog: Kozlov R. A. (in Russian)
3. Biliaiev, N. N., Gunko, E. Y., & Rostochilo, N. V. (2014). *Zashchita zdaniy ot proniknoveniya v nikhopasnykh veshchestv: monografiya*. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (in Russian)
4. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Belyaev, N. N. (1997). *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
5. Marchuk, G. I. (1982). *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy*. Moscow: Nauka. (in Russian)
6. Matsak, V. G., & Khotsyanov, L. G. (1959). *Gigienicheskoye znachenie skorosti isparennya i davleniya para toksicheskikh veshchestv, primenyaemykh v proizvodstve*. Moscow: Medgiz. (in Russian)
7. Barret, A. M. (2009). *Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness*. (Doctoral dissertation). Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania. (in English)
8. Berlov, O. V. (2016). Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo. *Science and Transport Progress*, 1(61), 48-54. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60953> (in English)
9. Biliaiev, M. M., & Kharytonov, M. M. (2012). Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security*, 87-91. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15 (in English)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

10. Cao, C., Li, C., Yang, Q., & Zhang, F. (2017). Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Allocation for Sustainable Disaster Supply Chain. *Sustainability*, 9(11), 1-22.
DOI: <https://doi.org/10.3390/su9112103> (in English)
11. CEFIC Guidance on safety Risk Assessment for Chemical Transport Operations. *Croner-i*. Retrieved from <http://clc.am/OnkmUw> (in English)
12. Naserzadeh, Z., Atabi, F., Moattar, F., & Nejad, N. M. (2017). Effect of barriers on the status of atmospheric pollution by mathematical modeling. *Bioscience Biotechnology Research Communications*, 10(1), 192-204. (in English)
13. Protective Action Criteria: A Review of Their Derivation, Use, Advantages and Limitations. (2017). *Government of Alberta*. Retrieved from <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> (in English)
14. Tumanov, A., Gumenyuk, V., & Tumanov, V. (2017). Development of advanced mathematical predictive models for assessing damage avoided accidents on potentially-dangerous sea-based energy facility. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 90, pp. 1-11).
DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/90/1/012027> (in English)
15. Zavila, O., Dobes, P., Dlabka, J., & Bitta, J. (2015). The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes. *The Science for Population Protection*, 2, 1-9. (in English)

Надійшла до редколегії: 12.10.20

Прийнята до друку: 10.02.21

УДК 504.5:[628.3:519.87]

М. М. БІЛЯЄВ^{1*}, М. В. ЛЕМЕШ^{2*}, В. О. ЗАДОЯ^{3*}, П. Б. МАШИХІНА^{4*},
Л. Г. ТАТАРКО^{5*}, З. М. ЯКУБОВСЬКА^{6*}^{1*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882^{2*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1230-8040^{3*}Каф. «Економіка та менеджмент», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта v.a.zadova@gmail.com, ORCID 0000-0001-9408-4978^{4*}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 gidro_eko@ukr.net, ORCID 0000-0003-3057-9204^{5*}Каф. «Енергетика», Український державний хіміко-технологічний університет, пр. Гагаріна, 8, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (056) 753 56 38, ел. пошта larisa.tatarco@gmail.com, ORCID 0000-0002-2080-6090^{6*}Каф. «Енергетика», Український державний хіміко-технологічний університет, пр. Гагаріна, 8, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (056) 753 56 38, ел. пошта zinaidaya25@gmail.com, ORCID 0000-0002-9893-3479**Моделювання біологічного очищення стічних вод в аеротенку з рухомим біоценозом**

Мета. Основною метою статті є розробка чисельної моделі для аналізу процесу біологічного очищення стічних вод в реакторі з рухомим біоценозом. **Методика.** Для математичного моделювання процесу біологічного очищення стічних вод в реакторі з рухомим біоценозом використано гідродинамічну модель нев'язкої безвихрової течії. Крайові умови для моделювального рівняння розраховано на поверхнях біореактора, твердих стінках, верхній поверхні; на вхідній границі; на границі витoku зі споруди. Для розрахунку процесу руху активного мулу та субстрату в біореакторі використано модель масопереносу, що враховує конвективно-дифузійний рух. Процес біологічного очищення води в тій частині біореактора, де немає рухомих носіїв біоценозу, розраховано на базі моделі Monod. А процес біологічного очищення води в частині біореактора з рухомими носіями розраховано на базі емпіричної моделі в три етапи. На першому етапі визначено субстрат за допомогою моделі Haffemoes. На другому етапі розраховано швидкість «споживання» субстрату в біоплівці. На третьому етапі визначено зміну концентрації субстрату в зоні, де розташовані носії біоценозу, за рахунок конвективного руху, дифузії субстрату в потоці та його деструкції в біоплівці на носіях. Хаотичний рух носіїв біоценозу в реакторі змодельовано на базі параболічного рівняння дифузії. Для чисельного інтегрування моделювальних рівнянь використано кінцево-різницеві схеми. **Результати.** Здійснено програмну реалізацію побудованої чисельної моделі. Проведено обчислювальний експеримент із визначення ефективності біологічного очищення стічних вод у різних частинах біореактора. **Наукова новизна.** Створено ефективну багатofакторну чисельну модель, що дозволяє оперативно аналізувати ефективність біологічного очищення стічних вод в аеротенку з рухомими носіями біоценозу. **Практична значимість.** Створена двовимірна чисельна модель може бути використана для проведення серійних розрахунків на етапі проєктування систем біологічного очищення стічних вод та аналізу ефективності роботи біореакторів за різних умов експлуатації.

Ключові слова: очищення води; біологічне очищення води; математичне моделювання; біореактор; модель Monod; рухомі носії біоценозу

Вступ

Для визначення ефективності біологічного очищення води на стадії проєктування аеротенків потрібно використовувати спеціальні математичні моделі [1, 2, 6, 7]. У наш час для вирі-

шення цієї задачі найчастіше використовують балансові, емпіричні та аналітичні моделі [3–6]. Але в деяких випадках, ці моделі не можуть дати надійного результату, бо вони не враховують у першу чергу геометричну форму реак-

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

тора та процес гідродинаміки, а також ряд інших параметрів. У зв'язку з цим актуальною проблемою є розробка математичних моделей, що дозволяють теоретично досліджувати процес біологічного очищення стічних вод в аеротенках з урахуванням найбільш важливих факторів [8–16, 19].

Мета

Основною метою нашої роботи є розробка CFD-моделі процесу біологічного очищення стічних вод в аеротенках із рухомим біоценозом.

Методика

Розглянемо підхід для моделювання руху носіїв біоценозу в реакторі (рис. 1).

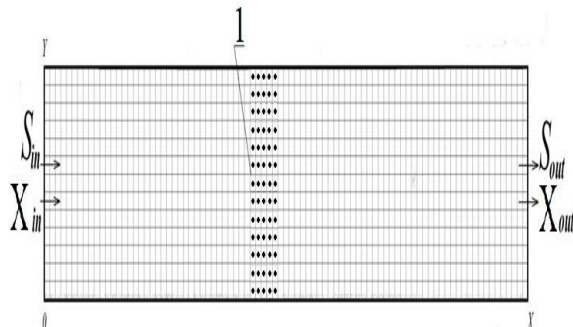


Рис. 1. Схема розрахункової області:
1 – область, де розташований рухомий біоценоз

Fig. 1. Scheme of the calculation area:
1 – area where the mobile biocenosis is located

По-перше, відзначимо, що процес руху носіїв у реакторі є суттєво хаотичний та досить складний із механічної точки зору: має місце взаємодія носіїв один з одним, вплив потоку води на носії, вплив бульбашок повітря на рух носіїв. Урахувати всі види взаємодії неможливо в математичній моделі, тому під час побудови потрібно робити припущення, і досить суттєві.

Із точки зору теорії масопереносу кожен рухомий носій біоплівки можна розглядати як «тверду» домішку, що знаходиться в перемішуванні, у реакторі. Припустимо, що рух носіїв не впливає на гідродинаміку потоку стічних вод у реакторі. Оскільки рух носіїв біоплівки є хаотичним, то для опису цього руху в реакторі будемо використовувати такий підхід хаотичний

рух субстанції моделює друга похідна від концентрації цієї субстанції. Тоді процес хаотичного руху носіїв біоплівки будемо моделювати таким рівнянням:

$$\frac{\partial C_a}{\partial t} = \mu_c \frac{\partial^2 C_a}{\partial x^2} + \mu_c \frac{\partial^2 C_a}{\partial y^2}, \quad (1)$$

де μ_c – коефіцієнт дифузії, C_a – концентрація рухомих носіїв, t – час.

Розглянемо граничні умови для моделювального рівняння:

– на твердих поверхнях реактора $\frac{\partial C_a}{\partial n} = 0$,

де n – одиничний вектор зовнішньої нормалі до твердої стінки;

– на нижній сітці, де потік надходить у зону з носіями, $C_a = 0$;

– на границі витoku скрізь сітку $C_a = C_m$, де C_m – максимально можлива концентрація рухомих носіїв в об'ємі води.

Початкова умова: за $t = 0$ $C_a = C_{00}$, де C_{00} – відома концентрація рухомих носіїв у реакторі.

Таким чином, модель (1) є дифузійною моделлю руху носіїв біоценозу в реакторі. Під час моделювання процесу руху носіїв біоценозу на базі рівняння (1) припустимо, що носії не залишають зону розташування. На практиці це досягається тим, що на границях зони розташовуються сітки, які не дають можливості носіям вийти із зони.

Зміну концентрації рухомих носіїв у різних точках реактора визначаємо шляхом розв'язання рівняння дифузії (1). Оскільки, концентрація носіїв у різних точках реактора змінюється з часом t , то буде змінюватися ефективність очищення води в різних частинах реактора.

Модель гідродинаміки. Для розрахунку нерівномірного поля швидкості потоку стічних вод у біореакторі використовуємо таке рівняння гідродинаміки:

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

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}; \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}, \quad (3)$$

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

де P – потенціал швидкості; u, v – компоненти вектора швидкості потоку стічних вод у біореакторі.

Крайові умови для моделювального рівняння такі:

– на поверхнях біореактора, твердих стінках, верхній поверхні $\frac{\partial P}{\partial n} = 0, \frac{\partial S}{\partial n} = 0, \frac{\partial X}{\partial n} = 0$, де n – одиничний вектор зовнішньої нормалі до поверхні;

– на вхідній границі: $\frac{\partial P}{\partial n} = V_n, S = S_{in}, X = X_{in}$, де V_n – швидкість течії; S_{in}, X_{in} – відома концентрація;

– на границі витоку зі споруди: $P = P_0 + const, \frac{\partial S}{\partial n} = 0, \frac{\partial X}{\partial n} = 0$.

Модель біологічного очищення стічних вод у реакторі. Запропоновані моделювальні рівняння можна поділити на такі групи:

1. Рівняння для розрахунку біологічного очищення стічних вод у тій частині споруди де немає рухомого біоценозу. У цій області використовуємо такі моделювальні рівняння [7, 19]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right); \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial X}{\partial t} + \frac{\partial uX}{\partial x} + \frac{\partial vX}{\partial y} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial X}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial X}{\partial y} \right); \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{dX}{dt} = \mu X - K_d X; \quad (6)$$

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{\mu}{Y} X; \quad (7)$$

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{S}{S + K_s},$$

де K_d – коефіцієнт вимирання активного мулу; t – час; $X(x, y, t)$ – концентрація активного мулу; $S(x, y, t)$ – концентрація субстрату; $\mu_{x,y,z}(t)$ – параметр в осях x, y, z із плinom часу; μ_{\max} – параметр у моделі Monod; Y – емпіричний параметр; K_s – параметр; $u(x, y), v(x, y)$ – компоненти швидкості водного потоку; μ_x, μ_y – коефіцієнти дифузії відповідно в напрямку x, y ; t – час.

2. Рівняння для розрахунку біологічного очищення води в тій частині споруди, де є рухомий біоценоз (рис. 1, позиція 1).

Розрахунок процесу деструкції субстрату в зоні, де розташовані рухомі носії, здійснюємо в три етапи. По-перше, на базі моделі Harremoos визначаємо параметр r [18, 19]:

$$r = k_a \cdot (S)^n, \quad (8)$$

де S – концентрація субстрату, г/м³; параметр k_a – визначається експериментально.

По-друге, розраховуємо швидкість «споживання» субстрату r_r в біоплівці на базі емпіричної моделі [17, 18]:

$$r_r = r \cdot w, \quad (9)$$

де w – активна площа поверхні носіїв.

На третьому етапі визначаємо зміну концентрації субстрату в зоні, де розташовані носії біоценозу, за рахунок конвективного руху, дифузії субстрату в потоці та його деструкції в біоплівці на носіях.

Для опису цих процесів використовуємо такі рівняння:

– для запропонованої моделі потрібно знати кількість рухомих носіїв, які є в контрольному об'ємі, та визначити параметр r на базі інформації про активну площу поверхні взаємодії й k_a ;

– для розрахунку поля швидкості потоку стічних вод у біореакторі (як у зоні, де є рухомі носії в біоплівці, так і в зоні, де їх немає) використовуємо рівняння для потенціалу швидкості.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

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

Таким чином, у рамках запропонованої моделі процес біологічного очищення в реакторі проходить у двох зонах: у зоні, де є рухомі носії, та в зоні, де їх немає.

Для проведення розрахунків потрібно задати чисельність рухомих носіїв у реакторі, площу активної поверхні, що використовується в процесі біологічного очищення.

Чисельне інтегрування моделювальних рівнянь здійснюємо на базі різницевої схем, що розглянуті в [7].

Алгоритм розв'язання задачі з оцінки ефективності роботи реактора з рухомими носіями такий:

1. Розв'язуємо задачу гідродинаміки шляхом визначення поля потенціалу швидкості. Для цього використовуємо рівняння (1).

2. Визначаємо поле швидкості потоку стічних вод у реакторі за залежністю (3).

3. Визначаємо поле концентрації субстрату в реакторі з урахуванням швидкості потоку та дифузії на момент часу t .

4. Визначаємо поле концентрації активного мулу в реакторі з урахуванням швидкості потоку та дифузії на момент часу t .

5. Розраховуємо процес деструкції субстрату в зоні, де немає рухомих носіїв на момент часу t . Для цього використовуємо залежність Monod.

6. Розраховуємо процес руху носіїв у реакторі на момент часу t за рівнянням (1).

7. На основі поля розподілу рухомих носіїв біоценозу в реакторі на момент часу t , розраховуємо параметри, що визначаються залежностями (8), (9).

8. Розраховуємо процес руху та деструкції субстрату в зоні, де є рухомі носії біоценозу на момент часу t . Для цього використовуємо рівняння (3–7).

9. Розрахунок повторюємо, починаючи з п. 3, для визначення нових значень параметрів у реакторі для нового моменту часу.

Результати

Нижче наведено результати обчислювального експерименту, що був проведений на базі розробленої чисельної моделі. Розрахунки виконано за таких вихідних даних [19]:

$S_{in} = 150$ мг/л – концентрація субстрату (БПК_{пов}), що потрапляє в споруду;

$X_{in} = 1200$ мг/л – концентрація активного мулу, що потрапляє в споруду;

розміри біореактора $20 \times 5 \times 5$ м;

$Q_s(t) = 4704$ м³/доб. – витрата стічних вод;

$\mu_x = \mu_y = 3 \cdot 10^{-4}$ м²/доб.;

$\mu_{max} = 1.04$ – параметр;

$K_s = 100$ мг/л – параметр;

$K_d = 0.055$ од./доб. – коефіцієнт, що враховує загибель мікроорганізмів;

$Y = 0.55$ – параметр;

активна площа поверхні носія – $0,001$ м².

максимальна кількість носіїв у реакторі –

$C_m = 120 \cdot 10^3$ шт./м³.

Початкова умова (для моменту часу $t = 0$):

$S_{in} = 150$ мг/л – концентрація субстрату в реакторі; кількість носіїв у реакторі $C_m = 90 \cdot 10^3$ шт./м³; $X_{in} = 1200$ мг/л – концентрація активного мулу.

На рис. 2 показана схема розрахункової області. Для зручності в ній виділено декілька зон. Зона № 1 розташована в тій частині, де має місце потрапляння субстрату в реактор. У зоні № 2 є рухомі носії біоценозу. Зона № 3 примикає до вихідного отвору з реактора (тут, які в зоні № 1 немає рухомих носіїв біоценозу).

Нижче на рис. 3–8 показано розподіл концентрації субстрату та концентрації рухомих носіїв біоценозу в реакторі для різних моментів часу. Відзначимо, що час – безрозмірний. Концентрація цих величин є усередненою за шириною реактора. Кожне число на наведених рисунках показує концентрацію субстрату та рухомих носіїв у відсотках від максимальної концентрації (для субстрату я концентрація становить $S_{in} = 150$ мг/л, а максимальна концентрація рухомих носіїв біоценозу дорівнює $C_m = 120 \cdot 10^3$ шт./м³).

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

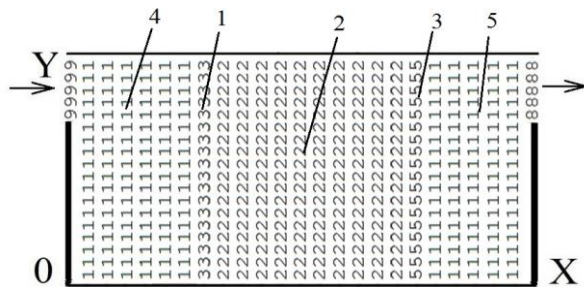
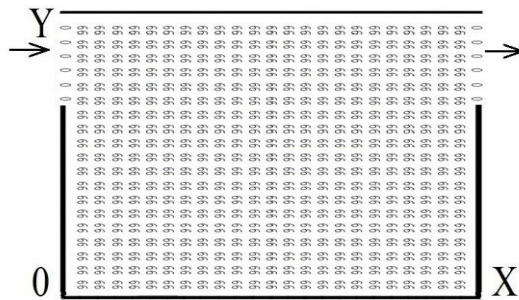
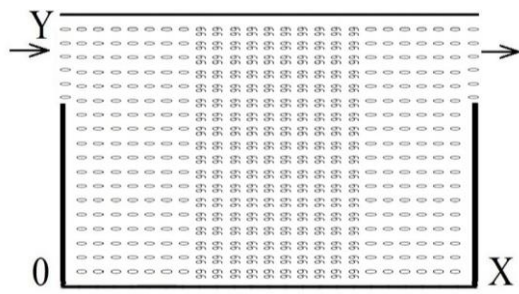
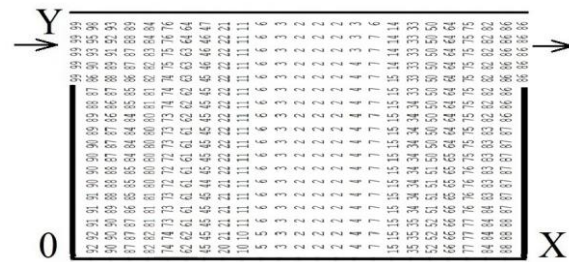
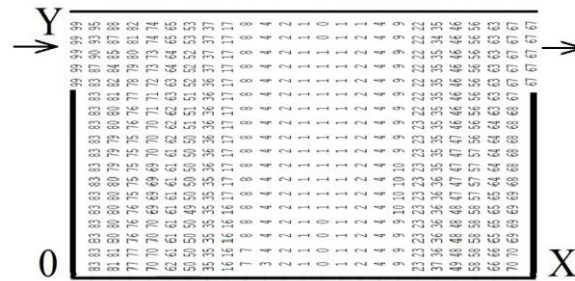
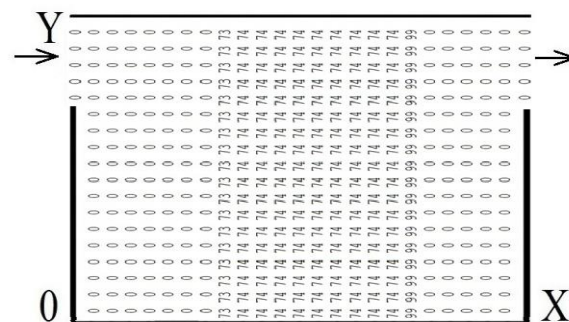


Рис. 2. Схема розрахункової області:

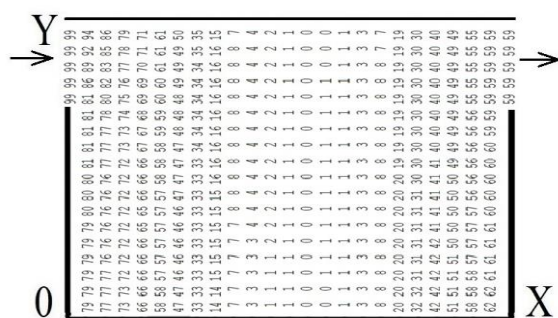
1 – ліва межа зони, де є рухомі носії біоценозу; 2 – зона, де є рухомі носії біоценозу; 3 – права межа зони, де є рухомі носії біоценозу; 4 – перша зона; 5 – третя зона

Fig. 2. Scheme of the calculation area:

1 – left boundary of the zone where there are mobile biocenosis carriers; 2 – zone where there are mobile biocenosis carriers; 3 – right boundary of the zone where there are mobile biocenosis carriers; 4 – first zone; 5 – third zone

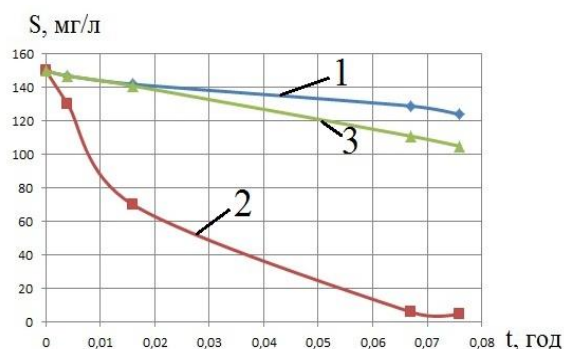
Рис. 3. Розподіл концентрації субстрату в біореакторі на початок розрахунку ($t = 0$)Fig. 3. Distribution of substrate concentration in the bioreactor at the beginning of the calculation ($t = 0$)Рис. 4. Розподіл концентрації рухомих носіїв біоценозу в біореакторі на початок розрахунку ($t = 0$, числу «99» відповідає концентрації $C_m = 90 \cdot 10^3 \text{ шт./м}^3$)Fig. 4. Distribution of the concentration of mobile biocenosis carriers in the bioreactor at the beginning of the calculation ($t = 0$, the number 99 corresponds to the concentration $C_m = 90 \cdot 10^3 \text{ pieces/m}^3$)Рис. 5. Розподіл концентрації субстрату в біореакторі ($t = 0,091$)Fig. 5. Distribution of substrate concentration in the bioreactor ($t = 0,091$)Рис. 6. Розподіл концентрації субстрату в біореакторі ($t = 0,148$)Fig. 6. Distribution of substrate concentration in the bioreactor ($t = 0,148$)Рис. 7. Розподіл концентрації рухомих носіїв біоценозу в біореакторі ($t = 0,172$, числу 99 відповідає концентрації $C_m = 120 \cdot 10^3 \text{ шт./м}^3$)Fig. 7. Distribution of the concentration of mobile biocenosis carriers in the bioreactor ($t = 0,172$, the number 99 corresponds to the concentration $C_m = 120 \cdot 10^3 \text{ pieces/m}^3$)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Рис. 8. Розподіл концентрації субстрату
в біореакторі ($t = 0,175$)Fig. 8. Distribution of substrate concentration
in the bioreactor ($t = 0.175$)

Аналіз наведених рисунків показує, що найбільш активно процес очищення стічних вод проходить всередині зони № 2, тобто зони розташування рухомих носіїв біоценозу.

На рис. 9 показана зміна концентрації субстрату в середині трьох характерних зон біореактора (рівень $y = 2$ м).

Рис. 9. Розподіл концентрації субстрату
в біореакторі з часом:

1 – першої зони; 2 – у зоні, де є рухомі носії біоценозу; 3 – у третій зоні

Fig. 9. Distribution of substrate concentration in the
bioreactor over time:

1 – first zone; 2 – in the zone where there are mobile
biocenosis carriers; 3 – in the third zone

У табл. 1 показано розподіл концентрації рухомих носіїв біоценозу на початку зони їх розташування в біореакторі (початок зони № 2, рівень $y = 2$ м), а в табл. 2 показано розподіл концентрації рухомих носіїв біоценозу в центрі зони № 2 (рівень $y = 2$ м).

Таблиця 1

**Розподіл концентрації рухомих носіїв біоценозу
на початку зони їх розташування
(початок зони № 2)**

Table 1

**Distribution of the concentration of mobile
biocenosis carriers at the beginning of their
location zone (beginning of zone 2)**

Час, t	C , шт./м ³
0	90 000
0,021	72 330
0,045	71 700
0,088	70 510
0,117	69 680
0,144	68 950
0,165	68 380

Таблиця 2

**Розподіл концентрації рухомих носіїв біоценозу
в центрі біореактора (зона № 2)**

Table 2

**Distribution of the concentration of mobile
biocenosis carriers in the center of the bioreactor
(zone 2)**

Час, t	C , шт./м ³
0	90 000
0,021	74 280
0,045	71 960
0,088	70 980
0,117	70 250
0,144	69 620
0,165	69 100

Як можна бачити з табл. 1, 2 унаслідок руху носіїв біоценозу має місце зміна їх концентрації в різних точках біореактора. Також можна відзначити, що на початку зони розміщення носіїв швидкість зміни їх концентрації більша ніж у центрі зони № 2. Унаслідок такої зміни буде мати місце зміна ефективності очищення стічних вод у зоні розташування рухомих носіїв біоценозу. Час розрахунку – 5 с.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Наукова новизна та практична значимість

Побудовано чисельну модель для аналізу процесу біологічного очищення стічних вод у біореакторі з рухомим біоценозом. Визначення поля швидкості потоку стічних вод у біореакторі здійснюється на базі моделі потенціального руху. Моделювання переносу субстрату, активного мулу в біореакторі, де немає рухомих носіїв, здійснюється на базі рівняння конвективно-дифузійного масопереносу. У цій області процес біологічного очищення здійснюється на базі моделі Monod. Процес біологічного очищення в зоні, де розташовані рухомі носії, розраховується на базі емпіричної моделі.

Розроблена чисельна модель може бути використана на етапі проєктування споруд біологічного очищення води.

Висновки

У статті розглянуто нову CFD-модель, що дозволяє аналізувати процес біологічного очищення стічних вод у реакторах із рухомим біоценозом. Модель дає можливість розраховувати процес очищення з урахуванням хаотичного руху носіїв біоценозу. Основу моделі складають фундаментальні рівняння механіки суцільного середовища.

У подальшому передбачено розробку тривимірної CFD-моделі на базі рівнянь руху в'язкої рідини.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Беляев Н. Н., Нагорная Е. К. *Математическое моделирование массопереноса в отстойниках систем водоотведения* : монографія. Днепропетровск : Новая идеология, 2012. 112 с.
2. Беляев Н. Н., Козачина В. А. *Математическое моделирование массопереноса в горизонтальных отстойниках* : монографія. Днепропетровск : Акцент ПП, 2015. 115 с.
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. Карелин Я. А., Жуков Д. Д., Журов В. Н., Репин Б. Н. *Очистка производственных сточных вод в аэротенках*. Москва : Стройиздат, 1973. 223 с.
5. Ласков Ю. М., Воронов Ю. В., Калицун В. И. *Примеры расчетов канализационных сооружений*. Москва : Высшая школа, 1981. 237 с.
6. Олійник О. Я., Айрапетян Т. С. Моделювання очисних 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. Biliaiev M. M., Lemesh M. V., Gunko O. Y., Zadoia V. O., Mashykhina P. B., Yakubovska Z. M. 3D modeling of biological wastewater treatment in aeration tank. *Наука та прогрес транспорту*. 2020. № 6 (90). С. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/224619>
8. 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>
9. Amaral A., Gillot S., Garrido-Baserba M., Filali A., Karpinska A. M., Plósz B. G., ... Rosso D. Modelling gas-liquid mass transfer in wastewater treatment : when current knowledge needs to encounter engineering practice and viceversa. *Water Science & Technology*. 2019. Vol. 80. Iss. 4. P. 607–619. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2019.253>
10. Babaei A., Azadi R., Jaafarzadeh N., Alavi N. Application and Kinetic Evaluation of upflow Anaerobic bio-film Reactor for Nitrogen Removal from Wastewater. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2013. Vol. 10. Iss. 1. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1186/1735-2746-10-20>
11. 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/10.1063/1.496496611>
12. Dapelo D., Bridgeman G. A CFD strategy to retrofit an anaerobic digester to improve mixing performance in wastewater treatment. *Water Science & Technology*. 2020. Vol. 81. Iss. 8. P. 1646–1657. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2020.08612>

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

13. Gao H., Stenstrom M. K. Development and applications in CFD modeling for secondary settling tanks over the last three decades : A review. *Water Environment Research*. 2019. Vol. 92. Iss. 6. P. 796–820. DOI: <https://doi.org/10.1002/wer.127913>
14. Gao H., Stenstrom M. K. Influence of Model Parameters and Inlet Turbulence Boundary Specification Methods in Secondary Settling Tanks : Computational Fluid Dynamics Study. *Journal of Environmental Engineering*. 2020. Vol. 146. Iss. 5. P. 04020028-1–04020028-12. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.000168911](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.000168911)
15. Gao H., Stenstrom M. K. Computational Fluid Dynamics Analysis for Improving Secondary Settling Tank Performance. *World Environmental and Water Resources Congress 2020*. 2020. P. 212–224. DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784482988.02115>
16. Griborio A. *Secondary Clarifier Modeling : A Multi-Process Approach. Dissertation and Theses*. University of New Orleans : USA, 2004. 440 p.
17. Pereda M., Zamarreno J. M. Agent – based modeling of an activated sludge process in batch reactor. *19th Med-iterranean Conference on Control and Automation Aquis*. 2011. P. 1128–1133. DOI: <https://doi.org/10.1109/med.2011.5983027>
18. Rusten B., Ødegaard H., Lundar A. Treatment of dairy wastewater in a novel moving bed biofilm reactor. *Water Science and Technology*. (1992), Vol. 26. Iss. 3–4. P. 703–711. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.1992.0451>
19. Trojanowicz K., Wójcik W. Dimensioning of aerated submerged fixed bed biofilm reactors based on a mathematical biofilm model applied to petrochemical wastewater – the link between theory and practice. *Water SA*. 2014. Vol. 40, No. 2. P. 323–330. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/wsa.v40i2.14>

M. M. BILIAIEV^{1*}, M. V. LEMESH^{2*}, V. O. ZADOIA^{3*}, P. B. MASHYKHINA^{4*},
L. H. TATARKO^{5*}, Z. M. YAKUBOVSKA^{6*}

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

^{2*}Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1230-8040

^{3*}Dep. «Economics and Management», 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.a.zadoia@gmail.com, ORCID 0000-0001-9408-4978

^{4*}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 gidro_eko@ukr.net, ORCID 0000-0003-3057-9204

^{5*}Dep. «Energy», Ukrainian State University of Chemical Technology, Haharina Av., 8, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (056) 753 56 38, e-mail larisa.tatarko@gmail.com, ORCID 0000-0002-2080-6090

^{6*}Dep. «Energy», Ukrainian State University of Chemical Technology, Haharina Av., 8, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (056) 753 56 38, e-mail zinaidaya25@gmail.com, ORCID 0000-0002-9893-3479

Simulation of Biological Wastewater Treatment in Aerotanks with Moving Biocenosis

Purpose. The main purpose of the article is to develop a numerical model for the analysis of the process of biological wastewater treatment in a reactor with a mobile biocenosis. **Methodology.** For mathematical modeling of the process of biological wastewater treatment in a reactor with a moving biocenosis, a hydrodynamic model of a non-viscous vortex-free flow is used. We calculated the boundary conditions for the modeling equation on the surfaces of the bioreactor, solid walls, and the upper surface; at the inlet boundary; at the outlet boundary from the building. To calculate the process of movement of activated sludge and substrate in the bioreactor, a mass transfer model is used, which takes into account the convective-diffusion movement of the substrate and activated sludge. The process of biological water purification in that part of the bioreactor where there are no mobile biocenosis carriers will be calculated based on the Monod model. The process of biological water purification in the part of the bioreactor where there are mobile carriers is calculated on the basis of an empirical model in three stages. The first stage is

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

determined using the Harremoës model. At the second stage, the rate of substrate «consumption» in the biofilm is calculated. At the third stage, the change in the substrate concentration in the zone where the biocenosis carriers are located is determined due to convective movement, substrate diffusion in the flow and its destruction in the biofilm on the carriers. The chaotic motion of biocenosis carriers in the reactor is modeled based on the parabolic diffusion equation. Finite-difference schemes are used for numerical integration of modeling equations. **Findings.** The software implementation of the constructed numerical model is carried out. A computational experiment to determine the efficiency of biological wastewater treatment in different parts of the bioreactor was conducted. **Originality.** An effective multifactorial numerical model has been created, which allows quick analysis of the efficiency of biological wastewater treatment in an aeration tank with mobile biocenosis carriers. **Practical value.** The created two-dimensional numerical model can be used for serial calculations at the stage of designing biological wastewater treatment systems and analysis of the efficiency of bioreactors under different operating conditions.

Keywords: water treatment; biological water treatment; mathematical modeling; bioreactor; Monod model; mobile biocenosis carriers

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. Vasilenko, O. A., Grabovskiy, P. O., Larkina, G. M., Polishchuk, O. V., & Progulny, V. Y. (2010). *Rekonstrukciya i intensyfikaciya sporud vodopostachannya ta vodovidvedennya*: navchalyy posibnyk. Kiev: IVNVKP «Ukrgeiotek». (in Ukrainian)
4. Karelin, Ya. A., Zhukov, D. D., Zhurov, V. N., & Repin, B. N. (1973). *Ochistka proizvodstvennykh stochnykh vod v aerotenkah*. Moscow: Stroyizdat. (in Russian)
5. Laskov, Yu. M., Voronov, Yu. V., & Kalitsun, V. I. (1981). *Primery raschetov kanalizatsionnykh sooruzheniy*. Moscow: Vysshaya shkola. (in Russian)
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/dopovid2015.05.055> (in Ukrainian)
7. Biliaiev, M. M., Lemesh, M. V., Gunko, O. Y., Zadoia, V. O., Mashykhina, P. B., Yakubovska, Z. M. (2020). 3D modeling of biological wastewater treatment in aeration tank. *Science and transport progress*, 6(90), 5-14. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/224619> (in English)
8. 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)
9. Amaral, A., Gillot, S., Garrido-Baserba, M., Filali, A., Karpinska, A. M., Plósz, B. G., ... Rosso, D. (2019). Modelling gas-liquid mass transfer in wastewater treatment: when current knowledge needs to encounter engineering practice and vice versa. *Water Science and Technology*, 80(4), 607-619. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2019.253> (in English)
10. Babaei, A. A., Azadi, R., Jaafarzadeh, N., & Alavi, N. (2013). Application and kinetic evaluation of upflow anaerobic biofilm reactor for nitrogen removal from wastewater by Anammox process. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 10(1), 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1186/1735-2746-10-20> (in English)
11. 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* (Vol. 1773, pp. 040003-1-040003-11). DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4964966> (in English)
12. Dapelo, D., & Bridgeman, J. (2020). A CFD strategy to retrofit an anaerobic digester to improve mixing performance in wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 81(8), 1646-1657. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2020.086> (in English)
13. Gao, H., & Stenstrom, M. K. (2019). Development and applications in computational fluid dynamics modeling for secondary settling tanks over the last three decades: A review. *Water Environment Research*, 92(6), 796-820. DOI: <https://doi.org/10.1002/wer.1279> (in English)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

14. Gao, H., & Stenstrom, M. K. (2020). Influence of Model Parameters and Inlet Turbulence Boundary Specification Methods in Secondary Settling Tanks: Computational Fluid Dynamics Study. *Journal of Environmental Engineering*, 146(5), 04020028-1-04020028-12.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001689](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001689) (in English)
15. Gao, H., & Stenstrom, M. K. (2020). Computational Fluid Dynamics Analysis for Improving Secondary Settling Tank Performance. *World Environmental and Water Resources Congress 2020*, 212-224.
DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784482988.021> (in English)
16. Griborio, A. (2004). *Secondary Clarifier Modeling: A Multi-Process Approach*. Dissertation and Theses. University of New Orleans: USA. (in English)
17. Pereda, M., & Zamarreno, J. M. (2011). Agent-based modeling of an activated sludge process in batch reactor. *19th Mediterrian Conference on Control and Automation Aquis* (pp. 1128-1133).
DOI: <https://doi.org/10.1109/med.2011.5983027> (in English)
18. Rusten, B., Ødegaard, H., & Lundar, A. (1992). Treatment of Dairy Wastewater in a Novel Moving Bed Biofilm Reactor. *Water Science and Technology*, 26(3-4), 703-711. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.1992.0451> (in English)
19. Trojanowicz, K., & Wójcik, W. (2014). Dimensioning of aerated submerged fixed bed biofilm reactors based on a mathematical biofilm model applied to petrochemical wastewater-the link between theory and practice. *Water SA*, 40(2), 323-330. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/wsa.v40i2.14> (in English)

Надійшла до редколегії: 05.10.2020

Прийнята до друку: 04.02.2021

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

UDC 629.4:656.25

V. V. BURCHENKOV^{1*}

^{1*}Dep. «Cars», Belarusian State University of Transport, Kirova St., 34, Gomel, Republic of Belarus, 246653,
tel. +37 (529) 530 37 84, e-mail lenadva@tut.by, ORCID 0000-0002-3664-4655

Improving the Methodology of Placing Peripheral Devices for Monitoring the Technical Condition of Rolling Stock

Purpose. Based on the research work of units and parts of rolling stock undercarriage in transient modes of emergency situations it is proposed to optimize the sequential placing of peripheral contactless devices for technical control of locomotives and cars on railway lines. **Methodology.** Investigation of transient processes of temperature increase of faulty axle bearings of locomotives and cars during remote technical diagnosing allows one to organize theory and hardware construction of the peripheral systems for testing the rolling stock on the move. Automatic control of the technical state of the rolling stock on the move – the last and in some cases the only possible process step, which allows revealing unacceptable defects in rolling units and thereby prevent emergencies in railway transport. **Findings.** Based on the research it was proposed a solution to the optimization problem of placing peripheral control devices of rolling stock when moving according to the criteria of the linear and exponential nature of heating defective axle boxes of wheelsets and other units of undercarriage. The risks of train stop on the railway line because of the erroneous classification of normally heated axle boxes as overheated, as well as the consequences of classification of overheated axle box as normally heated axle boxes were evaluated. **Originality.** Optimization model of placing peripheral control devices based on probabilistic criteria for evaluating the degree of permissible risk that, at a minimum, should not be exceeded during the transition to control technical means. A functional block diagram of test hardware diagnostics for the wheelsets when determining the gradations of digital indicators of defects was proposed. **Practical value.** The value of the results obtained lies in the improvement of a method of placing technical control peripheral devices and diagnosing rolling stock when determining the distance between the control stations in the same direction and organizing tracking modes for railcars with developing defects. From a technical point, reduced error probability is directly related to traffic safety and diagnostic algorithms.

Keywords: rolling stock; axle boxes; temperature control; method of placing; unit diagnostics

Introduction

With the development of remote control of the train movement and an increase in the coverage areas of centralized dispatching systems, the possibilities of visual observation of the technical condition of the undercarriage of cars and locomotives of trains along the route are reduced. On the railways of the world, peripheral systems for contactless control of the undercarriage of cars and locomotives in motion are widely used.

Overheating of the axle boxes of cars is characterized by an unsteady heat exchange mode and a temperature increase of the wheelset axle neck

and the axle-box body on the move. The rate of increase in the temperature of the axle neck depends on the nature of the axle box malfunction; to neutralize this tendency, the development and implementation of technical devices for controlling the temperature of axle boxes, brake discs and blocks is accelerated in order to prevent emergency situations.

At the same time, modern conditions impose on systems for diagnosing and control of undercarriage not only the requirements for detecting faulty elements, but also for early detection of emerging defects. This tendency actualizes the task of improving the methodology for determining the loca-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

tions of peripheral control devices for rolling stock, taking into account the option of tracking cars with heating axle boxes.

The basis of the strategy for optimizing the placement of peripheral diagnostic devices on railway lines is the recommendations developed based on statistical data and evaluation of the risks degree. The heating of the axle neck, at which the axle box should be considered emergency (overheated), is at the level above 100–140°C. For axle boxes with roller bearings, the temperature of the axle neck in the range of values up to 300°C changes at a speed of 2 to 15°C per minute, and in the range of values from 300 to 800°C (the approximate temperature of the axle neck fracture) reaches the values of 18–20°C/min. The maximum rates of increase (gradients) of the axle neck temperature are also characterized by its statistical data on fractures. Thus, according to foreign data, the fracture of the axle neck if there is no lubrication for axle boxes with rolling bearings occurs after 55–60 km. According to the statistics of All-Russian Scientific Research Institute of Railway Transport, the car mileage to the axle neck fracture is no more than 45–50 km. If an unacceptable heating of the axle box is not detected in time, its destruction occurs [5, 9, 14].

During the operation of the axle box, heat from the bearing is transferred to the axle box body. The value of the temperature rise of the axle box body ΔT_{abb} is determined by the temperature of the axle neck, the temperature of the outside air and the speed of the train. The heating of the axle box body due to solar radiation, its thermal resistance during heat transfer from the bearing to the body, the presence of moisture on the axle box surface, etc., have a great influence on the value ΔT_{abb} . Taking into account the influence of individual interfering factors, the distribution of the probability density of the real values of the temperature excess ΔT_{abb} of normal (curve 1) and overheated (curve 2) axle boxes with rolling bearings is shown in Fig. 1.

The sets of ΔT_{abb} values for normally operating and overheated axle boxes have an intersection zone. This indicates the impossibility of error-free recognition of overheated axle boxes by ΔT_{abb} value. Indeed, if we select a certain value of ΔT_{abb} as a recognition criterion, for example, 20°C, then a certain number of overheated axle boxes, ΔT_{abb} of

which is lower than this value, will not be detected, and vice versa, a certain number of normally operating axle boxes, ΔT_{abb} of which is higher than 20°C, will be taken as overheated. Tracking the rate of increase of axle box temperature at control points to a value exceeding the permissible one during operation indicates the statistical nature of these dependencies [3].

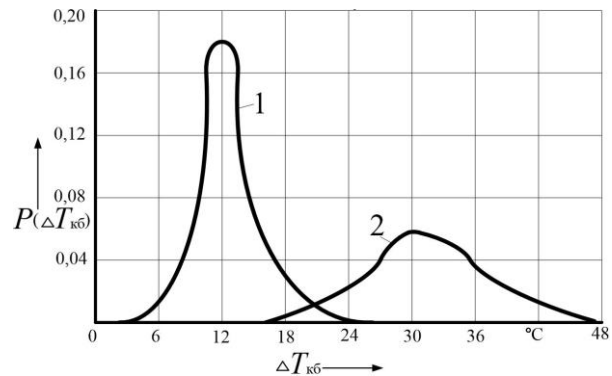


Fig. 1. Distribution of ΔT_{abb} values for axle boxes with rolling bearings

It follows from the above that the automation of the process of detecting overheated axle boxes will be successful only when using statistical methods for processing the measurement results.

Purpose

Based on the study of the operation of units and parts of the rolling stock undercarriage in transient modes of the development of emergency situations, the article provides optimizing the sequential placement of peripheral contactless devices for technical control of locomotives and cars on railway lines.

Methodology

The existing network of train observation points sets the degree of permissible risk, which, at a minimum, should not be exceeded during the transition to control by technical means. The dependencies identified during the analysis of the data make it possible to form a strategy for placing the control devices of heating axle boxes, focused on risks. In this case, the only and sufficient parameter of the axle box malfunction is its temperature, considered as an indicator of the risk of derailling.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Probabilistic assessment of the reliability of remote technical control of car wheels during train movement. Let us turn to probabilistic estimates of the reliability of detecting overheated and normally heated axle boxes. An overheated axle box skipping may lead to a violation of traffic safety along the route. In addition to losses from train stops, which can be quantified, more severe cases are possible, which are evaluated by other criteria (for example, losses from rolling stock wrecks and accidents).

At the same time, the erroneous recognition of a normally heating axle box as faulty is associated with additional costs for stopping the train on the running line. Comparison and optimal choice of indicators among these components are made on the basis of statistical data. From a technical point of view, reducing the probability of errors is directly related to traffic safety and diagnostic algorithms.

The parameter selected as an estimate for diagnosing is compared with the setting – the boundary value of this parameter. If the value of the parameter does not exceed the setting, the object is considered suitable, otherwise it is rejected [4, 10].

The conditions for making a diagnostic decision change over time, and the probability of error increases. The boundary values for making a decision are different for each category of equipment for detecting overheated axle boxes (for example, the boundary value for running line multifunctional hardware components set (MHCS) is 120°C; for the devices placed before the service points it is equal to 100°C, etc.). Due to the above-mentioned the specific value of the set is expanded to the field of possible values, which complicates the diagnostic process. External conditions (influence of solar radiation, ambient temperature) have a significant impact on the increase in the number of diagnostic errors. Due to these reasons, making a decision on the state of the object will be more objective with three-position evaluation of the object state [8, 16]. Having supplemented the minimum and maximum values of the parameter being diagnosed with the zone of an indefinite decision, the decision-making algorithm is modified as follows:

– if the parameter being diagnosed does not exceed the minimum value, a decision is made on the suitability of the object;

– if the parameter exceeds the maximum value, then the object is considered faulty;

– when the parameter values are in a certain range between the minimum and maximum values, the object is subject to monitoring in the tracking mode. At the same time, to determine the suitability, fixation of the parameter under control is used for each diagnostic point [15].

Let us show that in the case of using the described decision formation, the error probability decreases. To do this, we apply a probabilistic approach and consider one of two alternative cases (axle boxes operate in normal mode or in an overheated state). With normally heating boxes, the distribution probability density of the controlled parameter is fairly accurately approximated by the Rayleigh distribution [10]:

$$p(x) = (x / \sigma^2) \exp[-(x^2 / \sigma^2)], \quad (1)$$

where x – the value of the parameter being controlled; σ – root-mean-square deviation; $p(x)$ – probability distribution density.

Distribution (1) has a pronounced asymmetric nature with a maximum and with a characteristic drop to zero and is a special case of the Weibull distribution with density

$$\xi(x) = \frac{\alpha}{\sigma} (X / \sigma)^{\alpha-1} \exp[-(X / \sigma)^\alpha] \quad (2)$$

with $\alpha = 2$ and a special case of the distribution of a random variable $\xi = \sqrt{x_n^2} / n$ with the density

$$P(x) = \frac{\sqrt{2n}}{\sigma \Gamma(n/2)} \left(\frac{x \sqrt{n}}{\sigma \sqrt{2}} \right)^{n-2} \exp \left\{ -\frac{n}{2} \left(\frac{x}{\sigma} \right)^2 \right\} \quad (3)$$

at $n = 2$.

A gradual temperature increase of the axle box leads to the Weibull distribution, and random temperature changes due to the influence of solar radiation or other factors lead to the Rayleigh distribution. Thus, the Rayleigh distribution is, in a certain sense, universal in nature and can be used when setting up threshold devices.

Wheelsets belong to the undercarriages and are one of the most important elements of the car. Therefore, they are subject to special, increased requirements of the State Standard, the Rules for the Technical Operation of Railways, Instructions

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

for the Inspection, Repair and Formation of Car Wheelsets, as well as other regulatory documents during the design, manufacture and maintenance [13].

Particular attention should be paid to monitoring the condition of wheelsets when the train is moving, which makes it possible to detect defective wheelsets in advance, transfer the information received to the nearest inspection station for detailed diagnostics by technical personnel [19].

Structurally, the system for automatic control of the technical condition of axle boxes is a complex dynamic system. It includes the object of control – a wheel or axle box, test diagnostic control equipment and a decisive device for determining the conditions for further operation of rolling stock under control. This device provides a decision (based on the class assigned to the detected defect) on the further movement of the defective car (for example, about moving without restrictions, moving to the nearest repair depot for preventive control and repair, about immediate exclusion from operation).

The converter of parameters converts the state space of the object under control (wheel – axle box) E into the space of electrical signals S , subject to further processing:

$$S_i = Q(E_i), \quad (4)$$

where Q – space transformation operator of the object state into a signal space. The operation algorithm of this operator corresponds to the action of analog-to-digital converter used to measure continuous values of measured defects and issuing a digital equivalent in a form consistent with the operation of the attribute generator [1, 21].

The attribute generator (object state code) converts the signal space S into the attribute space X , which characterizes the state of the object:

$$X_i = R(S_i), \quad (5)$$

where R – operator of transformation of signal space into attribute space.

The classifier, based on the analysis of the attributes of the object state, performs the function of classification, that is, it generates a signal indicating that the attribute vector belongs to the corresponding class of states:

$$\gamma = L(X_i), \quad (6)$$

where L – classifier operation algorithm.

The algorithm for making a decision in favor of one of the state classes of recognition objects depends on the decision method. Two methods are possible: constant sample size decision and sequential decision.

In the first case, there are n attributes ($n = \text{const}$) X_1, X_2, \dots, X_n , which belong to one of the classes of states Ω_i . The hypotheses that the sample values belong to the a priori known distributions $W_n(X_1, X_2, \dots, X_n / \Omega_i)$ and $W_n(X_1, X_2, \dots, X_n / \Omega_{ij})$ we denote by H_i and H_{ij} and the decisions consisting in making appropriate hypotheses by γ_i and γ_j . Establishing a decision rule is reduced to dividing the n -dimensional attribute space (X_1, X_2, \dots, X_n) into two non-intersecting areas A_i and A_j , that is:

$$(X_1, X_2, \dots, X_n) \in A_i \rightarrow \gamma_i;$$

$$(X_1, X_2, \dots, X_n) \in A_j \rightarrow \gamma_j.$$

Since during classification it is necessary to delimit the intersecting areas of the attribute space into non-intersecting areas of state classes using the discriminant function, classification errors are inevitable. There are two kinds of errors: the probability of a «false alarm» (error of the first kind), that is, the probability of making a decision about a malfunction of an object at a time when it is actually working:

$$P_{fa} = P\left\{\frac{\gamma_j}{H_i}\right\} = P\left\{(X_1, X_2, \dots, X_n) \in \frac{A_j}{\Omega_i}\right\} = \int_{A_j} \dots \int W_n\left(\frac{(X_1, X_2, \dots, X_n)}{\Omega_i}\right) dX_1 dX_2 \dots dX_n; \quad (7)$$

and the probability of «missing» a faulty object (error of the second kind), that is, assigning the sample to the class Ω_i , although it reflects the Ω_j -th class of the state:

$$P_{miss} = P\left\{\frac{\gamma_j}{H_j}\right\} = P\left\{(X_1, X_2, \dots, X_n) \in \frac{A_i}{\Omega_j}\right\} = \int_{A_i} \dots \int W_n\left(\frac{(X_1, X_2, \dots, X_n)}{\Omega_j}\right) dX_1 dX_2 \dots dX_n. \quad (8)$$

Obviously, with a given (constant) sample size, it is impossible to simultaneously make the probabilities of «false alarm» and «missing» arbitrarily

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

small. You can only change their ratio by moving the separating function. The optimal equation of the discriminant function can be obtained based on the Bayes criterion, which minimizes the average risk of making a wrong decision [16]. When using Bayes' criterion, the discriminant function will take the form:

$$D(X_1, X_2, \dots, X_n) = \frac{P(\Omega_j)W_n \left(\frac{X_1, X_2, \dots, X_n}{\Omega_j} \right)}{P(\Omega_i)W_n \left(\frac{X_1, X_2, \dots, X_n}{\Omega_i} \right)} = \frac{P(\Omega_j)W_n \left(\frac{X_1, X_2, \dots, X_n}{\Omega_j} \right)}{P(\Omega_i)W_n \left(\frac{X_1, X_2, \dots, X_n}{\Omega_i} \right)} = \frac{P(\Omega_j)W_n}{P(\Omega_i)W_n} \lambda(X_1, X_2, \dots, X_n) = \frac{C_{ij} - C_{ii}}{C_{ji} - C_{jj}}, \quad (9)$$

where $P(\Omega_i)$, $P(\Omega_j)$, $\Omega\lambda$ – a priori the probabilities of the corresponding state classes; $\lambda(X_1, X_2, \dots, X_n)$ – likelihood function;

$\begin{vmatrix} C_{ij} & C_{ii} \\ C_{ji} & C_{jj} \end{vmatrix}$ – loss cost matrix whose rows correspond to hypotheses H_i and H_j and columns correspond to solutions γ_i and γ_j .

The minimum value of the average risk:

$$R = P(\Omega_i)C_{ii} + P(\Omega_j)C_{ji} + P(\Omega_i)(C_{ij} - C_{ii})P_{fa} - P(\Omega_i)(C_{ji} - C_{jj})(1 - P_{miss}), \quad (10)$$

where P_{fa} , P_{miss} – «false alarm» and missing probabilities determined by the discriminant function.

At various stages of the implementation of equipment for detecting axle box malfunctions, when a priori information about the statistics of the parameters under control is still insufficient, other criteria for optimality of the decision can also be used, which are special cases of the Bayes criterion (the Neumann–Pearson criterion, Kotelnikov criterion, etc.) [2, 17].

However, regardless of the criterion used, classification by constant sample size is as follows:

- the likelihood ratio $\lambda(X_1, X_2, \dots, X_n)$ is calculated with the measured attribute vector;
- the hypothesis H_i , depending on whether the found point is located above or below the discriminant function is accepted or rejected.

With the sequential classification method, the number of attributes (sample size) can vary. The decision-making procedure is reduced to the fulfillment of the condition $B < \lambda(X_1, X_2, \dots, X_n) < A$.

The decision is made in favor of the hypothesis H_j , as soon as the inequality $\lambda(X_1, X_2, \dots, X_n) \geq A$, is satisfied, and as well as in favor of the hypothesis H_j – if the inequality $\lambda(X_1, X_2, \dots, X_n) \leq B$ is satisfied.

If the result of calculating the likelihood ratio for n attributes falls between the stopping boundaries A and B , then the next $(n+1)$ -th attribute is being formed, and the calculation procedure is repeated.

It is proved [14] that the stopping boundaries providing the set probabilities of «false alarm» and «missing» are determined from the expression:

$$A = \frac{1 - P_{miss}}{P_{fa}}; B = \frac{P_{miss}}{1 - P_{fa}}. \quad (11)$$

The defect recorder, guided by the decision γ_i , adopted by the classifier, issues information J_{Ei} about the belonging of the state of the object under control to the corresponding class of states, that is:

$$J_{Ei} = H(\gamma_i), \quad (12)$$

where H – operator of the signal transformation of the classifier by the informatory.

Thus, the generalized analytical record of the hardware test fault detection process, constructed on the basis of expressions (5) – (7) and (10), has the form:

$$J_{Ei} = H(L(R(Q(E_i)))). \quad (13)$$

The general functional diagram of the test hardware diagnostics is shown in Fig. 2 [16].

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

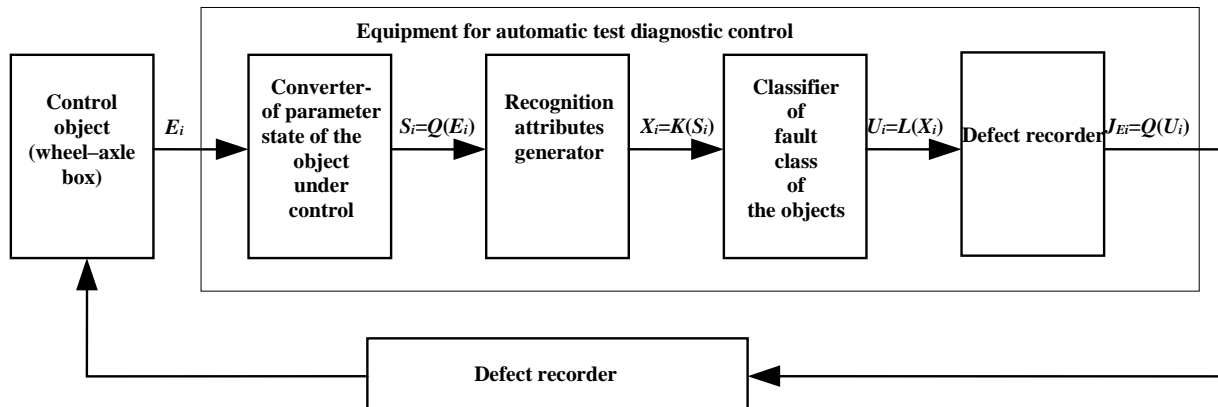


Fig. 2. Block diagram of the system of automatic test diagnostic control of axle boxes and wheels during the train movement

The decision-making device on the basis of component defects and unacceptable parameter values given in the Belarusian Railway Standard for wheelsets STP BCh 17.310–2015 [8] determines the gradation of digital indicators of defects.

For this purpose, the study of the heating nature of the axle boxes deserves attention. The statistical data of tracking at the control points of the axle box temperature rise to a value exceeding the permissible one during operation made it possible to identify heating of axle boxes of two fundamentally different types. They are: «2linear» – the axle boxes are characterized by a uniform, linear temperature rise at several control points until it reaches its limit value; «Exponential» – there is such a rapid temperature increase of the axle box between two points that at the next point its limit value has already been exceeded and an immediate train stop is required [11].

Axle boxes of the «linear» type. According to the statistical characteristics of the data of the «tracking» option (for the MHCS-02 equipment), it is possible to calculate the average increase in both the axle box temperature and the temperature difference between both axle boxes of the same axle (Fig. 3). Increase in each of these parameters can result in excess of its limit value and more often, the excess of the set temperature difference of the axle boxes is observed.

The influence of the section parameters, such as increased movement resistance in curves of a small radius or the maximum permissible speed, on the temperature rise of the axle boxes has not yet been revealed.

While the train stop at the stations, the cooling of the faulty axle box may occur, and, therefore, the increase in its temperature slows down, hence, when assessing the route, it is necessary to pay attention to the train movement time between two control points.

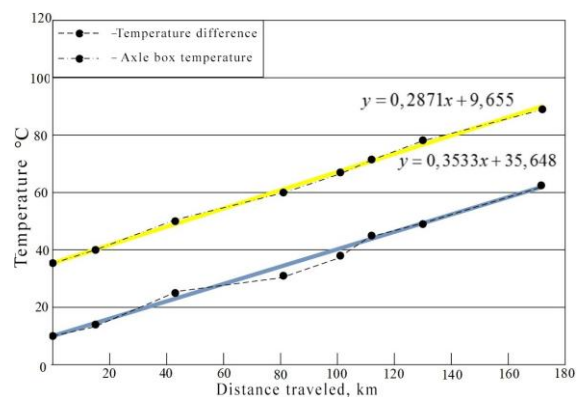


Fig. 3. Linear temperature change of the heating axle box $y = 0.2871x + 9.655$ and temperature difference of two axle-boxes $y = 3533x + 35.648$ of one axle

Based on the collected statistics, it is possible to calculate the limit values for the average temperature rise of the axle boxes (in degrees per kilometer), which are typical for the overwhelming majority of measurements that have already taken place (Table 1).

Numerous cases of the axle box temperature exceeding its limit value were considered. This allows, on the one hand, to check the correctness of the choice of this temperature value in operation, and on the other, to establish how long a train with a faulty axle box can still move without derailling [6, 14].

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Table 1

Average temperature increase of axle boxes (in degrees per kilometer)		
Parameter	Proportion of cases, %	
	95	100
Average increase in the absolute temperature of a faulty axle box	0.35	0.40
Average increase in temperature difference between axle boxes of one axle	0.33	0.38

Findings

The temperature value is taken as the value, at which the grease in the axle box loses its properties, the linear course of the temperature curve is no longer preserved, and then an exponential temperature increase occurs. Based on practical experience, it is possible to choose this value equal to about 120°C and, based on the linear temperature increase, calculate the distance that, after reaching its limit value, the train can pass without derailing for each specific case.

Thus, it seems possible to use the available data both on the maximum temperature rise and on its rise, determined online for a specific case.

These data are also of interest for the organization of operation, since they make it possible to determine the station most suitable for servicing a faulty car (check with a possible subsequent change in the movement order) [8].

Axle boxes of «exponential» type. As a result of the analysis of the identified heating axle boxes, it was found that in many cases the axle box temperature in the interval between two adjacent control points does not grow linearly, but so quickly that already at the next control point, an excess of its limit (the so-called alarm) value (in absolute terms or by the difference in temperature of the axle boxes of one axis) is observed.

It seems appropriate to mathematically describe the temperature change in these cases by an exponential function of the form $y = ae^b$ (see Fig. 4), the parameters a and b of which are determined empirically. In this case, it is also possible to distinguish between the temperature rise of the faulty axle box and the temperature difference between the axle boxes of one axle.

In order to correctly determine the distance between successively placed control points, at which the heating axle boxes are reliably detected, it is possible to combine both of these parameters, choosing their values for unfavorable situations. Of particular interest is the case when at one control point the measured temperature is approximately equal to the ambient temperature, for example, $a = 25^\circ\text{C}$ (Table 2), and at the next point its limit value has already been exceeded, as a result of which the damage to the axle box takes place [1, 7].

Thus, there are several scenarios for determining reasonable distances between two consecutive control devices, and the use of a combination of the worst parameters does not seem to be acceptable from the point of view of the necessary expenditures.

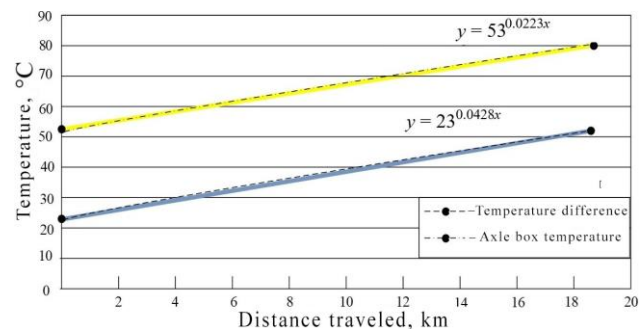


Fig. 4. Exponential temperature change of the heating axle box $y = 53^{0.0223x}$ and temperature difference of two axle-boxes $y = 23^{0.0428x}$ of one axle

Table 2

Values of parameters a and b for axle boxes of «exponential» type

Parameter determination method	Parameter value			
	a_1	b_1	a_{dt}	b_{dt}
Observation:				
– current	53.8	0.0196	18	0.056
– in a special case	25.0	0.037	–	–
– worst case	65.0	0.037	33	0.1351
Calculation	69.0	0.040	49	0.15

Especially unfavorable is the case when the temperature of the axle box at the control point is slightly lower than the alarm value «hot», and

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

therefore the train can freely run to the adjacent section of the line. For this case, when determining the distance between the sensors of the heating axle boxes, one should use the value of the parameter b known from observations (it can be rounded up in the direction of increasing safety) and select the parameter a 1°C higher than the value «hot».

Optimization model for the placement of peripheral control devices. If we take as a basis the linear temperature increase of the axle box, then, knowing how much the temperature rises on average (see Fig. 5), one can choose an appropriate distance between two adjacent points for placing control devices based on the temperature limit values.

The data obtained using the model (Fig. 5) can be supplemented by the results of the inspection of the train at the station.

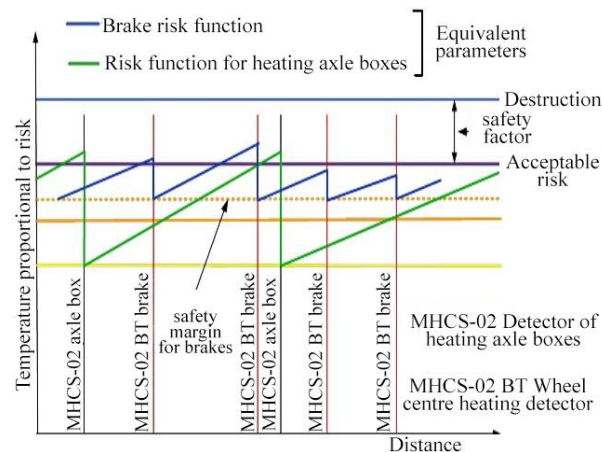


Fig. 5. Model for choosing the distances between two adjacent control devices depending on the degree of risk due to the temperature increase of the axle box

A car building worker when inspecting by the contact method (by touching the axle box cover by the back of his hand), establishes that the temperature has been exceeded, or visually, according to the appearance of the axle box cover, when the axle box is overheated. Fig. 6 shows the temperature dependence of the axle box cover on the air temperature at different values of the temperature of the axle neck of the wheelset. The characteristic of this dependence indicates a low accuracy in the visual determination of the level of heating of the axle box body. When using measuring transducers – bolometers (MHCS-01D and MHCS-02

complexes) or photon sensors (MHCS-03) – it is possible to detect a heating axle box in advance, first of all it refers to axle boxes of the «linear» type.

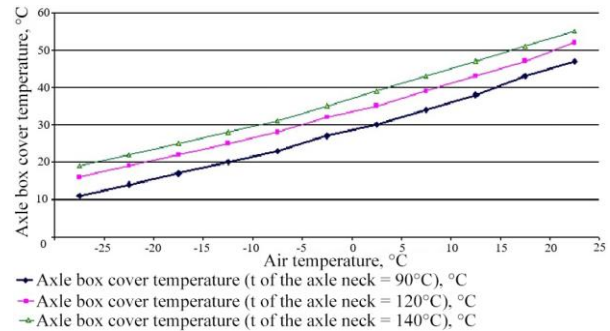


Fig. 6. Dependence of the temperature of the axle box cover on the air temperature at different values of the axle neck temperature

The existing automated rolling stock control system (ARS CS) sets the degree of acceptable risk, which, at least, should not be exceeded when switching to control by technical means. Early detection of the heating axle box of the «linear» type allows arguing for the increase in the distance between the points of the detector placement in comparison with the intervals between the available train observation points. In this case, it can be assumed that at the previous point, the temperature of the axle box (or the temperature difference between the two axle boxes) is 1°C lower than the set value. A linear temperature increase in the observed case allows one to get its rounded value, which can be used to determine the distance.

Originality and practical value

The model for optimizing the placement of peripheral control devices was developed based on probabilistic criteria to assess the degree of acceptable risks, which, at least, should not be exceeded when switching to control by technical means. A functional diagram of test instrumental diagnostics with a decider for wheelsets in determining the gradations of digital defect indicators is proposed.

The value of the results obtained consists in improving the methodology for placing peripheral devices for technical control and diagnostics of rolling stock when determining the distance between control points in the same direction and organizing tracking modes for cars with developing

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

defects. From a technical point of view, the reduction in error probabilities is directly related to movement safety and diagnostic algorithms.

Conclusions

The dependencies revealed during the analysis of the calculated data make it possible to supplement the risk-oriented strategy for placing control devices for heating axle boxes with the results of practical observations. In this case, the only and sufficient parameter of the axle box malfunction is its temperature, which is considered as an indicator of the risk of train derailment. The operator of the data transmission system of line points (DTS LP), when optimizing the placement of control points can use the values measured in practice to calculate the economic efficiency of measures. Due to the technical means of temperature control distributed over the network, it is possible to detect a heating tendency in advance and coordinate the implementation of appropriate measures [18, 20].

To correctly determine the distance between the peripheral control points, at which the heating axle boxes are reliably detected, it is advisable to combine both of these parameters, choosing their values for unfavorable situations. The probability of detecting heating axle boxes on the road network depends on the density of the placing peripheral devices. The use of a linear model of the dynamics of heating process of axle box makes it possible to obtain a rounded value of the distance between successively placed control points. The temperature difference between the hottest axle box and the average temperature of the remaining axle boxes

on the controlled side of the car is a more perfect criterion for determining the distances.

It was found that the highest confirmation of the readings is recorded when the dynamics of the axle box heating is above 1°C per 1 km of the car run. At a train speed of 60 km/h, this corresponds to a heating rate of 1°C/min.

Further data transfer to the road separation server using the options for tracking the «suspicious car» with its known route allows drawing conclusions about the increased damage probability or about the need for a denser placement of control points. Tracking these parameters along the entire train route using sequentially located control devices is promising for developing a strategy for optimizing the placement of such devices [12, 15].

With regard to other potential malfunctions of cars and locomotives (for example, to flats on the rolling surface of wheels), three gradations of defects have been established when determining their parameters to predict the development and optimize the placement of technical means of control, which ultimately can lead to more rational use of the MHCS. For example, on the railway lines of the Belarusian Railway, the interval for the MHCS installation in the same direction is 30–35 km, in some sections, this interval can be reduced to 20–25 km with the introduction of subsystems for detecting flats, dragging parts and control devices of rolling stock derailment. In order to increase the efficiency of using the information received by the maintenance points operator from the peripheral points, the MHCS complexes must be installed at a distance not exceeding 10 km from the railway junction.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Баранов Л. А. *Квантование по уровню и временная дискретизация в цифровых системах управления*. Москва : Энергоатомиздат, 1990. 304 с.
2. Бойник А. В., Загарий Г. И., Кошевой С. В., Луханин Н. И., Поэта Н. В., Поддубняк В. И. *Диагностирование устройств железнодорожной автоматики и агрегатов подвижных единиц*. Харьков : ЧП Издательство «Новое слово», 2008. 304 с.
3. Бурченков В. В. *Автоматизация технического контроля и диагностики подвижного состава железных дорог* : монография. Гомель : БелГУТ, 2020. 254 с.
4. Бурченков В. В., Холодилов О. В. Техническая диагностика состояния подвижного состава и перспективы ее развития в Западной Европе и США. *Вестник БелГУТа* : Наука и транспорт. 2017. № 1 (34). С. 5–9.
5. Гартнер Е. Железные дороги США : особенности грузовых и пассажирских перевозок. *Железные дороги мира*. 2007. № 4. С. 9–32.
6. Гондоров В. А. Современные средства диагностики подвижного состава на ходу поезда. *Вагоны и вагонное хозяйство*. 2017. № 4. С. 36–37.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

7. Иванова Т. В., Налабордин Д. Г. Оценка предотказных состояний буксового узла грузового вагона. *Вагоны и вагонное хозяйство*. 2017. № 1 (49). С. 46–47.
8. Миронов А. А. Перспективные направления совершенствования средств контроля КТСМ-02 и АСК ПС. *Автоматика, связь, информатика*. 2009. № 1. С. 38–41.
9. Мишин И. М. Техническое обслуживание и ремонт вагонов за рубежом. *Вагоны и вагонное хозяйство*. 2018. № 1. С. 44–45.
10. Наговицын В. С. *Системы диагностики железнодорожного подвижного состава на основе информационных технологий*. Москва : ВНИИТ РАН, 2004. 248 с.
11. Петухов В. М. Разработка структуры диагностического определения и диагностической модели буксовых узлов современных вагонов. *Технологический аудит и резервы производства*. 2015. № 5/3 (25). С. 26–29. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.51923>
12. Редекер Р. Удаленный мониторинг технических средств железных дорог. *Железные дороги мира*. 2012. № 10. С. 66–68.
13. *Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524) мм*. Москва : ОАО «ВНИИЖТ», 2017. 280 с.
14. Трестман Е. Е., Лозинский С. Н., Образцов В. Л. *Автоматизация контроля буксовых узлов в поездах*. Москва : Транспорт, 1983. 352 с.
15. Шобель А. Напольные системы мониторинга подвижного состава. *Железные дороги мира*. 2014. № 3. С. 51–59.
16. Burchenkov V. V. Decision making based on the results of automatic diagnostics of parts and assemblies of rolling stock. *World of Transport and Transportation*. 2019. Vol. 17. Iss. 4. P. 232–243. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-4-232-243>
17. Garip G., Ustoglu I., Mumcu T. V., Kaymakci O. T. Hot box detection system design for railway vehicle safety. *5th International Conference on Design and Product Development*. 2014. P. 31–36.
18. Malavasi G. Contact forces and running stability of railway vehicles. *International Journal of Railway Technology*. 2014. Vol. 3. Iss. 1. P. 121–132. DOI: <https://doi.org/10.4203/ijrt.3.1.6>
19. Manashkin L. A., Myamlin S. V. To the question of modeling of wheels and rails wear processes. *Наука та прогрес транспорту*. 2013. № 3 (45). P. 119–124. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2013/14791>
20. Tarawneh C., Hernandez V. V., Aranda J. A., Ramiez C. J. An analysis of the efficacy of Waydide Hot-Box detector data. *Joint Rail Conference* (Pittsburgh, April 18–20 2018). Pittsburgh, 2018. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1115/JRC2018-6218>
21. Toullier T., Dumoulin J., Mevel L. Study of complementary multi-sensors data influence on infrared thermography measurements for in-situ long-term monitoring. *Multimodal Sensing : Technologies and Applications*. 2019. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2526229>

В. В. БУРЧЕНКОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Вагони», Білоруський державний університет транспорту, вул. Кірова, 34, Гомель, Республіка Білорусь, 246653, тел. +37 (529) 530 37 84, ел. пошта lenadva@tut.by, ORCID 0000-0002-3664-4655

Удосконалення методики розміщення периферійних пристроїв контролю технічного стану рухомого складу

Мета. У статті передбачено на підставі дослідження роботи вузлів і деталей ходової частини рухомого складу в перехідних режимах розвитку аварійних ситуацій оптимізувати послідовне розміщення периферійних безконтактних пристроїв технічного контролю локомотивів і вагонів на залізничних лініях. **Методика.** Дослідження перехідних дефектних процесів підвищення температури несправних буксових підшипників локомотивів і вагонів за умови технічного дистанційного діагностування дозволяє систематизувати теорію й апаратну побудову периферійних систем перевірки рухомого складу під час руху. Автоматичний контроль технічного стану рухомого складу під час руху – остання і в ряді випадків єдиною можлива технологічна операція, що дозволяє виявити неприпустимі дефекти в рухомих одиницях і тим самим запобігти виникненню надзвичайних ситуацій на залізничному транспорті. **Результати.** На підставі дослідження запропоновано розв’язок задачі оптимізації розміщення периферійних засобів контролю рухомого складу

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

під час його руху за критеріями лінійного й експоненціального характеру нагрівання дефектних букс колісних пар та інших вузлів ходової частини. Оцінено ризики зупинки поїздів на перегоні через помилкове віднесення букс, які нормально гріються, до класу перегрітих, а також наслідки віднесення перегрітих букс до класу тих, які нормально гріються. **Наукова новизна.** Модель оптимізації розміщення периферійних пристроїв контролю розроблена на підставі ймовірнісних критеріїв для оцінки ступеня допустимих ризиків, який, як мінімум, не повинен бути перевищений під час переходу до контролю технічними засобами. Запропоновано функціональну схему тестового апаратурного діагностування з розв'язувальним пристроєм для колісних пар під час визначення градацій цифрових показників дефектів. **Практична значимість.** Цінність отриманих результатів полягає в вдосконаленні методики розміщення периферійних пристроїв технічного контролю й діагностики рухомого складу під час визначення відстані між постами контролю в попутному напрямку та організації режимів стеження для вагонів з дефектами, що розвиваються. Із технічної точки зору, зниження вірогідності помилок прямо пов'язане з безпекою руху та алгоритмами діагностування.

Ключові слова: рухомий склад; буксові вузли; температурний контроль; методика розміщення; діагностика вузлів

REFERENCES

1. Baranov, L. A. (1990). *Kvantovanie po urovnyu i vremennaya diskretizatsiya v tsifrovyykh sistemakh upravleniya*. Moscow: Energoatomizdat. (in Russian)
2. Boynik, A. V., Zagariy, G. I., Koshevoy, S. V., Lukhanin, N. I., Poeta, N. V., & Poddubnyak, V. I. (2008). *Diagnostirovanie ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i agregatov podvizhnykh edinit*. Kharkov: ChP Izdatelstvo «Novoe slovo». (in Russian)
3. Burchenkov, V. V. (2020). *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniyavtomatizatsiya tekhnicheskogo kontrolya i diagnostiki podvizhnogo sostava zheleznykh dorog: monografiya*. Gomel: BelGUT. (in Russian)
4. Burchenkov, V. V., & Kholodilov, O. V. (2017). Technicals diagnostic state of rolling stock and perspectives her development in Western Europe and the USA. *Vestnik BelGUTa: Nauka i transport*, 1(34), 5-9. (in Russian)
5. Gartner, Ye. (2007). *Zheleznye dorogi SShA: osobennosti gruzovykh i passazhirskikh perevozok. Zheleznye dorogi mira*, 4, 9-32. (in Russian)
6. Gondorov, V. A. (2017). *Sovremennye sredstva diagnostiki podvizhnogo sostava na khodu poezda. Vagony i vagonnoe khozyaystvo*, 4, 36-37. (in Russian)
7. Ivanova, T. V., & Nalabordin, D. G. (2017). *Otsenka predotkaznykh sostoyaniy buksovogo uzla gruzovogo vagona. Vagony i vagonnoe khozyaystvo*, 1(49), 46-47. (in Russian)
8. Mironov, A. A. (2009). *Perspektivnye napravleniya sovershenstvovaniya sredstv kontrolya KTSM-02 i ASK PS. Automation, communication and Informatics*, 1, 38-41. (in Russian)
9. Mishin, I. M. (2018). *Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont vagonov za rubezhom. Vagony i vagonnoe khozyaystvo*, 1, 44-45. (in Russian)
10. Nagovitsyn, V. S. (2004). *Sistemy diagnostiki zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava na osnove informatsionnykh tekhnologiy*. Moscow: VINITI RAN. (in Russian)
11. Petukhov, V. M. (2015). Structure development of diagnostic providing and diagnostic model of axle boxes in modern railroad cars. *Technology Audit and Production Reserves*, 5(3(25)), 26-29. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.51923> (in Russian)
12. Redecker, R. (2012). *Udalenny monitoring tekhnicheskikh sredstv zheleznykh dorog. Railways of the World*, 10, 66-68. (in Russian)
13. *Rukovodyashchiy dokument po remontu i tekhnicheskomu obsluzhivaniyu kolesnykh par s buksovymi uzlami gruzovykh vagonov magistralnykh zheleznykh dorog kolei 1520 (1524) mm.* (2017). Moscow: JSC VNIIZhT. (in Russian)
14. Trestman, Ye. Ye., Lozinskiy, S. N., & Obratsov, V. L. (1983). *Avtomatizatsiya kontrolya buksovykh uzlov v poezdakh*. Moscow: Transport. (in Russian)
15. Shobel, A. (2014). *Napolnye sistemy monitoringa podvizhnogo sostava. Railways of the world*, 3, 51-59. (in Russian)
16. Burchenkov, V. V. (2020). Decision making based on the results of automatic diagnostics of parts and assemblies of rolling stock. *World of Transport and Transportation*, 17(4), 232-243. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-4-232-243> (in Russian and English)

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

17. Garip, G., Ustoglu, I., Mumcu, T. V., & Kaymakci, O. T. (2014). Hot box detection system design for railway vehicle safety. *5th International Conference on Design and Product Development* (pp. 31-36). (in English)
18. Malavasi, G. (2014). Contact forces and running stability of railway vehicles. *International Journal of Railway Technology*, 3(1), 121-132. DOI: <https://doi.org/10.4203/ijrt.3.1.6> (in English)
19. Manashkin, L. A., & Myamlin S. V. (2013). To the question of modeling of wheels and rails wear processes. *Science and Transport Progress*, 3(45), 119-124. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2013/14791> (in English)
20. Tarawneh C., Hemandez, V. V., Aranda, J. A., & Ramiez, C. J. (2018). An analysis of the efficacy of Waydide Hot-Box detector data. *Joint Rail Conference* (pp. 1-8). DOI: <https://doi.org/10.1115/JRC2018-6218> (in English)
21. Toullier, T., Dumoulin, J., & Mevel, L. (2019). Study of complementary multi-sensors data influence on infrared thermography measurements for in-situ long-term monitoring. *Multimodal Sensing: Technologies and Applications*, 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2526229> (in English)

Received: Oct. 06, 2020

Accepted: Feb. 05, 2021

UDC 656.025.2:338.48

T. V. BUTKO¹, V. M. PROKHOROV^{2*}, L. O. PARKHOMENKO³, A. O. PROKOPOV⁴¹Dep. «Operational Work Management», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq. 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 89, e-mail uermp@ukr.net, ORCID 0000-0003-1082-599X^{2*}Dep. «Operational Work Management», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq. 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (099) 420 45 28, e-mail vicmmx@gmail.com, ORCID 0000-0001-8963-6467³Dep. «Operational Work Management», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq. 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 88, e-mail l.o.parkhomenko@kart.edu.ua, ORCID 0000-0003-1647-7746⁴Dep. «Cargo and Commercial Work Management», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq. 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 88, e-mail prokopovartem1301@gmail.com, ORCID 0000-0001-7324-4047**Improvement of Technology of Passenger Intermodal Transportation with Involvement of Railway Transport in the Conditions of Tourism Development**

Purpose. The main purpose of the authors is to define and methodically substantiate the ways to increase the efficiency of intermodal passenger transportations with the involvement of high-speed trains as an auxiliary mode of transport in terms of sea and river tourism. **Methodology.** In the process of research the following was used: the method of factor analysis – to determine the factors influencing the attractiveness of tourist travel using high-speed trains as ancillary transport; method of skipping stops – to increase the efficiency of using high-speed trains as an auxiliary mode of transport when making tourist trips; methods of construction and training of generative-adversarial networks for the formation of model of passenger flows forecasting, on the basis of historical data of multivariate time series; method of genetic algorithms – to optimize the model of mixed-integer programming, which allows obtaining the optimal scheme of high-speed trains on the line. **Findings.** In order to preserve the attractiveness of tourist travels and increase the route speed of trains, it is proposed to improve the technology of planning their work based on the method of skipping stops. A mathematical model of mixed-integer programming has been formed, which simultaneously provides the attractiveness of tourist travel and profitability for railway operators. To prepare the initial data, a method for forecasting passenger flows based on multivariate time series has been developed. The optimization procedure of the generated model was implemented in the form of software in the Matlab language. **Originality.** The method of skipping stops, which was first used to improve the technology of intermodal passenger traffic, was further developed in the work. An original method for predicting passenger flows based on multivariate time series using a modern model of generative-competitive neural networks is proposed. **Practical value.** The obtained results are aimed at improving the methodological approaches to the formation of modern technologies of intermodal passenger transportation and the realization of the potential of high-speed rail transportations as a basis for the comprehensive development of tourism.

Keywords: intermodal passenger transportations; high-speed rail passenger transportations; skip-stop method; genetic algorithms; neural networks; multivariate time series forecasting; tourism development

Introduction

Bringing the tourism industry to the modern level needs support in the form of new transport technologies. This thesis is relevant not only for countries with a large number of tourist locations, but primarily for countries such as Ukraine, Canada, USA, where in order to get to them you need to cover long distances using different modes of transport. However, transport cannot only be an aid to tourism, but also play a key role in tourism activities. For example, the English pastor Thomas Cook, from whom the history of modern tourism is derived, for the first time organized a rail journey from Liverpool to Lon-

don. Then in 1843 he organized boat trips on the Thames. Almost at the same time on the American continent on the legendary wheeled steamer «Mississippi», the company «American Express» opened regular tours on the Mississippi. Similar cruises began to take place on the Nile, Rhine, and Danube. There are many water travel routes in the United States and Canada, such as cruises to observe marine mammals, for example, whales, orcas, or polar bears. However, to get to the ocean coast you need to use other modes of transport. The sphere of water tourism is rapidly developing in Ukraine as well. Thus, the number of cruises on the Black Sea

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

and the Danube River increases annually in the port of Odessa. But to get to Odessa from such big cities as Kyiv or Lviv it is necessary to overcome considerable distances. Therefore, in order for these routes not to lose their attractiveness and in order to attract new customers, it is necessary to introduce new transport technologies.

Under these conditions, it is advisable to use high-speed rail transport as an auxiliary mode of transport, which is the main passenger transport in Ukraine. Thus, such trips are intermodal passenger traffic. Thus, the urgent task is the formation of modern technologies for managing intermodal passenger traffic with the involvement of high-speed rail transport.

Due to the relevance of this topic, it is becoming an increasingly popular object of research in recent years. One of the main directions of research in this area is the formulation and solution of problems related to the optimization of train planning. In [2], based on the analysis of the railway system in the Paris region of France, the problem of operational re-planning is solved, in which stops on railway lines can be missed by trains in case of limited traffic disruptions. For this purpose, a model of linear programming is presented, the objective function of which minimizes both the time of restoration of the traffic schedule and the waiting time of passengers. However, this model is only aimed at overcoming the problems associated with the malfunction of the transport system. [13] proposes a solution to the problem of planning the operation of high-speed rail lines by simultaneously optimizing the schedule of trains and their binding to passenger platforms at stations using the Lagrange relaxation method. However, this approach allows reducing the train movement time by only a small amount. In [3] using the model of mixed programming, the problem of simultaneous optimization of the operational schedule of traffic and stops of suburban trains is solved. However, this model is aimed only at reducing the waiting time of the passenger in case of train delay. [10] also solves the problem of optimizing stops and train schedules taking into account the probability of delays. However, the model does not take into account the data on passenger traffic. In [6], to reduce the waiting time for trains by passengers, a model based on a hybrid methodology for model-

ing discrete events is proposed, but this model is focused on use in subways and not on trunk lines. [1] proposed a model for constructing train schedules based on optimizing the number of stops, but this model is also focused on urban rail transport. In [14], a model of mixed integer programming is proposed to automate the process of constructing train schedules on high-speed lines in China. However, this model does not solve the problem of attracting passenger traffic, and its main focus is to optimize the use of rolling stock. In [12] the model of mixed integer programming which allows to minimize the general time of movement of day trains is resulted. However, this model is also not aimed at solving the problem of increasing comfort for passengers. Its purpose is to reduce the impact of high-speed railway maintenance processes on high-speed trains by changing their routes. In [11] the possibility of applying an integrated approach to the optimization of intermodal transportation in the implementation of transport links between the Japanese cities of Miyazaki and Fukuoka is considered. It is proposed to introduce an operational integrated schedule of railway and road transport and its operational adjustment, the introduction of a single ticket and even the coordination of the design of rolling stock in the design of trains and buses. However, the practical implementation of such developments is associated with significant difficulties. In [8] the possibility of optimizing the trajectory of the passenger on the basis of improving the technology of processing and exchange of information in the intermodal transport system, including rail and air transport is studied. However, this study primarily focuses on adjusting intermodal operations in the event of delays and does not take into account the dynamics of passenger traffic.

Thus, the tasks of optimizing the functioning of high-speed rail systems in the implementation of intermodal rail transport are relevant. However, in the context of the use of high-speed rail transport as an aid in the implementation of tourist travel, considerable attention should be paid to the attractiveness of transport services for passengers. To this end, it is necessary to investigate the factors influencing the attractiveness of the use of high-speed rail transport in intermodal transport and the corresponding impact of these factors on the dynamics of passenger traffic.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Purpose

The purpose of the work is to improve the technology of intermodal passenger transport with the involvement of high-speed rail transport in terms of tourist travel.

To achieve this goal, the following tasks were set:

- To analyze the technology of passenger intermodal transportation with the involvement of railway trains as an auxiliary mode of transport. To determine the parameters of the process of realization of the railway part of the route, which are the main factors influencing the attractiveness of tourist travel in general.

- To form an optimization model of high-speed trains route management in the direction of tourist passenger traffic. In order to provide the optimization model with the initial data to form a model for forecasting passenger traffic on the high-speed line.

- Carry out modeling using the formed models and analyze the results.

Methodology

An important aspect of the process of formation of modern technology for managing of high-speed railway transport operation is the possibility of applying the latest methods that use mathematical apparatus related to the branch of artificial intelligence or related fields. This approach is not a matter of time or a tribute to fashion, but a vital necessity, as it is the only way to overcome the obstacles associated with, for example, obtaining qualitative forecasts or combinatorial complexity when performing calculations on real models of large dimensions.

Formation of railway transport management technology at realization of intermodal transportations in the conditions of development of tourism

Analysis of the technology of intermodal transportation with the involvement of railway transport in terms of tourist passenger traffic.

High-speed rail systems require careful technical planning and decision-making on the basic elements and modes of operation. These elements have a complex relationship. Failure to take into account at least one factor may call into question the possibility of the existence of such a system.

Recently, in many developed countries, the availability of high-speed rail transport is becoming another impetus for the further development of tourism. For example, high-speed rail transport participates in the implementation of intermodal passenger transport in the implementation of tourist cruises using water transport (Fig. 1).

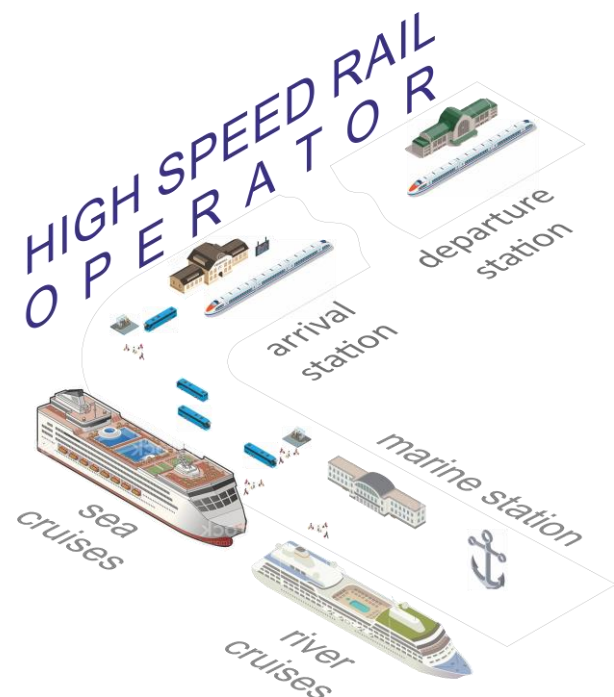


Fig. 1. The scheme of interaction between modes of transport during intermodal transportation in the service of tourist passenger traffic

In order for the tourist flow not to decrease, it is necessary to make this trip attractive for the tourist. According to the results of research [9], it was established which factors affect the attractiveness of tourist travel using high-speed rail transport (Fig. 2).

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

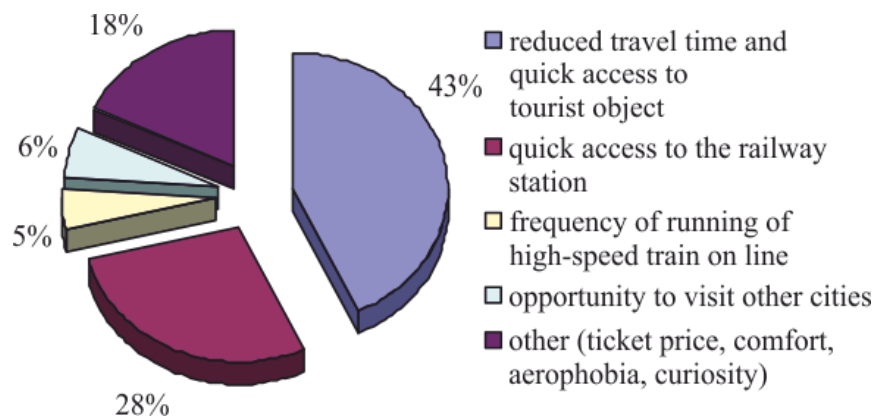


Fig. 2. Significance of factors influencing the decision to make tourist trips using high-speed rail transport

Thus, since high-speed lines already exist, we first identify the factors that directly affect the decision to make a tourist trip. Thus, the second most important factor (28%) is the time of access to the railway station, which depends on the density of stops on the line or the availability of convenient bus routes to get to the railway station. The most important factor (43%) is the total duration of travel using ancillary modes of transport to move to a tourist location or change to tourist modes of transport (water transport).

However, it should be noted that the total duration of the trip includes the time of access to the railway station. Thus, to increase the attractiveness of travel, it is necessary to develop mechanisms to influence these two factors: the time of access to the railway station and the time of the high-speed train.

Passengers' access times and, accordingly, the total travel time are related. In turn, they also depend on many factors, such as the area covered by the zone, which depends on the density of the stations. The speed of trains depends on the density of stops on the line. The attractiveness of the trip is also influenced by the frequency and population of trains. They, in turn, depend on the number of working fleet of trains, line capacity and tariffs and other economic factors. The study of the seriousness and sophistication of such interrelated complexity encourages careful elaboration of decision-

making procedures for the planning, design and operation of such lines and the continuous comprehensive monitoring of their operation.

Thus, the travel time to the tourist location or to the tourist mode of transport consists of the time of access (arrival by other modes of transport) of passengers to the railway line, the travel time by rail and the transfer time between rail and water transport. The transfer time depends primarily on the consistency of the schedules of these modes of transport and the time to overcome the distance between the terminals. However, first of all, it is necessary to single out the factors directly related to railway transport – the time of access of passengers to the railway line and the time in the movement of a high-speed train. You can use the utility function to quantify the attractiveness of a trip. Linear utility functions are often used as a utility function in such problems [7].

In Fig. 3, the general function of the usefulness of travel for the passenger is represented by a linear relationship (3). The dependence of utility on access time to the railway station, which, in turn, depends on the number of stops on the line, in some studies is presented as a convex function (1). Then the difference between curves (3) and (1) is a concave curve (2). It represents a utility function of the duration of the trip, which depends on the speed, which, in turn, depends on the number of stops on the line.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

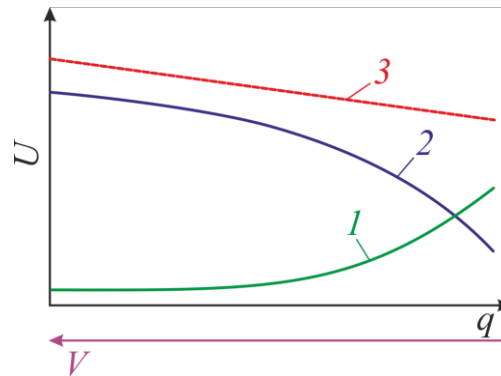


Fig. 3. The dependence of the usefulness of a tourist trip on the number of stops on the route of a high-speed train

This feature is obviously declining. However, we also argue that this concave shape of this curve is correct, because the greater elasticity in the initial section of the speed reduction is in line with the psychology of tourists, as small changes in travel duration have little effect on decision-making. To specify the utility function more precisely, it is proposed to build it on the basis of a five-parameter logistic function [5]. This approach will make it possible to give it the desired shape, taking into account the importance of utility and elasticity at certain points in the field of its calculation.

Increasing the speed of trains on the line through technical modernization of tracks, automation and rolling stock is often impossible or economically impractical. Under such conditions, a rational way to achieve this goal is the formation of methods for organizing the movement of high-speed trains and the development on their basis of appropriate management technology.

One of the methods that allow to reduce the movement time of passenger trains is the method of «skip stop».

The idea of the method is that express trains of several types run on the line, during the stop operation each train visits only a fixed subset of stations. Skipping several stations allows you to reduce the

cycle time and increase the route speed.

Formation of the optimization model of management of routes of high-speed trains on a direction in the conditions of service of a tourist passenger flow.

Skip-stop technology allows you to increase the route speed on the line and reduce the frequency of stops compared to the standard scheme of the organization; however, at the same time it can complicate the planning process. In addition, this technology may result in the lack of direct communication between some stations on the route, but due to the increase in speed, the line capacity is increased. However, passengers who do not leave at the final station of the route do not belong to the tourist passenger flow, and therefore for them the speed has little effect on the level of usefulness. For most of these passengers, it makes little difference whether a train belongs to the InterCity+, InterCity or regular interregional trains. Thus, although these passengers can be transported by other categories of trains, it is still necessary to minimize the loss of passenger traffic for high-speed rail companies and maximize profits by attracting new passengers. Thus, the objective function of the model, which represents the profit of the railway operator, can be written as follows:

$$C(X) = \bar{c}_{ticket} N \left(\sum_{i=1}^k U \left(\frac{L}{T_3 - \sum_{j=1}^{\#S} (1_{X_i}(s_j) (\tau_j^{stop} + \tau_j^{acc} + \tau_j^{dec}))} \right) \right) + \\ + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{\#S} \sum_{b=j+1}^{\#S} \delta_{j,b}^i c_{ticket}^{j,b} y_{j,b} (1 - Sgn(1_{X_i}(s_j) \cdot 1_{X_i}(s_b))) \rightarrow \max, \quad (1)$$

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

where $1_{X_i}(s_j)$, $1_{X_i}(s_b)$ – indicator of functions that return the value 1 in the case of belonging to the station s_j or station s_b to the set of stops X_i i -th train; X – vector of Boolean variables corresponding to the inclusion of stops at the stations of the route of all trains on the line; X_i – an elements subset of the vector of Boolean variables corresponding to the inclusion of stops at route stations for the i -th train; k – the number of routes and trains on the line; τ_j^{stop} – stop time according to the schedule at the j -th station of the route; τ_j^{acc} – additional time for acceleration after stopping at the j -th station of the route; τ_j^{dec} – additional time for braking before stopping at the j -th station of the route; $y_{j,b}$ – passenger traffic between stations j and b ; $s_{j,b}$ – elements of the plurality of stations representing the j -th and b -th stations of the route, respectively; $\delta_{j,b}^i$ – a variable factor that determines the relative

$$\left\{ \begin{array}{l} 1_{X_i}(s_1) = 1, \quad i = 1 \dots k \\ 1_{X_i}(s_{\#S}) = 1, \quad i = 1 \dots k \\ \tau_j^{stop} \geq \tau_j^{stop-std} \\ \sum_{j=1}^{\#S} \sum_{b=j+1}^{\#S} \delta_{j,b}^i y_{j,b} (1 - Sgn(1_{X_i}(s_j) \cdot 1_{X_i}(s_b))) (s_j \leq s) (s_b > s) \leq q, \quad \forall s \in S, i = 1 \dots k \end{array} \right., \quad (2)$$

where $\tau_j^{stop-std}$ – standard stop time according to the schedule at the j -th station of the route; q – passenger capacity of one high-speed train on the line.

The first and second restrictions prevent the exclusion of stations corresponding to the starting and ending points of passengers. The third restriction prevents the reduction of train stops at stations below the normative values. The fourth restriction prevents the current number of passengers from being exceeded after the disembarkation operations at each station of the route for each train. Thus, this objective function and the system of constraints represent a mathematical model of mixed-integer programming. The elements of the variable vector δ represent the relative shares of passenger traffic and can take any value in the range from 0 to 1. In fact, with the help of a vector δ we can get a detailed plan of ticket sales at all stations of each train, which is important when

share of the total passenger traffic between stations j and b , which is transported by the i -th train on the line; $\#S$ – power (number of elements) of the set of route stations; T_s – the time the train is in motion, provided that all stops are included in the route; L – route length; \bar{c}_{ticket} – the average ticket price for a tourist (passenger who goes to the final station of the route); $c_{ticket}^{j,b}$ – ticket price between stations j and b ; $U(\dots)$ – a function that returns the value of utility depending on the route speed of the train; $N(\dots)$ – linear function that returns the value of passenger traffic depending on the value of utility; $Sgn(\dots)$ – sign function.

This objective function is represented by a criterion that expresses the income of the company-operator of high-speed rail transport from the sale of tickets in terms of tourist passenger traffic. This objective function is subject to optimization with the following restrictions:

planning speed on the line. Integer constraints are imposed on vector elements, as they can only take a value of 1 or 0, which corresponds to the presence or absence of a stop at a given station, respectively. To solve problems of this type, specific algorithms based on combinatorics, graph theory, etc. are developed. In addition, to optimize the model and obtain the result it is necessary to have high-quality forecast data of passenger flows.

Formation of the forecast model.

The initial data for solving the forecasting problem are the historical data of passenger flows between the stations of the railway line on which high-speed trains run, which are time series. Models based on the modern mathematical apparatus of neural networks are a powerful tool, which is suitable for solving time series forecasting problems. However, the difficulty is that the historical data of correspondence of passenger flows can be represented not by ordinary time series, but by multidimensional

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

mensional ones. Theoretically, they can be predicted separately, but in this case, it is necessary to create a number of individual models that will be equal to the dimensions of the multidimensional time series, and also to configure or train them separately. But the main disadvantage of this approach is that in this case, the relationship between the data of parallel series will be impossible to take into account. Predicting multidimensional time series is a non-trivial problem that is almost impossible to solve even with the use of modern neural networks of standard architectures. Although there are classical, regression-based models, such as the vector autoregressive model (VARM). Regression models are unable to predict data that, for example, are affected by seasonal factors, and have many other limitations. At the present level, such a problem can be solved only by using the latest developments in the field of artificial intelligence. In 2014, a model called the Generative Adversarial Networks (GAN) [4] was proposed. This model is based on the original algorithm of machine learning without a teacher, which is implemented on a structure of two parallel convolutional neural networks, which are configured to work against each other. One neural network, called a generator, generates new instances of data, and the other,

a discriminator, evaluates them for authenticity. Thus, the discriminator decides whether each copy of the data it is considering belongs to the training data set or not. This model was developed for processing graphic images. However, multidimensional time series can also be represented as graphical images. The numbers of pixel lines correspond to the numbers of elementary (one-dimensional) time series, the numbers of pixel columns correspond to consecutive moments of time, the numerical values of the elements of time series represent the intensity of pixels (shades of gray). The generator network (G) generates images using data matrices that contain random noise. The discriminator network (D) (Fig. 4) receives the generated images and «real» images, which were obtained on the basis of historical data of time series of passenger flows. The purpose of the generator is to learn to generate such images that the discriminator will consider true and the purpose of the discriminator is to learn to recognize «fake» images. As a result of parallel training of both networks the generator gets ability to generate such images which the discriminator recognizes as «real». These images pass through the discriminator and are interpreted as multivariate time series forecast data.

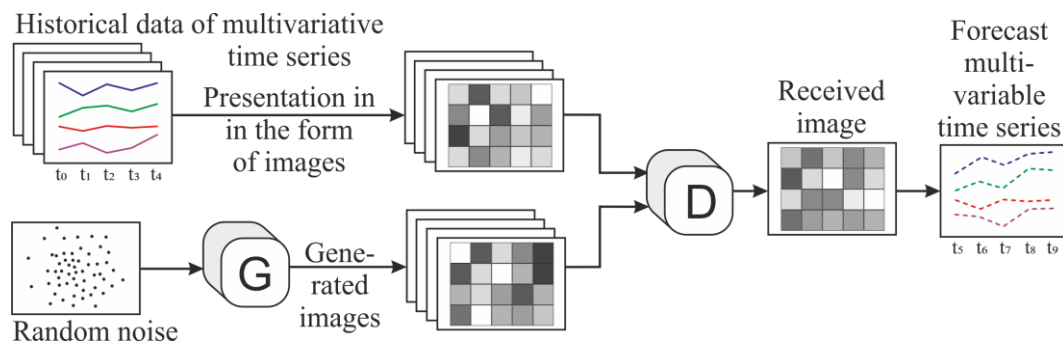


Fig. 4. Scheme of functioning of the multivariate time series forecasting model on the basis of generative-adversarial network

The proposed forecast model based on the generative-adversarial network was implemented in the Matlab environment. The simulation was performed using real data on passenger flows on the line connecting Kyiv-Pasazhyrskyi and Odesa-Holovna stations. Fig. 5 shows the dynamics of assessing the quality of the generator and discriminator networks during training. This graph shows

that the process of setting up both networks went well, because the discriminatory network dominates over the generator and at the same time, their estimates do not approach the extreme limits (0 or 1). The gradual decrease in the amplitudes of oscillations also indicates the stabilization of both networks.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

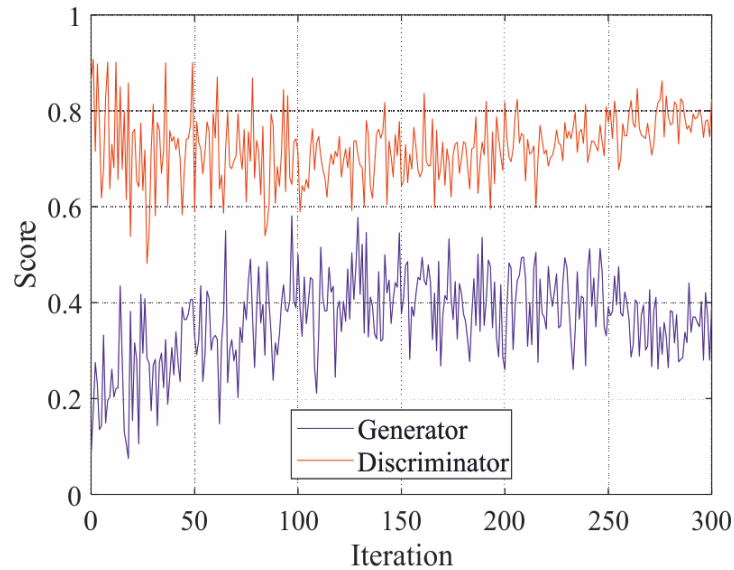


Fig. 5. Dynamics of quality assessments of generator and discriminatory networks during training

Table 1 shows the actual data of correspondence of passenger flows between stations and forecast data obtained using the formed model for

April 24, 2019, as well as actual data for the previous week.

Table 1

Correspondence of passenger flows between stations on the line

#	station of boarding	station of unboarding	17.04	18.04	19.04	20.04	21.04	22.04	23.04	24.04		
			fact							fact	forecast	diff.
1	Kyiv-Pass.	Vinnytsia	26	43	44	46	47	47	44	29	33	4
2	Kyiv-Pass.	Zhmerynka	17	29	28	21	20	10	30	18	18	0
3	Kyiv-Pass.	Vapniarka	22	32	24	36	24	13	31	20	17	–3
4	Kyiv-Pass.	Podilsk	21	33	36	36	39	43	44	20	20	0
5	Kyiv-Pass.	Odesa	375	703	698	693	757	672	713	407	402	–5
6	Vinnytsia	Zhmerynka	29	49	40	45	47	36	44	25	27	2
7	Vinnytsia	Vapniarka	27	56	34	47	60	43	59	28	24	–4
8	Vinnytsia	Podilsk	11	6	16	13	15	24	21	10	11	1
9	Vinnytsia	Odesa	294	361	375	329	372	462	368	246	241	–5
10	Zhmerynka	Vapniarka	20	45	42	46	46	27	48	32	32	0
11	Zhmerynka	Podilsk	22	18	27	27	36	35	23	22	22	0
12	Zhmerynka	Odesa	68	176	121	97	191	142	145	94	91	–3
13	Vapniarka	Podilsk	15	33	39	39	28	28	32	16	19	3
14	Vapniarka	Odesa	96	166	174	177	179	171	170	97	100	3
15	Podilsk	Odesa	87	142	140	139	162	144	149	84	84	0

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

The mean absolute percentage error used to assess the quality of the time series forecast was $MAPE = 5.9583\%$. This accuracy of the forecast is sufficient to develop a scheme of routes of high-speed passenger trains.

Model optimization.

An abstract line with 15 stations was chosen as the initial data for optimization of the formed mod-

el. The average distance between the stations is 40 km. The average values of stop, acceleration and deceleration times are 1 min, 6 min and 7 min, respectively. The running speed of the train is 160 km/h. Table 2 shows the data on the correspondence of passenger flows between stations on the line.

Table 2

Correspondence of passenger flows between stations on the line

to from	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	–	20	16	13	11	12	9	3	5	2	4	11	2	13	489
2	–	–	23	11	5	15	3	4	3	1	5	5	5	12	21
3	–	–	–	12	16	12	1	12	5	5	5	6	5	5	24
4	–	–	–	–	5	7	18	7	8	6	8	2	1	1	12
5	–	–	–	–	–	12	9	18	5	2	3	1	5	3	12
6	–	–	–	–	–	–	2	11	15	11	5	5	16	5	20
7	–	–	–	–	–	–	–	12	11	5	11	18	5	8	13
8	–	–	–	–	–	–	–	–	11	12	14	5	11	11	11
9	–	–	–	–	–	–	–	–	–	17	5	18	5	14	13
10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	18	23	12	6	11
11	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	2	4	2	18
12	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	5	1	17
13	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	12	19
14	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	20
15	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Since the objective function and the constraint system represent a model of mixed-integer programming, this problem belongs to the problems of combinatorial optimization, and, therefore, its solution requires a search of a large number of variants of vectors of control variables. The vector of variables must contain information about the presence of a stop at all 13 stations (there are always stops at the start and end stations). Then, when planning the routes of only two trains at the same time, the number of possible variants of the train running plan will be:

$$N = 2^{k \cdot (\#S - 2)} = 2^{2 \cdot (15 - 2)} = 2^{26} = 67108864. \quad (3)$$

Since there are no general effective exact methods of solution for combinatorial optimization problems of large dimension, it is expedient to apply modern approximate metaheuristic methods, which include, for example, the method of genetic algorithm (GA). The GA method is a method of stochastic search, the effectiveness of which is due to the reproduction of mechanisms for the development of adaptation and transmission of heredity of living nature, such as selection, crossing and

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

mutation. Thus, for the use of GA, the solution must be represented as a chromosome. In this case, the chromosome contains genes containing Boolean variables that carry information about the presence or absence of stops at the route stations of each of the trains.

To optimize the model, we used a floating-point genetic algorithm (FPGA) with integer constraints imposed on some variables. Fig. 6 shows the dynamics of convergence of the objective function during the execution of the genetic algorithm using a software product implemented in Matlab.

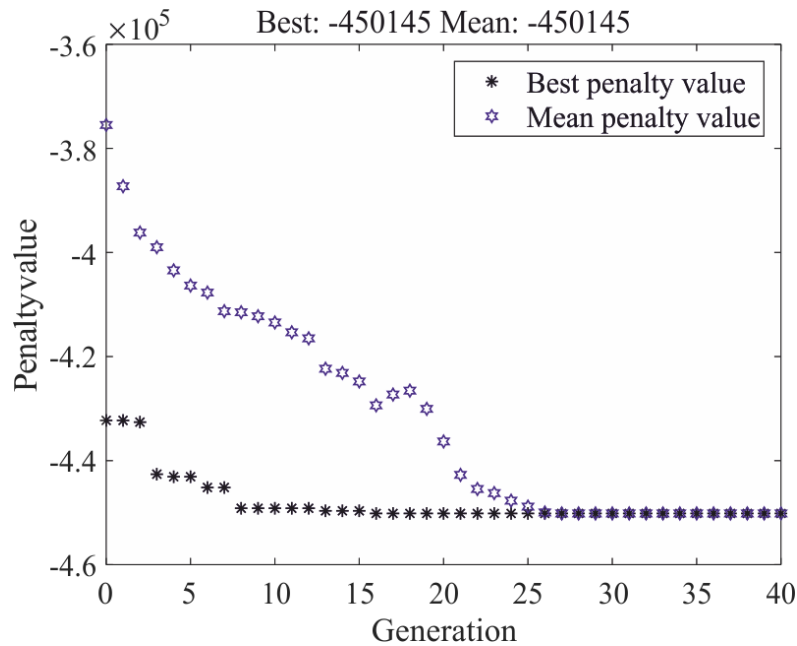


Fig. 6. Dynamics of convergence of the objective function of the genetic algorithm during model optimization

Since the standard GA procedures provide for the minimization of the objective function, and the objective function of the developed model is subject to maximization, the minimization of this function, taken with a minus sign, was carried out.

Fig. 7 shows a diagram of the running of two high-speed trains on the line in terms of the use of railway transport as an auxiliary in intermodal passenger traffic in the service of tourist passenger traffic.

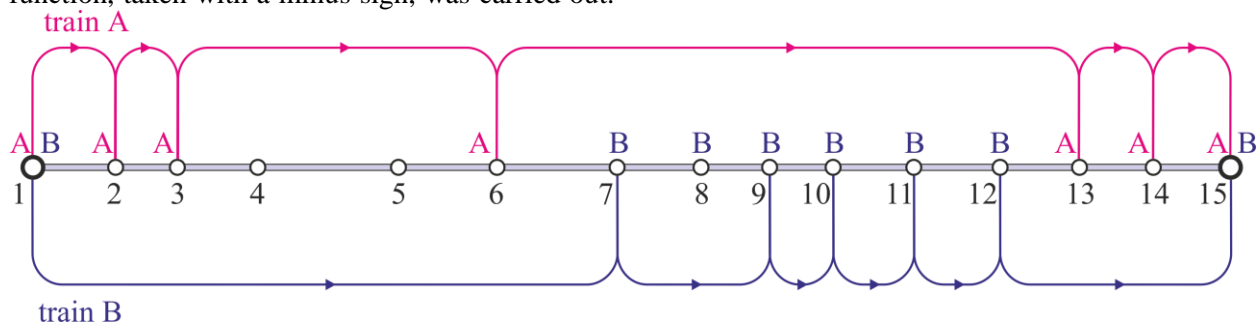


Fig. 7. Scheme of running two high-speed trains on the line, obtained as a result of model optimization

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

The optimization results indicate that the formed model allows to save up to 90% of the potential tourist passenger traffic and to process about 50% of the passenger traffic between the intermediate stations of the route.

Findings

The possibility of further development of tourism and achievement of new quality standards in any country requires modern transport. For high-quality organization of cruises on sea and river vessels, it is necessary to provide fast and comfortable delivery of passengers using other modes of transport. Thus, high-quality organization of tourist trips is impossible without modern technologies for managing intermodal passenger traffic. An important role in organizing such trips can play high-speed passenger transport as an ancillary mode of transport. However, the success of its use in this role depends on the ability to organize its work in such a way as not to reduce the tourist attractiveness of the trip as a whole. In the analysis of factors influencing the attractiveness of the use of trains as ancillary transport, it was found that the key factor is the time of the high-speed train. The introduction of modern technical means to increase the running speed of trains on the line may be impossible or impractical. Under such conditions, a rational way to solve the problem is to develop technology for planning high-speed train routes based on the method of skipping stops. The formed mathematical model is aimed at preserving the tourist passenger flow and at the same time the maximum processing of passenger flows between intermediate stations of train routes. This approach will not only provide comfortable conditions for transporting tourists, but will also allow railway operators to maintain the level of profitability of transportation. A linear utility function was used to numerically represent attractiveness. In order to obtain high-quality initial data for calculations, a high-precision forecast model was formed. The use of modern artificial intelligence technologies, such as generative adversarial networks, has ensured high accuracy of forecasting and overcoming the difficulties associated with multivariate time series. The use of a modern mathematical apparatus of genetic algorithms made it possible to find a vector of variables in which the extremum of the

objective function is achieved with sufficient accuracy. Confident convergence of the genetic algorithm in the process of solving the problem (Fig. 6) indicates the adequacy of the formed model.

Originality and practical value

It should be noted that the method of skipping stops has been used before, but mainly as a temporary regulatory measure without a certain mathematical basis. However, in this study, it is used as part of a mathematical model of mixed-integer programming. It allows to actually get a compromise solution, which is the basis for building a scheme of operation of high-speed trains. This approach provides an opportunity to maximize the involvement of tourist passenger traffic in the implementation of intermodal transport and maintaining the profitability of high-speed rail operators. Building a forecast model based on the generative-adversarial neural network, the primary purpose of which is image processing, to obtain accurate predictions of passenger flow parameters based on the data of multi-variable time series is also a new scientific approach.

Conclusions

1. The analysis of tourist trips with the use of water modes of transport revealed the need to improve the technology of intermodal passenger transport to improve the performance of high-speed trains in the case of their use as ancillary transport. It was found that the main factor influencing the attractiveness of tourist travel using trains as ancillary transport is the duration of the trip. It in turn depends on the precinct speed.

To numerically assess the dependence of the attractiveness of a tourist trip on the speed of the train, the use of the utility function is proposed.

2. In order to increase the route speed of high-speed trains, it is proposed to improve the technology of planning their work on the basis of the method of skipping stops. Based on the use of this method, a mathematical model of mixed-integer programming is formed, which simultaneously provides the attractiveness of tourist travel and profitability for railway operators. In order to provide the optimization model with high-quality initial data, a model of passenger traffic forecasting is

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

formed on the basis of modern neural network technology, the error of which exceeds 6%.

3. Given the significant combinatorial complexity of the problem, to optimize the existing model, it was proposed to use the mathematical apparatus of genetic algorithms. To this end, software has

been developed in the Matlab environment. The optimization results indicate that the formed model allows to save up to 90% of the potential tourist passenger traffic and to process about 50% of the passenger traffic between the intermediate stations of the route.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Abdelhafiez E. A., Salama M. R., Shalaby M. A. Minimizing passenger travel time in URT system adopting skip-stop strategy. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2017. Vol. 7. Iss. 4. P. 277–290. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2017.11.001>
2. Altazin E., Dauzère-Pérès S., Ramond F., Tréfond S. Rescheduling through stop-skipping in dense railway systems. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*. 2017. Vol. 79. P. 73–84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.03.012>
3. Dong X., Li D., Yin Y., Ding S., Cao Z. Integrated optimization of train stop planning and timetabling for commuter railways with an extended adaptive large neighborhood search metaheuristic approach. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*. 2020. Vol. 117. P. 102681. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102681>
4. Goodfellow I., Pouget-Abadie J., Mirza M., Xu B., Warde-Farley D., Ozair S., Courville A., Bengio Y. Generative Adversarial Networks. *Advances in Neural Information Processing Systems 27 (NIPS 2014)*. 2014. P. 2672–2680.
5. Gottschalk P. G., Dunn J. R. The five-parameter logistic : A characterization. *Analytical Biochemistry*. 2005. Vol. 343. Iss. P. 54–65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ab.2005.04.035>
6. Hassannayebi E., Boroun M., Alaei Jordehi S., Kor H. Train schedule optimization in a high-speed railway system using a hybrid simulation and meta-model approach. *Computers & Industrial Engineering*. 2019. Vol. 138. P. 106110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106110>
7. Li Z., Hensher D. A. Crowding and public transport: A review of willingness to pay evidence and its relevance in project appraisal. *Transport Policy*. 2011. Vol. 18. Iss. 6. P. 880–887. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2011.06.003>
8. Milbredt O., Rudolph F., Grunewald E., Christ T. Evaluating conditions and impact of intermodal traffic management involving airports and railways. *Transportation Research Procedia*. 2017. Vol. 25. P. 1735–1744. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.132>
9. Pagliara F., Valeri E., de Abreu e Silva J. Is there an impact of High Speed Rail on tourism? *13th WCTR*. 2013. P. 1–16.
10. Yang L., Qi J., Li S., Gao Y. Collaborative optimization for train scheduling and train stop planning on high-speed railways. *Omega*. 2016. Vol. 64. P. 57–76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.11.003>
11. Yashiro R., Kato H. Success factors in the introduction of an intermodal passenger transportation system connecting high-speed rail with intercity bus services. *Case Studies on Transport Policy*. 2019. Vol. 7. Iss. 4. P. 708–717. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2019.10.001>
12. Zhang C., Gao Y., Yang L., Kumar U., Gao Z. Integrated optimization of train scheduling and maintenance planning on high-speed railway corridors. *Omega*. 2019. Vol. 87. P. 86–104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.08.005>
13. Zhang Q., Lusby R., Shang P., Zhu X. Simultaneously re-optimizing timetables and platform schedules under planned track maintenance for a high-speed railway network. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*. 2020. Vol. 121. P. 102823. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102823>
14. Zhong Q., Lush R. M., Larsen J., Zhang Y., Peng Q. Rolling stock scheduling with maintenance requirements at the Chinese High-Speed Railway. *Transportation Research Part B : Methodological*. 2019. Vol. 126. P. 24–44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.05.013>

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Т. В. БУТЬКО¹, В. М. ПРОХОРОВ^{2*}, Л. О. ПАРХОМЕНКО³, А. О. ПРОКОПОВ⁴¹Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Феєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 89, ел. пошта uetmp@ukr.net, ORCID 0000-0003-1082-599X^{2*}Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Феєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (099) 420 45 28, ел. пошта vicmmx@gmail.com, ORCID 0000-0001-8963-6467³Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Феєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 88, ел. пошта l.o.parkhomenko@kart.edu.ua, ORCID 0000-0003-1647-7746⁴Каф. «Управління вантажною та комерційною роботою», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Феєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 88, ел. пошта prokopovartem1301@gmail.com, ORCID 0000-0001-7324-4047**Удосконалення технології пасажирських інтермодальних перевезень із залученням залізничного транспорту в умовах розвитку туризму**

Мета. За основну мету автори ставлять визначення та методичне обґрунтування шляхів підвищення ефективності пасажирських інтермодальних перевезень із залученням швидкісних поїздів як допоміжного виду транспорту в умовах здійснення морських та річкових туристичних подорожей. **Методика.** У процесі дослідження було використано: метод факторного аналізу – для визначення факторів, що впливають на привабливість здійснення туристичних подорожей із використанням швидкісних поїздів як допоміжного транспорту; метод пропуску зупинок – для з'ясування шляхів підвищення ефективності використання швидкісних поїздів як допоміжного виду транспорту під час здійснення туристичних подорожей; методи побудови та навчання генеративно-змагальних нейронних мереж – для формування моделі прогнозування пасажиропотоків, на основі історичних даних мультиваріативних часових рядів; метод генетичних алгоритмів – для оптимізації моделі змішано-цілочисельного програмування, яка дозволяє отримати оптимальну схему курсування швидкісних поїздів на лінії. **Результати.** Із метою збереження привабливості здійснення туристичних подорожей та підвищення маршрутної швидкості поїздів запропоновано вдосконалення технології планування їх роботи на основі методу пропуску зупинок. Сформовано математичну модель змішано-цілочисельного програмування, яка одночасно забезпечує привабливість здійснення туристичних подорожей та рентабельність для залізничних операторів. Для підготовки вихідних даних розроблено метод прогнозування пасажиропотоків на основі мультиваріативних часових рядів. Процедура оптимізації сформованої моделі було реалізовано у вигляді програмного забезпечення мовою Matlab. **Наукова новизна.** У роботі набув подальшого розвитку метод пропуску зупинок, який уперше було застосовано для вдосконалення технології інтермодальних пасажирських перевезень. Запропоновано оригінальний метод прогнозування пасажиропотоків на основі мультиваріативних часових рядів із використанням сучасної моделі генеративно-змагальних нейронних мереж. **Практична значимість.** Отримані результати спрямовані на вдосконалення методичних підходів до формування сучасних технологій інтермодальних пасажирських перевезень та реалізації потенціалу швидкісного залізничного транспорту як основи всебічного розвитку туризму.

Ключові слова: інтермодальні пасажирські перевезення; швидкісні залізничні пасажирські перевезення; метод пропуску зупинок; генетичні алгоритми; нейронні мережі; прогнозування мультиваріативних часових рядів; розвиток туризму

REFERENCES

1. Abdelhafiez, E. A., Salama, M. R., & Shalaby, M. A. (2017). Minimizing passenger travel time in URT system adopting skip-stop strategy. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 7(4), 277-290. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2017.11.001> (in English)
2. Altazin, E., Dauzère-Pérès, S., Ramond, F., & Tréfond, S. (2017). Rescheduling through stop-skipping in dense railway systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 79, 73-84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.03.012> (in English)
3. Dong, X., Li, D., Yin, Y., Ding, S., & Cao, Z. (2020). Integrated optimization of train stop planning and timetabling for commuter railways with an extended adaptive large neighborhood search metaheuristic approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 117, 102681. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102681> (in English)

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

4. Goodfellow, I., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., Courville, A., & Bengio, Y. (2014). Generative Adversarial Networks. *Advances in Neural Information Processing Systems 27 (NIPS 2014)*, 2672-2680. (in English)
5. Gottschalk, P. G., & Dunn, J. R. (2005). The five-parameter logistic: A characterization and comparison with the four-parameter logistic. *Analytical Biochemistry*, 343(1), 54-65.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ab.2005.04.035> (in English)
6. Hassannayebi, E., Boroun, M., Alaei Jordehi, S., & Kor, H. (2019). Train schedule optimization in a high-speed railway system using a hybrid simulation and meta-model approach. *Computers & Industrial Engineering*, 138, 106110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106110> (in English)
7. Li, Z., & Hensher, D. A. (2011). Crowding and public transport: A review of willingness to pay evidence and its relevance in project appraisal. *Transport Policy*, 18(6), 880-887.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2011.06.003> (in English)
8. Milbredt, O., Rudolph, F., Grunewald, E., & Christ, T. (2017). Evaluating conditions and impact of intermodal traffic management involving airports and railways. *Transportation Research Procedia*, 25, 1735-1744.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.132> (in English)
9. Pagliara, F., Valeri, E., de Abreu e Silva, J. (2013). Is there an impact of High Speed Rail on tourism? *13th WCTR*, 1-16. (in English)
10. Yang, L., Qi, J., Li, S., & Gao, Y. (2016). Collaborative optimization for train scheduling and train stop planning on high-speed railways. *Omega*, 64, 57-76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.11.003> (in English)
11. Yashiro, R., & Kato, H. (2019). Success factors in the introduction of an intermodal passenger transportation system connecting high-speed rail with intercity bus services. *Case Studies on Transport Policy*, 7(4), 708-717. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2019.10.001> (in English)
12. Zhang, C., Gao, Y., Yang, L., Kumar, U., & Gao, Z. (2019). Integrated optimization of train scheduling and maintenance planning on high-speed railway corridors. *Omega*, 87, 86-104.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.08.005> (in English)
13. Zhang, Q., Lusby, R. M., Shang, P., & Zhu, X. (2020). Simultaneously re-optimizing timetables and platform schedules under planned track maintenance for a high-speed railway network. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 121, 102823. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102823> (in English)
14. Zhong, Q., Lusby, R. M., Larsen, J., Zhang, Y., & Peng, Q. (2019). Rolling stock scheduling with maintenance requirements at the Chinese High-Speed Railway. *Transportation Research Part B: Methodological*, 126, 24-44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.05.013> (in English)

Received: Oct. 09,2020

Accepted: Feb. 08,2021

UDC 656.212.4:658.53

D. M. KOZACHENKO^{1*}, A. I. VERLAN^{2*}, R. H. KOROBIOVA^{3*}

^{1*}Dep. «Operational Work Management», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail kozachenko@upp.dit.edu.ua, ORCID 0000-0003-2611-1350

^{2*}LLC «Transinvestservis», Chapaieva St., 50, v. Vyzirka, Odesa region, Ukraine, 67543, tel. + 38 (0482) 30 07 24, e-mail averlan@tis.ua, ORCID 0000-0001-7855-8942

^{3*}Dep. «Operational Work Management», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail rgkorobyova@outlook.com, ORCID 0000-0002-6424-1079

Development of Analytical Methods for Calculating Time Standards for Shunting Operations

Purpose. The article is aimed to conduct a historical analysis of the development of analytical methods for standardizing the duration of shunting operations, as well as assessing their compliance with the existing operating conditions of railway transport. **Methodology.** The research in this article was carried out on the basis of an analysis of literary sources and methods of the theory of the organization of the operational work of railways. **Findings.** The standardization of the duration of shunting operations is one of the most important tasks of the theory of operational work of railways. The existing method of standardizing the duration of shunting operations developed in the first half of the 20th century and is used to this day. The performed analysis shows that the scientific principles underlying it generally correspond to the modern conditions of the railway transport. Additional research in this area can be associated with assessing the influence of the initial location of cars on the tracks on the average duration of shunting operations, taking into account the influence of length restrictions of the cars groups being moved, as well as monitoring the implementation of established norms by statistical methods. The article also shows that the values of modern time standards for shunting operations, in many cases, are set for technical means and technologies that were used in railway transport in the 50–70s of the 20th century and do not correspond to the operating conditions of real stations and sidings of industrial enterprises. Therefore, they require revision. **Originality.** In this paper, based on historical analysis, the process of development of methods for setting the time for shunting operations is described and the factors influencing the current value of norms are established. **Practical value.** The research results make it possible to identify the reasons for the discrepancy between the existing time standards for performing shunting operations and the real operating conditions of stations and sidings of industrial enterprises, as well as to establish the main elements of the methodology for standardizing the duration of shunting operations that require revision.

Keywords: railway transport; railway station; private siding; shunting operations; time standards

Introduction

Shunting is one of the main elements of the freight railway transportation. Shunting operation is any movement of railway rolling stock along the station and other tracks in order to provide train operation and production activities of the enterprises. Shunting includes all movements of rolling stock along station tracks, including traveling outside the station, as well as displacements along the sidings, except for the movement of trains from and to the railway line. Shunting operation requires significant amount of time, fuel, and other resources. About 10% of expenditures associated with general rail transportations are accounted for by shunting operation. Moreover, a considerable amount of shunting

operations is primarily performed at metallurgical and mining enterprises, as well as in the seaports. Recently, there have been significant changes in the operating conditions of railway transport. An increase in the share of own cars resulted in the need for additional selection of cars according to the owners, and the aging of the freight car fleet – according to the technical condition. Under these conditions, one of the most important tasks of the theory of operational work of railways is the regulation of the duration of shunting operations. The existing methodology for standardizing the duration of shunting operations was formed in the first half of the 20th century. During this time, significant changes have occurred, both in the conditions and

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

technology of railway transport operations, as well as in the mathematical methods used to calculate the norms. Therefore, studies aimed at performing a historical analysis of the development of methods for standardizing the duration of shunting operations are relevant. The issues of standardizing can become even more relevant in the future with the adoption of the new Law of Ukraine «On Railway Transport». Its draft provides for the separation of station services into a separate type of additional and auxiliary services of the railway infrastructure, as well as the presence of technological processes of sidings operation at the enterprises.

Scientific methods of standardization of technological processes are based on their mathematical models. At present, the methods of simulation of technological processes on a computer are becoming increasingly popular when assessing the performance of railway stations and sidings of industrial enterprises [1, 3, 6, 33–35, 37]. However, this in no way diminishes the importance of developing analytical methods that establish functional dependencies between the performance indicators of railway transport and the factors influencing them. These methods make it possible to obtain the necessary estimates with insignificant labor costs; they can be directly used in optimization procedures, as well as make it possible to assess the influence of individual factors on certain operation indicators of the railway transport.

Purpose

The purpose of this article is to conduct a historical analysis of the development of analytical methods for standardizing the duration of shunting operations, as well as assessing their compliance with the existing operating conditions of railway transport.

Methodology

According to the definition, standardizing is the process of establishing maximum permissible or optimal regulatory values in various fields of activity. One of the most common rationing problems, which is solved in railway transport, is the standardizing the duration of shunting operations. In the general case, the value of the time standards for shunting operations depends on the calculation methodology applied, which establishes how and what operational indicators should be taken into account, and

depends on the established time standards for their performing.

The regulatory and reference base that regulates the process of standardizing the duration of shunting operations in Ukraine is composed by the following documents:

- «Methodology instructions for calculating the time standards for shunting operation performed in railway transport» [10], which regulate the process of standardizing the duration of shunting operations in the traffic economy of Ukrzaliznytsia JSC;
- «Service regulations of railway sidings» [19], regulating the interaction of Ukrzaliznytsia JSC and the enterprises-owners of sidings;
- «Manual for the design of industrial railway stations (to Building Codes and Regulations 2.05.07-85)» [18], which regulates the procedure for determining the required technical equipment of the industrial stations under design;
- other normative and reference documents.

These documents contain calculation methodologies, time standards for shunting movements, preparatory and final operations, and complex shunting operations.

It should be noted that the methods for calculating the time standards for shunting operations set forth in these documents have both common features and differences. As an example, the formula for time standard for train sorting can be considered. According to [10], this standard should be established from the expression

$$T_c = Ag + Bn, \quad (1)$$

and according to [18] from the expression

$$T_c = 1,2(Agk_g + Bnk_n)k_{cur} + t_{cp}, \quad (2)$$

where A, B – are constant coefficients, depending on the method of performing shunting operation, measured respectively in min/cut and min/car; g, n – respectively, the number of cuts and cars in the train; k_g, k_n – repeat coefficients of sorting cuts and cars; k_{cur} – coefficient that takes into account increase in the time of sorting cars when the lead track is located in the curves of a small radius; t_{cp} – time for coupling groups of cars on the track, min.

Both of the given expressions represent linear dependences of the duration of the shunting operation on the number of cuts and cars in the train.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

However, expression (2) takes into account a larger number of factors and has a more complex structure than expression (1). In addition, the presence of a factor of 1.2 and a larger value of the coefficient B leads to the fact that the calculation by formula (2) for the same conditions gives a significantly longer time standard for sorting cars as compared to expression (1). Taking into account that both expressions describe the same process, documents [10] and [18] require agreement. It should be noted that the time standards for performing shunting operations are directly or indirectly used to solve the following tasks:

- substantiation of the sufficiency of technical equipment for the development of the planned volume of work, or the need for its development;
- technical regulation of the work of railways;
- setting standards for the time and cost of transport services during the preparation of contracts for transport services between Ukrzaliznytsia JSC and enterprises, as well as between enterprises.

Under these conditions, the problem of the adequacy of time standards for shunting operations that really occur in railway transport becomes very relevant.

The research in this article was carried out based on analysis of literary sources and methods of the theory of organizing the operational work of railways. The problem of standardizing the duration of shunting operations has more than 100 years of history, and many prominent scientists in the field of railway transport have devoted their work to its solution. Separate articles are devoted to the study of the scientific contribution of these scientists, which contain additional information on the essence of the issue [16, 25, 26].

Findings

The issue of standardizing the duration of shunting operations has always been relevant for the organization of the operational work of railways. According to [4], engineer Rikhter I. I., assistant of the head of the Nikolayev railway proposed the first standards for the organization of shunting operations at stations in 1877. I. I. Rikhter emphasized the importance of the problem of organizing shunting operation in his work «Notes on the reorganization of stations on the Nikolayev railway» published in

1878, where he indicated that about 40% of train delays are associated with unsatisfactory organization of shunting operations at stations.

According to [5], in the 30s of the 20th century, there already existed a «Manual on the organization of shunting operation at large stations.»

Subsequently, based on the prevailing theory of shunting operation, the standard station of the Ministry of Railways of the USSR in 1955 developed (in accordance with [27]), approved in 1956, and in 1957 published the «Guide for the technical standardization of shunting operation» [20] (hereinafter referred to as «Guide»). Subsequently, the «Guide» was reprinted several times in the USSR [21–24], and after its collapse in the Russian Federation [11, 13] and in Ukraine [10]. An important factor that must be taken into account when analyzing the change in the time standards for shunting operations is that until 1978 the standardization unit was an accounting two-axle car with an estimated length of 7.5 m [20–23]. At the same time, in the problems of rationing and planning, a four-axle car was taken into account as two two-axle cars, a six-axle car – as three, etc. After 1978, the standardization of the duration of shunting operations began to be performed for a four-axle car with an estimated length of 15 m [24].

Scientific research aimed at developing methods for setting the duration of shunting operations started at the end of the 19th century and have not lost their relevance to this day.

One of the main indicators that is subject to standardization when performing shunting operation is the duration of shunting movement. To normalize this indicator at the early stages of the development of railways, the formula for the duration of uniform movement was used. Thus, in [15, 17], to determine the duration of shunting operations in minutes, the following formula was used

$$t_{mov} = \frac{0.06l_{mov}}{v_{mov}}, \quad (3)$$

where l_{mov} – length of movement route, m; v_{mov} – movement speed of shunting train, km/h.

The problem of using expression (3) to normalize the duration of shunting operations is associated with the complexity of estimating the value v_{mov} depending on the operating conditions. Therefore, expression (3) is used, as a rule, only in educational

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

literature, and in the practice of railways, other approaches are used.

The world's first scientific research related to the study of shunting at railway stations was carried out in the Russian Empire by an engineer (later professor) A. N. Frolov. In 1899, he performed the timing of the duration of shunting operations at the stations Rtishchevo and Atkarsk [29, 30]. Based on the statistical processing of the results of these observations, A. N. Frolov established a relationship between the number of cars in a shunting train and the time spent on a shunting trip (movement of a locomotive or locomotive with cars with a change in direction)

– in the daytime

$$t_{mov} = 3.6 + 0.10n;$$

– in nighttime

$$t_{mov} = 4.5 + 0.12n;$$

– in average

$$t_{mov} = 4.07 + 0.112n.$$

Professor I. I. Vasilyev performed an analysis and generalization of theoretical studies based on the traction calculations of engineers M. M. Protodyakonov, A.M. Gribov, and others, as well as field observations of the operation of real stations. Based on the studies performed, it was concluded that the duration of shunting semi-trips (shunting movement without changing direction) and shunting trips (shunting movement with changing direction) is linearly dependent on the number of cars in the train.

$$t_{mov} = a + bn, \quad (4)$$

where a , b – coefficients, the values of which are determined based on observations of the station operation, measured respectively in min and min/car.

The results of these studies are published in [2]. This work also noted a significant difference in the value of the coefficient a of expression (3), obtained by Prof. Frolov A. N. based on time observations and traction calculations. It is indicated that it is caused by additional operations performed during shunting movements, such as coupling and uncoupling cars, transmitting and receiving commands, changing locomotive operating mode, etc. The method for estimating the parameters a and b of the

model (4) based on time observations is given in [2, 21]. At the same time, it was noted that during observations, one should record idle period and cases of irrational methods of its performing. The implementation of these provisions of the methodology is associated with a significant amount of subjectivity. Moreover, in different conditions, locomotive drivers can perform shunting at different speeds, which is not fixed by the methodology [2, 21]. Therefore, the collection and interpretation of statistics on the duration of shunting operations is time-consuming and must be performed by qualified observers. «Guide» [21] also gives the network time standards a and b for the semi-trips of displacement. The value of the coefficient a was set depending on the movement distance, and b on the movement distance and the state of the brakes of cars in the train (engaged or disengaged). Starting from the 3rd edition of the «Guide» [22], only network time standards a and b began to be published without a methodology for obtaining them for each station. As a result, the connection between the time standards for car displacement and the local operating conditions of railway stations and sidings was lost. Formula (4) was adopted as the main method for standardizing the duration of shunting movements since 1964 [21] and was used until the collapse of USSR, as well as in the Russian Federation until 1998 and in Ukraine until 2003. The values of the coefficients a and b were slightly corrected in 1972 in [23]. In 1978, the values of the coefficients b were doubled due to the transition to calculation in four-axle cars instead of two-axle cars [24].

Modern studies of the dependence of duration of shunting movements on the number of cars in the train, the route length and the maximum allowable speed [36], carried out based on the methods of planning factorial experiments, indicate that there is no reason to reject the linear dependence of the duration of car rearranging on these factors.

In addition to the coefficients a and b for calculating the time standards for displacement of cars, the coefficients a and b were also given in [20] to determine the duration of cars movement performed as part of complex shunting operations, such as pushing, pulling, pulling back, idle trips, as well as time standards for acceleration and braking of trains during displacements and kicks. In [21], these standards were transferred to the appendix, and, starting from [22], they were no longer published.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Alternative approach to assessing the duration of shunting movements is based on performing traction calculations. In accordance with [2], engineer M. M. Protodyakonov performed the first in the USSR traction calculations for shunting operation in 1929 and published in the work «Method for comparing types of small stations». Due to the cumbersome nature of traction calculations and the lack of accurate data for their implementation, the methods for determining the duration of shunting movements, based on a simplified solution of the motion equation, were developed, such as the method of Professor L. V. Odintsov [15]. In this case, the process of movement is divided into three elements: acceleration, movement at a constant speed, braking, and the total time spent on moving locomotives and cars is determined by the formula

$$t_{mov} = t_{ab} + \frac{0,06(l_{mov} - l_{ab})}{v_c} + t_{ext}, \quad (5)$$

where t_{ab} – time spent on acceleration and braking, min; l_{ab} – distance of acceleration and braking, m; v_c – constant speed movement; t_{ext} – extra time spent on coupling and uncoupling a locomotive or locomotive with cars to the train, taken equal to 0.20–0.25 minutes.

The distance covered by the shunting train during acceleration and braking, as well as the time spent on acceleration and braking, were determined by the formulas

$$l_{ab} = \frac{4,17v_c^2}{f_t - w_m} + \frac{4,17v_c^2}{f_b + w_m}, \quad (6)$$

$$t_{ab} = \frac{v_c}{2(f_t - w_m)} + \frac{v_c}{2(f_b + w_m)},$$

where f_t, f_b – respectively, the specific traction force and the specific braking force, kg/t (the dimension is given in accordance with the system of measurements used by the USSR); w_m – specific motion resistance, kg/t.

If $l_{mov} > l_{ab}$, then the shunting movement includes all three elements (acceleration, movement with constant speed, braking) and the time spent is determined by expression (5). Otherwise, shunting movement includes only two elements (acceleration and braking). In this case, from expression (6), the

maximum permissible acceleration speed v_c is established, and the duration of shunting movement was determined from expression

$$t_{mov} = t_{ab} + t_{ext}.$$

The proposed approach is rather cumbersome and has not been applied in the practical work of railways.

The formula that takes into account the permissible movement speed during shunting, as well as the procedure for its derivation, is given in [20] (for the sake of commonality in this article, the time was calculated in minutes, and in the original work [20] the calculation was performed in seconds)

$$t_{mov} = \frac{(\alpha + \beta n)v_{max}}{120} + \frac{0,06l_{mov}}{v_{max}}, \quad (7)$$

where α – coefficient taking into account the time required to change the locomotive speed by 1 km/h during acceleration, and the time required to change the locomotive speed by 1 km/h when braking sec/km/h; β – coefficient taking into account the extra time to change the speed of each car in the shunting train by 1 km/h during acceleration and the extra time to change the speed of each car in the shunting train by 1 km/h when braking, sec/km/h per car; v_{max} – permissible movement speed during shunting, km/h.

In [20], the values of the coefficients were also presented, which were $\alpha = 2.40$ sec/km/h (including 1.00 sec/km/h acceleration and 1.40 sec/km/h braking) and $\beta = 0.10$ sec/km/h per car (including 0.04 sec/km/h acceleration and 0.06 sec/km/h braking of 1 car in the train).

In [28], expression (7) is somewhat modified and presented in the form

$$t_{mov} = \frac{(\alpha + \beta n)v_{max}}{120} + \frac{0,06l_{mov}}{v_{max}} + t_{pf},$$

where t_{pf} – the time standard for preparatory and final operations, which, according to [28], for semi-trips of displacement is 0.2 minutes.

When deriving expression (7), it is assumed that the shunting movement includes three elements (acceleration, movement at a constant speed and braking). Therefore, this expression gives an incorrect result for short distance movements, which consist

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

only of acceleration and braking. To solve this problem, in [20], a figure was presented with the dependences of the maximum speed of shunting movement on the number of cars in the train and the length of the route of displacement $v_{\max}(l_{\text{mov}}, n)$. The principles of constructing these dependencies are not given in [20]. A derivation of formula (6) similar to [20] is given in [9]. It is also indicated here that the maximum possible value of the acceleration speed v_{\max} is set from the condition of the ratio of the power and traction force of the locomotive. The fact that the maximum permissible acceleration speed when moving over short distances is also limited by the braking conditions is not mentioned in [9]. Moreover, the dependences $v_{\max}(l_{\text{mov}}, n)$ in [20] are determined only at distances of more than 100 m. Therefore, it is difficult to fully use the methodology described in [20] for practical purposes.

Since 1964, after the publication of the second edition of the «Guide» [21], expression (7) has not been used to standardize the duration of shunting operations. Expression (7) started to be used again after the introduction of «Methodological guidelines for calculating the time standards for shunting operations performed in railway transport» [11] in the Russian Federation in 1998. In 2003, Ukraine published its «Methodological guidelines for calculating the time standards for shunting operations performed in railway transport» [10], which practically repeated the text of the Russian analogue. The methodologies [10, 11] established the values of the coefficients $\alpha = 2.44 \text{ sec/km/h}$ and $\beta = 0.10 \text{ sec/km/h per car}$. In contrast to [20] in [10, 11], there are no indications on the choice of the maximum permissible acceleration speed in (7), and tables 5.1–5.4 in these regulatory documents contain incorrect standards for traveling over short distances. This fact is indicated in [7, 31]. To solve the problem, it was proposed in [7] to calculate the time standard for movement over distances less than

$$l_{\text{ab}} = \frac{(\alpha + \beta n)v_{\max}^2}{7.2}$$

according to formula

$$t_{\text{mov}} = \sqrt{\frac{l_{\text{mov}}(\alpha + \beta n)}{500}}.$$

Additional questions to the methodology described in [10, 11] arise due to the fact that the value of the coefficient $\beta = 0.1 \text{ sec/km/h}$ for a four-axle car with roller bearings exactly repeats the value of the coefficient β in [20], established for a two-axle car with slider bearings. It should be noted that the standards [10] are still in force in Ukraine. At the same time, in 2007, the Russian Federation published the «Time standards for shunting operation performed at the railway stations of Russian Railways JSC, the standards for the number of shunting locomotive crews» [13]. Here the tabular values of the time standards for displacement of cars for short distances, as well as the values of the coefficients $\alpha = 0.73 \text{ sec/km/h}$ and $\beta = 0.13 \text{ sec/km/h per car}$ were corrected. In [13], there is no information about the locomotives for which the value of the coefficient α was obtained, however, the accelerations that these locomotives must realize during the displacement significantly exceed the values of the accelerations described in the literature, which are realized by shunting locomotives during intensive acceleration and braking during kicks in the process of sorting cars.

An important element of shunting operation is preparatory and final operations, such as switching of points, uncoupling and coupling a locomotive, coupling and uncoupling cars, inspecting cars, engaging and testing cars brakes, fixing cars with shoes and removing them, giving commands, reports and their perception, etc. Also, significant time expenditures are associated with the passage of workers from one place of performing operations to another. The need to account for these operations is indicated both in the scientific and educational literature during the formation of the theory of shunting operation in railway transport, however, no significant attention was paid to the problem of standardizing and accounting for such operations. In particular, in [2] it is indicated that 0.2–0.25 minutes should be added to the duration of the semi-trips to give commands and change the locomotive movement direction. In [15] it is indicated that it is necessary to add 0.2 minutes to the duration of the semi-trips for coupling and uncoupling of the locomotive to the train, etc. As specified in [27], according to the data of standard station of the USSR Ministry of Railways, the time spent on preparatory and

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

final operations when performing shunting of displacement was set to one semi-trip, and the time standards for preparatory and final operations during sorting, collecting, pushing and inspecting of cars to one accounting two-axle car. Also, the duration of individual preparatory and final operations during the validity period of the 1st [20] and 2nd [21] editions of the «Guide» can be estimated from the tables with examples of calculating time standards for the stations. The third edition of the «Guide» [22] contains a table «Standards of time, min, for performing other operations» with standard duration values of preparatory and final operations for the railway network. The number of operations in this table was supplemented from edition to edition, and if in [22] only 9 operations were indicated, then in [13] 36 operations is indicated.

Considering that standard technical means are mainly used in railway transport, the duration of elementary preparatory and final operations can be estimated by the methods of mathematical statistics and are recommended for use throughout the entire railway network. At present, it is advisable to revise the standards that have been in force since 1967, which in many cases were established administratively.

It should be noted that the standards include both the time standards for elementary and complex preparatory and final operations. Considering that there is no description of the actions performed in the process of these operations, it is rather difficult to establish their compliance with the operating conditions of a certain station. In particular, it is possible to trace the change in the time standards for operations associated with the engagement of brakes of the cars in the shunting train.

In [20], there is no time standard for engagement and testing automatic brakes. The example shows the calculation formula

$$t_{ab} = 1.5 + 0.25n.$$

In [21], there is also no time standard for engagement and testing automatic brakes. The example shows the calculation formula

$$t_{ab} = 2.19 + 0.30n.$$

After 3 years, the 3rd edition of the «Guide» was published [22], starting from which the duration of the operation of «engagement and testing automatic

brakes of cars in a shunting train» started to be normalized. In [22], the time standard was established

$$t_{ab} = 3.0 + 0.07n. \quad (8)$$

In [23], the time standard was established

$$t_{ab} = 3.0 + 0.10n.$$

In [24], with the transition to standardizing for four-axle cars, the standard was established

$$t_{ab} = 3.0 + 0.14n. \quad (9)$$

The same standard has been preserved in [10, 11, 13], but the name of the operation has changed and, at present, it sounds like «charging the brake line and testing the autobrakes of cars in a shunting train». The absence of a list of elementary operations that the standard developers took into account as part of the complex operation «engagement and testing automatic brakes of cars in a shunting train» or «charging the brake line and testing the autobrakes of cars in a shunting train» does not allow explaining the significant difference in the observed values indicated in [20, 21] and the normative values in [22], the difference in examples on the standardization of shunting operation with local cars between [24] and [10, when, while preserving in [10] the standard (9) from unchanged [24] (and in fact (8) from [22]) a significant number of operations associated with the automatic brakes engagement were added to the example.

In the 20s of the 20th century in the USSR professor I. I. Vasilyev, engineers V. S. Larionov, N. A. Morshchikhin, and others investigated the problems of standardizing the duration of complex shunting operations. In the course of these studies, based on analytical calculations, calculation formulas were obtained for assessing the duration of such complex operations as sorting cars of a train into several tracks, collecting cars from several tracks into one train, blocking of trains, etc. The existing methodology of standardizing the duration of complex shunting operations is mainly based on the research of Professor I. I. Vasilyev, the results of which are detailed in [2]. This methodology is based on the assumption of a linear dependence of the duration of the shunting movement on the number of cars in the shunting train (4), as well as the equal number of cars on each of the tracks. Professor Vasilyev examined the method of sorting cars by flat

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

shunting and various methods of sorting cars by shocks loose shunting. At the same time, flat shunting means when vehicles are continuously moved from one place to another with engine attached. Loose shunting means pushing vehicles by kicks with the help of an engine and allowing them to roll with engine unattached.

In particular, under such assumptions, the minimum duration of sorting trains by flat shunting will be determined by the formula (the formula from [9] is given)

$$T_s = 2a_s g + b_p n + 2\sqrt{(a_p + a_l - a_s)b_s n g} \quad (10)$$

or

$$T_c = A'g + B'n + C'\sqrt{ng} \quad (11)$$

where a_s, b_s – shunting parameters for sorting and pulling back semi-trips, min and min/car; a_p, b_p – shunting parameters for pulling semi-trips, min and min/car; a_l – shunting parameters of trips of a single locomotive for the next group of cars, min; A', B', C' – constant coefficients.

The time standards for loose shunting can also be reduced to form (11).

The time expenditures on other complex shunting operations can also be calculated by analogy with (11). In particular, the time expenditures on collecting cars from several tracks to one can be established by formula

$$T_{col} = U'p + F'n + P'\sqrt{np} \quad (12)$$

where p – the number of tracks from which the cars are collected; U', F', P' – constant coefficients.

Taking into account that the dependence \sqrt{ng} is close to linear, then expression (11) can be simplified and presented in the form of expression (1). Similarly, when the dependence is close to linear, expression \sqrt{np} (12) can be represented as

$$T_{col} = Up + Fn \quad (13)$$

It is the expressions (1) and (13) that are practically used in the operational work of railways.

In [32], a formula was derived for assessing the time of sorting cars on the basis of expression (7). As a result, it was established that the duration of

sorting cars can be determined by a linear dependence (1). It was also assumed in the study that the coefficients A and B in formula (1) significantly depend on the length of the station necks.

The assumption of the equality of the number of cars in cuts, when deriving formula (10), was accepted without justification, and in the 30s of the 20th century there was a rather intense debate about the possibility of reducing the duration of car sorting by taking into account the real size of the car groups [12]. However, from a scientific perspective, this issue has not been fully investigated. Also, the methodologies for standardizing complex operations given in [2, 20, 21] do not take into account the various restrictions that may occur in the operational work of railway stations, such as the length of the lead tracks, the power of locomotives, etc.

Expression (10) contains only the time expenditures on shunting movements. However, sorting of cars includes a significant number of preparatory and final operations. Mostly the number of these operations is proportional to the number of shunting movements. Some preparatory-final operations are associated with the passages of shunting master along the train, and the number of such operations is proportional to the number of cars. In [2] it is recommended to take into account the time spent on preparatory and final operations by increasing the coefficients a . However, according to [20], the time spent on preparatory and final operations was attributed to one car of the train. In particular, during the train breaking-up, extra time expenditures per car were set at $c_{ext} = 0.12$ minutes, when forming one-group and two-group trains – $c_{ext} = 0.2$ min., multi-group – $c_{ext} = 0.3$ min. With this approach, the order of performing shunting operations during the sorting process and the number of parts into which the train is divided does not affect the time spent on preparatory and final operations, which somewhat does not correspond to the real process. However, in the then operating conditions of the railways, the error in estimating the time for car sorting was insignificant.

The development of methods for standardizing the duration of shunting operations took place in the period of the 30–50s of the 20th century, when the crossing and carrying capacity of railway transport significantly lagged behind the needs of the economy in transportations. Therefore, there was an urgent need to intensify labor productivity, which had

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

a significant influence on the value of the time standards that were set for railway stations. The process of performing field experiments to estimate the value of the coefficients a and b of expression (10) is described in [2]. These coefficients were established for the conditions of sorting cars with slider bearings in sorting yards without taking into account the operation of securing when switchers switch points individually and give visual commands to the locomotive drivers. In fact, the obtained coefficients a and b represent the minimum possible time spent on shunting movements in the most favorable conditions. However, even under these conditions, the value of the standard values of the coefficients A and B in expression (1) is significantly lower than the value of these coefficients, which can be obtained by direct calculation according to the data of educational and scientific literature. Explanation of the reason for this discrepancy can be found in [20] and [21]. The method of sorting cars by flat shunting in the works of the 30-50s of the 20th century was described as outdated and at that time, there was propaganda aimed at the widespread use of various methods of sorting by loose shunting. In accordance with the 1st edition of the «Guide» [20], when setting the time standard for sorting cars by flat shunting, it was taken into account that 50% of the sorting semi-trips were carried out by flat shunting, and 50% by loose shunting. Further, in accordance with the 2nd edition of the «Guide» [21], it was taken into account that only 25% of the sorting semi-trips were carried out by flat shunting, and 75% – by loose shunting. Starting from the 3rd edition [22] of the «Guide», the methodology for deriving formulas was no longer published, however, the values $A = 1.01$ min/cut and $B = 0.25$ min/car given in it correspond to the condition when 89% of shunting is performed by loose shunting and only 11% by the flat one. It should also be noted that due to the difference in time expenditures on preparatory and final operations, in the 1st, 2nd and 3rd editions of the «Guide» [20–22], the coefficients A and B were indicated for the train breaking-up, as well as large, in relation to them, time standards for the formation of group and pick-up trains. In the 4th edition [23] of the «Guide», only lower values of the coefficients A and B were left. In the 5th edition of the «Guide» [24], the time standards for complex operations were recalculated from two-axle cars into four-axle cars. Considering

that two-axle cars were excluded from operation as early as 1965, in 1978 there were no significant changes in the operational work of railways associated with a change in the structure of the car fleet. Also, a comparison of the «Guides» of 1972 [23] and 1978 [24] shows that the time standards for movement and preparatory and final operations calculated according to them have not changed significantly. At the same time, the standards of time for complex operations were reduced by 19–25%. At present, in many cases, sorting by loose shunting is prohibited because the safety requirements of railway workers, the safety of rolling stock and cargo cannot be ensured. Flat shunting is performed entirely in accordance with the definition of this method, when the cars are moved by locomotive until they stop on the tracks. Under such conditions, the values of the time standards for sorting cars given in [10] do not even correspond to the physics of the processes performed during shunting. Moreover, since the 1950s, significant changes have taken place in the operation of railway transport. In particular, at present, in most cases, the switching of points is performed not manually, but remotely, which undoubtedly increased the safety level of shunting operation, but led to the fact that the assessment of the situation by workers is not carried out directly, but according to data of devices, while visual commands were replaced by verbal ones. Therefore, the time spent on the preparation of routes has increased in comparison with that adopted in [24]. Moreover, in the case when the sorting of cars takes place under conditions of electrical centralization of switches and signals, the shunting train should pass behind the oncoming signal, not behind the switch of changing the movement direction, which increases the movement distance in comparison with [24]. The transition of rolling stock from slider bearings to rolling ones made it possible to significantly reduce the movement resistance of cars and reduce the cost of train traffic, but this resulted in an increase in the standards and a change in the order of train fixation. And, finally, the introduction of radio communication allowed one shunting master to carry out shunting operation without an assistant, but at the same time the number of movements of the shunting master between the work sites increased significantly and the possibility of parallel execution of preparatory and

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

final operations was lost. For these and other reasons, the application of 70–40 year old time standards leads to significant differences between the estimated and observed duration of shunting operations.

The performed analysis shows that at present, when calculating the time standards for complex shunting operations, it is accepted that their duration linearly depends on the number of elementary operations performed and the number of cars taking part in them. These assumptions generally correspond to the operating conditions of railway transport; however, they require clarification for shunting operations occurring under various restrictions.

To date, a significant number of differences in the work of railway transport have accumulated from the conditions for which the time standards for complex operations were established in [20–24]. For this reason, in order to obtain reliable time standards, it is not enough to carry out a proportional increase in the norms, as it was done in [18], but it is necessary to comprehensively revise the standardizing methodology itself. Obtaining general standards for public railway stations and sidings of industrial enterprises is impossible due to significant differences in technical equipment, staffing and operation technology. In these conditions, it is advisable to return to the practice of calculating individual standards, which was performed during the period of validity of the «Guidelines» of the 1st and 2nd editions [20, 21]. At the same time, methodological materials for the calculation should contain process charts for all elementary and complex shunting operations.

An important scientific problem in the field of rationing the duration of shunting operations, which has also not been resolved to date, is the determination of which value of the indicator is the norm. In the general case, the duration of shunting operation is a random variable, which is influenced by a significant number of random factors. Ignoring this fact leads to situations that are described, for example, in [12], when the value close to the minimum possible is set as a standard and, further, its deviations are recorded. In this regard, it is advisable to consider the possibility of adaptation and application of statistical methods for controlling technological processes based on Shewhart's charts [8] in the process of shunting operation. These methods imply the establishment of a set of control limits instead of

one standard value. The presence of such limits makes it possible to establish not only the compliance of the duration of individual operations with the established standards, but also the compliance of the standards with the ongoing technological process.

Originality and practical value

In this work, based on historical analysis, the process of development of methods for standardizing the time for shunting operations is described and the factors influencing the current value of the standards are established.

The research results make it possible to identify the reasons for the discrepancy between the existing time standards for performing shunting operations and the actual operating conditions of stations and sidings of industrial enterprises, as well as to establish the main elements of the methodology for standardizing the duration of shunting operations that require revision.

Conclusions

1. Scientific methods of standardizing the duration of shunting operations, which are used in the railway transport of Ukraine, were developed in the 30s of the 20th century. They are based on a linear representation of the dependences of the duration of shunting operations on the number of elementary operations and the number of cars participating in them. Modern time standards for shunting operations were mainly established in the 50–70s of the 20th century.

2. To date, significant changes have taken place in the operation of railway transport compared to the conditions of its operation during the period of establishing the time standards for the duration of shunting operations. In this regard, it is necessary to carry out a comprehensive revision of these standards. For the existing operating conditions of railway transport, it is advisable to move away from the practice of applying general network time standards for complex shunting operations and return to the calculation of individual standards for individual stations and sidings of industrial enterprises.

3. The applied calculation methods allow setting the time standards for shunting operations with sufficient accuracy for practical purposes. The issues of standardizing the duration of shunting operations under conditions of limiting the length of shunting

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

trains, assessing the influence on the value of the time standard of the initial distribution of cars on the tracks, as well as standardizing the duration of shunting movements under conditions of using statistical methods of control technological processes require additional research.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Бобровский В. И., Сковрон И. Я., Дорош А. С., Демченко Е. Б., Малашкин В. В., Болвановская Т. В. Имитационное моделирование процесса расформирования многогруппных составов на двусторонней горке малой мощности. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2018. Вип. 15. С. 19–26. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2018/150194>
2. Васильев И. И. *Графики и расчеты по организации железнодорожных перевозок*. Москва : Трансжелдориздат, 1941. 575 с.
3. Горбова О. В. Формалізація технологічних процесів залізничних станцій на основі поетапного моделювання. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 5 (83). С. 71–80. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/181850>
4. *История железнодорожного транспорта России*. Т. 1 : 1836–1917 / под ред. Е. Я. Красковского, М. М. Уздина. Санкт-Петербург, Москва : АО «Иван Федоров». 1994. 335 с.
5. Кисляков Н. Т., Тихомиров И. Г. *Организация железнодорожных перевозок*. Москва : Трансжелдориздат, 1934. 288 с.
6. Козаченко Д. Н. Математическая модель для оценки технико-технологических показателей работы железнодорожных станций. *Наука та прогрес транспорту*. 2013. № 3 (45). С. 22–28. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2013/14540>
7. Козаченко Д. М., Журавель І. Л., Левицький І. Ю. Нормування тривалості виконання маневрових пересувань з врахуванням обмеження швидкості руху на окремих елементах прямування составів. *Залізничний транспорт України*. 2014. № 6. С. 30–36.
8. Козаченко Д. Н., Германюк Ю. Н., Манафов Э. К. Организация контроля технологических процессов железнодорожных станций на основании статистических методов. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 4 (82). С. 47–60. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/178426>
9. Кочнев Ф. П., Тихонов К. К., Черномордик Г. И. *Организация движения на железнодорожном транспорте* : учеб. для вузов. Москва : Трансжелдориздат, 1963. 520 с.
10. *Методичні вказівки з визначення норм часу на маневрові роботи, які виконуються на залізничному транспорті*. Наказ Укрзалізниці від 25.03.03. № 072-ЦЗ. Київ : Транспорт України, 2003. 96 с.
11. *Методические указания по расчету норм времени на маневровые работы, выполняемые на железнодорожном транспорте*. Москва : МПС РФ, 1998. 84 с.
12. Михельсон К. П. Лженаука в эксплуатации железных дорог под прикрытием «математики». *Труды МИИТа*. 1937. Вып. 50. С. 51–82.
13. *Нормы времени на маневровые работы, выполняемые на железнодорожных станциях ОАО «РЖД», нормативы численности бригад маневровых локомотивов*. Москва : Техинформ, 2007. 102 с.
14. Образцов В. Н., Никитин В. Д., Бузанов С. П. Станции и узлы. Ч. 1 : *Малые и участковые станции*. Москва : Трансжелдориздат, 1935. 316 с.
15. Одинцов Л. В. *Вопросы теории маневровой работы*. Москва : Трансжелдориздат, 1947. 204 с.
16. Пищик Ф. П. Ученый – основоположник эксплуатационной науки. *Вестник БелГУТа : Наука и транспорт*. 2015. № 2 (30). С. 132–142.
17. Повороженко В. В. *Организация грузовой работы промежуточных станций и движения сборных поездов*. Москва : Трансжелдориздат, 1940. 168 с.
18. *Пособие по проектированию промышленных железнодорожных станций* (к СНиП 2.05.07-85). Москва : Стройиздат, 1990. 199 с.
19. *Правила обслуговування залізничних під'їзних колій*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0875-00#Text>
20. *Руководство по техническому нормированию маневровой работы*. Москва : Трансжелдориздат, 1957. 143 с.
21. *Руководство по техническому нормированию маневровой работы*. Москва : Транспорт, 1964. 131 с.
22. *Руководство по техническому нормированию маневровой работы*. Москва : Транспорт, 1967. 62 с.
23. *Руководство по техническому нормированию маневровой работы*. Москва : Транспорт, 1972. 60 с.
24. *Руководство по техническому нормированию маневровой работы*. Москва : Транспорт, 1978. 54 с.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

25. Стрелко О. Г. Аналіз наукового доробку професора О. М. Фролова (1863–1939) в галузі експлуатації залізниць. *Наукові праці істор. фак-ту Запорізького нац. ун-ту*. 2015. Вип. 4. С. 361–364.
26. Стрелко О. Г., Бердниченко Ю. А. Роль академіка В. М. Образцова в розробці проблем комплексного розвитку транспорту. *Історія науки і техніки*. 2016. Вип. 6 (8). С. 52–61.
DOI: <https://doi.org/10.32703/2415-7422-2016-6-8-52-61>
27. Технический справочник железнодорожника. Т. 13 : *Эксплуатация железных дорог* / ред. Р. И. Робель. Москва : Трансжелдориздат, 1956. 740 с.
28. Тихомиров И. Г. *Основы технологии работы участковых и сортировочных станций*. Москва : Трансжелдориздат, 1958. 184 с.
29. Фролов А. Н. *Наблюдения над маневрами на станциях Аткарск и Ртищево Рязано-Уральской железной дороги*. Санкт-Петербург, 1900. 25 с.
30. Фролов А. Н. *Сборник статей, касающихся станций и маневров*. Саратов, 1906. 143 с.
31. Шмудевич М. И., Стариков А. Е. Особенности нормирования маневровой работы в имитационной модели станции. *Мир транспорта*. 2015. Т. 13, № 5. С. 198–212.
32. Шмудевич М. И., Стариков А. Е. Зависимости времени сортировки состава на вытяжном пути и продолжительности полурейса. *Мир транспорта*. 2016. Т. 14, № 5. С. 46–55.
33. Belošević I., Ivić M. Variable neighborhood search for multistage train classification at strategic planning level. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2018. Vol. 33. Iss. 3. P. 220–242.
DOI: <https://doi.org/10.1111/mice.12304>
34. Hirashima Y. A new design method for train marshaling evaluating the transfer distance of locomotive. *Intelligent Control and Innovative Computing*. 2012. P. 163–176.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1695-1_13
35. Kozachenko D., Bobrovskiy V., Gera B., Skovron I., Gorbova A. An optimization method of the multi-group train formation at flat yards. *International Journal of Rail Transportation*. 2021. Vol. 9. Iss. 1. P. 61–78.
DOI: <https://doi.org/10.1080/23248378.2020.1732235>
36. Lashenyh O., Turpak S., Gritcay S., Vasileva L., Ostroglyad E. Development of mathematical models for planning the duration of shunting operations. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 5, № 3 (83). P. 40–46. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.80752>
37. Nechay T., Roganov V., Zhashkova T., Chirkina M., Lavendels J., Korop G. Improvement of operational planning for shunting service on non-public railway lines. *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science* (Saint-Petersburg, 24–27 April 2019). Saint-Petersburg Mining University. Saint-Petersburg, 2019. Vol. 378. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/378/1/012026>

Д. М. КОЗАЧЕНКО^{1*}, А. І. ВЕРЛАН^{2*}, Р. Г. КОРОБІЙОВА^{3*}

^{1*}Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта kozachenko@upr.diit.edu.ua, ORCID 0000-0003-2611-1350

^{2*}ТОВ з П «Трансінвестсервіс», вул. Чапаєва, 50, с. Візирка, Одеська обл., Україна, 67543, тел. +38 (0482) 30 07 24, ел. пошта averlan@tis.ua, ORCID 0000-0001-7855-8942

^{3*}Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта rgkorobyova@outlook.com, ORCID 0000-0002-6424-1079

Розвиток аналітичних методів розрахунку норм часу на маневрові операції

Мета. Автори статті ставлять за мету проведення аналізу розвитку аналітичних методів нормування тривалості маневрових операцій, а також оцінку їх відповідності наявним умовам роботи залізничного транспорту. **Методика.** Дослідження в цій статті виконано на підставі аналізу літературних джерел і методів теорії організації експлуатаційної роботи залізниць. **Результати.** Нормування тривалості маневрових операцій є однією з найважливіших задач теорії експлуатаційної роботи залізниць. Наявна методика нормування тривалості маневрових операцій склалася в першій половині ХХ століття й використовується до наших днів.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Проведений аналіз показує, що наукові принципи, закладені в основу зазначеної методики, у цілому відповідають умовам роботи залізничного транспорту. У той же час із розвитком математичних методів з'явилася можливість отримувати більш точні оцінки витрат часу на маневрові операції. У статті показано, що застосовувані зараз значення нормативів часу на маневрові операції у багатьох випадках установлено для технічних засобів і технологій, які використовували на залізничному транспорті в 50–70-ті роки XX століття, тому вони не відповідають сучасним умовам роботи станцій і під'їзних колій промислових підприємств та вимагають перегляду. **Наукова новизна.** У цій роботі на підставі аналізу описано процес розвитку методів нормування часу на маневрові операції та встановлено фактори, що впливають на сучасну величину норм. **Практична значимість.** Проведені дослідження дозволяють виявити причини невідповідності між наявними нормативами часу на виконання маневрових операцій і реальними умовами роботи станцій та під'їзних колій промислових підприємств, а також установити основні елементи методики нормування тривалості маневрових операцій, що вимагають перегляду.

Ключові слова: залізничний транспорт; залізнична станція; під'їзна колія; маневрова робота; норми часу

REFERENCES

- Bobrovskiy, V. I., Skovron, I. Ya., Dorosh, A. S., Demchenko, Ye. B., Malashkin, V. V., & Bolvanovskaya, T. V. (2018). Simulation modeling of the process of disbanding multigroup compositions on a double-sided low power hump. *Transport Systems and Transportation Technologies*, 15, 19-26. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2018/150194> (in Russian)
- Vasilev, I. I. (1941). *Grafiki i raschety po organizatsii zheleznodorozhnykh perevozok*. Moscow: Transzheldorizdat. (in Russian)
- Ghorbova, O. V. (2019). Formalization of the technological processes at railway stations based on the step-by-step modeling. *Science and Transport Progress*, 5(83), 71-80. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/181850> (in Ukrainian)
- Kraskovskiy, Ye. Ya., & Uzdin, M. M. (Ed.). (1994). *Istoriya zheleznodorozhnogo transporta Rossii* (Vol. 1: 1836-1917). St. Petersburg. Moscow: AO «Ivan Fedorov». (in Russian)
- Kislyakov, N. T., & Tikhomirov, I. G. (1934). *Organizatsiya zheleznodorozhnykh perevozok*. Moscow: Transzheldorizdat. (in Russian)
- Kozachenko, D. M. (2013). Mathematical model for estimating of technical and technological indicators of railway stations operation. *Science and Transport Progress*, 3(45), 22-28. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2013/14540> (in Russian)
- Kozachenko, D. M., Zhuravel, I. L., & Levitsky, I. U. (2014). The standardization of the duration of shunting movements taking into account speed limits on certain elements of following trains. *Railway transport of Ukraine*, 6, 30-36. (in Ukrainian)
- Kozachenko, D. M., Hermaniuk, Y. N., & Manafov, E. K. (2019). Control organization of technological processes of railway stations on the basis of statistical methods. *Science and Transport Progress*, 4(82), 47-60. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/178426> (in Russian)
- Kochnev, F. P., Tikhonov, K. K., & Chernomordik, G. I. (1963). *Organizatsiya dvizheniya na zheleznodorozhnom transporte: uchebnik dlya vuzov*. Moscow: Transzheldorizdat. (in Russian)
- Metodychni vkazivky z vyznachennja norm chasu na manevrovi roboty, jaki vykonujutsja na zaliznychnomu transporti*. (2003). Kiev: Transport Ukrainy. (in Ukrainian)
- Metodicheskie ukazaniya po raschetu norm vremeni na manevrovye roboty, vpolnyaemye na zheleznodorozhnom transporte*. (1984). Moscow: MPS RF. (in Russian)
- Mikhelson, K. P. (1937). Lzhenauka v ekspluatatsii zheleznykh dorog pod prikrytiem «matematiki». *Trudy MIITa*, 50, 51-82. (in Russian)
- Normy vremeni na manevrovye roboty, vpolnyaemye na zheleznodorozhnykh stantsiyakh OAO «RZhD», normativy chislennosti brigad manevrovyykh lokomotivov*. (2007). Moscow: Tekhninform. (in Russian)
- Obraztsov, V. N., Nikitin, V. D., & Buzanov, S. P. (1935). Stantsii i uzly. In *Malye i uchastkovye stantsii* (Vol. 1.). Moscow: Transzheldorizdat. (in Russian)
- Odintsov, L. V. (1947). *Voprosy teorii manevrovoy roboty*. Moscow: Transzheldorizdat. (in Russian)
- Pishchik, F. P. (2015). Uchenyy - osnovopolozhnik ekspluatatsionnoy nauki. *Bulletin of BSUT: Science and Transport*, 2(30), 132-142. (in Russian)
- Povorozhenko, V. V. (1940). *Organizatsiya gruzovoy roboty promezhutochnykh stantsiy i dvizheniya sbornyykh poezdov*. Moscow: Transzheldorizdat. (in Russian)

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

18. *Posobie po proektirovaniyu promyshlennykh zheleznodorozhnykh stantsiy (k SNiP 2.05.07-85)*. (1990). Moscow: Stroyizdat. (in Russian)
19. *Pravyla obsluhovuvannya zaliznychnykh pidyiznykh kolyi*. (2000). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0875-00#Text> (in Ukrainian)
20. *Rukovodstvo po tekhnicheskomu normirovaniyu manevrovoy raboty*. (1957). Moscow: Transport. (in Russian)
21. *Rukovodstvo po tekhnicheskomu normirovaniyu manevrovoy raboty*. (1964). Moscow: Transport. (in Russian)
22. *Rukovodstvo po tekhnicheskomu normirovaniyu manevrovoy raboty*. (1967). Moscow: Transport. (in Russian)
23. *Rukovodstvo po tekhnicheskomu normirovaniyu manevrovoy raboty*. (1972). Moscow: Transport. (in Russian)
24. *Rukovodstvo po tekhnicheskomu normirovaniyu manevrovoy raboty*. (1978). Moscow: Transport. (in Russian)
25. Strelko, O. G. (2015). The analysis of the professor O. M. Frolov's scientific heritage (1863-1939) in the field of railway operation. *Scholarly Works of the Faculty of History, Zaporizhzhya National University*, 4, 361-364. (in Russian)
26. Strelko, O., & Berdnychenko, Y. (2016). The role of academician V. M. Obratsov in the development of complex transport development issues. *History of Science and Technology*, 6(8), 52-61. DOI: <https://doi.org/10.32703/2415-7422-2016-6-8-52-61> (in Ukrainian)
27. Robel, R. I. (Ed.). (1956). *Tekhnicheskii spravochnik zheleznodorozhnika* (Vol. 13). In *Ekspluatatsiya zheleznykh dorog*. Moscow: Transzheldorizdat. (in Russian)
28. Tikhomirov, I. G. (1958). *Osnovy tekhnologii raboty uchastkovykh i sortirovochnykh stantsiy*. Moscow: Transzheldorizdat. (in Russian)
29. Frolov, A. N. (1900). *Nablyudeniya nad manevrami na stantsiyakh Atkarsk i Rtishchevo Ryazano-Uralskoy zheleznoy dorogi*. St. Petersburg. (in Russian)
30. Frolov, A. N. (1906). *Sbornik statey, kasayushchikhsya stantsiy i manevrov*. Saratov. (in Russian)
31. Shmulevich, M. I., & Starikov, A. E. (2015). Features of regulation of shunting operations in the station simulation model. *World of Transport and Transportation*, 13(5), 198-213. (in Russian)
32. Shmulevich, M., & Starikov, A. (2016). Dependence of train sorting time on the turnout track and duration of semi-trip. *World of Transport and Transportation*, 14(5), 46-55. (in English & in Russian)
33. Belošević, I., & Ivić, M. (2017). Variable Neighborhood Search for Multistage Train Classification at Strategic Planning Level. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 33(3), 220-242. DOI: <https://doi.org/10.1111/mice.12304> (in English)
34. Hirashima, Y. (2011). A new design method for train marshaling evaluating the transfer distance of locomotive. *Intelligent Control and Innovative Computing*, 163-176. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1695-1_13 (in English)
35. Kozachenko, D., Bobrovskiy, V., Gera, B., Skovron, I., & Gorbova, A. (2020). An optimization method of the multi-group train formation at flat yards. *International Journal of Rail Transportation*, 9(1), 61-78. DOI: <https://doi.org/10.1080/23248378.2020.1732235> (in English)
36. Lashenyh, O., Turpak, S., Gritcay, S., Vasileva, L., & Ostroglyad, E. (2016). Development of mathematical models for planning the duration of shunting operations. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(3(83)), 40-46. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.80752> (in English)
37. Nechay, T., Roganov, V., Zhashkova, T., Chirkina, M., Lavendels, J., & Korop, G. (2019). Improvement of operational planning for shunting service on non-public railway lines. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 378, pp. 1-8). DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/378/1/012026> (in English)

Received: Oct. 09,2020

Accepted: Feb. 08,2021

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

UDC 629.3:656.13.021.2

D. P. KHODOSKIN^{1*}

^{1*}Dep. «Road Transport and Road Traffic Management», Belarusian State University of Transport, Kirova St., 34, Republic of Belarus, Gomel, 246653, tel. +37 (529) 733 96 12, e-mail hodoskinaolga@gmail.com, ORCID 0000-0002-0870-0250

Determination of Reserves for Reducing Delays and Increasing the Capacity of the Street-Road Network in Gomel as a Factor of Reducing Losses in Traffic

Purpose. Often, the existing level of traffic capacity of road network facilities in large cities is insufficient. This is often due to the fact that urban growth is significantly ahead of the reconstruction and renovation of the corresponding infrastructure. As a result, traffic delays of various kinds occur on city roads, accompanied, first of all, by economic losses. Therefore, the search for reserves to reduce various types of losses associated with insufficient traffic capacity of the road network when organizing urban traffic is the purpose of this work. **Methodology** To determine the reserves for increasing the traffic capacity of the road network and reducing various kinds of delays, the method of deterministic analysis was used, the method for calculating the cycle according to F. Webster, based on the use of phase coefficients and time lost in the cycle (as the sum of transient intervals), the method for measuring the intensity of car traffic in the traffic flow, as well as the methodology for calculating economic losses arising from delays in the movement of vehicles. **Findings.** A study of delays and time expenditures and the corresponding economic losses that occur at typical objects of the city's street-road network (regulated intersections) has been carried out. The reserves of their reduction, and as a consequence, the increase in the capacity of both individual sections and the city's road network as a whole, have been determined. **Originality.** The use of this method on real objects of the road network allows developing the scientific interpretation of the methods used and expanding the scope of their application. **Practical value.** Assessment of emerging problems of traffic capacity and associated losses (including economic ones) makes it possible to determine the most promising ways to determine the traffic capacity reserves and, as a result, reduce economic losses.

Keywords: traffic capacity; road network; accident losses; economic losses; infrastructure; road traffic

Introduction

In one form or another, losses are present in all spheres of activity and, accordingly, have a different form – from wasted time to human losses. At the same time, almost any of them can be interpreted from the standpoint of the economy – to calculate economic losses using (if necessary) the cost estimates of objects and phenomena and the corresponding coefficients. Losses in road traffic are classified into economic, environmental, accident and social. In terms of scale, economic losses significantly exceed all combined. In addition, this type significantly affects the level of well-being of the population of our country, however, they are

masked and merge with really inevitable costs, as a result they get used to them and they seem to be not noticed. However, they are almost equally distributed among all members of society as various taxes. Economic losses mean unnecessary delays caused, for example, by a speed decrease in comparison with the norm, as well as stops and overruns of transport, delays of passengers and pedestrians, excessive fuel consumption, wear or damage to the vehicle due to poor-quality traffic conditions, etc.

Traffic loss is the socio-economic cost of the non-compelled costs of the driving process. When determining economic losses from traffic delays at a regulated intersection, a uniform speed of

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

60 km/h is taken as the normative one. Anything that differs from this regime in the direction of decreasing speed and increasing unevenness is considered to be an unforced cost that causes losses. However, this speed at a controlled intersection is only possible for transit traffic flows. At the same time, for turning, especially for right-turning traffic flows, in most cases it is physically unattainable, since it is determined by a relatively small turning radius of the trajectory of traffic flows [2, 3, 4, 5, 8, 9].

Turning radii are determined by many factors, a certain number of which does not depend on the organization of traffic, therefore they must be measured, and not determined by calculation. Consequently, less than 60 km/h speed of turning traffic flows to some extent is a forced cost and does not lead to losses. Therefore, in each specific case, for turning traffic flows, it is necessary to determine the maximum speed, below which unforced costs begin, which already lead to losses. The determination of the reference speed of turning traffic flows is carried out taking into account the tasks being solved, depending on the turning radius of the trajectory of the movement, which is determined according to the scale plan of the object.

Purpose

The existing level of traffic capacity in large cities is rarely sufficient. This is often due to the fact that urban growth is significantly ahead of the reconstruction and renewal of the corresponding infrastructure. As a result, traffic delays of various kinds occur on city roads, accompanied primarily by economic losses. Therefore, finding opportunities to reduce various kinds of losses associated with insufficient traffic capacity of the road network when organizing urban traffic is the purpose of this work.

Methodology

To determine the reserves for increasing the traffic capacity of the road network and reducing various kinds of delays, the method of deterministic analysis was used, the method for calculating the cycle according to F. Webster, based on the use of phase coefficients and time lost in the cycle (as the sum of transient intervals), the method for measuring the intensity of car traffic in the traffic flow, as well as the methodology for calculating economic losses

arising from delays in the movement of vehicles. And Rankin's «Traffic Loss Determination» methodology was also used, with some changes corresponding to the specific object of the road network under study.

Findings

Economic losses at controlled intersections are usually calculated only for controlled traffic. Economic losses in uncontrolled traffic are insignificant – less than losses in controlled traffic, which is explained by the low traffic intensity, so they are not calculated. A certain compensation for these losses is made by choosing the annual fund of time for the operation of the road network facility and a certain increase in the estimated traffic intensity compared to the average value. Losses from traffic and pedestrian traffic costs are calculated. Among the costs of traffic, delays, stops, overrun and excessive fuel consumption are considered, and when pedestrians are moving, delays and overruns. Of greatest interest in the analysis of the object under consideration are the costs associated with the movement of vehicles. Transport delays and stops are calculated for each lane in each direction, and the losses caused by them are summed up within the intersection. Over-mileage and losses from it are determined only in the case of prohibition or assignment of turns, which, as a rule, is accompanied by over-mileage with all the ensuing consequences. Losses from excessive consumption of fuel are determined for the so-called calculated total traffic flow. Pedestrian delays are determined for each pedestrian crossing, and losses from them are added up within the intersection. Pedestrian repassage and losses from it are determined only in the case of the closure of the pedestrian crossing or significant (more than 6 m from the pavement line) assignment of the crossing from the intersection [10].

Losses on the stretch are determined for transport from delays, stops, over-mileage and excessive fuel consumption. Stops on the stretch can occur in the event of overload, the presence of an unregulated pedestrian crossing, etc., delays can also occur when the average technical speed of the traffic flow differs from the normative one (60 km/h). In this case, losses from excessive fuel consumption are also determined. The overtravel

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

often occurs outside the investigated stretch, however, the losses from the overtravel are calculated, since its cause lies in the investigated coordinated direction.

When determining the cost of unit costs, the value of the gross domestic product, the cost of fuel, the cost of the car and its operation, as well as the loss of profit by consumers (10% of the cost of costs) due to irrational use of the car are also taken into account.

The cost of excessive fuel consumption when calculating losses at a regulated intersection was included in the cost of delays, stops and overruns of transport and is not calculated separately. The numerical values of the specific overrun and specific overtravel are determined from the results of experimental measurements or are specified in the initial data. The values of specific delays, specific stops and specific fuel consumption are determined by calculation.

Using the example of a typical regulated intersection located in a residential area of Gomel-city, we will consider measures to reduce delays and thereby reduce economic losses.

This intersection connects Mazurova Street with entrances to sleeping areas and to the parking lot to the Almi and Vesta stores (Figure 1). Near this crossroads there are residential buildings, bus stops for route vehicles, various shops. Thus, the flow of vehicles is diverse (cars and trucks, public transport, etc.).

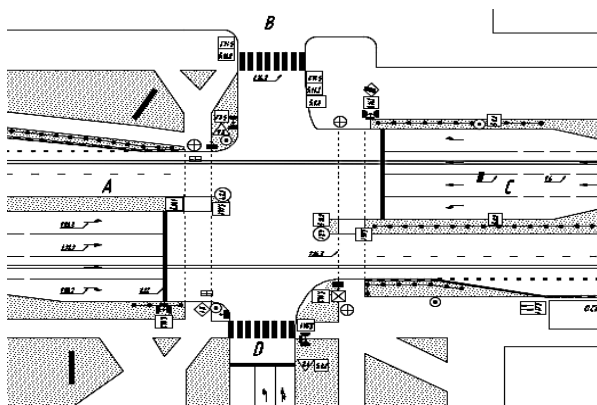


Fig. 1. The scheme of the investigated controlled intersection

The main road, Mazurova Street, has a G2 road category. Accordingly, there are two carriageways – 2 lanes in each direction (entrances A and C), the width of which is 4 m, however, when approaching

the intersection, there are additional lanes for making maneuvers (turns left and right). Secondary road – entrances to shops (entrances B and D) – they have three lanes (two of which face the intersection), at entrance B the width of each lane is 3.5 m, and at entrance D the width of the carriageway is 9 m. There is a dividing strip on the Mazurova Street. The main flows of vehicles move from entrances A and C, the direction of their movement is predominantly transit.

Traffic delays are a measure of the effectiveness of traffic management. At a controlled intersection, they primarily depend on the quality of the traffic light cycle, the optimization of which is one of the ways to reduce economic losses. The traffic light facility is one of the most significant places where economic losses are concentrated, mainly from delays and transport stops. In turn, delays and stops of transport are the most important indicators of the functioning of a traffic light object and their determination is necessary when calculating and optimizing a traffic light cycle [6, 7, 11, 12].

Knowing the average arrival rate $q=1/T$ and departure rate $q_H=1/T_H$, as well as the duration of the cycle (C) and the green signal (t_g), we can determine the total delay value by dividing it by the number of cars passed, defined as:

$$n = q \cdot C. \quad (1)$$

In the first, very rough approximation, it can be assumed that each stopped car is delayed for a time equal to half the time the red signal is on. Since for stopped cars, in the first approximation, the proportion of the red signal in the cycle is proportional, the specific delay is approximately equal to:

$$d \approx \left(\frac{t_{kp}}{2} \right) \cdot \left(\frac{t_{kp}}{C} \right) = \frac{t_{kp}^2}{2 \cdot C}, \text{ s} \quad (2)$$

where t_{kp} – duration of the prohibition signal on, s; C – duration of the traffic light cycle, s.

Considering that $t_{kp} = C \cdot (1 - \lambda)$, we can write:

$$d \approx \frac{C \cdot (1 - \lambda)^2}{2}, \quad (3)$$

where λ – the proportion of the green signal in the cycle:

$$\lambda = \frac{t_z}{C}, \quad (4)$$

where t_z – duration of green signal on, s.

This formula is used for rough calculations when evaluating options for organizing traffic on large sections of the road network, most often at the initial design stage. However, this formula does not take into account several very significant factors.

First, the arrival is far from uniform – both in terms of the number of arriving vehicles at the stop line per cycle, and the moment of their arrival within the cycle itself.

Departure of vehicles from stop lines (saturation flow) can be equally uneven, which is associated with the composition of the traffic flow, the location of vehicle types in front of the stop line (for example, trucks and buses first, and then cars, or vice versa), and also an extreme variety of driving conditions. Finally, relatively short-term overloads are possible, when not all vehicles manage to pass the stop line in a given cycle and remain for the second, or even the third - fourth cycle. Taking into account these factors and their combinations, the calculation of the transport delay becomes sharply complicated and it is almost impossible to obtain accurate values. Therefore, the approach proposed by F. Webster has gained widespread acceptance, which considers two components of the total delay - deterministic and random:

$$d = d_1 = d_2, \quad (5)$$

where d_1 – deterministic component, corresponding to the uniform arrival and departure of the vehicles; d_2 – the random component, taking into account the random nature of the arrival and departure of the vehicle.

In expanded form, Webster's formula takes the form:

$$d = \frac{C \cdot (1 - \lambda)^2}{2 \cdot (1 - \lambda \cdot X)} + \frac{X^2}{2 \cdot q \cdot (1 - X)} - 0.65 \cdot X^{2+5\lambda} \cdot \sqrt[3]{\frac{C}{q^2}}, \quad (6)$$

where X – the traffic load factor;

$$X = \frac{q}{q_H \cdot \lambda}, \quad (7)$$

where q – arrival rate, auto/s; q_H – saturation flux, auto/s.

It was found that the simplified Webster's formula gives good enough results:

$$d = 0.45 \cdot \left[\frac{C \cdot (1 - \lambda)^2}{1 - \lambda \cdot X} + \frac{X^2}{q \cdot (1 - X)} \right] \quad (8)$$

Webster's formula is not applicable in the area of very high loads, when $X \rightarrow 1$ and overloads, when $X > 1$, which is clearly seen from its structure, where the expression $(1 - X)$ stands in the denominator [1].

Pedestrian delays are determined by the formula:

$$d_n = 0.5 \cdot C \cdot (1 - \lambda_n)^2, \text{ s} \quad (9)$$

where λ_n – the percentage of green signal in the cycle for pedestrians.

For calculations, the lanes from entrance A will be considered. In ten traffic light cycles, 8 cars turned to the right, 17 cars turned left, 157 vehicles turned straight (from the left lane 95 vehicles, from the right 62). The intensity of traffic in the lane for turning to the right is 48 auto/h or 0.013 auto/s, along the lane for the left turn 102 auto/h or 0.028 auto/s, directly from the left lane – 570 auto/h or 0.16 auto/s, directly from the right lane – 372 auto/h or 0.1 auto/s.

Let us calculate the specific delay:

$$d \approx \frac{86 \cdot \left(1 - \frac{44}{86}\right)^2}{2} = 10.32 \text{ s.}$$

The load factor for each lane is:

$$X_{left} = 102 / (1800 \cdot 0.51) = 0.11;$$

$$X_{lstraight1t} = 570 / (1800 \cdot 0.51) = 0.62;$$

$$X_{lstraight2} = 372 / (1800 \cdot 0.51) = 0.41;$$

$$X_{right} = 48 / (1800 \cdot 0.51) = 0.05$$

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Delay of vehicles is:

$$d_{left} = 0.45 \cdot \left[\frac{86 \cdot (1 - 0.51)^2}{1 - 0.51 \cdot 0.11} + \frac{0.11^2}{0.028 \cdot (1 - 0.11)} \right] = 10.1 \text{ s};$$

$$d_{straight1} = 0.45 \cdot \left[\frac{86 \cdot (1 - 0.51)^2}{1 - 0.51 \cdot 0.62} + \frac{0.62^2}{0.16 \cdot (1 - 0.62)} \right] = 16.4 \text{ s};$$

$$d_{straight2} = 0.45 \cdot \left[\frac{86 \cdot (1 - 0.51)^2}{1 - 0.51 \cdot 0.41} + \frac{0.41^2}{0.1 \cdot (1 - 0.41)} \right] = 13 \text{ s};$$

$$d_{right} = 0.45 \cdot \left[\frac{86 \cdot (1 - 0.51)^2}{1 - 0.51 \cdot 0.05} + \frac{0.05^2}{0.013 \cdot (1 - 0.05)} \right] = 9.6 \text{ s}.$$

Pedestrian delay is:

$$d_n = 0.5 \cdot 86 \cdot \left(1 - \frac{40}{86} \right)^2 = 12.3 \text{ s}$$

Traffic at the intersection under study is of high intensity and, as shown by the analysis results, there is a high value of vehicle and pedestrian delays. The investigated intersection is accepted for analysis as typical for the city of Gomel. The number of objects of the road transport network in the city with a similar configuration, traffic light control system and, as a consequence, and similar problems in the field of traffic management is quite large. In this regard, the data obtained can be used as an analytical base for a certain segment of the city's road network. From an economic point of view, the magnitude of the delays obtained can be characterized using the approved reduction coefficients, which take into account not only the magnitude of delays in seconds, but also their type (delays of pedestrians, vehicles of various types). Since the processes occurring in the world economy and the country's economy do not allow an unambiguous assessment of economic losses in national monetary units in the long term, the corresponding reduction coefficients can be used only taking into account the reduction to conventional

monetary units and subsequent conversion into the national currency as of a specific period. This approach will allow the obtained results to be as close to real ones as possible and will make them comparable in different time periods. The resulting value of economic losses from delays only at the considered intersection (as one of the most common types of intersections in Gomel-city among the objects of the road network) is about 5–6 thousand Belarusian rubles (or 2300 conventional monetary units) in year. However, if we take into account the losses associated with delays in the movement of specialized vehicles (ambulances, the Ministry of Emergency Situations, other specialized vehicles), then this amount may increase several times. If we take into account the economic losses for all similar objects of the street and road network, then the annual amount can reach 2–3 % of the city budget (about 2 million conventional monetary units per year). Thus, it is necessary to strive to reduce vehicle delays, increase the traffic capacity of road network facilities (in particular, regulated intersections), which will lead to an increase in traffic speed, a decrease in travel time, fuel consumption, gas pollution and noise.

Originality and practical value

It is important to note that although the method used to analyze the capacity of the selected object of the road network is not completely new, however, its application in the course of a comprehensive assessment of economic losses arising from delays on sections of the road network and their insufficient capacity allows the best not only to determine the emerging economic losses, but also, as a consequence, on the basis of the results obtained, to determine the most promising ways to determine the capacity reserves and reduce economic losses. The use of this method on real objects of the road network allows developing the scientific interpretation of the methods used and expanding the scope of their application.

Conclusions

In conclusion, it should be noted that the main possibilities for reducing delays and the corresponding loss of time (and, as a result, economic losses) can be called the use of a number of measures associated with changing the structure of

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

the traffic light cycle. Since at the intersection under study, in direction A, the two middle lanes are considered more loaded, it is proposed to optimize the traffic light cycle at this intersection.

The regulation cycle is 86 s, the duration of the green signal for pedestrians is 40 s. After the optimization of the traffic light cycle (namely, changing the duration of the green signal for pedestrians,

taking into account the equipment with a safety island) using a specialized software product, pedestrian delays slightly increased, however, transport delays in the two middle lanes decreased by 3 seconds. In addition, this will also lead to a reduction in cases of violation of road traffic rules by pedestrians (namely, crossing a passing part at a prohibiting traffic light).

LIST OF REFERENCE LINKS

1. *Автомобильные перевозки и организация дорожного движения* : справочник / пер. с англ. В. У. Рэнкин, П. Клафи, С. Халберт и др. Москва : Транспорт, 1981. 592 с.
2. Дергунов С. А., Феоктистова К. Б. Подходы к оптимизации пропускной способности улично-дорожной сети. *Тенденции развития науки и образования*. 2018. С. 65–68.
DOI: <https://doi.org/10.18411/lj-10-2018-118>
3. Пальчик А., Додух К. Практическая пропускная способность полосы движения автомобильной дороги. *Modern management review*. 2015. Vol. XX. P. 155–171. DOI: <https://doi.org/10.7862/rz.2015.mmr.12>
4. Birulina A., Chilinger L. Analysis of the development of the street-road network of Tomsk. *Interexpo GEO-Siberia*. 2019. Vol. 3. Iss. 2. P. 17–25. DOI: <https://doi.org/10.33764/2618-981x-2019-3-2-17-25>
5. Dovganiuk, A. The development of the planning structure of the street and road network and the transport infrastru of the city of chernivtsi. *Urban development and spatial planning*. 2020. № 74. P. 102–119.
DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2020.74.102-119>
6. Filatova A., Kazakova G., Muraveva N. Investigation of the parameters sections of the road network in the city of Saratov using simulation. *A Alternative Energy Sources in the Transport-Technological Complex : Problems and Prospects of Rational Use Of*. 2015. Vol. 2, № 1. P. 192–195. DOI: <https://doi.org/10.12737/14019>
7. Gorodokin V., Mavrin V., Almetova Z., Shepeleva E. Method to ensure crossing capacity when limiting the cycle time and roadway width. *Transportation Research Procedia*. 2020. Vol. 50. P. 167–173.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.021>
8. Háznagy A. Street network analysis based on subdistricts of Budapest. *Road and Rail Infrastructure V*. 2018. P. 1607–1613. DOI: <https://doi.org/10.5592/co/cetra.2018.822>
9. Kachmar R. Ya., Lanets' O. S. The impact of parameters of traffic flows of Lviv street-road network on the level of environmental and economic losses. *Transport Technologies*. 2020. Vol. 2020. P. 83–91.
DOI: <https://doi.org/10.23939/tt2020.01.083>
10. Kapskiy D. V., Navoy D. V., Pegin P. A. Development of Model for Traffic Flows on Urban Street and Road Network. *Science & Technique*. 2019. Vol. 18. P. 47–54.
DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-1-47-54>
11. Nemchinov D., Mikhailov A., Martiahin D., Martiahina N. Assessment of the required street and road network development in urban agglomerations. *Urban Transport XXV*. 2019. Vol. 186. P. 1–10.
DOI: <https://doi.org/10.2495/ut190011>
12. Nesterenko D. H. Investigation of the influence of the structure of motor traffic on the efficiency of the use of the road network section. *Intelligence. Innovations. Investment*. 2019. Iss. 1. P. 90–96.
DOI: <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2019-1-90>

Д. П. ХОДОСКІН^{1*}

^{1*}Каф. «Управління автомобільними перевезеннями та дорожнім рухом», Білоруський державний університет транспорту, вул. Кірова, 34, Гомель, Республіка Білорусь, 246653, тел. +37 (529) 733 96 12, ел. пошта hodoskinaolga@gmail.com, ORCID 0000-0002-0870-0250

Визначення резервів зниження затримок і збільшення пропускної здатності вулично-дорожньої мережі м. Гомель як фактор скорочення збитків в дорожньому русі

Мета. Часто наявний рівень пропускної здатності об'єктів вулично-дорожньої мережі у великих містах буває недостатнім. Це пов'язано передусім із тим, що зростання міст значно випереджає реконструкцію й оновлення відповідної інфраструктури. Як наслідок, на міських дорогах виникають затримки руху різного характеру, супроводжувані економічними збитками. Тому пошук резервів для зниження різного роду збитків, пов'язаних із недостатньою пропускною здатністю вулично-дорожньої мережі під час організації міського дорожнього руху, є метою цієї роботи. **Методика.** Для визначення резервів збільшення пропускної здатності вулично-дорожньої мережі та зменшення різного роду затримок застосовано методику детермінованого аналізу, методику розрахунку циклу за Ф. Вебстером, засновану на використанні фазових коефіцієнтів і втраченого в циклі часу (як суму перехідних інтервалів), методику вимірювання інтенсивності руху автомобілів у транспортному потоці, а також методику розрахунку економічних збитків, що виникають у разі затримки руху транспортних засобів. **Результати.** Проведено дослідження затримок руху та витрат часу й відповідних їм економічних збитків, характерних для типових об'єктів вулично-дорожньої мережі міста (регульованих перехресть). Визначено резерви їх зниження і, як наслідок, збільшення пропускної здатності як окремих перегонів, так і в цілому вулично-дорожньої мережі міста. **Наукова новизна.** Застосування зазначеного методу на реальних об'єктах вулично-дорожньої мережі дозволило розвинути наукове інтерпретування використовуваних методик і розширити їх сферу. **Практична значимість.** Оцінка наявних проблем пропускної здатності й супутніх збитків дозволяє визначити найбільш перспективні резерви збільшення пропускної здатності і, як наслідок, зниження економічних збитків.

Ключові слова: пропускна здатність; вулично-дорожня мережа; аварійні втрати; економічні втрати; інфраструктура; дорожній рух

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Renkin, V. U., Klafi, P., & Khalbert, S. (Transl.). (1981). *Avtomobilny eperevozki i organizatsiya dorozhnogo dvizheniya* : spravochnik. Moscow: Transport. (in Russian)
2. Palchik, A., & Dodukh, K. (2015). Practical capacity of road lane. *Modern management review*, XX, 155-171. DOI: <https://doi.org/10.7862/rz.2015.mmr.12> (in Russian)
3. Birulina, A., & Chilingir, L. (2019). Analysis of the development of the street-road network of tomsk. *Interexpo GEO-Siberia*, 3(2), 17-25. DOI: <https://doi.org/10.33764/2618-981x-2019-3-2-17-25> (in English)
4. Dergunov, S. A., & Feoktistova, K. B. (2018). Approaches to optimizing the capacity of the road network. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*, 65-68. DOI: <https://doi.org/10.18411/lj-10-2018-118> (in Russian)
5. Dovganiuk, A. (2020). The development of the planning structure of the street and road network and the transport infrastructure of the city of chernivtsi. *Urban Development and Spatial Planning*, 74, 102-119. DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2020.74.102-119> (in English)
6. Filatova, A., Kazakova, G., & Muraveva, N. (2015). Investigation of the parameters sections of the road network in the city of Saratov using simulation. *Alternative Energy Sources in the Transport-Technological Complex: Problems and Prospects of Rational Use Of*, 2(1), 192-195. DOI: <https://doi.org/10.12737/14019> (in English)
7. Gorodokin, V., Mavrin, V., Almetova, Z., & Shepeleva, E. (2020). Method to ensure crossing capacity when limiting the cycle time and roadway width. *Transportation Research Procedia*, 50, 167-173. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.021> (in English)
8. Háznagy, A. (2018). Street network analysis based on subdistricts of Budapest. *Road and Rail Infrastructure V*, 1607-1613. DOI: <https://doi.org/10.5592/co/cetra.2018.822> (in English)

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

9. Kachmar, R., & Lanets, O. (2020). The impact of parameters of traffic flows of Lviv street-road network on the level of environmental and economic losses. *Transport Technologies*, 2020(1), 83-91.
DOI: <https://doi.org/10.23939/tt2020.01.083> (in English)
10. Kapskiy, D. V., Navoy, D. V., & Pegin, P. A. (2019). Development of Model for Traffic Flows on Urban Street and Road Network. *Science & Technique*, 18(1), 47-54.
DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-1-47-54> (in English)
11. Nemchinov, D., Mikhailov, A., Martiahin, D., & Martiahina, N. (2019). Assessment of the required street and road network development in urban agglomerations. *Urban Transport XXV*, 186, 1-10.
DOI: <https://doi.org/10.2495/ut190011> (in English)
12. Nesterenko, D. H. (2019). Investigation of the influence of the structure of motor traffic on the efficiency of the use of the road network section. *Intelligence. Innovations. Investment*, 1, 90-96.
DOI: <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2019-1-90> (in English)

Received: Oct. 01, 2020

Accepted: Feb. 01, 2021

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

UDC 621.336.2-044.952

I. V. DOMANSKYI^{1*}, V. O. VASENKO²

^{1*}Dep. «Electric Transport», O. M. Beketov National University of Urban Economy, Marshala Bazhanova St., 17, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (056) 736 24 80, e-mail ilya.domanskiy@gmail.com, ORCID 0000-0001-8819-410X

²Municipal Enterprise «Miskelektrotransservis», Aktiubinska St., 24, Kharkiv, Ukraine, 61001, tel. +38 (057) 737 96 58, e-mail vladvasenko2021@gmail.com, ORCID 0000-0001-8613-973X

Improvement of Video Measuring Systems for Electric Traction Network Diagnostics

Purpose. The purpose of the article is system analysis of the state of electric traction networks, as well as methods of complex diagnostics of the contact network from a moving laboratory car to increase the resolution capability of the systems for monitoring the quality of interaction between the contact network and current collectors.

Methodology. The problem was solved by theoretical analysis and experimental studies of the current collection parameters, a generalized model of the device for monitoring the wear of the overhead wire and its functional units in order to determine the factors affecting the control error, as well as the development of methods that reduce the specified error. The apparatus of factor analysis, the theory of optoelectronic circuits and methods of statistical information processing were used. **Findings.** Innovative approaches and qualitatively new diagnostic tools are proposed that allow expanding the functionality of the laboratory cars for testing the contact network for power supply enterprises of electrified railways, industrial and urban electric transport. Hardware and software have been developed to improve the system for measuring the parameters of the overhead wire and other components of the contact network.

Originality. The theoretical maximum permissible, from the point of view of the contact network operation, error in monitoring the wear of the overhead wire and other components of the electric traction network has been determined. A method for increasing the resolution capability of a stereo television system and an adaptive lighting system is proposed. It consists in preliminary image transformation and expansion of the dynamic range of image measurement. The ways of introducing a high-speed real-time compression algorithm and using LED backlighting are proposed. **Practical value.** The quality of the contact network diagnostics in difficult conditions for video surveillance has been improved. A camera with a built-in image compression module without losing its performance is proposed, which allows capturing and transmitting full-frame images to a computing complex for the application of new diagnostic algorithms for contact network components. The modernized video measuring systems for the wear of the overhead wire for monitoring the grounding of the contact network supports are proposed, as well as elements of track facilities located in the visibility zone of specialized cameras, which ensure the operability of the systems at any time of the day at speeds up to 160 km/h. An air curtain subsystem was implemented to protect the cameras.

Keywords: diagnostic systems; contact network; overhead wire wear; optical measurement methods

Introduction

The basis for ensuring the traffic safety is systems for diagnosing the state of infrastructure devices, which allow predicting their possible failures and eliminating emergency situations in a timely manner. A non-redundant link of electrified

lines of railways and urban electric transport is a contact network (CN), the failures of which lead to delays of trains, urban electric transport and, as a consequence, to economic damage [1–12]. An important feature of the CN is its participation in the current collection, which causes the appearance of loads requiring the improvement of interaction

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

models of current collectors with the CN and the development of a theory of high-current contact to improve the diagnostic systems [3, 14]. The uniqueness of the CN places high demands both on the design of its devices and to the methods of their technical operation [4, 7].

Reliable and economical operation of the CN is impossible without automated diagnostic devices that allow detecting the locations of malfunctions or other aberrations, as well as analysing them to develop managerial decisions to ensure the uninterrupted movement of the rolling stock [9, 11–13, 16].

Railway and industrial companies in many countries strive to eliminate interruptions in the movement of trains and electric industrial and urban electric transport through high-quality diagnostics of the CN and malfunction repair. In this case, the economic aspect associated with the optimization of the service life of the CN devices and, first of all, the overhead wire (OW) plays the most important role [7, 8].

Today, the triangulation method for determining the height and zigzag of the OW, the phase measuring method based on the use of light sources, the method of monitoring the position of the video camera system and OW wear are known in application. The existing methods are based on one of two basic principles: contactless measurement or contact one, when the sensor is installed on the current collector and touches the overhead wire. Using the contactless systems, measurements can be made at any movement speed, but the measurement accuracy is reduced. Contact systems have higher accuracy, but they provide measurements at low speeds [15, 17].

The optical method of automatic control involves installation of several optical systems on the roof of the laboratory car for testing the contact network (LTCN), which films the catenary suspension with supporting structures on the move from different points and transfers the resulting images to a storage unit.

In the measurement system, specialized high-speed television cameras are used, and fan-shaped raster pulse laser illuminators are used to illuminate the overhead wires.

On the German Railways Network (DBAG), for monitoring small devices, such as bolt heads or torn wire strands of the carrier cable, the optics resolu-

tion is 1–2 mm, and the flash duration when illuminating the object should not exceed 45 μ s. When measuring the OW wear, comparison with previous results is not required. A comparison with the cross-section of the new wire is enough here. The measurement accuracy of this type is 0.1 mm, and a decrease in the wire thickness can be detected already at a length of 2–3 cm [15, 17].

In recent years, qualitatively new diagnostic tools have been developed based on video measuring systems. Their speed and detection reliability when diagnosing the CN elements have been increased. Computing power has been significantly increased, new more advanced photoreceiving components and image processing algorithms have been developed [9, 13–17]. Therefore, there is a scientific problem of improving video measuring diagnostics systems to ensure reliable and economical current collection on electrified lines of railways and urban electric transport.

Purpose

The main purpose of the article is a systematic analysis of the state and development prospects of electric traction networks of electrified railways and urban electric transport, the development of hardware and software for improving video measuring diagnostic tools and expanding the functionality of laboratory cars for testing the contact network.

Methodology

In our opinion, in the current situation, it is necessary to solve the problem of complete replacement of most of the devices of electric traction networks of railways and urban electric transport by investing significant funds in modernization. This is evidenced by the experience of foreign countries. On many railway sections of transport corridors, as well as in large cities, a new CN is required, and only in this case safe and economical operation of the power supply for train traction system and urban electric transport will be ensured [6, 14].

The problem of increasing the resolution capability of the quality control systems of the current collectors and CN's interaction from the moving laboratory car was solved using a complex approach. This approach includes theoretical analysis and experi-

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

mental research of the parameters of the control object – overhead wire (OW), modelling of the control device of the wear of overhead wire and its functional units, determination of factors influencing the control error [3, 4, 7, 10]. At the same time, the apparatus of factorial analysis, the theory of optoelectronic circuits and methods of statistical information processing were used to determine the theoretically maximum allowable error in monitoring the wear of the OW and other components, from the point of view of the operation of CN.

Findings

Analysis of the state and development prospects of electric traction networks of railways and urban electric transport. At all stages of the development of railways, electrification was the leading link in their reconstruction, qualitatively changing the operational work (Fig. 1). For the period 1994–2011 more than 1700 km of the operational length of railways were electrified, the polygon of electrified lines was increased by 21%, while the volume of electric traffic increased to 89.7%. The highest electrification rates were achieved in 2011–2012 on the sections of the accelerated movement of passenger trains with an operational length of 176 km. The specific weight of the length of electrified lines increased to 47.3%, and the specific weight of electric cargo turnover was more than 91.2% [1].

The task of further electrification was planned in the volume of phased implementation: in total for the period 2013–2020 – about 1 841 km. However, this program failed. At the same time, in recent years, there has been a tendency for the development of urban electric transport in large cities.

The rate of ageing of power supply devices, given the existing funding shortfall, continues to outstrip the rate of reconstruction. The length of the electrified lines operated beyond the average period (40 years) increased from 5012 km (or 52.0%) in 2007 to 6393 km (or 62.3%) in 2012, and in 2020 up to 6820 km (or 67.9%). Today, 73% of the total number of traction substations of urban electric transport operate with a service life of more than 40 years, and 43% with a service life of more than 50 years. Thus, a complete reconstruction of more than 80% of the length of the contact network and traction substations of urban electric transport is required. There is no global experience in operating

a contact network with such ageing rates. Specific damage to CN, which has served for 40 years or more, is 2.7 times higher than in the sections with a service life of 10 years [1, 2].

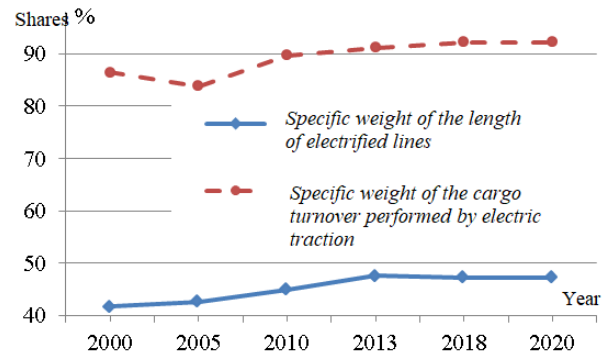


Fig. 1. Specific weight of electric traction in the railway network length and in the total cargo turnover

Analysis of the replacement dynamics of the main CN devices (Fig. 2) shows that the average values and root-mean-square deviations (shown in brackets) have the following values: overhead wire – 188 km (80 km); carrier cable – 134 km (79 km); high-voltage insulators – 40 thousand pcs. (17 thousand pieces); supports – 2340 pcs. (751 pcs.). Thus, the existing rate of replacement of the main devices of the CN is incommensurate to the rate of their ageing, and since 2021, it can cause a snowballing growth of failures [2].

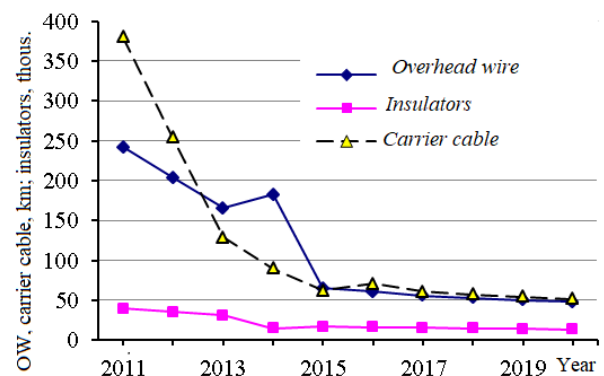


Fig. 2. Replacement dynamics of the main elements of the CN

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Analysis of the number of damages at all junctions of the CN of the railways for different periods shows that the most often fail the overhead wire and cables, insulators, droppers, clamps and parts. Fig. 3 shows the failure dynamics of these devices for railways. This is explained by the fact that structurally all other elements of the CN are designed to support the OW in the set position. Failures of any element of the CN often result in OW failure. On the other hand, the OW is the element of CN that directly interacts with the current collector. Interaction with the current collector during the current collection process causes intensive ageing of wires and a large number of sudden failures caused by malfunctions of the electric rolling stock.

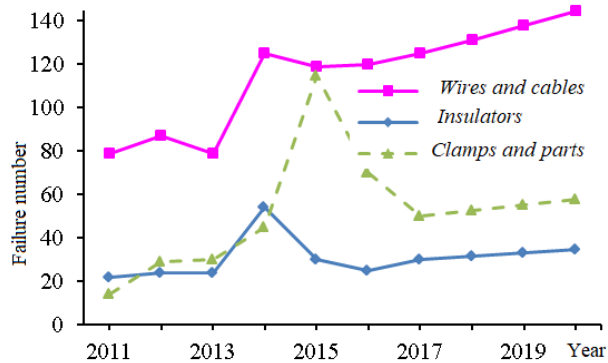


Fig. 3. Failure dynamics of the most damageable catenary devices

Over the past 10 years, there has been a tendency for an increase in the number of CN failures due to mechanical and electromechanical wear of droppers, as well as clamps and parts. The height depletion of the support structures, which occurred on a significant part of the polygon due to multiple track repairs, also became a problem. The specified problem can be solved only with the overhaul repair of the CN [2].

Calculations have shown that over the past 10 years, there have been changes in the failure risks, which reflected the growth of ageing, wear and degradation processes of the CN. The most sig-

nificant is the risk of OW failures. The risk of failures of catenary suspension and current collectors in monetary terms is so great that it requires drastic solutions in the field of investments both in overhaul repair or construction of new catenary suspension and current collectors of electric rolling stock, and in new systems for diagnostics of current collection.

Analysis of damage to power supply devices for urban electric transport shows that the overwhelming amount of damage is accounted for by contact networks, especially in the sections with a service life of more than 40 years. Significantly less damage occurs at traction substations (TS). Damage distribution by the types of devices: CN – 49.7%; TS – 5.4%; cable lines and trackways – 44.6%.

The ratio of mathematical expectations and root-mean-square deviations of damage to the contact network and current collectors as a result of delays of trams and trolleybuses in percent of the total number of delays over the past 10 years are as follows: 194.5 and 15.5, which is 64.3% and 3.4%, respectively.

The need to expand tram and trolleybus lines and modernize power supply devices in a resource-saving environment requires new technologies for the design, construction and operation of infrastructure facilities. For the first time in Kharkiv, a new generation of traction substation with dry transformers, 12-pulse rectification circuits, digital protection and equipment diagnostics was put into operation, ensuring operation according to condition. It is necessary to create automated systems for laboratory cars for testing CN of trams (LTCN–T), which recognize hidden defects in CN (Fig. 4), as well as laboratories on the basis of trolley buses or trucks for trolleybus CN. This task is posed in our country for the first time [7–12].

The modern LTCN–T include an optical-mechanical unit; laser fast-acting system for OW diagnostics; video surveillance and information processing system; additional power supply system; complex control panel and functional panel; rotation angle sensors, stresses, lateral displacements, ambient temperature, car movement speed.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

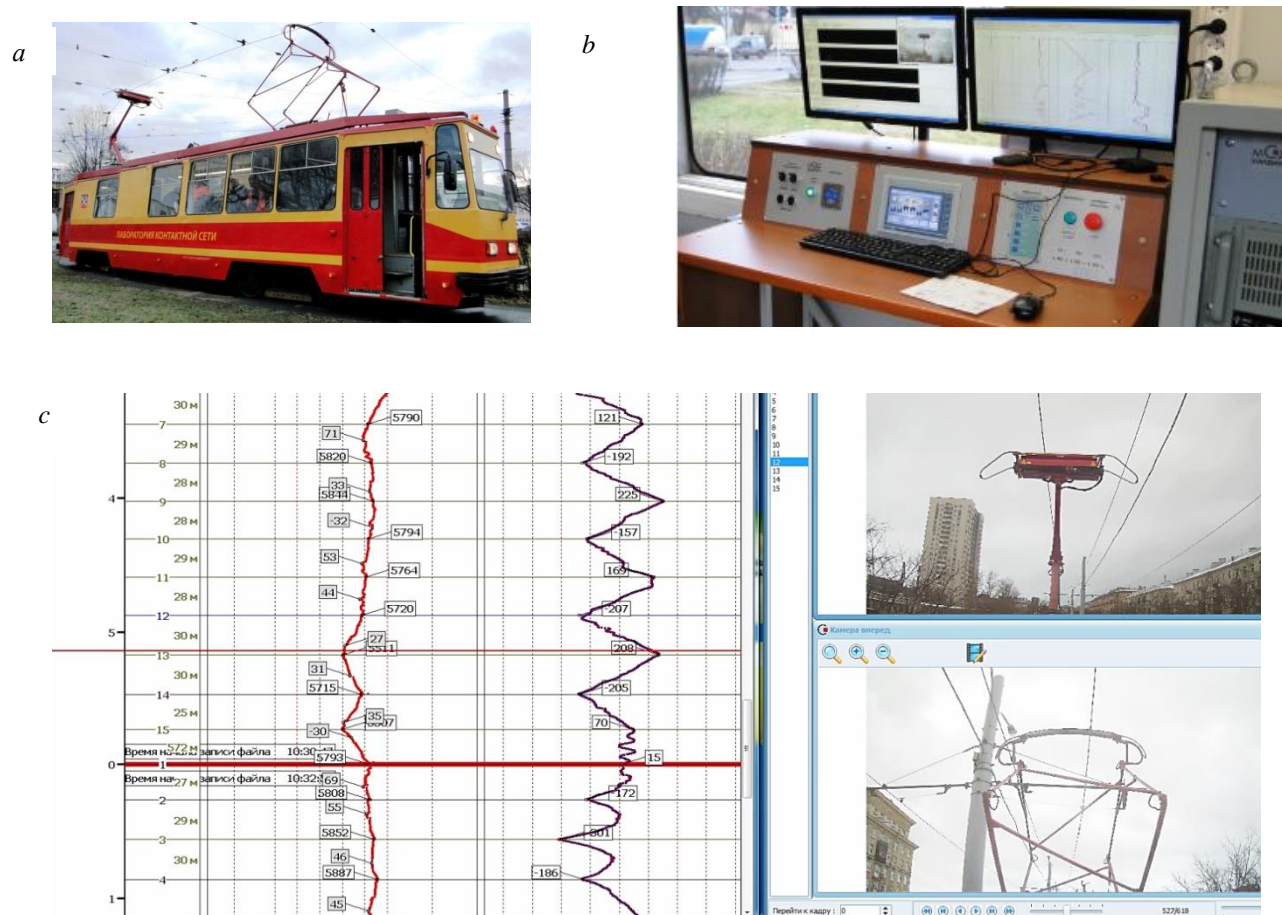


Fig. 4. LTCN–T:

a – appearance; *b* – workplace in the car;
c – operation of the video surveillance system and information processing synchronously
with the determination of the car geolocation

LTCN–T allows controlling the current height position, OW displacement; OW suspension defects; OW wear; distance travelled; movement speed; ambient air temperature; CN voltage; GLONASS/GPS coordinates; CN state with the help of video recording.

The tram laboratory for a comprehensive assessment of the infrastructure state, in addition to the LTCN–T parameters, allows performing measurements of track depression and alignment, longitudinal track gradient, acceleration on the bogie and body, track width, rail wear, CN support dimensions, as well as video monitoring of the rail track, connections of assembling joints, connection of supply cables, inter-rail connections.

For example, a specialized video system (Fig. 4, *c*) records a video image, the viewer of

which is shown on the screen. The programs work synchronously. This makes it possible to stop the tape in the places where clarification is needed (for example, a large zigzag), enter the video program at this place and take a photo with the necessary comment to analyse, issue to the repair site and for serviceability.

The use of LTCN–T allows obtaining objective data on the CN state, conducting an automated assessment of the CN state by one or several passes, linking the measurement results to a place on the map and performing video surveillance of the CN infrastructure. All the above makes it possible to create databases on the state of the contact network, track, cable lines, etc., as well as the conditions for the transition of their service by state. The solution of the problem allows improving the assessment

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

quality of the CN state and reducing the possibility of failures, as well as ensuring energy and resource saving in the process of passenger transportations.

Video measuring systems for diagnostics of contact networks. In recent years, hardware and software have been developed to improve the system for measuring the OW parameters and other CN components. A method for increasing the resolution of a stereo television system and an adaptive lighting system is proposed. It consists in preliminary image transformation and expansion of the dynamic range of image measurement. The quality of CN diagnostics in difficult conditions for video surveillance has been improved. A camera with a built-in image compression module without loss of its fast action has been proposed, which allows capturing and transmitting full-frame images to a computer complex for the application of new CN diagnosing algorithms [8, 10, 15, 16].

The stereo television system is based on a specialized fast-acting television camera of a new generation, and the lighting system can operate both in continuous and in pulsed mode with a duration of light pulses from 20 μ s. Cameras can be equipped with lenses with automatic iris control according to the P-iris standard; serial interface; serial interfaces and high-speed video compression module and frame grabber.

For the enterprises of power supply of electrified railways, industrial and urban electric transport, innovative means of complex diagnostics of the CN state have been developed. They are laboratory cars, which provide monitoring of OW wear, the state of high-voltage insulation, heating of electrical connections, grounding of supports on rail.

An automated video-measuring system for monitoring the CN supports grounding and its other equipment, as well as elements of the track facilities located in the visibility zone of specialized cameras, which ensure the system's operability at any time of the day at speeds up to 160 km/h, is proposed: discretization of image lines along the track length from 0.5 mm; the value of the electronic shutter at a speed of 160 km/h is not more than 22 μ s; the number of pixels in a line is at least 1000. An air curtain subsystem is implemented to protect the cameras.

Development of new diagnostic tools for the contact network and improving the efficiency of existing ones is a priority area of activity of DAK-

Energetika LLC, which carries out the entire range of works, including research, design, manufacture, installation, commissioning, warranty and service.

The manufactured measuring equipment is included in the State Register of Measuring Instruments and Register of Measuring Instruments, Test Equipment and Methods of Measurements Used in Ukrainian Railway OJSC, and is metrologically certified and protected by patents.

Improvement of WEAR laser fast-acting system for measuring the parameters of the contact wire. The Aptima MT9M413C36STC video sensor used in the WEAR system has a 100-bit output data bus that transmits a block of 10-bit brightness readings of 10 neighbouring pixels of the current line per one cycle of the operating frequency f_z . Each line of the image has a size of 1280 pixels and is transmitted in a block consisting of 128 f_z cycles. For contactless measuring of the profile of the worn out OW part, measuring the position of the OW relative to the current collector axis, detecting OW overturns and lateral slopes of the OW clips (dropper, pull-off, etc.), LTCN is equipped with WEAR fast-acting laser diagnostic OW system.

This diagnostic system belongs to the group of systems that measure OW wear by its profile, their operating principle is indicated in [8, 10, 13].

The measuring system consists of 8 laser fan-shaped emitters, in which the collimated laser beam is converted into a flat fan out light beam 0.3–0.6 mm thick using a spreading system, and 4 matrix television cameras. When the fan beam of light strikes the OW, a visible line of its intersection with the plane is formed on the wire surface, in which the correct beam lies. It is this intersection line that is distinguished by the processing system from the resulting image of the current frame of the television camera. In this case, the shape of the fixed line weakly depends on the OW inclination and is mainly determined by its wear. The program provides the ability to display a 3-D OW model with imposed measured wear for the selected camera (Fig. 5).

The use of LED illumination, which effectively illuminates the entire surface of the lower part of the overhead wire and clamps, together with the possibility of obtaining a full frame of the image at the input of the information-computing complex, can significantly increase the informativeness of the

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

WEAR system. Thus, many unclear situations caused by the insufficient informativeness of the measuring system can be resolved in real time by

visual or programmatic assessment of the received frames corresponding to the CN section that causes questions.

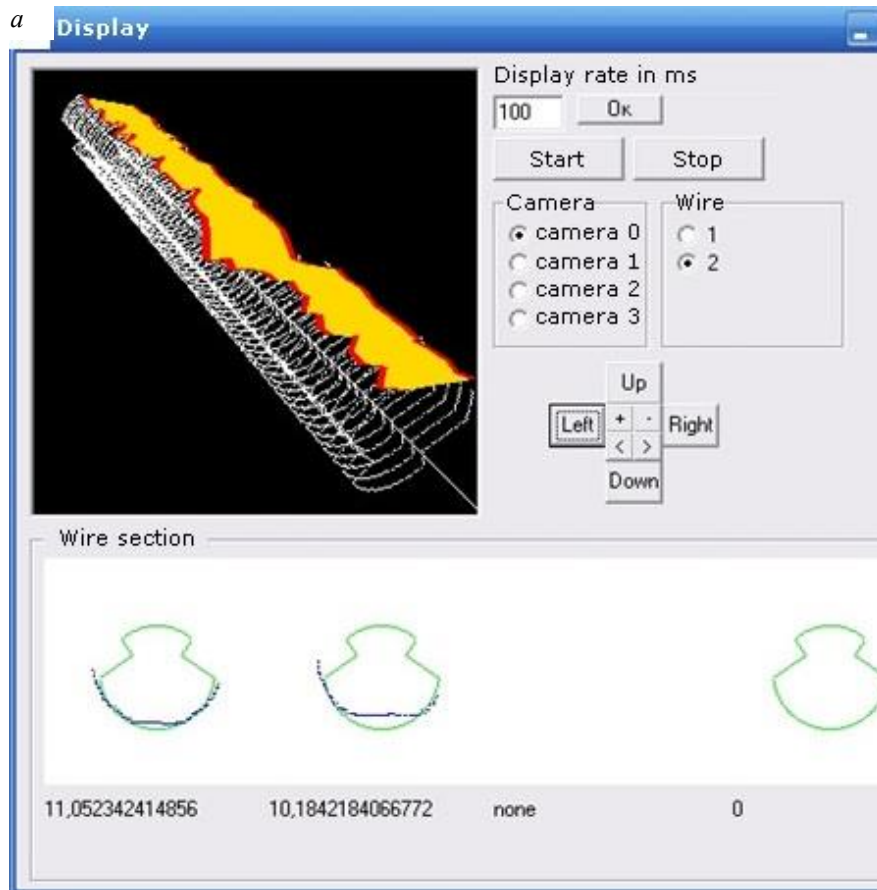


Fig. 5. Reconstructed 3-D model of the worn-out section of the OW (a) and a photograph of this place (b)

The second important aspect of the WEAR system modernization is the need to obtain full-frame illuminated images of the CN elements at a high speed for continuous scanning of objects of interest. Based on the optical characteristics of the lenses, the frame resolution and the distance at which the cameras are located relative to the measured objects, the field of view along the OW is $l = 37$ mm. The maximum speed at which the WEAR system operates is $v = 72$ km/h. The maximum time T of receiving one frame, at which continuous scanning of the CN is provided, is determined by the expression $T = c \cdot (l / v)$, where $c = 0.0036$ is the reduction coefficient of values to the SI system.

With the given values l and v $T = 0.00185$ s, which corresponds to the frequency of obtaining frames $f = 541$ fps.

The required bandwidth of the channel C for transmitting only an uncompressed image for a frame with a resolution r and a bitness of one pixel n is determined by the following expression: $C = r \cdot n \cdot f$. With $r = 1\,280 \cdot 128$ and $n = 10$ $C = 846$ Mb/s.

Test results of the WEAR system. The automated system for measuring the wear of the overhead wire installed on the LTCN was tested along the 1 and 2 station track in variable cloud conditions at a temperature of $+28^{\circ}\text{C}$. A double contact wire MF-100 is suspended within the test section. Automated measurements were carried out at a measuring car speed of 37 km/h.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Manual wear measurements were taken between the 69th and 71st supports along the first station track. For accurate synchronization of measurements, manual measurements were carried out next to the dropper and pull-off clips, since such places can be easily identified using the measurement data from the WEAR system. The measurements results are given in Table 1.

It was found that at the points being checked, the difference between the automated measurements of the WEAR system and manual measurements of the residual height does not exceed 0.26 mm.

Table 1

**Results of manual and automated
measurements
of OW wear along the first station track**

Distance from support, cm	Manual measurements, mm		Wear system measurement, mm		Error, mm	
	left	right	left	right	left	right
0	10.47	8.1	10.3	8.35	0.17	–0.25
075	9.57	9.49	9.5	9.29	0.07	0.2
150	10.13	9.57	10.16	9.54	–0.03	0.03
850	9.45	8.92	9.8	8.9	–0.35	0.02
1 875	9.36	9.1	9.3	8.98	0.06	0.12
2 875	8.5	9.38	8.65	9.05	–0.15	0.23
3 745	8.17	8.75	8.25	8.9	–0.08	–0.15
4 025	9.8	8.71	9.5	8.76	0.2	–0.05
4 085	9.24	8.71	9.7	8.7	–0.26	0.01
4 875	9	8.93	9.12	8.93	–0.12	0.11
5 850	9.8	9.35	9.5	9.2	0.24	0.23
6 000	9.37	9.67	9.2	9.5	0.16	0.26
6 075	9.2	9.76	9	9.61	0.25	0.15

During the test drive on the second station track, several places were found where, due to lateral wear of the overhead wire, the wear area reached the clamp itself, as a result of which the bite wear began (Fig. 5).

The difference between manual and automatic measurements (Table 2) does not exceed 0.33 mm in the residual wire height, except for the reference

point at the mark of 4 473 cm (right wire), where there is strong lateral wear of the wire and an error could be made during manual measurements.

Table 2

**Results of manual and automated measurements
of OW wear along the second station track**

Distance from support, cm	Manual measurements, mm		Wear system measurement, mm		Error, mm	
	left	right	left	right	left	right
0	11.5	11.5	11.4	11.3	0.1	0.2
25	9.25	10.4	9.11	10.43	0.14	–0.03
1 075	9.27	11.2	9.04	10.63	0.23	0.57
1 174	9.27	11.75	9.35	11.7	–0.08	0.05
1 211	9.38	11.65	9.19	11.63	0.19	0.02
1 982	9.75	10.95	9.78	10.88	–0.03	0.07
2 767	9.45	10.12	9.89	9.855	–0.24	0.265
2 839	10.1	10.15	10.03	10.01	0.07	0.14
3 557	10.45	11.55	10.37	11.7	0.08	–0.15
4 390	11	11.15	10.73	10.94	0.27	0.21
4 408	9.32	11.25	8.9	11.05	0.32	0.2
4 420	11	11.05	10.7	10.75	0.3	0.3
4 446	11.65	11.15	11.32	10.85	0.33	0.3
4 473	11.27	11.16	11.1	10.35	0.17	0.81

Originality and practical value

The theoretical maximum permissible, from the point of view of the contact network operation, wear control error of the overhead wire and other components of the electric traction network has been determined. A method for increasing the resolution capability of a stereo television system and an adaptive lighting system is proposed, which consists in preliminary image transformation and expansion of the dynamic range of image measurement.

The quality of diagnostics of the contact network in difficult conditions for video surveillance has been improved. A camera with a built-in image compression module without loss of its performance has been proposed, which allows capturing and transmitting full-frame images to a computer

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

complex for the application of new diagnostic algorithms for the components of the contact network of electrified railways and urban electric transport.

Conclusions

To reduce the wear of the overhead wire and current collector plates, to ensure reliable and economical current collection in the process of transportation by electric transport, high-quality diagnostics of the electric traction network is required. The proposed video system has the following speed charac-

teristics: obtaining a JPEG image with a compression ratio of $k > 10$ and a resolution of 1 280 x 128 at a speed of 976 fps. In this case, the required maximum speed of compressed data transfer does not exceed 85 Mb/s. The system is equipped with fast-acting LED backlighting, which makes it possible to obtain a continuous illuminated image of the CN elements in real time. Thus, the improvement of the WEAR laser fast-acting system can significantly increase the reliability and reduce the detection time of emerging OW malfunctions and other CN components.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. *Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2011 році*. Київ : «Укрзалізниця», Головне Управління Електрифікації та Електропостачання, 2012. 323 с.
2. *Аналіз роботи господарства електропостачання в 2015 році*. Київ : ПАТ «Українська залізниця», Департамент Електропостачання, 2016. 148 с.
3. Вологин В. А. *Взаимодействие токоприемников и контактной сети*. Москва : Интекст, 2006. 256 с.
4. Доманський В. Т., Переверзев К. В. Концепція технічного обслуговування пристроїв електропостачання залізниць за станом на базі їх діагностики і моніторингу. *Українська залізниця*. 2019. № 3 (69). С. 9–13.
5. Доманський І. В. *Основи енергоефективності електричних систем з тяговими навантаженнями* : монографія. НТУ «ХПІ». Харків : вид-во ТОВ «Центр інформації транспорту України», 2016. 224 с.
6. Корниенко В. В., Котельников А. В., Доманський В. Т. *Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы (Аналитический обзор)* : монографія. Киев : Транспорт Украины, 2004. 196 с.
7. Переверзев К. В. Современные методы и средства диагностики контактных сетей электрифицированных железных дорог. *Українська залізниця*. 2019. № 6 (72). С. 23–27.
8. Столбов П. В. Высокоскоростная специализированная матричная камера с расширенным динамическим диапазоном и сжатием изображения. *Материалы 14-ой международной конференции «Телевидение : передача и обработка изображений»* (Санкт-Петербург, 27–28 июня 2017 г.). Санкт-Петербург, 2017. С. 54–57.
9. Хворост М. В., Доманський І. В., Васенко В. О. Ресурсозберігаючі технології експлуатації контактної мережі за станом для міського електротранспорту. *Світлотехніка та електроенергетика*. 2020. Вип. 58, № 02. С. 3–9. DOI: <https://doi.org/10.33042/2079-424X-2020-2-58-3-9>
10. Шевяков С. М., Сиротинин В. И., Сафин В. Г., Воронин А. В. Видеоизмерительные системы диагностики контактной сети. *Евразия Вести*. 2017. № 11. С. 23.
11. Demydov O., Liubarskyi B., Domanskyi V., Glebova M., Iakunin D., Tyshchenko A. Determination of optimal parameters of the pulse width modulation of the 4qs transducer for electric rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 5. Iss. 5 (95). P. 29–38. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.143789>
12. Domanskyi I., Kozlova O. Development prospects of external power supply electrical networks of traction substations. *Series : Engineering Science and Architecture*. 2020. Vol. 1. Iss. 154. P. 8–15. DOI: [10.33042/2522-1809-2020-1-154-8-15](https://doi.org/10.33042/2522-1809-2020-1-154-8-15)
13. Information technology – digital compression and coding of continuous-tone still images – Requirements and guidelines. URL: <https://www.w3.org/graphics/jpeg/itu-t81.pdf> (дата звернення: 05.01.2021)
14. Kiessling F., Puschmann R., Schmieder A., Schneider E. *Contact Lines for Electric Railways : Planning, Design, Implementation, Maintenance, 3rd Edition*. Wiley Publishers, 2017. 994 p.
15. Sarnes B. Измерительная система для определения положения и износа контактного провода. *Elektrische Bahnen*. 2001. № 12. С. 490–495.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

16. Schmidt H., Schmieder A. Current collection for high-speed transport. *Elektrische Bahnen*. 2005. № 4. P. 231–236.
17. Sohei Y., Toshihide K., Hiroshi Y. Utilization of Data Obtained Using Power Equipment Monitoring System Equipped to Series E235 Rolling Stock. *JR EAST Technical Review*. 2016. № 34. P. 33–36.

I. В. ДОМАНСЬКИЙ^{1*}, В. О. ВАСЕНКО²

^{1*}Каф. «Електричний транспорт», Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (056) 736 24 80, ел. пошта ilya.domanskiy@gmail.com, ORCID 0000-0001-8819-410X

²Комунальне підприємство «Міське електротранссервіс», вул. Актюбінська, 24, Харків, Україна, 61001, тел. +38 (057) 737 96 58, ел. пошта vladvasenko2021@gmail.com, ORCID 0000-0001-8613-973X

Удосконалення відеовимірювальних систем діагностики електротягової мережі

Мета. Основною метою статті є системний аналіз стану електротягових мереж, а також методів комплексної діагностики контактної мережі (КМ) з рухомого вагона-лабораторії для підвищення роздільної здатності систем контролю якості взаємодії контактної мережі і струмоприймачів. **Методика.** Поставлену задачу вирішено шляхом теоретичного аналізу та експериментальних досліджень параметрів струмозняття, узагальненої моделі пристрою контролю зносу контактної мережі (КП) та його функціональних вузлів із метою визначення факторів, що впливають на похибку контролю, а також розробки методів, що знижують зазначену похибку. При цьому використано апарат факторного аналізу, теорію оптико-електронних схем і методи статистичної обробки інформації. **Результати.** Запропоновано інноваційні підходи та якісно нові діагностичні засоби, що дозволяють розширити функціональні можливості вагонів-лабораторій випробування контактної мережі для підприємств електропостачання електрифікованих залізниць, промислового й міського електротранспорту. Розроблено апаратні та програмні засоби для вдосконалення системи вимірювання параметрів контактної мережі та інших компонентів контактної мережі. **Наукова новизна.** Визначене теоретичну максимально допустиму, із точки зору експлуатації контактної мережі, похибку контролю зносу контактної мережі та інших компонентів електротягової мережі. Запропоновано метод підвищення роздільної здатності стереотелевізійної системи й адаптивної системи освітлення, що полягає в попередній трансформації зображення й розширенні динамічного діапазону вимірювання зображення. Запропоновано шляхи впровадження високошвидкісного алгоритму стиснення реального часу й застосування світлодіодного підсвічування. **Практична значимість.** Підвищено якість діагностики контактної мережі в складних для відеоспостереження умовах. Запропоновано камеру із вбудованим модулем стиснення зображення без втрати її швидкодії, що дозволяє захоплювати й передавати в обчислювальний комплекс повнокадрові зображення для застосування нових алгоритмів діагностики компонентів контактної мережі. Запропоновано модернізовані відеовимірювальні системи вимірювання зносу контактної мережі, контролю заземлення опор контактної мережі, а також елементів колійного господарства, розташованого в зоні видимості спеціалізованих камер, які забезпечують працездатність систем у будь-який час доби на швидкостях до 160 км/год. Для захисту камер реалізовано підсистему повітряної завіси.

Ключові слова: системи діагностики; контактна мережа (КМ); знос контактної мережі (КП); оптичні методи вимірювань

REFERENCES

1. *Analiz roboty hospodarstva elektryfikatsiyi ta elektropostachannya v 2011 rotsi.* (2012). Kiev: «Ukrzaliznytsya», Holovne Upravlinnya Elektryfikatsiyi ta Elektropostachannya. (in Ukrainian)
2. *Analiz roboty hospodarstva elektropostachannya v 2015 rotsi.* (2016). Kiev: PAT «Ukrayins'ka zaliznytsya», Departament Elektropostachannya. (in Ukrainian)
3. Vologin, V. A. (2006). *Vzaimodeystvie tokopriemnikov i kontaktnoy seti.* Moscow: Intekst. (in Russian)
4. Domanskyi, V. T., & Pereverzyev, K. V. (2019). Kontseptsiya tekhnichnoho obsluhovuvannya prystroyiv elektropostachannya zaliznyts za stanom na bazi yikh diahnostyky i monitorynhu. *Ukrainian Railway*, 3(69), 9–13. (in Ukrainian)

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

5. Domanskyi, I. V. (2016). *Osnovy enerhoefektyvnosti elektrychnykh system z tyahovymy navantazhennyamy: monohrafiya*. NTU «KhPI». Kharkiv: vydavnytstvo TOV «Tsentr informatsiyi transportu Ukrayiny». (in Ukrainian)
6. Kornienko, V. V., Kotelnikov, A. V., & Domanskyi, V. T. (2004). *Elektrifikatsiya zheleznykh dorog. Miroye tendentsii i perspektivy (Analiticheskiy obzor): monografiya*. Kiev : Transport Ukrainy. (in Russian)
7. Pereverzev, K. V. (2019). Sovremennye metody i sredstva diagnostiki kontaktnykh setey elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog. *Ukrainian Railway*, 6(72), 23-27. (in Russian)
8. Stolbov, P. V. (2017). Vysokoskorostnaya spetsializirovannaya matrichnaya kamera s rasshirennym dinamicheskim diapazonom i szhatiemy izobrazheniya. *Materialy 14-oy mezhdunarodnoy konferentsii «Television: images broadcasting & processing»* (pp. 54-57). St. Petersburg, Russia. (in Russian)
9. Khvorost, M., Domanskyi, I., & Vasenko, V. (2020). Resource-saving technologies of operation of a contact network on the state for city electric transport. *Lighting Engineering & Power Engineering*, 2(58), 3-9. DOI: <https://doi.org/10.33042/2079-424X-2020-2-58-3-9>. (in Ukrainian)
10. Shevyakov, S. M., Sirotnin, V. I., Safin, V. G., & Voronin, A. V. (2017). Videoizmeritelnye sistemy diagnostiki kontaktnoy seti. *Yevraziya Vesti*, 11, 23. (in Russian)
11. Demydov, O., Liubarskyi, B., Domanskyi, V., Glebova, M., Iakunin, D., & Tyshchenko, A. (2018). Determination of optimal parameters of the pulse width modulation of the 4qs transducer for electric rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(5(95)), 29-38. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.143789> (in English)
12. Domanskyi, I., & Kozlova, O. (2020). Development prospects of external power supply electrical networks of traction substations. *Series: Engineering Science and Architecture*, 1(154), 8-15. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2020-1-154-8-15> (in English)
13. Information technology-digital compression and coding of continuous-tone still images-Requirements and guidelines. Retrieved from <https://www.w3.org/graphics/jpeg/itu-t81.pdf> (in English)
14. Kiessling, F., Puschmann, R., Schmieder, A., & Schneider, E. (2017). *Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance, 3rd Edition*. Wiley Publishers. (in English)
15. Sarnes, B. (2001). Izmeritelnaya sistema dlya opredeleniya polozheniya i iznosa kontaktnogo provoda. *Elektrische Bahnen*, 12, 490-495. (in Russian)
16. Schmidt, H., & Schmieder A. (2005). Current collection for high-speed transport. *Elektrische Bahnen*, 4, 231-236. (in English)
17. Sohei, Y., Toshihide, K., & Hiroshi, Y. (2016). Utilization of Data Obtained Using Power Equipment Monitoring System Equipped to Series E235 Rolling Stock. *JR EAST Technical Review*, 34, 33-36. (in English)

Received: Oct. 02, 2020

Accepted: Feb. 02, 2021

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

UDC 669.017.16:624.954

Y. I. HEZENTSVEI¹, D. O. BANNIKOV^{2*}

¹Metinvest Engineering LCC, Yaroslava Mudroho St., 53, Dnipro, Ukraine, 49038, tel. +38 (067) 611 57 91, e-mail efim.gezentsvey@metinvestholding.com, ORCID 0000-0003-1190-5465

^{2*}Dep. «Construction Production and Geodesy», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 400 43 07, e-mail bdo2020@yahoo.com, ORCID 0000-0002-9019-9679

Use of Fine-Grained Heat-Strengthened Steels to Increase the Operation Qualities of Bunker Capacities from Thin-Walled Galvanized Profiles

Purpose. The work is aimed to study the use efficiency of fine-grained heat-strengthened steels (mainly 10G2FB) for steel bunker capacities. At the same time, the structural scheme of such a structure using corrugated steel sheets is considered as the main variant. **Methodology.** To achieve this purpose, a series of numerical calculations was carried out for a steel bunker capacity of a pyramidal-prismatic type with overall dimensions in plan view of 6×5.2 m and a total height of 4.5 m. The capacity was designed for complicated working conditions, in particular, increased loads, including long-term dynamic ones. The potential possibility of operating the container under conditions of high or low temperatures was also taken into account. At the same time, both the traditional structural scheme of a bunker capacity with horizontal stiffening ribs and the developed structural scheme based on corrugated steel sheets were analyzed. The calculations were carried out by the finite element method based on the SCAD for Windows project complex. **Findings.** Based on the results of the analysis and comparison of the data obtained in numerical calculations, it was found that the use of fine-grained heat-strengthened high-strength steels (for example, steel 10G2FB) for bunker capacities, both the traditional structural scheme with stiffening ribs and the developed structural scheme based on corrugated sheets, allows reducing material consumption by about 30% in both cases. At the same time, due to the good performance of fine-grained heat-strengthened steel 10G2FB, both at high and at low temperatures, it can be effectively used for steel bunker capacities that work in difficult conditions. **Originality.** The possibility and efficiency of the use of fine-grained, heat-strengthened high-strength steels for the construction of a steel bunker capacity is estimated. At the same time, such an estimation was given not only for structures of the traditional structural scheme with horizontal stiffening ribs, but also for bunkers with a developed structural scheme based on corrugated sheets. **Practical value.** From a practical point of view, quantitative parameters of the stress-strain state were obtained during investigations of various design variants for a steel bunker capacity. The data are presented in a compact form that is easy to evaluate and compare. They allow us to state about the improvement of the operation characteristics of capacities and the potential reduction of the risks of their failures and accidents during operation.

Keywords: fine-grained heat-strengthened steel; thin-walled galvanized profile; finite element method; bunker capacity

Introduction

In recent decades, a fairly new and interesting direction in the practice of creating and further operation of building structures for various purposes is the use of thin-walled galvanized profiles. Some features of their production and application in

modern conditions of Ukraine are described in the publication of a master's student of Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (DNURT), whose thesis was devoted to this issue [2].

Thin-walled galvanized profiles are widely used for steel silo capacitive structures designed

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

mainly for grain storage. However, various factors often cause failures and accidents of such structures [3]. The situation is further complicated by the small thickness of the profiles themselves (not more than 3 mm), which forces creating packages of several sheets connected by bolts (Fig. 1).



Fig. 1. Packages of sheets from thin-walled galvanized profiles for steel silo capacitive structures

Such silo capacities are often installed at facilities related to transport and storage operations. These include, for example, railway stations or river and seaports.

In addition to silo capacities, bunker tanks are also often located at such facilities. They, like silos, perform the technological functions of accumulation and dosed distribution of bulk material stored in them over time.

Regarding bunker tanks, especially those operating under difficult production conditions and designed for high loads, one of the co-authors of this article, Professor D. O. Bannikov, has developed a special design scheme [10]. It is designed to absorb not only static but also dynamic loads, which are quite significant in bunker-type tanks.

However, to obtain the desired load-bearing ability, it is often necessary to lay in the hopper structure thickness of the load-bearing elements not less than 10 mm. This is especially true in the case of operation of such facilities under adverse and complicated conditions: high loads, low or high temperatures. It is for these conditions that the use of fine-grained heat-strengthened high-strength steels of the 10G2FB type instead of traditional steels of the usual St3 type proved to be quite efficient. It was tested on the example of blast-furnace jacket structures and confirmed its high practical

efficiency [4]. The choice of steel type is due to the new technological capabilities of Metinvest Engineering OJSC, which has mastered the production of such steels with improved mechanical properties and an expanded range of sheet thicknesses.

10G2FB steel was used during the design of the steel pyramidal-prismatic bunker of the bypass track of furnace-charge feeding. The customer of the object is Pivnichstal PJSC, so the bunker facilities operate at low temperatures.

The general description of a design of these bunker constructions, the theoretical substantiation of possibility and efficiency of use of steel 10G2FB are presented in the separate publication [15]. The bunkers are made according to the traditional structural scheme with horizontal reinforcing stiffening ribs. The calculated economic effect in the prices of 2019 amounted to about 0.5 million UAH (almost \$ 20,000), and the total weight reduction was about 4 tons per bunker with dimensions of 6×5.2 m in plan, with a total height of 4,5 m and a usable volume of 40 m³.

However, as has been repeatedly noted in the monograph [10], as well as in many other works by Professor D. O. Bannikov, the traditional structural scheme with stiffening ribs has certain reserves of load-bearing ability. It is possible to use them due to the specially developed panel structural scheme based on corrugated sheets of steel.

Purpose

In regard to the above, the purpose of our publication is to study the efficiency of fine-grained heat-strengthened steels (mainly grade 10G2FB) for steel bunker tanks. Thus, structural scheme of such structure with the use of corrugated steel sheets variant was considered as the basic.

Methodology

First of all, it should be noted that the work of corrugated steel sheets is quite complex. The current normative document of Ukraine on the design of steel structures [6] does not pay special attention and does not contain relevant recommendations for the design of such structural elements.

This issue is partially addressed in a recently published monograph [1]. However, the corresponding analytical solutions, even for the simplest cases, have a whole system of empirical correction factors.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Thus, in the domestic research practice there are actually no full-fledged theoretical developments that would allow theoretical determining of the load-bearing ability of corrugated steel sheets.

The situation is further complicated by such an aspect as the lack of clear recommendations in the current regulations [5] to determine the loads from the action of bulk material on the structural elements of the bunker capacity.

Since the use of corrugated steel sheets for capacitive structures is the newest direction in construction, the foreign literature is also quite limited in terms of the application of analytical approaches. For example, in the classic monograph [12] there is no information on such topics.

Currently, in foreign practice there are only partial studies of corrugated profiles, primarily closed-type profiles [14]. Another part of the research covers the search for more efficient protective surfaces for thin-walled profiles [13]. Also, some studies raise the issue of mounting and manufacturing of structures of thin-walled profiles [17].

However, even the accumulated European experience in the calculation and design of corrugated profiles, presented in the national standards [7, 8], which are translations of the relevant European standards, is quite limited. These standards provide only general recommendations for determining the stress-strain state for some cases, but there are no full analytical solutions.

Given this situation, as the main research method the finite element method was chosen, which has become extremely popular in recent decades and which is constantly being modernized [20]. Its practical implementation took place on the basis of SCAD for Windows domestic project complex [9]. This choice was made according to the construction orientation of this complex, in contrast to other developments, such as SolidWorks, CosmosWork, Nastran or WinMachine, which have a machine-building orientation [16]. During the research, the experience of school of soil mechanics of DNURT was also used [18, 19].

As already mentioned, steel pyramidal-prismatic bunker was the object of the study. The height of the prismatic part was 0.5 m, and the pyramidal hopper – 4.0 m. The prismatic part also

formed a bunker beam, through which the capacity rested on the elements of the bunker trestle. The width of the discharge mouth, as well as its length were taken equal to 1.2 m, the angle of hopper inclination with such geometric dimensions was about 60°.

Slag scrap, whose density, according to the initial data, reaches 3 t/m³ and the internal friction angle is 45° is provided as one of the loaded bulk materials. The minimum coefficient of dynamics, according to the customer data, was 1.3. In addition, it was necessary to take into account the action of vibrating feeders, whose operation mode is provided around the clock. Technological load from the sole weight of bulk material is set in accordance with the developments presented in the monograph [10].

The constructed finite-element models for research were plate systems (Fig. 2.) The finite element is an isoparametric shell element from the standard library of the SCAD for Windows complex. Fastening of bunker capacities is modeled in such a way to receive the hinged scheme of their operation.

Findings

A separate issue during the research was to determine the characteristics of steels, provided for the design of steel bunker capacity. The tests were conducted by a specialized organization, State Enterprise Ya. Yu. Osada Scientific Research Tube Institute (SE SRTI). Both the chemical composition of steels (Table 1) and their tensile mechanical characteristics for different temperatures were determined separately (Table 2).

The chemical composition was determined by photoelectric spectral analysis on Spectromax X LMM04 atomic emission spectrometer manufactured by SPECTRO in Germany. According to the test protocols, the room temperature was +24 °C, relative humidity – 40%.

The mechanical characteristics were established during the tensile test of standard cylindrical specimens with a diameter of 10 mm on a test machine type P-5.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

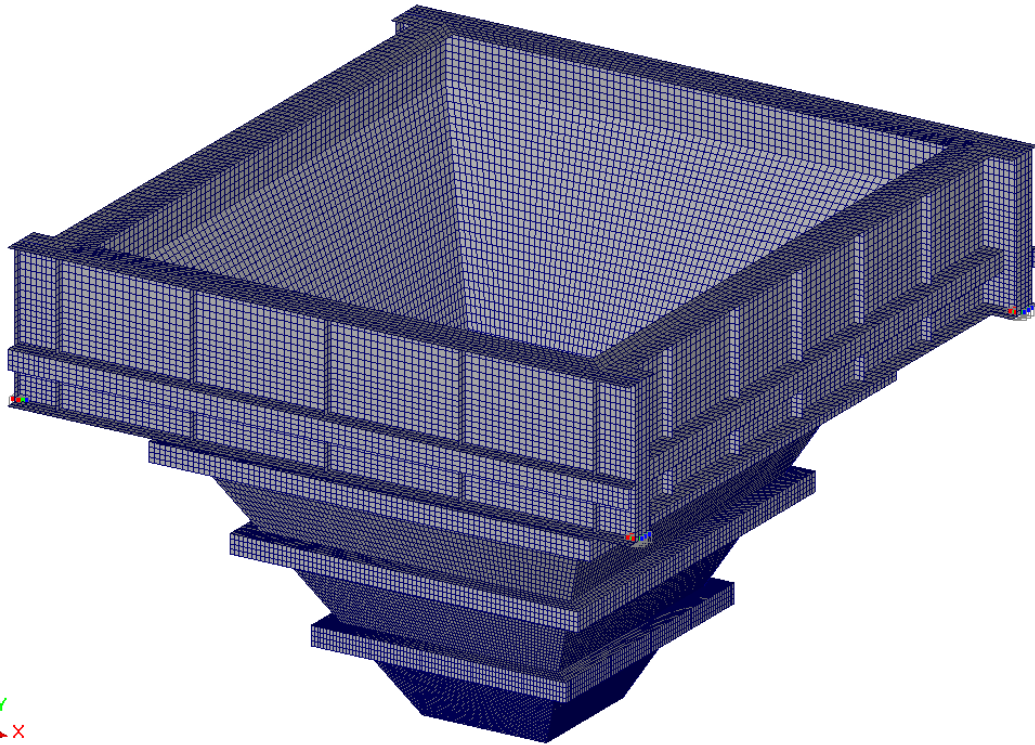
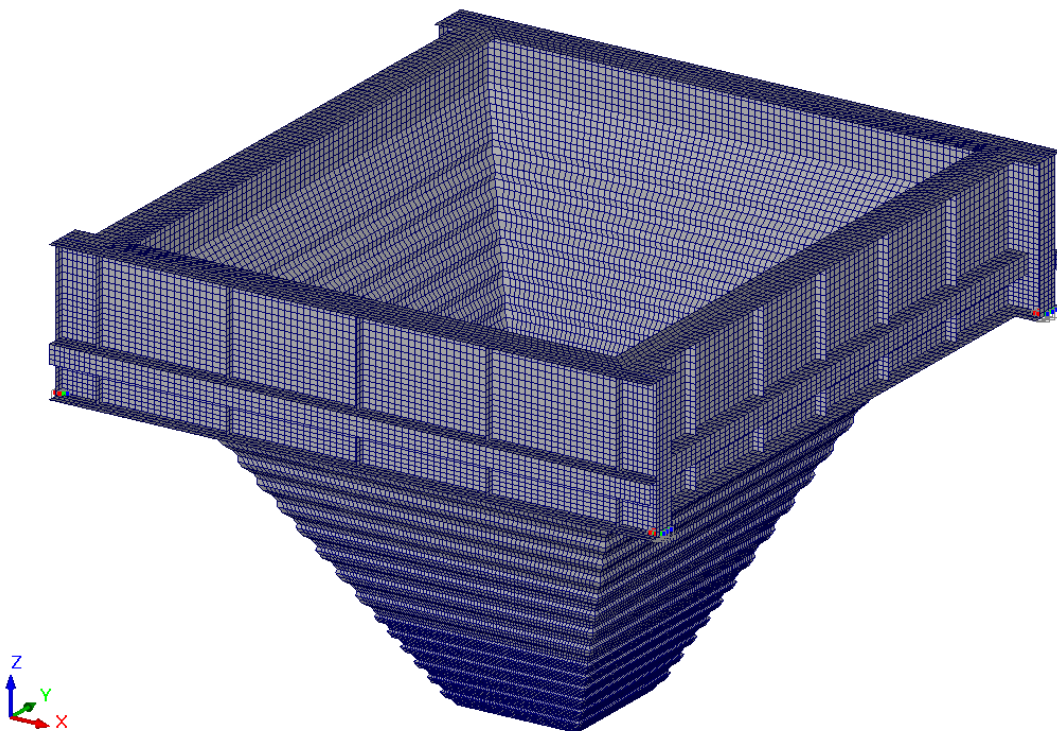
a*b*

Fig. 2. Finite-element model of steel hopper capacity:
a – traditional structural scheme with horizontal stiffening ribs;
b – developed structural scheme with horizontal corrugated elements

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Thus, based on the obtained test results in terms of operation of the bunker capacity under difficult conditions of high loads, as well as high and low temperatures, 10G2FB steel grade was the best. It has a mixed structure of fine ferrite and dispersed carbide and of the second phase carbonitride, which is achieved by microalloying and controlled rolling with the addition of chromium, niobium, vanadium and titanium. These admixtures have a grinding effect on the original austenitic grain [11]. It also provides 10G2FB steel with good impact resistance at $KCV^{-15} = 59 \text{ J/cm}^2$ and $KCU^{-60} = 39 \text{ J/cm}^2$. Therefore, steel grade 10G2FB was taken as the main for the design of steel bunker capacity.

As a result of the numerical calculations, quantitative results were obtained (Table 3), and the general pictures of the deformed state are shown in Fig. 3 (for ease of perception, half of the model is presented).

As can be seen from the results obtained, for the bunker capacity designed with horizontal corrugated elements, the deformed state is more uniform. Accordingly, the stress state is also more uniform, with fewer stress concentrators, which is very important for difficult operating conditions (especially for low temperatures). Weight indicators remain almost the same.

Table 1

Chemical composition of tested steels

Steel grade	Mass fraction of elements, %					
	Carbon (C)	Manganese (Mn)	Silicon (Si)	Sulfur (S)	Phosphorus (P)	Chromium (Cr)
St3sp	0.16	0.50	0.20	0.004	0.009	0.04
09G2S	0.09	1.64	0.55	0.004	0.009	0.03
10G2FB	0.09	1.64	0.55	0.004	0.009	0.03
Steel grade	Mass fraction of elements, %					
	Nickel (Ni)	Copper (Cu)	Vanadium (V)	Aluminum (Al)	Niobium (Nb)	Titanium (Ti)
St3sp	0.03	0.01	–	0.04	–	–
09G2S	0.05	0.03	0.001	–	–	–
10G2FB	0.05	0.03	0.001	0.033	0.05	0.02

Table 2

Mechanical properties of tested steels

Steel grade	Test temperature, °C	Yield strength, MPa		Strength limit σ_b , MPa	Relative elongation, δ_5 , %	Contraction ratio, ψ , %
		$\sigma_{0.2}$	σ_T			
St3sp	+20	–	278	418	36	67
	+600	108	–	155	60	87
	+800	37	–	55	83	76
09G2C	+20	–	343	492	36	74
	+600	167	–	227	40	85
	+800	63	–	48	91	77
10G2FB	+20	–	462	584	27	65
	+600	258	–	285	27	83
	+800	73	–	84	59	86

Table 3

Quantitative results of numerical analysis

Indicator	Constructive scheme with horizontal			
	stiffening ribs		corrugated elements	
	St3sp steel	10G2FB steel	St3sp steel	10G2FB steel
Stability coefficient	13.41	5.14	15.27	6.43
Wall deflection, mm	7.27	14.24	5.15	7.35
Weight, kg	15 456	11 216	15 532	11 310

It should also be noted that the presence of a corrugated surface on the inside of the bunker capacity creates additional opportunities for special self-lining due to the retention of bulk material. In the practice of design, this method of lining the inner surface is created artificially, attaching special horizontal retaining elements, which in turn increases the complexity of manufacturing the structure.

Originality and practical value

This publication evaluates the possibility and efficiency of using fine-grained high-strength steels for the construction of steel bunker capaci-

ties. And the similar estimation is given not only for constructions of the traditional structural scheme with horizontal stiffening ribs, but also for bunkers with the developed structural scheme on the basis of corrugated sheets.

From the practical point of view in the course of the conducted researches of various structural variants of steel bunker capacity, quantitative indicators of a stress-strain state are received. The data is presented in a compact and easy to evaluate and compare form. They suggest an improvement in the performance of bunkers and a potential reduction in the risk of their failure and accidents during operation.

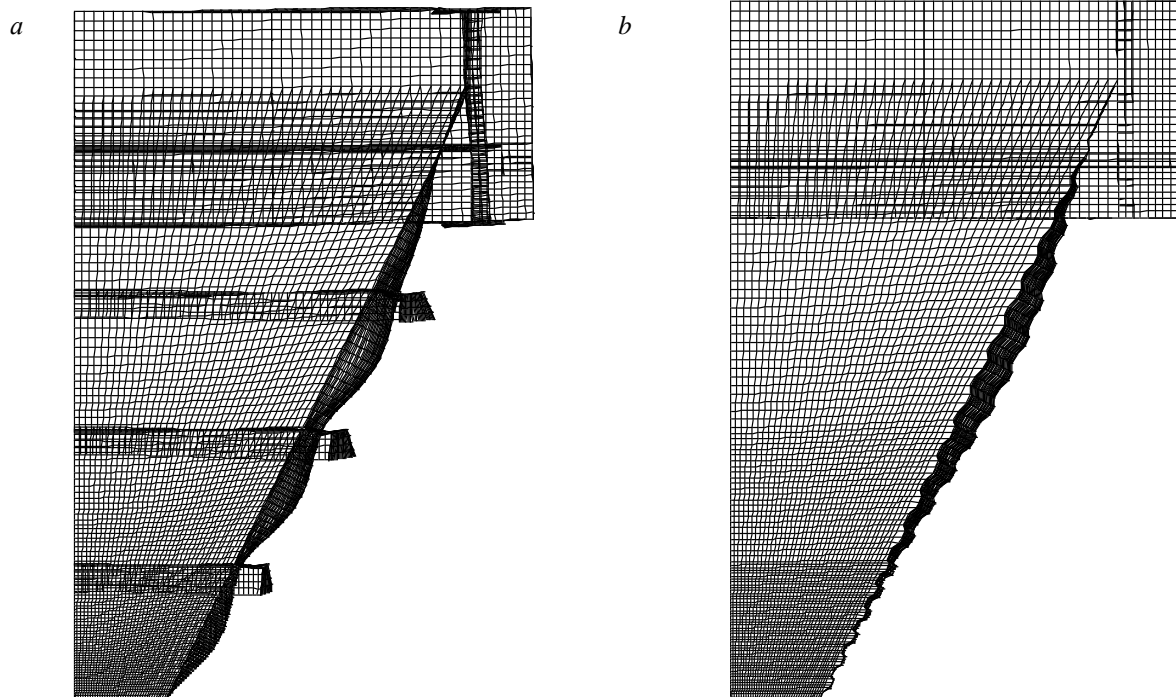


Fig. 3. Deformed state of steel bunker capacity made of 10G2FB steel:

a – traditional structural scheme with horizontal stiffening ribs;*b* – developed structural scheme with horizontal corrugated elements

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Conclusions

Based on the assessment of the stress-strain state of the steel bunker capacity, made of steels of different grades, it should be stated the following:

1. The use of fine-grained heat-resistant steels of high strength (for example, 10G2FB steel grade) for bunker capacities of both traditional structural scheme with stiffening ribs, and developed structural scheme based on corrugated sheets can reduce the material consumption of the structure by about 30% in both cases.

2. Due to good performance at both high and low temperatures, fine-grained heat-resistant steel grade 10G2FB can be effectively used for steel bunkers operating under difficult conditions. Such conditions include working conditions in the northern regions or with hot bulk materials.

3. It should be noted the possibility of improving the performance of steel bunker capacities, in particular durability and reliability, due to the improved mechanical properties of the steel type used. In operation, this potentially reduces the possible costs of repairing and maintaining bunker capacities.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Баженов В. А., Перельмутер А. В., Ворона Ю. В., Отрашевська В. В. *Варіаційні принципи будівельної механіки. Нариси з історії*. Київ : Каравела, 2018. 924 с.
2. Банніков Д. О. Аварії та відмови сталевих тонкостінних циліндричних силосів для зернових культур. *Мости та тунелі : теорія, дослідження, практика*. 2019. № 15. С. 6–17. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2019/172336>
3. Безсалий В. М., Банніков Д. О. Ефективність сталевих тонкостінних оцинкованих профілів для аркових елементів. *Мости та тунелі : теорія, дослідження, практика*. 2019. № 16. С. 20–29. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2019/189428>
4. Гезенцвей Е. И. Технологичность применения мелкозернистых термоупрочненных сталей в конструкциях кожухов доменных печей. *Промислове будівництво та інженерні споруди*. 2016. № 3. С. 43–47.
5. ДБН В.2.2-8-98. Підприємства, будівлі і споруди по зберіганню та переробці зерна. [Чинний від 1998-01-07]. Вид. офіц. Київ : Держбуд, 1998. 41 с.
6. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. [Чинний від 2015-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон, 2014. 205 с.
7. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-3:2012. Національний стандарт України. Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-3. Загальні правила. Додаткові правила для холодноформованих елементів і профільованих листів. (EN 1993-1-3:2005, IDT). [Чинний від 2014-01-07]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд та ЖКГ України, 2012. 14 с.
8. ДСТУ-Н Б EN 1993-4-1:2012. Національний стандарт України. Єврокод 3: Проектування сталевих конструкцій. Частина 4-1: Силоси, (EN 1993-4-1:2007, IDT). [Чинний від 2021-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд та ЖКГ України, 2017. 64 с.
9. Карпиловский В. С., Криксунов Э. З., Маляренко А. А., Фиалко С. Ю., Перельмутер А. В., Перельмутер М. А. *SCAD Office. Версия 21. Вычислительный комплекс SCAD++*. Москва : СКАД СОФТ, 2015. 848 с.
10. Качуренко В. В., Банников Д. О. *Конструктивные решения стальных емкостей для сыпучих материалов* : монография. Днепропетровск : Новая идеология, 2016. 168 с.
11. Малинов Л. С., Бурова Д. В., Малышева Е. И. Способы повышения свойств стали 10Г2ФБ, обеспечивающие ее применение по новому назначению и энергосбережение. *Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении*. 2017. № 2. С. 72–74.
12. Edwin H., Gaylord Jr., Gaylord Ch. N., Stallmeyer J. E. *Structural Engineering Handbook*. McGraw-Hill, 1997. 1368 p.
13. Gronostajski Z., Kaczyński P., Polak S., Bartczak B. Energy absorption of thin-walled profiles made of AZ31 magnesium alloy. *Thin-Walled Structures*. 2018. Vol. 122. P. 491–500. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.10.035>
14. He K., Chen Yu., Wan J. Web crippling behavior of grouted galvanized rectangular steel tube. *Thin-Walled Structures*. 2018. Vol. 122. P. 300–313. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.09.032>

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

15. Hezentsvei Yu., Bannikov D. Effectiveness Evaluation of Steel Strength Improvement for Pyramidal-Prismatic Bunkers. *Eureka : Physics and Engineering*. 2020. № 2 (27). P. 30–38.
DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001146>
16. Neduzha L. O., Shvets A. O. Application of APM WinMachine software for design and calculations in mechanical engineering. *Наука та прогрес транспорту*. 2016. № 2 (62). P. 129–147.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/67328>
17. Piekarczyk A., Więch Pr., Cybulski R. Experimental method to evaluate the load-carrying capacity of double corrugated sheet profiles. *Thin-Walled Structures*. 2019. Vol. 144.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263823119302368>.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106283>
18. Tiutkin O., Miroshnyk V., Radkevych A., Alkhdour A. Nonuniform Stress State of a Hoisting Shaft Lining as a Result of Disturbance of the Ground Freezing Technology. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 109. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900099>
19. Tiutkin O., Petrosian N., Radkevych A., Alkhdour A. Regularities of Stress State of Unsupported Working Occurring in a Layered Massif. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 109. P. 1–7.
DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900100>
20. Zhang Y., Ge W., Zhang Y., Zhao Z. Topology optimization method with direct coupled finite element–element-free Galerkin method. *Advances in Engineering Software*. 2018. Vol. 115. P. 217–229.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.09.012>

Ю. І. ГЕЗЕНЦВЕЙ¹, Д. О. БАННИКОВ^{2*}

¹ВАТ «Метінвест Інжиніринг», вул. Ярослава Мудрого, 53, Дніпро, Україна, 49038, тел. +38 (067) 611 57 91, ел. пошта efim.gezentsvey@metinvestholding.com, ORCID 0000-0003-1190-5465

^{2*}Каф. «Будівельне виробництво та геодезія», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 400 43 07, ел. пошта bdo2020@yahoo.com, ORCID 0000-0002-9019-9679

Застосування дрібнозернистих термозміцнених сталей для підвищення експлуатаційних якостей бункерних ємностей із тонкостінних оцинкованих профілів

Мета. У роботі передбачено дослідити ефективність застосування дрібнозернистих термозміцнених сталей (переважно марки 10Г2ФБ) для сталевих бункерних ємностей. При цьому як основний варіант розглянуто конструктивну схему такої споруди з використанням сталевих гофрованих листів. **Методика.** Для досягнення поставленої мети проведено серію чисельних розрахунків сталевих бункерних ємностей пірамідально-призматичного типу з габаритними розмірами в плані 6×5,2 м й загальною висотою 4,5 м. Ємність спроектовано для ускладнених умов роботи, зокрема підвищених навантажень, у тому числі й тривалих динамічних. Також до уваги взято потенційну можливість експлуатації ємності за умов підвищених або понижених температур. При цьому проаналізовано як традиційну конструктивну схему бункерної ємності з горизонтальними ребрами жорсткості, так і розроблену конструктивну схему на основі сталевих гофрованих листів. Обчислення проведено методом скінченних елементів на базі проектного комплексу SCAD for Windows. **Результати.** На підставі аналізу та зіставлення отриманих під час чисельних розрахунків даних установлено, що застосування дрібнозернистих термозміцнених сталей високої міцності (на прикладі сталі марки 10Г2ФБ) для бункерних ємностей як традиційної конструктивної схеми з ребрами жорсткості, так і розробленої конструктивної схеми на основі гофрованих листів дозволяє знизити матеріалоемність споруди приблизно на 30 % в обох випадках. При цьому завдяки хорошим показникам роботи як за підвищених, так і за понижених температур дрібнозерниста термозміцнена сталь марки 10Г2ФБ може бути ефективно застосована для сталевих бункерних ємностей, які працюють в ускладнених умовах. **Наукова новизна.** Оцінено можливість та ефективність застосування дрібнозернистих термозміцнених сталей високої міцності для конструкції сталевих бункерних ємностей. Причому подібну оцінку надано не тільки для споруд традиційної конструктивної схеми з горизонтальними ребрами жорсткості, а й для бункерів із розробленою конструктивною схемою на основі гофрованих листів. **Практична значимість.** Із практичної

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

точки зору в ході проведених досліджень різноманітних конструктивних варіантів сталеві бункерної ємності отримано кількісні показники напружено-деформованого стану. Дані представлено в компактній та зручній для оцінки й зіставлення формі. Вони дозволяють стверджувати про поліпшення експлуатаційних характеристик ємностей і потенційне зниження ризиків їх відмов та аварій під час експлуатації.

Ключові слова: дрібнозерниста термозміцнена сталь; тонкостінний оцинкований профіль; метод скінченних елементів; бункерна ємність

REFERENCES

1. Bazhenov, V. A., Perelmutter, A. V., Vorona, Yu. V., & Otrachevskaya, V. V. (2018). *Variatsiini pryntsyipy budiv-elnoi mekhaniky. Narysy z istorii*. Kiev: Karavela. (in Ukrainian)
2. Bannikov, D. O. (2019). Accidents and failures of steel thin-walled cylindric silos for grain cultures. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 15, 6-17. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2019/172336> (in Ukrainian)
3. Bezsalii, V. M., & Bannikov, D. O. (2019). Efficiency of thin-walled galvanized profiles for arch elements. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 16, 20-29. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2019/189428> (in Ukrainian)
4. Gezentsvey, Ye. I. (2016). Tekhnologichnost primeneniya melkozernistykh termouprochnennykh staley v konstruktivnykh kozhukhov domennykh pechey. *Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy*, 3, 43-47 (in Russian)
5. *Pidpriemstva, budivli i sporudy po zberihanniu ta pererobtsi zerna*, 41 DBN V.2.2-8-98 (1998). (in Ukrainian)
6. *Stalevi konstruktivni. Normy proektuvannya*, 205 DBN B.2.6-198:2014 (2014). (in Ukrainian)
7. *Natsionalnyi standart Ukrainy. Yevrokod 3. Proektuvannya stalevykh konstruktiv. Chastyna 1-3. Zahalni pravyla. Dodatkovy pravyla dlia kholodnoformovanykh elementiv i profilovanykh lystiv. (EN 1993-1-3:2005, IDT) 14 DSTU-N B EN 1993-1-3:2012* (2014). (in Ukrainian)
8. *Natsionalnyi standart Ukrainy. Yevrokod 3: Proektuvannya stalevykh konstruktiv. Chastyna 4-1: Sylosy, (EN 1993-4-1:2007, IDT) 64 DSTU-N B EN 1993-4-1:2012* (2021). (in Ukrainian)
9. Karpilovskyy, V. S., Krykunov, E. Z., Maliarenko, A. A., Fialko, S. Yu., Perelmutter, A. V., & Perelmutter, M. A. (2015). *SCAD Office. Version 21. Computing complex SCAD++*. Moscow: SCAD SOFT. (in Russian)
10. Kachurenko, V. V., & Bannikov D. O. (2016). *Structural decisions of steel capacities for granular materials: monograph*. Dnepropetrovsk: Novaya ideologiya. (in Russian)
11. Malinov, L., Burova, D., & Malysheva, I. (2017). A method for improving the properties of steel 10G2FB, providing its application for a new purpose and energy saving. *New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering*, 2, 72-74. (in Russian)
12. Edwin, H., Gaylord, Jr., Gaylord, Ch. N., & Stallmeyer, J. E. (1997). *Structural Engineering Handbook*. McGraw-Hill. (in English)
13. Gronostajski, Z., Kaczyński, P., Polak, S., & Bartczak, B. (2018). Energy absorption of thin-walled profiles made of AZ31 magnesium alloy. *Thin-Walled Structures*, 122, 491-500. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.10.035> (in English)
14. He, K., Chen, Yu., & Wan, J. (2018). Web crippling behavior of grouted galvanized rectangular steel tube. *Thin-Walled Structures*, 122, 300-313. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.09.032> (in English)
15. Hezentsvei, Yu., & Bannikov, D. (2020). Effectiveness Evaluation of Steel Strength Improvement for Pyramidal-Prismatic Bunkers. *Eureka: Physics and Engineering*, 2(27), 30-38. DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001146> (in English)
16. Neduzha, L. O., & Shvets, A. O. (2016). Application of APM WinMachine software for design and calculations in mechanical engineering. *Science and Transport Progress*, 2(62), 129-147. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/67328> (in English)
17. Piekarczyk, A., Więch, P., & Cybulski, R. (2019). Experimental method to evaluate the load-carrying capacity of double corrugated sheet profiles. *Thin-Walled Structures*, 144. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263823119302368>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106283> (in English)
18. Tiutkin, O., Miroshnyk, V., Radkevych, A., & Alkhdour, A. (2019). Nonuniform Stress State of a Hoisting Shaft Lining as a Result of Disturbance of the Ground Freezing Technology. *E3S Web of Conferences*, 109, 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900099> (in English)

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

19. Tiutkin, O., Petrosian, N., Radkevych, A., & Alkhdour, A. (2019). Regularities of Stress State of Unsupported Working Occurring in a Layered Massif. *E3S Web of Conferences*, 109, 1-7.
DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900100> (in English)
20. Zhang, Y., Ge, W., Zhang, Y., & Zhao, Z. (2018). Topology optimization method with direct coupled finite element–element-free Galerkin method. *Advances in Engineering Software*, 115, 217-229.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.09.012> (in English)

Received: Oct. 01, 2020

Accepted: Feb. 01, 2021

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

629.46.027.11:[519.87:656.2.08]

Л. А. МУРАДЯН^{1*}, І. В. ПІЦЕНКО^{2*}, В. Ю. ШАПОШНИК^{3*}

^{1*}Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 19, ел. пошта leontymuradian@gmail.com, ORCID 0000-0003-1781-4580

^{2*}Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 19, ел. пошта irinapit95@gmail.com, ORCID 0000-0002-5674-0337

^{3*}Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 19, ел. пошта vladislav.sh91@gmail.com, ORCID 0000-0003-4701-6491

Математична модель визначення ризиків на залізничному транспорті під час діагностики буксових вузлів вантажних вагонів

Мета. Дослідження спрямовано на розробку математичної моделі визначення ризиків на залізничному транспорті під час діагностики буксових вузлів вантажних вагонів, яка дозволить надати оцінку безпеки руху в разі вантажних перевезень. **Методика.** Для розробки математичної моделі визначення ризиків на залізничному транспорті використано безперервну статичну модель залежності рівня індивідуального підходу обслуговуючого персоналу від рівня загальних інтересів (бригада, зміна). При цьому було розглянуто три види залежностей: оптимістичну, нейтральну, песимістичну. **Результати.** Розроблена математична модель, яка дозволяє, під час діагностики буксових вузлів вантажних вагонів, оцінити ризики і рівень безпеки руху поїздів, а також визначити подальші заходи щодо зниження ризиків. У процесі оцінки рівня індивідуальних підходів і загальних інтересів окремого підрозділу залізниці під час виконання технічного обслуговування та ремонту буксового вузла вантажних вагонів були розглянуті варіанти граничних можливостей цього підрозділу, при цьому встановлені екстремальні значення за рівноважного розподілу, для випадку домінування технічного контролю буксового вузла вантажних вагонів та для випадку домінування ремонтів буксового вузла вантажних вагонів. **Наукова новизна.** Вперше розроблено математична модель ризиків на залізничному транспорті, що формується при виконанні технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів, яка дозволяє визначити рівень безпеки руху під час виконання вантажних перевезень та намітити подальші заходи щодо зниження ризиків. Набув подальшого розвитку метод дослідження ефективності системи технічного обслуговування та ремонту буксового вузла, що на відміну від наявного встановлює залежність кількості технічних обслуговувань вагонних букс від кількості їх ремонтів в експлуатації та дозволить підвищити рівень безпеки руху. **Практична значимість.** Застосування отриманих математичних моделей ризиків на залізничному транспорті може знизити ризики під час проведення діагностики буксових вузлів вантажних вагонів із метою підвищення локального чи загального рівня безпеки руху поїздів.

Ключові слова: безпека руху поїздів; ризик; буксовий вузол; діагностика; вантажні вагони; залізничний транспорт

Вступ

Залізничний транспорт на внутрішньому ринку надає значну частину транспортних послуг, пов'язаних з організацією та забезпеченням процесу перевезення вантажів і пасажирів.

Одним із головних завдань залізничного транспорту, а також важливою складовою його ефективної роботи й розвитку є забезпечення безпеки руху, на яку безпосередньо впливає надійність елементів рухомого складу й технічних засобів інфраструктури [3, 8, 23, 25].

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Успішне вирішення завдання забезпечення необхідного рівня безпеки руху на залізниці полягає в підтримці належного технічного стану й надійності в першу чергу вагонного парку. Безпека руху при цьому може бути оцінена ризиками можливих відмов вантажних вагонів після виконання технічного обслуговування та ремонту. Тому забезпечення низьких значень ризиків у процесі експлуатації залізничного транспорту під час технічного обслуговування та ремонту може бути досягнуто належним процесом діагностування вантажних вагонів, оскільки вони складають найбільшу частину з усього рухомого складу під час вантажних перевезень [2, 4].

Інформація про відмови елементів вантажних вагонів, що виникають у процесі експлуатації, являє собою деякий набір статистичних даних, використання яких дає можливість провести аналіз цих відмов. На підставі відомої статистичної інформації про відмови елементів вантажних вагонів можна стверджувати, що найбільша їх частка припадає на буксові вузли.

У ході аналізу відмов буксових вузлів вантажних вагонів встановлено, що майже всі вони пов'язані з неякісно проведеним ремонтом і технічним обслуговуванням, на процес якого істотно впливає недотримання технології виконання, зокрема й людський фактор [24]. Для зниження ризиків, що допускаються під час ремонту й технічного обслуговування вантажних вагонів, необхідно застосовувати методи діагностування буксових вузлів і подальший розрахунок ризиків для оцінки безпеки руху на залізничному транспорті.

У роботах [13, 22] наведено методики аналізу дерева відмов для оцінки безпеки руху. Такі методики використовують для підвищення ефективності технічного обслуговування залізничного транспорту й зниження ризиків. Кілька методів у роботах [14, 20] представляють поліпшені методики аналізу дерева відмов для прийняття рішень.

Роботи [12, 16, 24] засновані на сценаріях аварій з урахуванням людського фактора. У роботах [9, 11] наведено моделі ризику для оцінки безпеки руху. У роботах [10, 26] безпека руху пов'язана з процесами системи технічного

обслуговування елементів транспортної системи.

У [17, 18] наведено систему ідентифікації ризиків на залізничному транспорті та застосовано метод експлуатаційної надійності для оцінки безпеки руху. Аналіз ризику [19] дав можливість використовувати стохастичні методи оцінки безпеки руху. У [2, 6, 21] представлені методи оцінки ризиків і можливості підвищення безпеки руху під час проектування, експлуатації та технічного обслуговування засобів транспорту залізниць, особливу увагу приділено конструкції вантажних вагонів і їх впливу на безпеку руху.

Мета

Основною метою роботи є розробка математичної моделі визначення ризиків на залізничному транспорті під час діагностики буксових вузлів вантажних вагонів, яка дозволить надати оцінку безпеки руху в разі вантажних перевезень.

Методика

Використаємо параметр P_x – імовірність успішного виконання поставленого завдання з технічного обслуговування й ремонту буксових вузлів вантажних вагонів, за яким можна надати оцінку якості їх виконання. Запишемо залежність для зазначеного параметра ймовірності в загальному вигляді:

$$P_x = \sum_{i=1}^n P_{xi} (1 - P_{hi}) / n, \quad (1)$$

де P_{xi} – імовірність виконання відповідної i -ої операції з технічного обслуговування й ремонту буксового вузла вантажних вагонів; P_{hi} – імовірність допущеної помилки під час виконання відповідної i -ої операції з технічного обслуговування й ремонту буксового вузла вантажних вагонів; n – кількість операцій з технічного обслуговування й ремонту буксового вузла вантажних вагонів.

Якщо поставлене завдання з технічного обслуговування й ремонту буксового вузла вантажних вагонів виконане без допущення поми-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

лок обслуговуючим персоналом, то вираз (1) матиме значення $P_x = 1$.

Під час здійснення технічного контролю виконання технічного обслуговування й ремонту буксового вузла вантажних вагонів ризик його відмови R_x дорівнює величині $R_x = 1 - P_x = 0$. Але в загальному вигляді ризик відмови буксового вузла вантажних вагонів в ході здійснення технічного контролю виконання технічного обслуговування й ремонту потрібно визначати за таким виразом:

$$R_x = (1 - P_{hk})P_{hk} = 0, \quad (2)$$

де P_{hk} – імовірність допущеної помилки у разі виконання технічного контролю під час прийняття буксового вузла вантажних вагонів із ремонту.

Ризик відмови буксових вузлів вантажних вагонів, які призвели до транспортних подій, визначаємо за виразом:

$$R_{хтп} = \frac{K_{тк}}{\sum_{i=1}^n K_i}, \quad (3)$$

де $K_{тк}$ – кількість відмов буксових вузлів вантажних вагонів під час експлуатації, які призвели до транспортних подій;

$\sum_{i=1}^n K_i$ – сума всіх відмов вантажних вагонів під час експлуатації, які призвели до транспортних подій.

Маючи наявні дані, виявлені приладами контролю колісних пар, можемо розрахувати ризик відмови буксових вузлів вантажних вагонів під час здійснення технічного контролю виконання ремонту за виразом:

$$R_{хтк} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n K_{іпк} - K_e \right)}{\sum_{i=1}^n K_{іпк}}, \quad (4)$$

де K_e – кількість відмов буксових вузлів вантажних вагонів через недотримання вимог експлуатації або фізичного зносу, які виявлені приладами контролю; $K_{іпк}$ – i -та відмова буксових вузлів вантажних вагонів під час експлуатації, які виявлені приладами контролю колісних пар.

Якби не було виявлено несправності буксових вузлів вантажних вагонів під час експлуатації приладами контролю колісних пар, то можна було б стверджувати, що вони призвели до відмов, які перейшли в категорію транспортних подій. Це доводить той факт, що застосування технічних засобів і приладів, а також відсутність впливу людського чинника дозволяє знизити ризики відмов буксових вузлів вантажних вагонів під час їх експлуатації.

Для того щоб знизити вплив людського чинника як під час проведення технічного обслуговування та ремонту, так і під час виконання технічного контролю, необхідно застосувати метод та обладнання для діагностики буксових вузлів вантажних вагонів за вібраційними характеристиками [1]. Це дозволить знизити рівень ризику відмов буксових вузлів під час експлуатації вантажних вагонів.

На практиці під час виконання технічного обслуговування та ремонту буксового вузла вантажних вагонів існує деяка безперервна статична модель залежності рівня індивідуального підходу обслуговуючого персоналу (x) від рівня загальних інтересів (бригада, зміна) (y) [5, 7, 15]. Як правило, існує три види залежностей: оптимістична, нейтральна, песимістична. Аналітично ці залежності мають вигляд:

- оптимістична – $x = 1 - y^2$;
- нейтральна – $x = 1 - y$;
- песимістична – $x = (y - 1)^2$.

Графічно ці залежності під час виконання технічного обслуговування та ремонту буксового вузла вантажних вагонів наведено на рис. 1.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

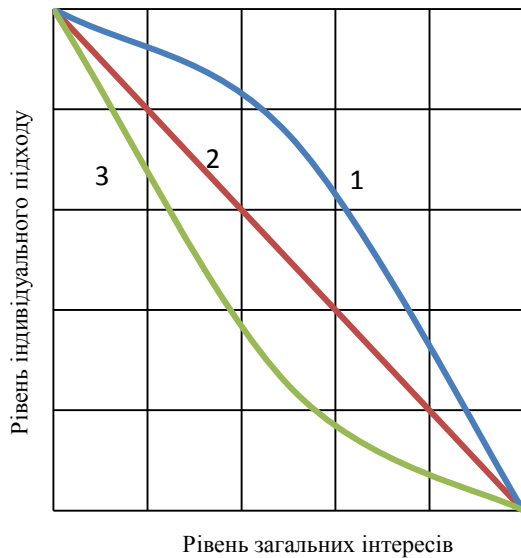


Рис. 1. Графічні залежності рівня індивідуального підходу під час виконання технічного обслуговування та ремонту буксового вузла вантажних вагонів від рівня загальних інтересів:

1 – оптимістична; 2 – нейтральна; 3 – песимістична

Fig. 1. Graphic dependencies of the level of individual approach during the maintenance and repair of the axle box of freight cars on the level of common interests:

1 – optimistic; 2 – neutral; 3 – pessimistic

Як інтегральні критерії визначення стратегічно оптимального співвідношення рівнів досягнення індивідуального підходу й загальних інтересів під час виконання технічного обслуговування та ремонту буксового вузла вантажних вагонів можуть бути обрані два види – мультиплікативний та евклідовий:

$$Y_1 = xy; \rightarrow Y_2 = x^2 + y^2; \quad (5)$$

які для трьох видів залежностей мають вигляд:

– оптимістичний:

$$Y_1 = (1 - y^2)y; Y_2 = (1 - y^2)^2 + y^2;$$

– нейтральний:

$$Y_1 = (1 - y)y; Y_2 = (1 - y)^2 + y^2;$$

– песимістичний:

$$Y_1 = (y - 1)^2 y; Y_2 = (y - 1)^4 + y^2.$$

Результати

Стратегічно оптимальне співвідношення рівнів досягнення індивідуальних підходів і загальних інтересів під час виконання технічного обслуговування та ремонту буксового вузла вантажних вагонів наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Стратегічно оптимальні співвідношення досягнення рівнів індивідуальних підходів і загальних інтересів під час виконання технічного обслуговування та ремонту буксового вузла вантажних вагонів

Table 1

Strategically optimal ratios of achieving the levels of individual approaches and common interests during the maintenance and repair of the axle box of freight cars

Вид стратегічної залежності	Метрика інтегрального критерію	
	мультиплікативна	евклідова
Оптимістичний	0,58	0,7
Нейтральний	0,5	0,5
Песимістичний	0,67	0,4

Таким чином, залежно від суб'єктивного вибору виду стратегічної залежності між рівнем досягнення індивідуального підходу й рівнем досягнення загального інтересу та видом метрики інтегрального критерію під час виконання технічного обслуговування та ремонту буксового вузла вантажних вагонів можна оцінити в статичному режимі їх оптимальне співвідношення.

На основі наведених залежностей на рис. 1, які будуть виступати кривими граничних можливостей окремого підрозділу залізниці під час виконання технічного обслуговування та ремонту буксового вузла вантажних вагонів, розглянемо взаємозалежності кількості технічних обслуговувань (x) і кількості ремонтів буксового вузла вантажних вагонів (y), виходячи з максимальних можливостей окремого підрозділу X_{\max} та Y_{\max} відповідно. Ці залежності наведено на рис. 2.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

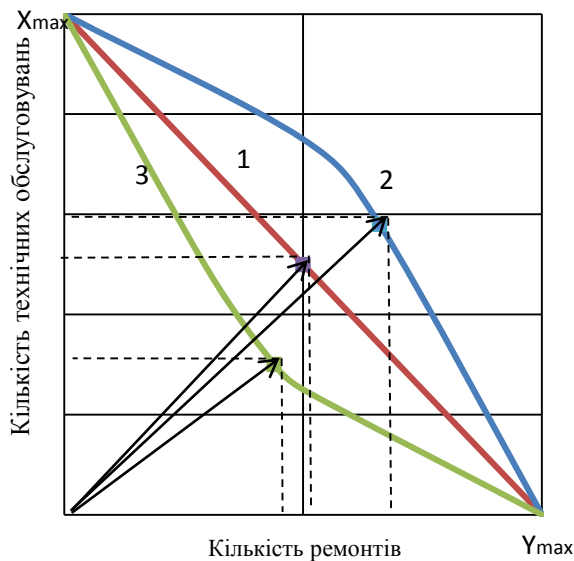


Рис. 2. Криві граничних можливостей окремого підрозділу залізниці під час виконання технічного обслуговування та ремонту буксового вузла вантажних вагонів:
1 – рівноважна; 2 – домінування технічних обслуговувань;
3 – домінування ремонтів

Fig. 2. Curves of the limit possibilities of a separate railway subdivision during the maintenance and repair of axle box of freight cars:
1 – equilibrial; 2 – dominance of maintenance;
3 – dominance of repairs

Для рівноважної залежності під час виконання технічного обслуговування та ремонту буксового вузла вантажних вагонів запишемо рівняння:

$$y = a + bx. \quad (6)$$

При цьому максимальне значення кількості ремонтів буксового вузла вантажних вагонів дорівнюватиме: $y_{\max} = a$, а максимальне значення кількості технічних обслуговувань буксового вузла вантажних вагонів $a + bx_{\max} = 0$.

Тоді $b = -\frac{y_{\max}}{x_{\max}}$.

Вихідна залежність з урахуванням значень коефіцієнтів матиме вигляд:

$$y = y_{\max} \left(1 - \frac{x}{x_{\max}} \right).$$

Використовуючи мультиплікативний критерій

$$J = xy \rightarrow \max, \quad (7)$$

запишемо для цього випадку критерій:

$$J = xy_{\max} \left(1 - \frac{x}{x_{\max}} \right) \rightarrow \max.$$

Знайдемо екстремуми наведеної функції ($J = 0$):

$$y_{\max} \left(1 - \frac{x}{x_{\max}} \right) - \left(\frac{xy_{\max}}{x_{\max}} \right) = 0;$$

$$x_{\text{ext}} = \frac{x_{\max}}{2};$$

$$y_{\text{ext}} = \frac{y_{\max}}{2}.$$

Далі для випадків, представлених кривими 2 і 3 на рис. 2, запишемо загальне рівняння у вигляді:

$$y = a + bx + cx^2. \quad (8)$$

Для залежності в разі домінування технічного контролю буксового вузла вантажних вагонів (крива 2, рис. 2) максимальне значення кількості ремонтів (за $x = 0$) дорівнюватиме: $y_{\max} = a$, а похідна в точці $x = 0$ дорівнює:

$$y' = b + 2cx|_{x=0} = 0,$$

тоді $b = 0$ для цього випадку.

Запишемо початкове рівняння зі знайденими коефіцієнтами:

$$y_{\max} + 0x_{\max} + cx_{\max}^2 = 0,$$

звідси:

$$c = -\frac{y_{\max}}{x_{\max}^2}.$$

У результаті матимемо:

$$y = y_{\max} \left(1 - \frac{x^2}{x_{\max}^2} \right).$$

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Запишемо критерій (7):

$$J = xy_{\max} \left(1 - \frac{x^2}{x_{\max}^2} \right) \rightarrow \max.$$

Знайдемо екстремуми наведеної функції ($J = 0$):

$$y_{\max} \left(1 - \frac{x^2}{x_{\max}^2} \right) - \left(\frac{2x^2 y_{\max}}{x_{\max}^2} \right) = 0;$$

$$x_{\text{ext}} = \frac{x_{\max}}{\sqrt{3}} = 0,58x_{\max};$$

$$y_{\text{ext}} = \frac{2}{3} y_{\max} \approx 0,66y_{\max}.$$

Для залежності в разі домінування кількості ремонтів буксового вузла вантажних вагонів (крива 3, рис. 2) максимальне значення кількості ремонтів (за $x = 0$) дорівнюватиме: $y_{\max} = a$, а похідна в точці $x = 0$:

$$\dot{y} = b + 2cx_{\max} = 0,$$

тоді $b = -2cx_{\max}$ для розглянутого випадку.

Запишемо початкове рівняння зі знайденими коефіцієнтами:

$$y_{\max} + 2cx_{\max}^2 + cx_{\max}^2 = 0,$$

звідси:

$$c = \frac{y_{\max}}{x_{\max}^2};$$

$$b = -2 \frac{y_{\max}}{x_{\max}}.$$

Ще раз запишемо рівняння:

$$y = y_{\max} \left(1 - \frac{2x}{x_{\max}} + \frac{x^2}{x_{\max}^2} \right).$$

$$J = xy_{\max} \left(1 - \frac{2x}{x_{\max}} + \frac{x^2}{x_{\max}^2} \right) = xy_{\max} \left(1 - \frac{x}{x_{\max}} \right)^2 \rightarrow \max.$$

Знайдемо екстремуми наведеної функції ($J = 0$):

$$y_{\max} \left(1 - \frac{x}{x_{\max}} \right)^2 -$$

$$-2y_{\max} \left(1 - \frac{x}{x_{\max}} \right) \times \frac{x}{x_{\max}} = 0;$$

$$x_{\text{ext}} = \frac{x_{\max}}{3} \approx 0,33x_{\max};$$

$$y_{\text{ext}} = \frac{4}{9} y_{\max} \approx 0,44y_{\max}.$$

Розглянуті варіанти граничних можливостей окремого підрозділу залізниці за рівноважної залежності, у разі домінування кількості технічних обслуговувань або ремонтів буксового вузла вантажних вагонів, дають можливість обрати техніко-економічні параметри роботи окремого підрозділу залізниці та модель для оцінки виконання технічного обслуговування й ремонту буксового вузла вантажних вагонів.

Наукова новизна та практична значимість

Автори цієї роботи вперше запропонували математичну модель визначення ризиків на залізничному транспорті під час діагностики буксових вузлів вантажних вагонів, яка дозволяє надати оцінку безпеки руху в разі здійснення вантажних перевезень та визначити подальші заходи щодо зниження ризиків.

Набув подальшого розвитку метод дослідження ефективності системи технічного обслуговування та ремонту буксового вузла, що на відміну від наявного встановлює залежність кількості технічних обслуговувань вагонних букс від кількості їх ремонтів в експлуатації та дозволить підвищити рівень безпеки руху.

Висновки

У процесі оцінки рівня індивідуальних підходів і загальних інтересів окремого підрозділу залізниці під час виконання технічного обслуговування та ремонту буксового вузла вантажних вагонів в умовах невизначеності було розглянуто варіанти граничних можливостей цього

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

підрозділу. При цьому встановлено, що за рівноважного розподілу екстремальні значення $x_{\text{ext}} = x_{\text{max}} / 2$, $y_{\text{ext}} = y_{\text{max}} / 2$ для випадку домінування технічних обслуговувань буксового вузла вантажних вагонів дорівнюють

$x_{\text{ext}} = 0,58x_{\text{max}}$, $y_{\text{ext}} = 0,66y_{\text{max}}$, а для випадку домінування ремонтів буксового вузла вантажних вагонів $x_{\text{ext}} = 0,33x_{\text{max}}$, $y_{\text{ext}} = 0,44y_{\text{max}}$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ададуров А. С., Романова А. А. Критерии достоверности результатов диагностики буксовых узлов грузовых вагонов акустическими методами. *Транспорт Российской Федерации*. 2019. № 5 (84). С. 57–61.
2. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Мищенко А. А. Методологические основы определения эксплуатационных характеристик несамоходного подвижного состава. *Наука та прогрес транспорту*. 2016. № 1 (61). С. 169–179. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/61044>
3. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Пиценко И. В. Перспективы эксплуатации литых колес на железных дорогах Украины. *Вагонный парк*. 2016. Вып. № 9–10 (114–115). С. 38–41.
4. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Подосенов Д. О. Повышение надежности грузовых вагонов с применением новых технологий изготовления и восстановления рабочих поверхностей. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2016. № 11. С. 49–54.
5. Мямлін С. В., Мурадян Л. А. Застосування основних законів розподілу випадкових величин для визначення показників надійності вагонів. *Збірник наукових праць ДЕТУТ. Серія «Транспортні системи і технології»*. 2015. Вип. 26. С. 172–180.
6. Потапенко О. О., Могила В. І. Перспективна конструкція ресорного підвішування візка вантажного вагона та результати її дослідження. *Вісник ЧНУ ім. В. Даля*. 2019. № 3 (251). С. 144–150.
7. Устич П. А., Карпычев В. А., Овечников М. Н. *Надежность рельсового нетягового подвижного состава*. Москва : УМЦ МПС России, 2004. 416 с.
8. Швець А. О. Стійкість вантажних вагонів у разі дії стискних поздовжніх сил. *Наука та прогрес транспорту*. 2020. № 1 (85). С. 119–137. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/199485>
9. An M., Lin W., Huang S. An Intelligent Railway Safety Risk Assessment Support System for Railway Operation and Maintenance Analysis. *The Open Transportation Journal*. 2013. Vol. 7. P. 27–42. DOI: <https://doi.org/10.2174/1874447801307010027>
10. COMMISSION IMPLEMENTING REGULATION (EU) No 402/2013 of 30 April 2013 on the common safety method for risk evaluation and assessment and repealing Regulation (EC) No 352/2009. *Official Journal of the European Union*. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex:32013R0402>
11. Figueres E. M., Hughes P., Gulijk C. Big Data for Risk Analysis : the future of safe railways. *XII Congreso de Ingeniería del Transporte (CIT 2016)* (Spain, 7-9 June 2016). Universitat Politècnica de València, 2016. P. 347–353. DOI: <https://doi.org/10.4995/CIT2016.2016.1825>
12. Hadj-Mabrouk H. Contribution of artificial intelligence to risk assessment of railway accidents. *Urban Rail Transit*. 2019. Vol. 5. Iss. 2. P. 104–122. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40864-019-0102-3>
13. Houdijk R. M. Rail transport of hazardous substances from the perspective of ‘all hazard’ risk management. *Chemical 158 engineering transactions*. 2016. Vol. 48. P. 949–954.
14. Huang H.-Z., Zhang H., Li Y. A new ordering method of basic events in fault tree analysis. *Quality and Reliability Engineering International*. 2012. Vol. 28. Iss. 3. P. 297–305. DOI: <https://doi.org/10.1002/qre.1245>
15. Johansen S. Estimation and hypothesis testing of cointegration vectors in the presence of linear trend. *Econometrica*. 1991. Vol. 59. № 6. P. 1551–1580.
16. Leitner B. A general model for railway systems risk assessment with the use of railway accident scenarios analysis. *Procedia engineering*. 2017. Vol. 187. P. 150–159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.361>
17. Lingaitis L. P., Mjamlin S., Baranovsky D., Jastremskas V. Prediction methodology of durability of locomotives diesel engines. *Eksplotacija i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability*. 2012. Vol. 14, № 2. P. 154–159.
18. Lingaitis L. P., Mjamlin S., Baranovsky D., Jastremskas V. Experimental investigations on operational reliability of diesel locomotives engines. *Eksplotacija i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability*. 2012. Vol. 14, № 1. P. 5–10.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

19. Licciardello R., Baldassarra A., Vitali P., Tieri A., Cruciani M., Vasile A. N. Limits and opportunities of risk analysis application in railway systems. *Transactions on The Built Environment*. 2013. Vol. 134. P. 133–144. DOI: <https://doi.org/10.2495/SAFE130131>
20. Mo Y., ZhongmF., Liu H., Yang Q., Cui G. Efficient ordering heuristics in binary decision diagram-based fault tree analysis. *Quality and Reliability Engineering International*. 2013. Vol. 29. Iss. 3. P. 307–315. DOI: <https://doi.org/10.1002/qre.1382>
21. Muradian L. A. Probabilistic-physical approach to describe and determine the reliability of cars. *Science and Transport Progress*. 2016. № 5 (65). P. 168–177. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/84082>
22. Peng Z., Lu Y., Miller A., Johnson C., Zhao T. Risk assessment of railway transportation systems using timed fault trees. *Quality and Reliability Engineering International*. 2016. Vol. 32. Iss. 1. P. 181–194. DOI: <https://doi.org/10.1002/qre.1738>
23. Reidemeister O. G., Shykunov O. A. Sensitivity of stresses to the forces acting on the cast parts of freight-car bogie. *Science and Transport Progress*. 2018. № 4 (76). P. 125–133. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/141186>
24. Shaposhnyk V. Y. Human factor influence on performing technical maintenance and repair of freight cars. *Science and Transport Progress*. 2018. № 6 (78). P. 165–175. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154031>
25. Shykunov O. A. Three-element bogie side frame strength. *Science and Transport Progress*. 2017. № 1 (67). P. 183–193. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/92535>
26. Smoczyński P., Kadziński A. Introduction to the risk management in the maintenance of railway tracks. *Journal of mechanical and transport engineering*. 2016. Vol. 68, № 4. P. 65–80. DOI: <https://doi.org/10.21008/j.2449-920X.2016.68.4.06>

L. A. MURADIAN^{1*}, I. V. PITSENKO^{2*}, V. Y. SHAPOSHNYK^{3*}

^{1*}Dep. «Cars and Car Facilities», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 19, e-mail leontymuradian@gmail.com, ORCID 0000-0003-1781-4580

^{2*}Dep. «Cars and Car Facilities», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 19, e-mail irinapit95@gmail.com, ORCID 0000-0002-5674-0337

^{3*}Dep. «Cars and Car Facilities», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 19, e-mail vladislav.sh91@gmail.com, ORCID 0000-0003-4701-6491

Mathematical Model of Risks in Railway Transport During Diagnostics of Axle Boxes of Freight Cars

Purpose. The research is aimed at developing a mathematical model for determining the risks in railway transport during the diagnostics of axle boxes of freight cars, which will provide an assessment of traffic safety in the case of freight transportations. **Methodology.** To develop a mathematical model for determining the risks in railway transport, a continuous static model of the dependence of the level of individual approach of service personnel on the level of common interests (crew, shift) was used. Three types of dependencies were considered: optimistic, neutral, pessimistic. **Findings.** A mathematical model has been developed that allows assessing the risks and the level of train traffic safety during the diagnosis of axle boxes of freight cars, as well as determining further measures to reduce risks. In the process of assessing the level of individual approaches and general interests of a particular railway subdivision during maintenance and repair of the axle box of freight cars the variants for the limit possibilities of this subdivision were considered. At the same time extreme values for equilibrium distribution, for a case of dominance of maintenance and for a case of dominance of repairs of freight car's axle box were established. **Originality.** For the first time, a mathematical model of risks in railway transport was developed, which is formed during the maintenance and repair of freight cars. It allows determining the level of traffic safety during freight transportations and outlining further measures to reduce risks. The method of studying the efficiency of the system of maintenance and repair of the axle box has been further developed, which, in contrast to the existing one, establishes the dependence of the number of maintenance of axle boxes on the number of their repairs in operation and will

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

increase traffic safety. **Practical value.** The application of the obtained mathematical models of risks in railway transport can reduce the risks during the diagnostics of axle boxes of freight cars in order to increase the local or general level of train traffic safety.

Keywords: train traffic safety; risk; axle box; diagnostics; freight cars; railway transport

REFERENCES

1. Adadurov, A. S., & Romanova, A. A. (2019). Validation criteria of cargo wagon's axle box diagnostic results by acoustic method. *Transport of the Russian Federation*, 5(84), 57-61. (in Russian)
2. Muradian, L. A., Shaposhnyk, V. Y., & Mischenko, A. A. (2016). Methodological Fundamentals of Determination of Unpowered Rolling Stock Maintenance Characteristics. *Science and Transport Progress*, 1(61), 169-179. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/61044> (in Russian)
3. Muradyan, L. A., Shaposhnik, V. Yu., & Pitsenko, I. V. (2016). Perspektivy ekspluatatsii litykh koles na zheleznykh dorogakh Ukrainy. *Vagonniy park*, 9-10(114-115), 38-41. (in Russian)
4. Muradyan, L. A., Shaposhnik, V. Yu., & Podosenov, D. A. (2016). Improving the reliability of freight wagons with the use of new manufacturing technologies and regeneration of working surfaces. *Electromagnetic compatibility and safety on railway transport*, 11, 49-54. (in Russian)
5. Myamlin, S. V., & Muradian, L. A. (2015). Application of the fundamental laws of distribution of random variables to determine the parameters of reliability of cars. *Transport Systems and Technologies: Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technologies*, 26, 172-180. (in Ukrainian)
6. Potapenko, O., & Mogila, V. (2019). Perspective design of spring suspension of the cart of the freight wagon and the results of its study. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 3(251), 144-150. (in Ukrainian)
7. Ustich, P. A., Karpychev, V. A., & Ovechnikov, M. N. (2004). *Nadezhnost relsovogo netyagovogo podvizhnogo sostava*. Moscow: UMTs MPS Rossii. (in Russian)
8. Shvets, A. O. (2020). Stability of freight cars under the action of compressive longitudinal forces. *Science and Transport Progress*, 1(85), 119-137. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/199485> (in Ukrainian)
9. An, M., Lin, W., & Huang, S. (2013). An Intelligent Railway Safety Risk Assessment Support System for Railway Operation and Maintenance Analysis. *The Open Transportation Journal*, 7, 27-42. DOI: <https://doi.org/10.2174/1874447801307010027> (in English)
10. COMMISSION IMPLEMENTING REGULATION (EU) No 402/2013 of 30 April 2013 on the common safety method for risk evaluation and assessment and repealing Regulation (EC) No 352/2009. *Official Journal of the European Union*. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex:32013R0402> (in English)
11. Figueres, E. M., Hughes, P., & Gulijk, C. (2016). Big Data for Risk Analysis: the future of safe railways. *XII Congreso de Ingeniería del Transporte (CIT 2016)* (pp. 347-353), Universitat Politècnica de València, Spain. DOI: <https://doi.org/10.4995/CIT2016.2016.1825> (in English)
12. Hadj-Mabrouk, H. (2019). Contribution of Artificial Intelligence to Risk Assessment of Railway Accidents. *Urban Rail Transit*, 5(2), 104-122. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40864-019-0102-3> (in English)
13. Houdijk, R. M. (2016). Rail transport of hazardous substances from the perspective of 'all hazard' risk management. *Chemical engineering transactions*, 48, 949-954. (in English)
14. Huang, H.-Z., Zhang, H., & Li, Y. (2011). A New Ordering Method of Basic Events in Fault Tree Analysis. *Quality and Reliability Engineering International*, 28(3), 297-305. DOI: <https://doi.org/10.1002/qre.1245> (in English)
15. Johansen, S. (1991). Estimation and hypothesis testing of cointegration vectors in the presence of linear trend. *Econometrica*, 59(6), 1551-1580. (in English)
16. Leitner, B. (2017). A general model for railway systems risk assessment with the use of railway accident scenarios analysis. *Procedia Engineering*, 187, 150-159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.361> (in English)
17. Lingaitis, L. P., Mjamlin, S., Baranovsky, D., & Jastremskas, V. (2012). Prediction methodology of durability of locomotives diesel engines. *Ekspluatacija i Niezawodnosc-Maintenance and Reliability*, 14(2), 154-159. (in English)
18. Lingaitis, L. P., Mjamlin, S., Baranovsky, D., & Jastremskas, V. (2012). Experimental Investigations on Operational Reliability of Diesel Locomotives Engines. *Ekspluatacija i Niezawodnosc-Maintenance and Reliability*, 14(1), 5-10. (in English)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

19. Licciardello, R., Baldassarra, A., Vitali, P., Tieri, A., Cruciani, M., & Vasile A. N. (2013). Limits and opportunities of risk analysis application in railway systems. *Transactions on The Built Environment*, 134, 133-144. DOI: <https://doi.org/10.2495/SAFE130131> (in English)
20. Mo, Y., Zhong, F., Liu, H., Yang, Q., & Cui, G. (2012). Efficient Ordering Heuristics in Binary Decision Diagram-based Fault Tree Analysis. *Quality and Reliability Engineering International*, 29(3), 307-315. DOI: <https://doi.org/10.1002/qre.1382> (in English)
21. Muradian, L. A. (2016). Probabilistic-physical approach to describe and determine the reliability of cars. *Science and Transport Progress*, 5(65), 168-177. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/84082> (in English)
22. Peng, Z., Lu, Y., Miller, A., Johnson, C., & Zhao, T. (2014). Risk assessment of railway transportation systems using timed fault trees. *Quality and Reliability Engineering International*, 32(1), 181-194. DOI: <https://doi.org/10.1002/qre.1738> (in English)
23. Reidemeister, O. G., & Shykunov, O. A. (2018). Sensitivity of stresses to the forces acting on the cast parts of freight-car bogie. *Science and Transport Progress*, 4(76), 125-133. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/141186> (in English)
24. Shaposhnyk, V. Y. (2019). Human factor influence on performing technical maintenance and repair of freight cars. *Science and Transport Progress*, 6(78), 165-175. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154031> (in English)
25. Shykunov, O. (2017). Three-element bogie side frame strength. *Science and Transport Progress*, 1(67), 183-193. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/92535> (in English)
26. Smoczyński, P., & Kadziński, A. (2016). Introduction to the risk management in the maintenance of railway tracks. *Journal of Mechanical and Transport Engineering*, 68(4), 65-80. DOI: <https://doi.org/10.21008/j.2449-920X.2016.68.4.06> (in English)

Надійшла до редколегії: 12.10.2020

Прийнята до друку: 11.02.2021

УДК 629.463.02:519.87

О. В. ФОМІН¹, А. О. ЛОВСЬКА^{2*}¹Каф. «Вагони та вагонне господарство», Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, Київ, Україна, 04071, тел. +38 (067) 813 97 88, ел. пошта fomin1985@ukr.net, ORCID 0000-0003-2387-9946^{2*}Каф. «Інженерія вагонів та якість продукції», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейербаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта alyonalovskaya.vagons@gmail.com, ORCID 0000-0002-8604-1764**Дослідження вертикальної динаміки несучих конструкцій вантажних вагонів із круглих труб**

Мета. Це дослідження спрямоване на визначення вертикальної динаміки несучих конструкцій вантажних вагонів із круглих труб. **Методика.** Проведено математичне моделювання динамічної навантаженості несучих конструкцій основних типів вантажних вагонів із круглих труб: піввагон, критий вагон, вагон-платформа, вагон-хопер. Дослідження проведено в плоскій системі координат – площині XZ. При цьому враховано, що вагон рухається пружно-в'язкою колією так, що реакції колії пропорційні як її деформації, так і швидкості цієї деформації. Узятю до уваги рух вагонів у порожньому стані. Стикову нерівність описано періодичною функцією. Розрахунок проведено за швидкості руху вагонів 80 км/год. Розв'язок диференціальних рівнянь руху здійснено в програмному комплексі MathCad із використанням методу Рунге-Кутта. **Результати.** На підставі математичного моделювання динамічної навантаженості несучих конструкцій вагонів із круглих труб отримано основні показники їх динаміки: прискорення, які діють на несучі конструкції в центрі мас, сили, що діють у ресорному підвішуванні візків, коефіцієнти динаміки. Для піввагона, критого вагона, а також вагона-хопера прискорення в центрі мас несучої конструкції перебувають у межах 0,4 g, а вагона-платформи – 0,5 g. Установлено, що отримані показники динаміки вагонів із круглих труб перебувають у межах допустимих. Прискорення, які діють на несучі конструкції вагонів із круглих труб, майже не відрізняються від тих, що отримані для вагонів-прототипів. При цьому хід вагонів оцінено як «відмінний» – піввагон, критий вагон, вагон-хопер та «добрий» – вагон-платформа. **Наукова новизна.** У роботі вперше здійснено математичне моделювання динамічної навантаженості несучих конструкцій вагонів із круглих труб та отримано основні показники їх динаміки. **Практична значимість.** Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо проектування несучих конструкцій вантажних вагонів із круглих труб, а також можуть бути корисними напрацюваннями під час створення інноваційних конструкцій вагонів.

Ключові слова: вагон; несуча конструкція; динамічна навантаженість; вертикальна динаміка; транспортна механіка

Вступ

Плідне функціонування транспортної галузі зумовлює необхідність упровадження в експлуатацію сучасних транспортних засобів. Оскільки основний сегмент перевізного процесу відведено залізничному транспорту, то до створення сучасних конструкцій вагонів потрібно перед'являтися особливі умови. Зокрема це стосується їх несучих конструкцій.

Важливим напрямом створення перспективних вантажних вагонів є оптимізація їх несучих конструкцій. Це дозволило б зменшити їх матеріаломісткість за умови дотримання вантажопідйомності не нижче за відповідні конструкції вагонів-прототипів. Таке рішення сприятиме

зменшенню витрат на виготовлення вагонів, їх експлуатацію, а також підвищенню ефективності перевізного процесу.

Визначення динамічної навантаженості піввагона моделі С70 з урахуванням різної висоти центра ваги наведено у [8]. Розрахункові сили, які діють на кузов вагона, установлено на підставі нормативних стандартів для залізниць Китаю.

З'ясування основних динамічних показників вантажних вагонів з урахуванням поперечних зміщень візків описано в [7]. Отримано дані, які дозволяють оцінити вплив поперечного зміщення візків вагона на показники безпеки руху.

Однак задачу визначення вертикальної навантаженості несучих конструкцій вагонів

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

з урахуванням зменшення їх матеріалоемності в цих роботах не розглянуто.

Дослідженню динаміки рухомого складу з використанням експериментального вагона-лабораторії присвячено роботу [5]. Розглянуто можливу силову дію на рейку та колесо рухомого складу під час проходження складної ділянки колії.

Оцінку динамічних якостей вантажних вагонів на візках перспективної моделі наведено в [14]. Отримано експериментальні залежності основних динамічних показників руху піввагонів із використанням візків моделі 18–9771, яка має різні параметри ковзунів. Це дає можливість вибору параметрів ковзунів для отримання найбільшого ефекту зі зниження динамічної навантаженості як вагона, так і колії.

Однак у цих роботах приділено увагу поліпшенню показників динаміки вагонів шляхом використання нових або модернізованих типів візків. При цьому не взято до уваги несучі конструкції вагонів.

Особливості модернізації кузовів вантажних вагонів на сучасному етапі розвитку транспортної галузі описано в [15]. Метою такої модернізації є подовження строку експлуатації вагона. Також у роботі запропоновано вдосконалення системи діагностики технічного стану модернізованих кузовів вагонів.

Заходів щодо оптимізації кузова вагона з метою зменшення матеріалоемності в роботі не запропоновано.

Структурно-динамічний аналіз вантажного вагона подано в [13]. Розрахунок проведено за методом скінченних елементів. При цьому розглянуто багаторівневу систему вільності вагона.

Результати визначення динамічної навантаженості піввагона під час перевезення на залізничному поромі наведено в [9, 11]. При цьому розглянуто випадок жорсткого закріплення кузова відносно палуби, тобто відсутність власного ступеня вільності під час коливань залізничного порома.

Важливо зазначити, що в цих роботах не взято до уваги визначення вертикальної динаміки та оцінку ходу вагона.

Дослідження впливу осьового навантаження на динамічні показники піввагонів, а також по-

казники їх взаємодії з колією описано в [16]. Проведено математичне та комп'ютерне моделювання динамічної навантаженості піввагона під час руху зі швидкостями в діапазоні від 50 до 90 км/год в кривих радіусами 350 і 600 м.

Визначення міцності кузова піввагона з урахуванням отриманих результатів динамічної навантаженості в роботі не проведено.

Результати втомного аналізу кузова вагона серії S (g) mmns наведено в [17]. Розрахунок здійснено за методом скінченних елементів. Розроблено та верифіковано тривимірні моделі досліджуваних вагонів та визначено показники їх міцності.

Однак питанню оптимізації кузова вагона з метою зменшення матеріалоемності в цій роботі уваги не приділено.

Мета

Основною метою статті є дослідження вертикальної динаміки несучих конструкцій вантажних вагонів з круглих труб. Це дозволить обґрунтувати доцільність упровадження круглих труб як несучих елементів кузовів вагонів та визначити вплив цього вдосконалення на безпеку руху. Для досягнення зазначеної мети потрібно виконати такі завдання:

- створити розрахункову схему несучої конструкції вантажного вагона для визначення основних показників динаміки;
- визначити основні показники динаміки вантажних вагонів із круглих труб;
- провести аналіз отриманих результатів щодо визначення основних показників динаміки вантажних вагонів із круглих труб.

Методика

Для зменшення матеріалоемності несучих конструкцій вагонів запропоновано впровадити як конструкційні елементи круглі труби [10, 12]. Таке технічне рішення обґрунтовано проведеними розрахунками на міцність. При цьому дослідження проведено для основних типів вантажних вагонів: піввагон, критий вагон, вагон-платформа та вагон-хопер (рис. 1).

Просторові комп'ютерні моделі вантажних вагонів з урахуванням запропонованих рішень наведено на рис. 2.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Для визначення основних показників динаміки запропонованих конструкцій вагонів проведено розрахунки, для чого використано математичну модель, наведену в [3].

Вагон при цьому розглянуто як систему з трьох твердих тіл – несучої конструкції та двох візків моделі 18–100 з ресорними комплектами, які мають жорсткість та коефіцієнт відносного тертя.

Ураховано, що на систему накладено такі зв'язки:

– переміщення кузова та візків вагона-платформи уздовж осі колії однакові: $q_1 = q_3 = q_5$;

– колісні пари рухаються без проковзування: $\Psi r_{ij} = x r_{ij}/R$, ($r, i, j = 1, 2$), де R – радіус колеса, 0,475 м;

– через відсутність пружних елементів у буксовому підвішуванні підстрибування візків визначають підстрибуванням колісних пар.

a – a*б – б**в – в**г – г*

Рис. 1. Досліджувані типи вантажних вагонів:
а – піввагон; б – критий вагон; в – вагон-платформа; г – вагон-хопер

Fig. 1. Types of freight cars under study:
a – gondola car; b – covered car; c – flat car; d – hopper car

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

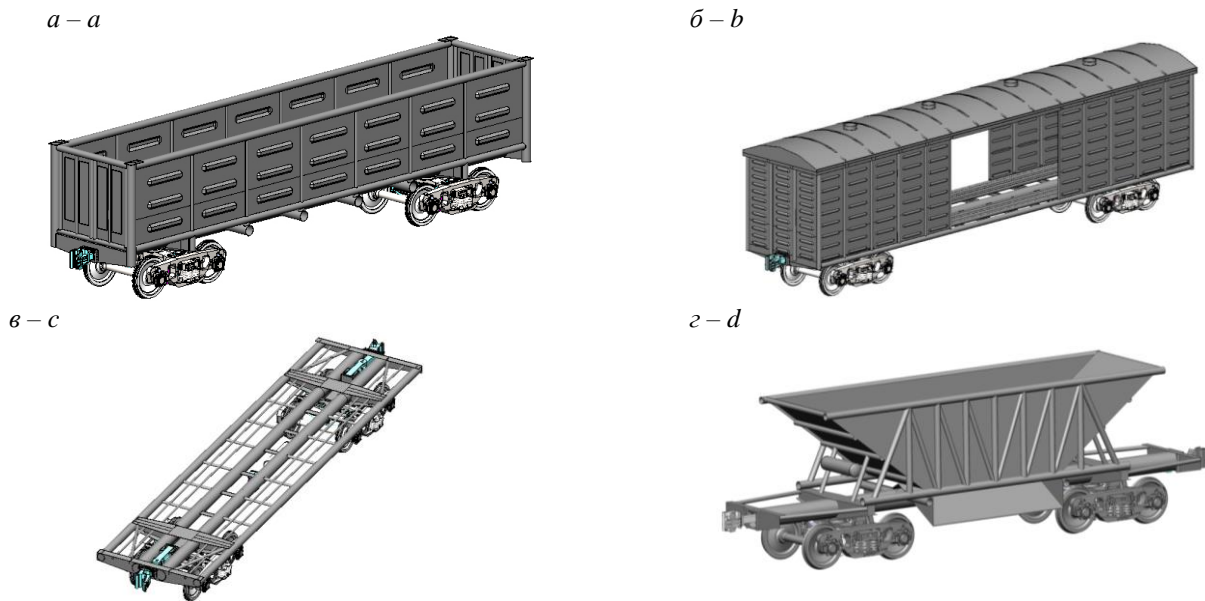


Рис. 2. Комп'ютерні моделі залізничних вагонів, несучі елементи кузовів яких виконано з труб круглого перерізу:

a – піввагон; *b* – критий вагон; *c* – вагон-платформа; *d* – вагон-хопер

Fig. 2. Computer models of railway cars, supporting elements of bodies of which are made of round section pipes:

a – gondola car; *b* – covered car; *c* – flat car; *d* – hopper car

Результати

Дослідження проведено в плоскій системі координат. Прийнято припущення, що вагон рухається пружно-в'язкою колією так, що реа-

кції колії пропорційні як її деформації, так і швидкості цієї деформації [3]. Ураховано, що вагони рухаються в порожньому стані. Розрахункова модель вагона наведена на рис. 3.

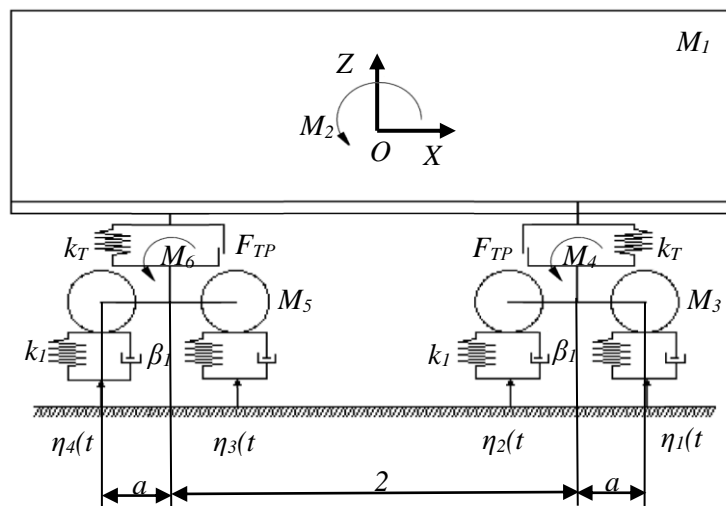


Рис. 3. Розрахункова схема вантажного вагона

Fig. 3. Estimated scheme of freight car

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

$$M_1 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_1 + C_{1,1} \cdot q_1 + C_{1,3} \cdot q_3 + C_{1,5} \cdot q_5 = -F_{TP} \cdot \left(\operatorname{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_1 \right) + \operatorname{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_2 \right) \right); \quad (1)$$

$$M_2 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_2 + C_{2,2} \cdot q_2 + C_{2,3} \cdot q_3 + C_{2,5} \cdot q_5 = F_{TP} \cdot l \cdot \left(\operatorname{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_1 \right) + \operatorname{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_2 \right) \right); \quad (2)$$

$$M_3 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_3 + C_{3,1} \cdot q_1 + C_{3,2} \cdot q_2 + C_{3,3} \cdot q_3 + B_{3,3} \cdot \frac{d}{dt} q_3 = \\ = F_{TP} \cdot \operatorname{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_1 \right) + k_1 (\eta_1 + \eta_2) + \beta_1 \left(\frac{d}{dt} \eta_1 + \frac{d}{dt} \eta_2 \right); \quad (3)$$

$$M_4 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_4 + C_{4,4} \cdot q_4 + B_{4,4} \cdot \frac{d}{dt} q_4 = -k_1 (\eta_1 - \eta_2) - \beta_1 \cdot a \cdot \left(\frac{d}{dt} \eta_1 - \frac{d}{dt} \eta_2 \right); \quad (4)$$

$$M_5 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_5 + C_{5,1} \cdot q_1 + C_{5,2} \cdot q_2 + C_{5,5} \cdot q_5 + B_{5,5} \cdot \frac{d}{dt} q_5 = \\ = F_{TP} \cdot \operatorname{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_2 \right) + k_1 (\eta_3 + \eta_4) + \beta_1 \left(\frac{d}{dt} \eta_3 + \frac{d}{dt} \eta_4 \right); \quad (5)$$

$$M_6 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_6 + C_{6,6} \cdot q_6 + B_{6,6} \cdot \frac{d}{dt} q_6 = -k_1 \cdot a \cdot (\eta_3 - \eta_4) - \beta_1 \cdot a \cdot \left(\frac{d}{dt} \eta_3 - \frac{d}{dt} \eta_4 \right); \quad (6)$$

де M_1, M_2 – відповідно маса та момент інерції несучої конструкції вагона-платформи; M_3, M_4 – відповідно маса та момент інерції першого за ходом руху візка; M_5, M_6 – відповідно маса та момент інерції другого за ходом руху візка; C_{ij} – характеристики пружності елементів коливної системи, які визначаються значеннями коефіцієнтів жорсткості пружин k_T ; B_{ij} – функція розсіювання; a – половина бази візка; k_1 – жорсткість колії; β_1 – коефіцієнт демпфування; $\eta_i(x)$ – функція, яка описує нерівність рейкової колії; δ_i – деформації пружних елементів ресорного підвішування; F_{TP} – сила абсолютного тертя в ресорному комплекті.

Стикову нерівність описано періодичною функцією [3]:

$$\eta(t) = \frac{h}{2} (1 - \cos \omega t), \quad (7)$$

де h – глибина нерівності; ω – частота коливань, яку визначають за формулою $\omega = 2\pi V/L$ (V – швидкість руху вагона, L – довжина нерівності).

Розв'язок математичної моделі здійснено в програмному комплексі MathCad за методом Рунге–Кутта [4, 6, 18].

Початкове переміщення та швидкості взято рівними нулю. Вхідними параметрами моделі є технічні характеристики кузовів вагонів, ресорного підвішування, а також збурюючої дії. Під час проведення розрахунків ураховано параметри ресорного підвішування візка моделі 18–100.

Інерційні коефіцієнти несучих конструкцій вагонів, які враховано під час визначення динамічної навантаженості у вертикальній площині, наведено в табл. 1. Ці коефіцієнти визначено за допомогою опцій програмного комплексу SolidWorks.

Розрахунок проведено за швидкості руху вагонів 80 км/год. Результати розрахунків наведено в табл. 2, а також на рис. 4–7.

Отже, для піввагона, критого вагона, а також вагона-хопера прискорення в центрі мас несучої конструкції перебуває в межах 0,4 g, а вагона-платформи – 0,5 g.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що показники динаміки вагонів перебувають у межах допустимих [1, 2].

Прискорення, які діють на несучі конструкції вагонів із круглих труб, майже не відрізня-

ються від тих, що отримані для вагонів-прототипів (рис. 8).

При цьому хід вагонів оцінено як «відмінний» – піввагон, критий вагон, вагон-хопер та «добрий» – вагон-платформа (рис. 9).

Таблиця 1

Інерційні коефіцієнти несучих конструкцій вагонів для визначення динамічної навантаженості у вертикальній площині

Table 1

Inertial coefficients of supporting structures of cars for determination of dynamic loading in the vertical plane

Тип вагона	Маса, т	Момент інерції, т · м ²	Відсоток зменшення маси порівняно з вагоном-прототипом
Піввагон	14,6	266,1	6,0
Критий вагон	14,7	307,9	4,0
Вагон-платформа	11,0	101,4	4,0
Вагон-хопер	14,8	230,2	5,0

Таблиця 2

Динамічні показники досліджуваних вагонів під час руху в порожньому стані

Table 2

Dynamic indicators of the cars under study when moving in empty state

Показник	Значення			
	ПВ	КВ	ВПФ	ВХ
Прискорення кузова, м/с ²	4,1	4,07	5,2	4,05
Сила в ресорному підвішуванні першого візка, кН	41,0	41,4	40,3	41,3
Сила в ресорному підвішуванні другого візка, кН	41,0	41,4	40,3	41,3
Коефіцієнт динаміки першого візка	0,52	0,5	0,72	0,5
Коефіцієнт динаміки другого візка	0,52	0,5	0,72	0,5

ПВ – піввагон; КВ – критий вагон; ВПФ – вагон-платформа; ВХ – вагон-хопер

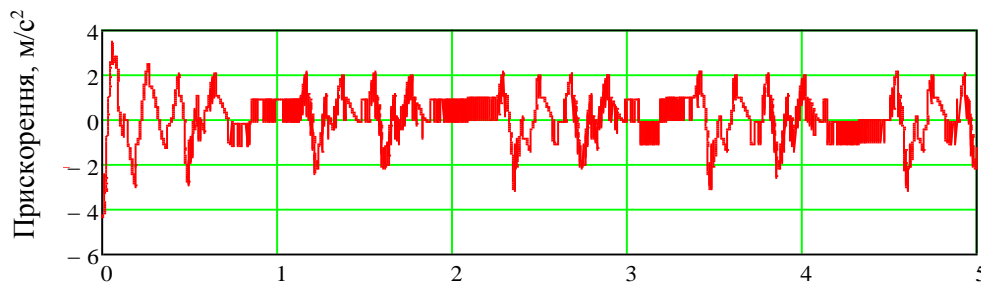


Рис. 4. Прискорення, які діють на несучу конструкцію піввагона t, с

Fig. 4. Accelerations acting on the supporting structure of the gondola

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

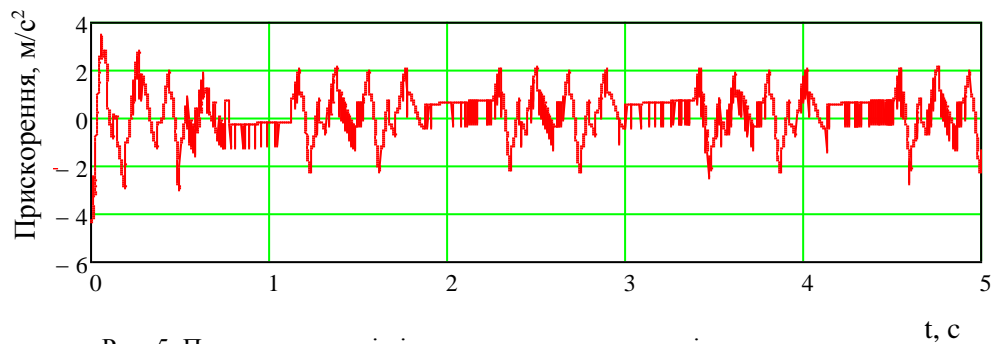


Рис. 5. Прискорення, які діють на несучу конструкцію критого вагона

Fig. 5. Accelerations acting on the supporting structure of the covered car

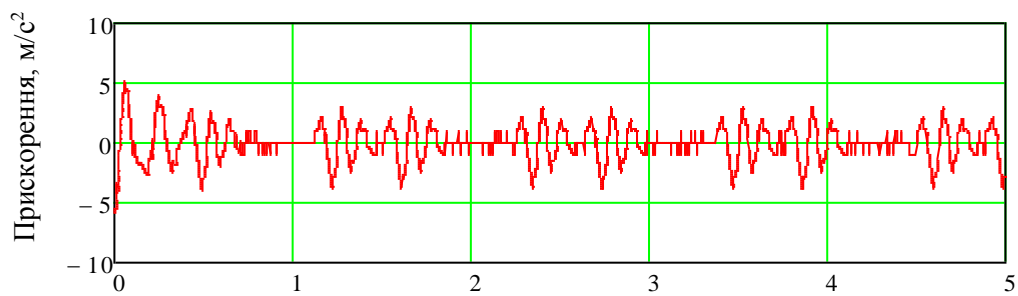


Рис. 6. Прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи

Fig. 6. Accelerations acting on the supporting structure of the flat car

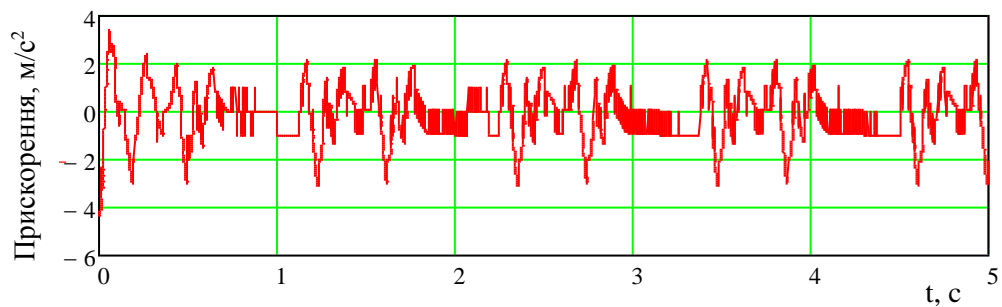


Рис. 7. Прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-хопера

Fig. 7. Accelerations acting on the supporting structure of the hopper car

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

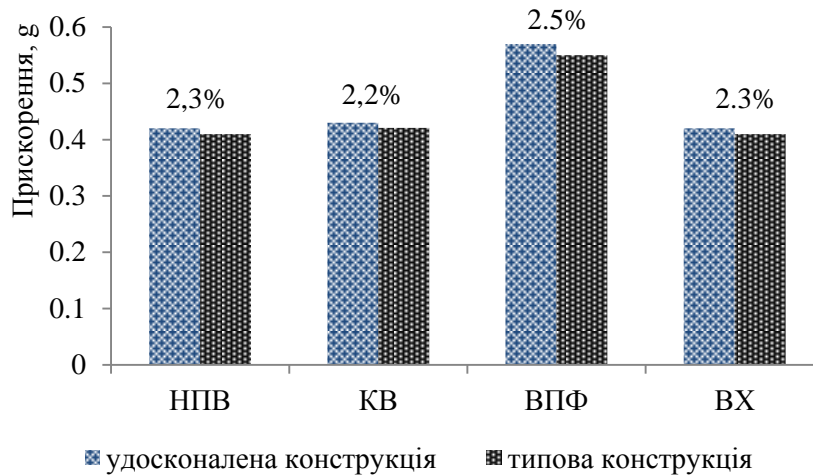


Рис. 8. Порівняльний аналіз прискорень, які діють на несучі конструкції вагонів

Fig. 8. Comparative analysis of accelerations acting on the supporting structures of cars

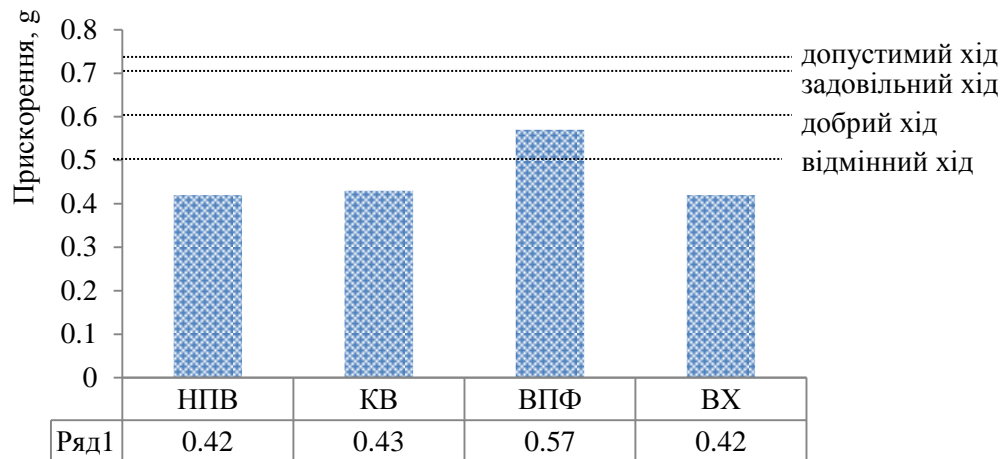


Рис. 9. Прискорення, які діють на несучі конструкції вагонів із круглих труб

Fig. 9. Accelerations acting on the supporting structures of cars made of round pipes

Проведені дослідження доводять доцільність упровадження круглих труб для несучих елементів вагонів.

Наукова новизна та практична значимість

У роботі вперше здійснено математичне моделювання динамічної навантаженості несучих конструкцій вагонів із круглих труб та отримано основні показники їх динаміки.

Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо проектування несучих конструкцій вагонів із круглих труб, а також можуть бути корисними напрацюваннями для створення інноваційних конструкцій вагонів.

Висновки

1. Створено розрахункову схему несучої конструкції вантажного вагона для визначення основних показників динаміки. Дослідження

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

проведено в плоскій системі координат. Модель враховує переміщення вагона по стиковій нерівності. При цьому досліджено рух вагонів у порожньому стані.

2. Визначено основні показники динаміки вантажних вагонів із круглих труб: прискорення, які діють на несучу конструкцію в центрі мас, сили, що діють у ресорному підвішуванні візків, коефіцієнти динаміки.

3. Проведено аналіз отриманих результатів щодо визначення основних показників динаміки вантажних вагонів із круглих труб. При цьому для піввагона, критого вагона, а також вагона-хопера прискорення в центрі мас несучої

конструкції перебувають у межах 0,4 g, а вагона-платформи – 0,5 g.

Прискорення, які діють на несучі конструкції вагонів із круглих труб, майже не відрізняються від прискорень для вагонів-прототипів, а хід вагонів оцінено як «відмінний» – піввагон, критий вагон, вагон-хопер та «добрий» – вагон-платформа.

Установлено, що отримані показники динаміки вагонів із круглих труб перебувають у межах допустимих.

Викладене вказує на доцільність упровадження несучих елементів вагонів із круглих труб.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. [Действителен 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. Дьомін Ю. В. *Залізнична техніка міжнародних транспортних систем (вантажні перевезення)*. Київ : Юніком-Прес, 2001. 342 с.
4. Дьяконов В. *MATHCAD 8/2000 : специальный справочник*. Санкт-Петербург : Издательство «Питер», 2000. 592 с.
5. Ермоленко И. Ю., Железняк В. Н. Исследование динамики подвижного состава с использованием экспериментального вагона-лаборатории при движении по сложным участкам дороги ВСЖД. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2016. № 4 (52). С. 199–203.
6. Кирьянов Д. В. *Mathcad 13*. Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2006. 608 с.
7. Луханин Н. И., Мямлин С. В., Недужая Л. А., Швец А. А. Динамика грузовых вагонов с учетом поперечного смещения тележек. *Збірник наукових праць ДонІЗТ*. 2012. № 29. С. 234–241.
8. Chao C., Mei H., Yanhui H. Study of Railway Freight Vehicle Body's Dynamic Model Based on Goods Loading Technical Standards. *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 29. P. 3572–3577. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.533>
9. Fomin O., Gerlici J., Lovska A., Kravchenko K., Prokopenko P., Fomina A., Hauser V. Durability Determination of the Bearing Structure of an Open Freight Wagon Body Made of Round Pipes during its Transportation on the Railway Ferry. *Communications – Scientific letters of the University of Zilina*. 2019. Vol. 21. Iss. 1. P. 28–34. DOI: <https://doi.org/10.26552/com.c.2019.1.28-34>
10. Fomin O., Gerlici J., Lovskaya A., Kravchenko K., Prokopenko P., Fomina A., Hauser V. Research of the strength of the bearing structure of the flat wagon body from round pipes during transportation on the railway ferry. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 235. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823500003>
11. 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>
12. Fomin O. V., Lovska A. O., Plakhtii O. A., Nerubatskyi V. P. The influence of implementation of circular pipes in load-bearing structures of bodies of freight cars on their physico-mechanical properties. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2017. № 6. P. 89–96.
13. Haraka S. S., Sharma S. C., Harsha S. P. Structural dynamic analysis of freight railway wagon using finite element method. *Procedia Materials Science*. 2014. Vol. 6. P. 1891–1898. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.221>

14. Myamlin S., Neduzha L., Lunys O. Estimation of dynamic qualities of freight wagons on bogies of a perspective model. *IX International conference*. 2017. P. 459–471.
15. Płaczek M., Wróbel A., Buchacz A. A concept of technology for freight wagons modernization. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 161. P. 1–13.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/161/1/012107>
16. Shvets A. O., Bolotov O. O. Influence of loading from the axle of a gondola car on its dynamic indicators and railway track. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 1 (79). С. 151–166.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/158127>
17. Stoilov V., Slavchev S., Purgic S. Study of fatigue in welded joints and stress notches of wagon series S(g)mmns with methods of UIC and DVS 1612. URL: http://www.mech-ing.com/journal/Archive/2012/9/nano/82_Stoilov%20d1%20en_tm'12.pdf
18. Vatulja G., Komagorova S., Pavliuchenkov M. Optimization of the truss beam. Verification of the calculation results. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 230. P. 1–8.
DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823002037>

O. V. FOMIN¹, A. O. LOVSKA^{2*}

¹Dep. «Cars and Carriage Facilities», State Economy and Technology University of Transport, Kyrylivska St., 19, Kyiv, Ukraine, 03049, tel. +38 (067) 813 97 88, e-mail fomin1985@list.ru, ORCID 0000-0003-2387-9946

^{2*}Dep. «Wagon Engineering and Product Quality», 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

Research of the Vertical Dynamics of the Supporting Structures of Freight Cars Made of Round Pipes

Purpose. This study is aimed at determining the vertical dynamics of supporting structures of freight cars made of round pipes. **Methodology.** Mathematical modeling of the dynamic loading of the supporting structures of the main types of freight cars made of round pipes (gondola car, covered car, flat car, hopper car) was carried out. The studies were carried out in a plane coordinate system – the XZ plane. At the same time, it was taken into account that the car is moving in an elastic-viscous track so that the reactions of the track are proportional to both its deformation and the rate of this deformation. The studies were carried out for the case of empty cars. The joint inequality is described by a periodic function. The calculation was performed at a speed of 80 km/h. Differential equations of motion were solved in the MathCad software package using the Runge-Kutta method. **Findings.** Based on the mathematical modeling of the dynamic loading of the supporting structures of cars made of round pipes, the main indicators of their dynamics were obtained: accelerations acting on the supporting structures in the mass center, forces acting in the spring suspension of bogies, dynamics coefficients. For gondola car, covered car, and hopper car, the acceleration at the mass center of the supporting structure is within 0.4 g, and for a flat car – 0.5 g. It was found that the obtained indicators of the dynamics of cars made of round pipes are within the permissible limits. The accelerations acting on the supporting structures of cars made of round pipes are almost the same as those obtained for prototype cars. At the same time, the motion of cars is assessed as «excellent» for gondola car, covered car, and hopper car and «good» for flat car. **Originality.** Mathematical modeling of the dynamic loading of the supporting structures of cars from round pipes was carried out and the main indicators of their dynamics were obtained. **Practical value.** The research carried out will contribute to the creation of recommendations for the design of supporting structures of freight cars of round pipes, and can also be useful developments in the creation of innovative car designs.

Keywords: car; supporting structure; dynamic loading; vertical dynamics; transport mechanics

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)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

3. Domin, Yu. V. (2001). *Zaliznychna tekhnika mizhnarodnykh transportnykh system (vantazhni perevezennya)*. Kiev: Yunikom-Pres. (in Ukrainian)
4. Dyakonov, V. (2000). *MATHCAD 8/2000: spetsialnyy spravochnik*. St. Petersburg: Izdatelstvo «Piter». (in Russian)
5. Yermolenko, I. Yu., & Zheleznyak, V. N. (2016). Issledovanie dinamiki podvizhnogo sostava s ispolzovaniem eksperimentalnogo vagona-laboratorii pri dvizhenii po slozhnym uchastkam dorogi VSZhD. *Modern Technologies system. Analysis. Modeling*, 4(52), 199-203. (in Russian)
6. Kiryanov, D. V. (2006). *Mathcad 13*. St. Petersburg: BKhV-Peterburg. (in Russian)
7. Lukhanyin, M. I., Myamlin, S. V., Neduzha, L. A., & Shvets, A. O. (2012). Freight Cars Dynamics Taking into Account Transversal Displacement of the Bogies. *Zbirnyk naukovykh prats DonIZT*, 29, 234-241. (in Russian)
8. Chao, C., Mei, H., & Yanhui, H. (2012). Study of Railway Freight Vehicle Body's Dynamic Model Based on Goods Loading Technical Standards. *Procedia Engineering*, 29, 3572-3577. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.533> (in English)
9. Fomin, O., Gerlici, J., Lovska, A., Kravchenko, K., Prokopenko, P., Fomina, A., & Hauser, V. (2019). Durability Determination of the Bearing Structure of an Open Freight Wagon Body Made of Round Pipes during its Transportation on the Railway Ferry. *Communications-Scientific Letters of the University of Zilina*, 21(1), 28-34. DOI: <https://doi.org/10.26552/com.c.2019.1.28-34> (in English)
10. Fomin, O., Gerlici, J., Lovskaya, A., Kravchenko, K., Prokopenko, P., Fomina, A., & Hauser, V. (2018). Research of the strength of the bearing structure of the flat wagon body from round pipes during transportation on the railway ferry. *MATEC Web of Conferences*, 235, 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823500003> (in English)
11. 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)
12. Fomin, O. V., Lovska, A. O., Plakhti, O. A., & Nerubatskyi, V. P. (2017). The influence of implementation of circular pipes in load-bearing structures of bodies of freight cars on their physico-mechanical properties. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 89-96. (in English)
13. Haraka, S. S., Sharma, S. C., & Harsha, S. P. (2014). Structural dynamic analysis of freight railway wagon using finite element method. *Procedia Materials Science*, 6, 1891-1898. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.221> (in English)
14. Myamlin, S., Neduzha, L., & Lunys, O. (2017). Estimation of dynamic qualities of freight wagons on bogies of a perspective model. *IX International conference*, 459-471. (in English)
15. Placzek, M., Wróbel, A., & Buchacz, A. (2016). A concept of technology for freight wagons modernization. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 161, 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/161/1/012107> (in English)
16. Shvets, A. O., & Bolotov, O. O. (2019). Influence of loading from the axle of a gondola car on its dynamic indicators and railway track. *Science and Transport Progress*, 1(79), 151-166. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/158127> (in English)
17. Stoilov, V., Slavchev, S., & Purgic, S. Study of fatigue in welded joints and stress notches of wagon series s (g)mmns with methods of UIC and DVS 1612. Retrieved from http://www.mech-ing.com/journal/Archive/2012/9/nano/82_Stoilov%20d1%20en_tm'12.pdf (in English)
18. Vatulja, G., Komagorova, S., & Pavliuchenkov, M. (2018). Optimization of the truss beam. Verification of the calculation results. *MATEC Web of Conferences*, 230, 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823002037> (in English)

Надійшла до редколегії: 02.10.2020

Прийнята до друку: 02.02.2021

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 624.21.095:[624.072:539.319]

С. В. КЛЮЧНИК^{1*}

^{1*}Каф. «Транспортна інфраструктура», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 667 40 49, ел. пошта ssser05@ukr.net, ORCID 0000-0001-7771-8377

Дослідження роботи вузла поверхового сполучення балок проїзної частини залізничного моста

Мета. Поверхове сполучення балок проїзної частини залізничних мостів найбільш просте за конструкцією, але внаслідок конструктивних недоліків виникають численні дефекти. Метою цієї роботи є дослідження пропонувані раніше способів підсилення вузла спирання балок проїзної частини поверхового сполучення, а також дослідження роботи запропонованого автором підсилення. **Методика.** Проаналізовано стан металевих мостів, експлуатованих на залізниці. Виявлено, що вирішальним елементом для визначення вантажопідйомності всього моста є балки проїзної частини. Для досягнення поставленої мети за допомогою методу скінченних елементів проведено аналіз напруженого стану вузла спирання поздовжньої балки на поперечну без підсилення та з підсиленням. Виявлено раціональні параметри запропонованого вузла підсилення. Розрахунки проведено в програмному забезпеченні «Selenia». **Результати.** Автор отримав і проаналізував деформаційно-напружений стан вузла сполучення поздовжніх балок із поперечними за їх поверхового розташування, підібрав раціональні параметри елементів підсилення вузла спирання балок поверхового сполучення та проаналізував деформаційно-напружений стан нового вузла сполучення поздовжніх балок із поперечними за їх поверхового розташування на основі типових прогонових споруд «Проектсталеконструкції» (ПСК). Аналіз показує, що після запропонованого підсилення максимальні напруження в горизонтальних полицях поясних кутиків поздовжніх і поперечних балок, що руйнували конструкції, зменшились на 43–73 %. **Наукова новизна.** У роботі проведено аналіз напружено-деформованого стану металевих балок проїзної частини поверхового розташування з урахуванням спільної роботи балок із несучими фермами, а також досліджено напружено-деформований стан запропонованого підсилення вузла спирання металевих балок з виявленням раціональних параметрів. **Практична значимість.** Зазначений спосіб ремонту з підсиленням рекомендовано як найбільш раціональний для моста через річку Інгулець на 109-му км лінії Верхівцеве – Долинська (договір № 94/2011–Цтех–177/2011–ЦЮ від 30.09.2011). За поданими результатами було оформлено патент на корисну модель № 109806 від 12.09.2016.

Ключові слова: поздовжні балки; деформація; напруження; поперечні балки; металеві прогонові споруди

Вступ

Підвищення вантажопідйомності моста та подовження експлуатаційного ресурсу металевих прогонових споруд залізничних мостів, з урахуванням виявлених пошкоджень, можливі за умови усунення наявних дефектів утомного характеру, модернізації вузлів спирання поздовжніх балок мостового полотна на попе-

речні. Поверхове сполучення балок проїзної частини найбільш просте за конструкцією (рис. 1). Його застосовували у випадках, коли будівельна висота проїзної частини дозволяла встановити поздовжні балки на поперечні [1, 3].

Поперечні зв'язки поставлені тільки над опорами, тобто над поперечними балками. Ярусне розташування балок дозволило спростити їх поєднання. У місцях спирання поздов-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

жні балки прикріплені до поперечних болтами, причому отвори для болтів у поясах поздовжніх балок зроблені овальними, щоб створити можливість зрушення поздовжніх балок й усунути вигин поперечних балок у горизонтальній площині в разі деформації поясів. Тільки щодо середньої поперечної балки поздовжні балки жорстко прикріплені до розширених вузлових фасонів поздовжніх зв'язків і передають їм гальмівні сили. Завдяки поверховому розташуванню в поздовжніх балках скоротилося число монтажних стиків, які призначені через кожні дві панелі [1].

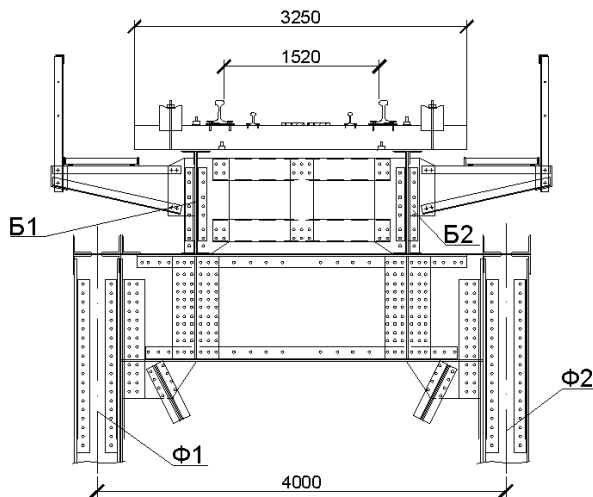


Рис. 1. Конструкція проїзної частини поверхового сполучення

Fig. 1. Track-way structure of the staged connection

Але внаслідок конструктивних недоліків такої споруди виникають численні дефекти:

- ослаблення та розрив вертикальних заклепок або болтів прикріплення поздовжніх балок до поперечних;
- нещільність спирання поздовжніх балок на поперечні;
- поздовжні тріщини в нижніх поясах кутиках поздовжніх балок уздовж обушків кутиків на їх кінцевих відрізках;
- тріщини уздовж обушків верхніх поясах кутиків поперечних балок у місцях спирання поздовжніх балок;
- вихили горизонтальних полиць верхніх поясах кутиків поперечних балок у зоні спирання поздовжніх балок.

Усе це свідчить про те, що конструкція сполучення балок проїзної частини з поверховим розташуванням поздовжніх і поперечних балок, застосована на мосту, є невдалою й вимагає підвищення надійності конструкцій прикріплення.

Мета

Проблема в конструктивному вирішенні поверхового з'єднання балок проїзної частини, яка існує сьогодні, полягає в необхідності підвищення надійності конструкції вузла прикріплення поздовжніх балок до поперечних, тобто його підсилення. Для цього необхідно дослідити деформаційно-напружений стан вузла сполучення поздовжніх балок із поперечними до та після підсилення. У цій роботі для визначення раціональних параметрів конструкцій підсилення вузла балочної клітки поверхового сполучення виконано чисельне дослідження напружено-деформованого стану цього вузла. Метою досліджень було запропонувати конструкцію підсилення вузла, щоб позбутися руйнівних напружень у деталях поздовжніх і поперечних балок проїзної частини. Особливу увагу під час досліджень напружень було звернуто на визначення раціональних параметрів конструкції підсилення за мінімальних затрат, оскільки саме вартість ремонту має суттєве значення в сучасних умовах.

Методика

Неодноразово були запропоновані проекти підсилення та ремонту поверхової конструкції балок проїзної частини [4]. Основні принципи й конструктивні рішення підсилення прогонових споруд мостів із поверховим розташуванням балок проїзної частини базуються на ідеї забезпечення максимального наближення роботи проїзної частини з поверховим сполученням балок до роботи проїзної частини поздовжніх і поперечних балок за розташування їх в одному рівні. Конструктивно це досягається тим, що під кожною поздовжньою балкою влаштовують додатковий пояс із чотирьох кутиків 125×80×10, що об'єднані між собою та встановлені в рівні нижнього пояса поперечних балок цієї панелі й з'єднують додатковий пояс та поздовжню балку з вертикальними стінками попе-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

речних балок. При цьому об'єднання поздовжніх балок і додаткових поясів підвищує вдвічі висоту поздовжніх балок біля поперечних, відповідно знижуючи розрахункові зусилля в поясах поздовжніх балок над поперечними, збільшує довжину спирання поздовжніх балок і зону передачі від них зусиль на поперечну балку та знижує зусилля в поясах поздовжніх балок у середині панелей. Указане підсилення балок проїзної частини доповнене встановленням горизонтальних жорстких діафрагм, які з'єднують верхні пояси головних ферм із поздовжніми балками для включення останніх у сумісну роботу з поясами ферм від поїзного навантаження. Діафрагми горизонтальні зменшують горизонтальні згинальні моменти в поперечних балках і поліпшують умови роботи поперечних балок.

На основі вивчення технічної документації за типовими проектами, аналізу результатів попередніх обстежень цих прогонових споруд ПСК з поверховим сполученням балок проїзної частини, аналізу характеру та динаміки розвитку тріщин встановлено таке:

- основною причиною появи тріщин і виколів у нижніх поясних кутиках поздовжніх балок у місцях їх спирання на поперечні, тріщин і виколів горизонтальних полицок верхніх поясних кутиків поперечних балок і розладнань вузлів спирання є недоліки прийнятого в проектах ПСК конструктивного рішення поверхового сполучення балок, яке призвело до місцевих перенапружень у металі;

- несприятливий вплив на напружений стан металу в місцях появи тріщин мають деформації балок, які виникають у разі сумісної роботи балок проїзної частини з верхніми поясами головних ферм під час завантаження всієї прогону споруди рухомим складом; при цьому верхні пояси ферм скорочуються, поперечні балки згинаються в горизонтальному напрямку й закручуються, а в місці сполучення поздовжніх і поперечних балок виникають додатковий кут взаємного повороту, деформації кінцевих відрізків поясних кутиків поздовжніх балок та деформації верхніх поясних кутиків поперечних балок у місцях спирання на них поздовжніх балок;

- у зв'язку з відсутністю діагоналей поперечних в'язей між поздовжніми балками (у тому числі і в перерізах над поперечними балками) в разі дії горизонтальних поперечних навантажень від рухомого складу можлива деяка деформація контура поперечних в'язей і додаткові напруження в поясних кутиках поздовжніх балок на їх кінцевих відрізках та в кутиках поперечних балок;

- за наявності нещільності спирання поздовжніх балок на поперечні збільшуються динамічні навантаження на балки та з'являються осередки корозії, виплески та вироблення металу в місцях спирання;

- на відміну від з'єднання балок проїзної частини в одному рівні, за поверхового спирання поздовжніх балок на поперечні елементи прикріплення (заклепки або болти) та полицки поясних кутиків балок виявились неспроможними сприймати вертикальні моменти, які виникають у разі лінійних та кутових деформацій балок.

З аналізу результатів обстежень металевих прогонових споруд мостів із поверховим розташуванням балок проїзної частини [4÷7] випливає, що в переважній більшості випадків клас прогонової споруди зазвичай визначає клас балок проїзної частини як найбільш дефектних елементів усієї прогонової споруди (табл. 1).

Одноманітна дефектність визначається як особливостями конструкції металевих прогонових споруд із поверховою проїзною частиною, так і тим фактом, що несприятливий вплив на напружений стан металу в місцях появи тріщин мають деформації балок, які виникають за сумісної роботи балок проїзної частини з верхніми поясами головних ферм.

Основними пріоритетними заходами з підвищення вантажопідйомності та подовження експлуатаційного ресурсу металевих прогонових споруд залізничних мостів, з урахуванням виявлених пошкоджень, визначено проведення ремонтних робіт, спрямованих на усунення наявних дефектів утомного характеру, модернізацію вузлів мостового полотна прогонових споруд та відновлення експлуатаційного ресурсу.

Таблиця 1

Результати класифікацій балок проїзної частини та елементів ферм металевих прогонових споруд мостів із поверховим розташуванням балок

Table 1

Classifications results of track-way stringers and truss elements of metal spans of bridges with a staged location of stringers

№ з/п	Розташування моста	Довжина прогону, м	Клас балок, К	Клас елементів ферм, K_{min}
1	Через річку Мокра Москва на 186-му км лінії Кривий Ріг – Волноваха	44	3,9	7,84
2	Через річку Південний Буг на 49-му км лінії Вапнярка – Христинівка	55	4,77	6,38
3	Через річку Прут на 1662-му км лінії Курчуган – Унгени	70,63	4,92	6,53
4	Через річку Мала Вись на 995-му км лінії Шевченко – Помічна	44	4,6	8,2
5	Через річку Інгулець на 109-му км лінії Долинська – Верхівцеве – Ясинувата	55	4,8	6,5

Результати

Як було зазначено раніше, головною проблемою залізничних прогонових споруд із поверховою проїзною частиною є крутий момент, що виникає в поперечній балці та через

4 болти прикріплення поперечної балки до поздовжньої передається на неї. Напруження в горизонтальних полицях кутиків досягають 230–330 МПа [14], що значно перевищує розрахункові значення опору металу.

Коли балки знаходяться в одному рівні (паралельне розміщення балок), ця проблема не виникає, оскільки відсутній ексцентриситет по висоті між поздовжніми та поперечними балками [10–12].

Найпростішим способом усунення цієї проблеми могло б стати вилучення поздовжніх балок із сумісної роботи з поясами ферм [4]. Цього можна досягнути від'єднанням поздовжніх балок від поперечних, але при цьому невирішеною залишиться проблема гальмівних зусиль, геометричної незмінності всієї конструкції. Також за реалізації цього методу суттєво збільшилась будівельна висота прогонової споруди, тому цей напрям був визначений як такий, що важко реалізується в цій конструкції.

Наступним методом, що може перешкодити викручуванню поперечних балок, є об'єднання їх у районі нижнього пояса спеціальними в'язями, як запропоновано проєктним інститутом «Гипротранспуть» [4]. Основна ідея – максимально забезпечити наближення роботи проїзної частини з поверховим сполученням балок до роботи проїзної частини поздовжніх і поперечних балок за розташування їх в одному рівні. При цьому об'єднання поздовжніх балок і додаткових поясів підвищує вдвічі висоту поздовжніх балок біля поперечних, відповідно знижуючи розрахункові зусилля в поясах поздовжніх балок над поперечними, збільшує довжину спирання поздовжніх балок і зону передачі від них зусиль на поперечну балку та знижує зусилля в поясах поздовжніх балок в середині панелей. Зусилля, що виникатимуть у в'язях, будуть утримувати поперечні балки від викручування, а болти прикріплення будуть працювати лише на зсувні зусилля. Але такий спосіб надто затратний за вартістю та трудомісткістю.

Іншим напрямом усунення проблеми є підсилення самого вузла спирання поздовжньої балки на поперечну. Для вирішення проблем конструктивного рішення поверхового спирання балок пропонуємо встановлення консольних

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

листів, розташованих уздовж поздовжньої балки та прикріплених до стінки поперечної балки й посилені сталевими кутиками (рис. 2).

Таку конструкцію направлено на підсилення вузла спирання поздовжньої балки на поперечну, зменшення небажаних деформацій, усунення появи дефектів вузла та зменшення матеріальних затрат і витрат часу під час ремонтних робіт.

Для забезпечення надійної та ефективної роботи запропонованого вузла необхідно відшукати найвигідніші параметри для кожного збірного елемента конструкції вузла окремо та за сумісної роботи всіх елементів разом.

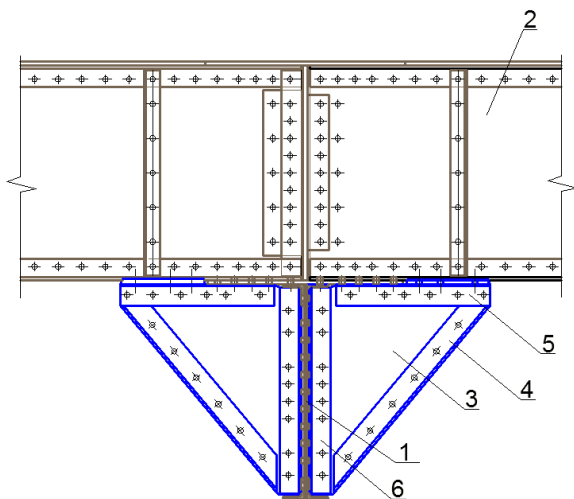


Рис. 2. Вузол спирання поздовжньої балки на поперечну:

- 1 – поперечна балка, 2 – поздовжня балка,
3 – консольні опорні листи, 4 – кутики підсилення,
5 – кутики кріплення листів до пояса поздовжньої балки,
6 – кутики кріплення листів до стінки поперечної балки

Fig. 2. Support node of the stringer on the floor beam:

- 1 – floor beam, 2 – stringer,
3 – cantilever support plates, 4 – strengthening angles,
5 – plates attach angles to the flange of the stringer,
6 – plates attach angles to the wall of the floor beam

Головний критерій підбору параметрів вузла – це зменшення небажаних концентрацій напружень у балках проїзної частини зі встановленими додатковими консольними листами й посилені сталевими кутиками, описаними раніше, за найменших матеріальних затрат.

Параметри елементів, що підлягали дослідженню, це:

- величина консолі;
- товщина консольного опорного (фасонного) листа;
- розмір кутиків підсилення (величина та товщина стінки);
- величина деформації (прогину) характерної точки, що впливає на кут повороту опорного перерізу поздовжньої балки, та її залежність від підібраних елементів підсилення.

Для визначення величини консолі була побудована просторова консольна розрахункова схема зі стрижневих та плоских кінцевих елементів [11]. За розрахункову модель поздовжньої балки було взято просторову модель із кінцевих елементів у вигляді пластин, що моделюють балки цієї прогонової споруди. Розрахунки проведено за допомогою методу скінченних елементів у програмному комплексі Selena 4.1.1 (ліцензійний ключ 1802619725) [9].

Розміри всіх пластин (верхня та нижня полиця, стінка балки) змодельовано чітко відповідно до реальної конструкції. Кутики підсилення консолі взято як стрижень. За розрахункове було взято статичне рівномірне розподілене навантаження, величина якого становить 50 кН/м. Отриману просторову модель показано на рис. 3.

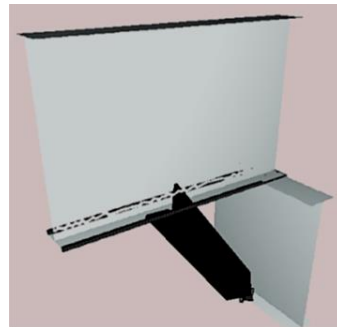


Рис. 3. Просторова модель для визначення величини консолі

Fig. 3. Spatial model for determining the cantilever size

Параметр величини консолі було підібрано за максимальними величинами напружень у нижньому поясі поздовжньої балки та верхньому поясі поперечної балки. Отримані напруження подано в табл. 2.

Таблиця 2

Отримані напруження в поздовжніх та поперечних балках за різної величини консолі

Table 2

Obtained stresses in the stringers and floor beams for different sizes of the cantilever

Величина консолі, см	Максимальні напруження, МПа				Прогин консолі, мм
	Поздовжня балка		Поперечна балка		
0	660	−180	1560	− 120	103,4
20	188	−36	75	−18	3,2
30	72	−108	82,5	−7,5	1,65
40	30	−33	84	−6	1,1
50	33	−23	88	−4	0,84
60	32	−16	88	−4	0,67
70	33	−29	88	−4	0,63
80	33	−10	88	−4	0,59
90	33	− 11,2	88	−4	0,56
100	33	− 11,5	88	−4	0,54

Графіки максимальних напружень показано на рис. 4 та 5, а отримані поля напружень поясів балок при цьому зображено рис. 6 та 7.

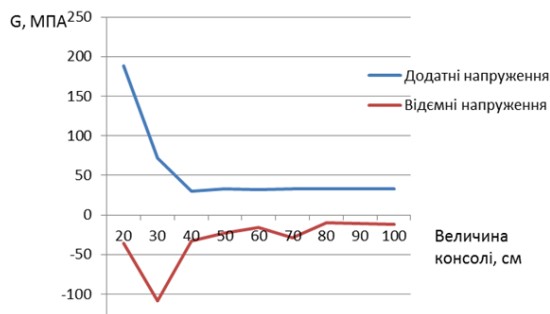


Рис. 4. Максимальні напруження поздовжньої балки, МПа

Fig. 4. Maximum stresses of the stringer, MPa

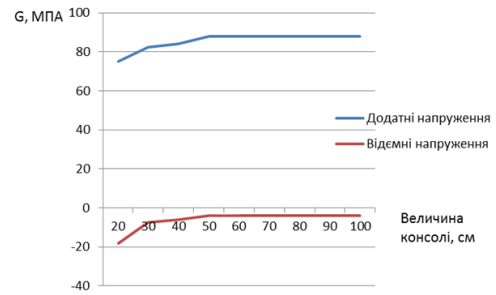


Рис. 5. Максимальні напруження поперечної балки, МПа

Fig. 5. Maximum stresses of the floor beam, MPa

Максимальні напруження поздовжньої та поперечної балок за величини консолі більше ніж 40 см достатньо стабільні.

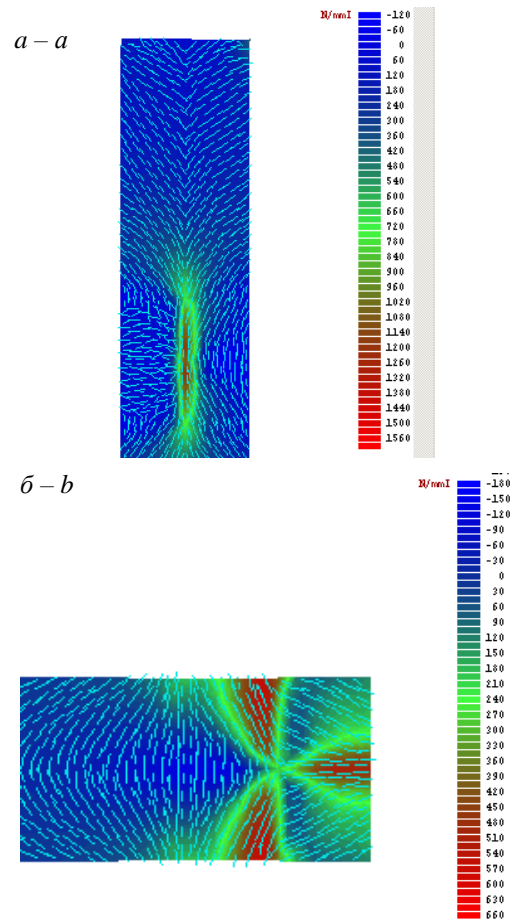


Рис. 6. Напружений стан поясів поздовжньої балки просторової моделі без консолі, МПа: а – верхнього; б – нижнього

Fig. 6. Stress-strain state of the stringer flanges of the spatial model without a cantilever, MPa: a – the upper one; b – the lower one

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Проаналізувавши поля головних напружень, можна з упевненістю сказати, що робота балок у разі гірша без консолі. Напруження в обох балках стабілізуються, починаючи з величини консолі в 40÷50 см. Але за величини консолі 80 см напружений стан поздовжньої балки є мінімальним. Прогини фіксованої точки (див. рис. 8), що впливає на кут повороту вузла спирання балок, свідчать, що за величини консолі в 70 та 80 см різниця зменшення величини прогину є кращим критерієм для визначення раціональних параметрів.

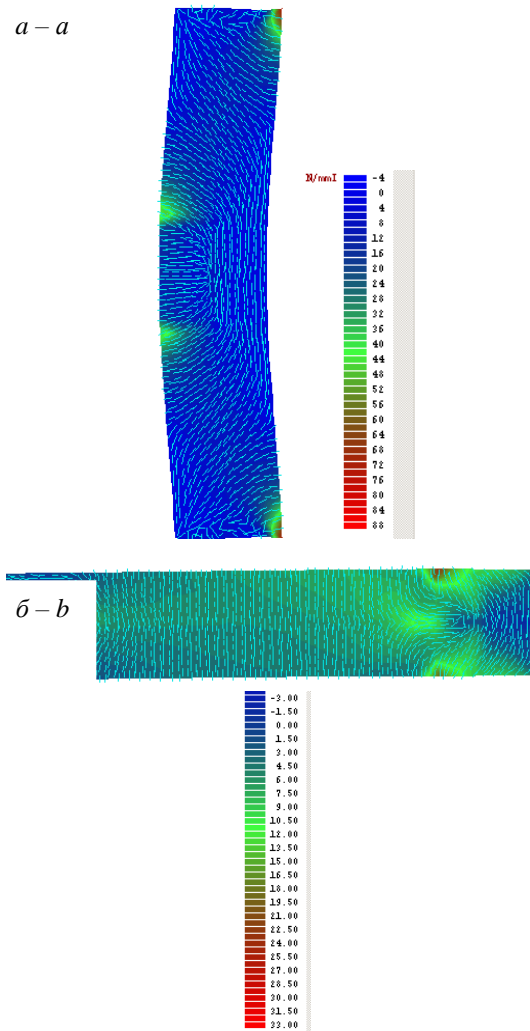


Рис. 7. Напружений стан поясів поздовжньої балки просторової моделі з консоллю 80 см, МПа:
а – верхнього; б – нижнього

Fig. 7. Stress-strain state of the stringer flanges of the spatial model without with a cantilever of 80 cm, MPa:
a – the upper one; b – the lower one

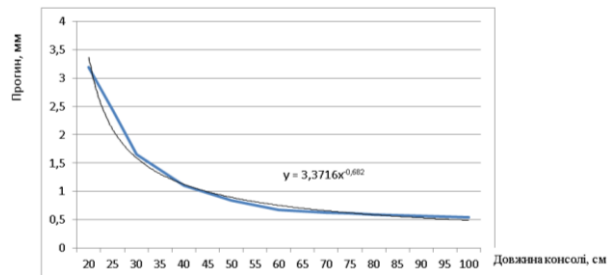


Рис. 8. Графік залежності прогину фіксованої точки на поздовжній балці від величини консолі

Fig. 8. Dependence graph of a fixed point deflection on the stringer on the size of the console

Одноточний аналіз напружено-деформованого стану балок просторової моделі засвідчує, що оптимальна величина консолі становить 80 см.

Для вирішення питань підбору товщини металевго листа консолі та величини кутиків підсилення було проведено розрахунки моделі зі стрижневих та плоских кінцевих елементів, де параметри елементів змінювались. Товщину металевго листа розглядали від 8 до 12 мм, а кутики підсилення – від 80×80×7 до 125×125×8. Завантаження балки також виконано статичним рівномірно розподіленим навантаженням, величина якого 20 кН/м. Результати розрахунків наведено в табл. 3.

У результаті аналізу отриманих показників, можна зробити висновки, що розмір кутика майже не впливає на напружений стан металевго горизонтального листа балок. Напружений стан самого кутика залежить більше від товщини полиці кутика ніж від величини кутика, і напруження рівномірно зменшуються залежно від товщини листа консолі та розміру самого кутика. У реальних конструкціях прогонових споруд встановлені кутики 100×100×10 та листи товщиною 10 мм. Тому, зважаючи на уніфікацію конструктивних проєктних рішень, доцільно в посиленні вузла спирання балок одна на одну теж узяти кутики 100×100×10 та металеві листи товщиною 10 мм.

Таблиця 3
Результати розрахунків параметрів елементів підсилення

Table 3

Calculation results of the parameters of the strengthening elements

№ з/п	Кутик, мм	Товщина листа, мм	Напруження, МПа		Прогин характерної точки, мм
			Кутик	Лист	
1	2	3	4	5	6
1	80×80×7	Δ=8	43,7	6,0	4,18
		Δ=10	35,8	5,0	3,83
		Δ=12	34,5	4,5	3,55
2	80×80×10	Δ=8	37,6	5,0	3,44
		Δ=10	33,8	4,4	3,19
		Δ=12	30,6	3,6	2,99
3	90×90×7	Δ=8	40,7	6,0	3,89
		Δ=10	36,0	5,0	3,58
		Δ=12	32,2	4,4	3,33
4	90×90×9	Δ=8	36,4	5,0	3,37
		Δ=10	32,8	4,4	3,13
		Δ=12	29,6	4,0	2,94
5	100×100×7	Δ=8	38,0	5,5	3,63
		Δ=10	33,8	5,0	3,36
		Δ=12	30,4	4,4	3,13
6	100×100×10	Δ=8	32,1	4,4	2,93
		Δ=10	29,1	3,6	2,75
		Δ=12	26,5	3,6	2,59
7	125×125×8	Δ=8	30,7	4,4	2,86
		Δ=10	27,2	4,0	2,69
		Δ=12	25,3	3,6	2,54

Дослідження напружено-деформованого стану запропонованого вузла спирання поздовжніх балок на поперечні. Для визначення величини напружень у балках зі встановленими додатковими консольними листами й поси-

ними сталевими кутиками, описаними раніше, було змодельовано просторовий вузол з'єднання балок поверхового типу з елементами підсилення (рис. 9). Для побудови моделі в натуральну величину також використано кінцеві елементи трикутної форми, які було генеровано в поверхні відповідної товщини металу у збірці.

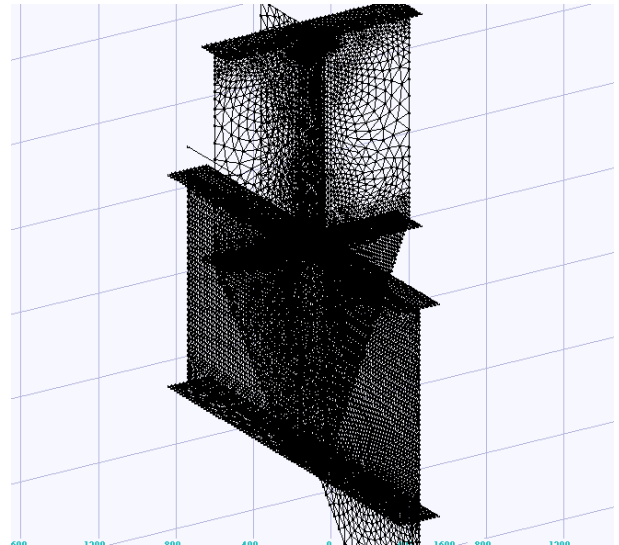


Рис. 9. Загальний вигляд просторової моделі вузла з підсиленням

Fig. 9. General view of the spatial model of the node with reinforcement

У результаті було отримано скінченно-елементну модель, що складається з 17 107 вузлів та 34 374 кінцевих елементів.

Навантаження на модель виконували за крайовими умовами з урахуванням отриманих зусиль у просторовій моделі ферми, аналогічних навантаженню попередніх розрахунків без підсилення вузла.

Після розрахунку отримано поля напружень, які зображено на рис. 10.

Якщо порівняти ці результати з попереднім випадком, коли підсилення відсутнє, то можна констатувати, що напруження в кутиках горизонтальних полиць поздовжньої балки з підсиленням зменшилось на 73 % до 54 МПа, а напруження за верхніми горизонтальними полицями кутиків поперечної балки з підсиленням зменшилось на 43–48 % до 170 МПа.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

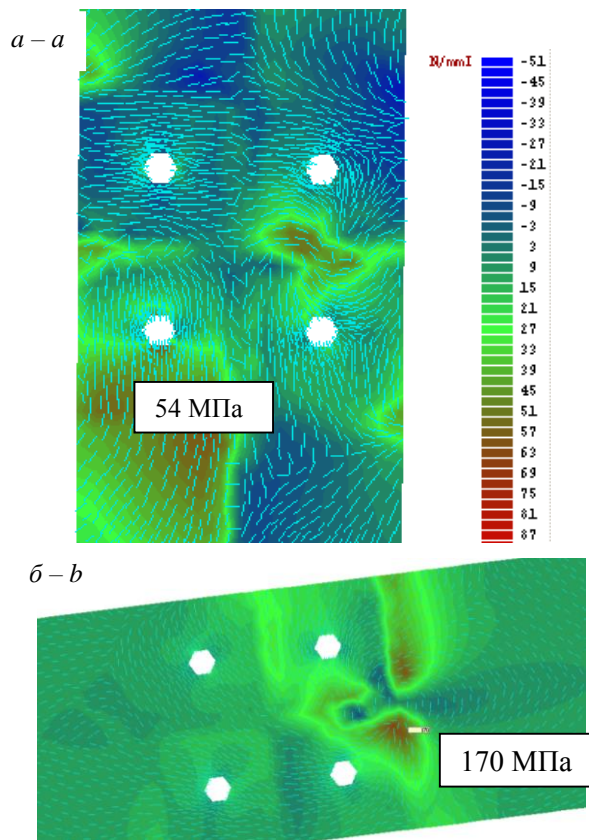


Рис. 10. Напружений стан за горизонтальними полицями кутків із підсиленням, МПа:
а – поздовжньої балки; б – поперечної балки

Fig. 10. Stress-strain state behind the horizontal legs of the angles with reinforcement, MPa:
а – stringer; б – floor beam

Наукова новизна та практична значимість

У ході дослідження вивчено технічну документацію за типовими проектами «Проектстальконструкції», проведено аналіз результатів попередніх обстежень даних прогонових споруд ПСК з поверховим сполученням балок проїзної частини, аналіз характеру та динаміки розвитку тріщин. Також проаналізовано результати обстежень металевих прогонових споруд мостів із поверховим розташуванням балок проїзної частини [4–7] й виявлено, що в переважній більшості випадків клас прогонової споруди зазвичай визначає клас балок проїзної частини як найбільш дефектних елементів усієї споруди.

У роботі досліджено напружено-деформований стан підсилення вузла спирання металевих балок проїзної частини поверхового розташування. Запропоновано нову конструкцію підсилення вузла спирання поздовжніх балок на поперечні з підбором раціональних параметрів конструкції.

Представлена конструкція, на відміну від попередніх:

- не усуває включення в сумісну роботу поздовжніх балок;
- не протидіє виникненню крутного моменту в поперечній балці.

Головна мета цієї конструкції – більш плавно передати зусилля з поперечної балки на поздовжню, суттєво збільшуючи площу їх взаємного спирання.

За отриманими результатами було оформлено патент на корисну модель № 109806 від 12.09.2016 [2].

Особливістю прогонових споруд, створених за кресленнями «Проектстальконструкції», є однотипність проїзної частини, що дозволило розробити креслення консолей підсилення, які підійдуть до будь-яких прогонових споруд за цією серією. Додатковою перевагою цього способу є той факт, що матиме місце суттєве збільшення вантажопідйомності поздовжніх балок. Цей спосіб ремонту найбільш раціональний (рекомендовано для моста через річку Інгулець на 109-му км лінії Верхівцеве – Долинська, договір № 94/2011–Цтех–177/2011–ЦЮ від 30.09.2011 [8]. «Проведення досліджень стану залізничних металевих мостів з двоповерховою проїзною частиною та шляхи їх реконструкції під сучасні вимоги»).

Висновки

За результатами розрахунків та комп'ютерного моделювання визначено, що основною причиною появи тріщин є конструктивна недосконалість вузлів спирання поздовжніх балок на поперечні прогонової споруди з поверховою проїзною частиною, характерна для аналогічних конструкцій. Аналіз напружено-деформованого стану наявної конструкції вузла спирання поздовжніх балок на поперечні свідчить про складні умови роботи балочної клітини. Напруження в горизонтальних поли-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

цях кутиків досягають 230–330 МПа, що значно перевищує розрахункові значення опору металу.

Запропонована нова конструкція вузла спираючого поздовжніх балок на поперечні усуває недолік концентрації напружень. Виявлено раціональні параметри вузла: величина консолю підсилення становить 80 см, величину елементів вузла взято за конструктивними характерис-

тиками типового проєкту тому, що ці величини мають малий вплив на НДС вузла.

Дослідження напружено-деформованого стану запропонованого вузла спираючого поздовжніх балок на поперечні показало, що максимальні напруження в горизонтальних полицях поясних кутиків поздовжніх і поперечних балок (за цих умов) зменшились на 43–73 % та становлять 100–170 МПа.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бычковский Н. Н., Данковцев А. Ф. *Металлические мосты*. Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., 2005. 364 с.
2. *Вузол спираючого поздовжньої балки на поперечну*: пат. 109806 Україна: МПК Е 01 D 1/00, Е 01 D 19/00, Е 01 D 101/30. № у 2016 01940; заявл. 29.02.2016; опубл. 12.09.2016, Бюл. № 17. 4 с.
3. Едвабный В. И. Результаты расчетно-экспериментального исследования работы эстажно расположенных балок проезжей части однопутных мостов. *Вопросы статической и динамической работы мостов*: Межвуз. сб. науч. тр. ДИИТа. 1972. Вып. 127. С.134–140.
4. Ключник С. В., Марочка В. В. Обзор вариантов усиления та ремонту балок проїзної частини поверхового типу. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2014. № 6. С. 35–40.
5. *Науково-дослідна робота (НДР) № 279 «Обследование и испытание железнодорожного моста через р. Мокрая – Московка на 188 км линии Долгинцево – Волноваха Приднепровской железной дороги»*. ГНДЛ штучних споруд ДНУЗТ, 1970. 72 с.
6. *НДР № 603 від 22.04.2004 р. «Визначення вантажопідйомності прогонових будов l=55,0 м на мосту через річку Південний Буг на 49 км лінії Вапнярка – Христинівка і розробка рекомендацій по підготовці мосту до швидкісного руху поїздів»*. ГНДЛ штучних споруд ДНУЗТ, 2004. 59 с.
7. *НДР № 604 «Обстеження і випробування металевої прогонової будови з поверховою проїзною частиною моста 995 км лінії Шевченко – Помічна та розробка рекомендацій по підсиленню балок проїзної частини, в яких виникли і розвиваються тріщини»*. ГНДЛ штучних споруд ДНУЗТ, 2004. 50 с.
8. *НДР № 94/2011-Цтех-177/2011-ЦЮ від 30.09.2011 р. «Проведення досліджень стану залізничних металевих мостів з двоповерховою проїзною частиною та шляхи їх реконструкції під сучасні, вимоги»* Київ «Укрзалізниця», 2011. 120 с.
9. Расчетный модуль Selenia. URL: <http://www.itech.net.ua/ru/calculation-module-selenia> (дата звернення: 09.11.2020).
10. Bokarev S. A., Zhunev K. O., Usol'tsev A. M. Stress-strain behavior of welded joints in railway girders. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. № 8. P. 119–129.
11. Diachenko L., Benin A., Smirnov V., Diachenko A. Rating of dynamic coefficient for simple beam bridge design on high-speed railways. *Civil and Environmental Engineering*. 2018. Vol. 14. Iss. 1. P. 37–43. DOI: <https://doi.org/10.2478/cee-2018-0005>
12. Glovnea M., Manolache-Rusu C., Suciuc C. Modeling of stress and strain states induced by torsion of straight rods with elliptical cross sections. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Iasi, 19-22 June 2019). Iasi, Romania, 2019. Vol. 591. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/591/1/012047>
13. Kitov Y., Verevicheva M., Vatulia G., Orel Y., Deryzemlia S. Design solutions for structures with optimal internal stress distribution. *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 133. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713303001>
14. Kluchnik S. V. Stress-strain state of beam staged connection point of the railway bridge track-way. *Наука та прогрес транспорту*. 2017. № 3 (69). P. 160–170. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/104762>

S. V. KLIUCHNYK^{1*}¹*Dep. «Transport Infrastructure», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 667 40 49, e-mail ssser05@ukr.net, ORCID 0000-0001-7771-8377

Operation Study of the Node of Stringer Staged Connection Point of the Railway Bridge Track-Way

Purpose. The staged connections of the stringers of railway bridge track-way have the simplest design, but some design flaws result in numerous defects. The purpose of this work is an investigation of the previously proposed methods of strengthening the support node for the stringers of the track-way of a staged communication, as well as investigation of the work of the reinforcement proposed by the author. **Methodology.** The author analyzes the condition of metal bridges operated on the railway. It was found that the decisive element in determining the load capacity of the entire bridge are the stringers of the track-way. To achieve this goal, the author analyzed the stress-strain state of the support node of the stringer on the cross-bar without and with reinforcement using the finite element method. The discovered rational parameters of the proposed reinforcement unit. The calculations were performed in Selena software. **Findings.** Stress-strain state of the connection point of the stringers with the floor beams on condition of their staged position was obtained and analyzed. The author selected the rational parameters of the reinforcement elements of the stringer support node for the staged communication and analyzed stress-strain state of the new connection node of the stringers with the floor beams at their staged location based on typical spans of Proiektstalkonstruktzii LLC (PSK). The analysis shows that after the proposed reinforcement, the maximum stresses in the horizontal legs of the flange angles of the stringers and floor beams, which destroyed the structures, decreased by 43–73%. **Originality.** The work analyzes the stress-strain state of metal stringers of the track-way of the staged location taking into account the joint work of stringers with load-bearing trusses, as well as the stress-strain state of the proposed reinforcement of the support node of metal stringers with the identification of rational parameters. **Practical value.** This method of repair with reinforcement is recommended as the most rational for a bridge over the Inhulets river at 109 km of the Verkhivtseve – Dolynska Railway (contract No. 94/2011–TsTekh–177/2011–ETU dated 09/30/2011). Based on these results, a patent for utility model No. 109806 dated 09/12/2016 was issued.

Keywords: stringers; strain; stress; floor beams; metal spans

REFERENCES

1. Bychkovskiy, N. N., & Dankovtsev, A. F. (2005). *Metallicheskie mosty*. Yuri Gagarin state technical university of Saratov. (in Russian)
2. Kliuchnyk, S. V., & Marochka, V. V. (2016). *UA Patent № u 2016 01940*. Ukrainian Intellectual Property Institute (UKRPATENT).
3. Yedvabnyy, V. I. (1972). Rezultaty raschetno-eksperimentalnogo issledovaniya raboty etazhno raspolozhennykh balok proezzhey chasti odnoputnykh mostov. *Voprosy staticheskoy i dinamicheskoy raboty mostov*, 27, 134-140. (in Russian)
4. Klyuchnik, S. V., & Marochka, V. V. (2014). Review of enhancement and repair options for roadway beams of two-level type. *Bridges and tunnels: Theory, Research, Practice*, 6, 35-40. (in Ukrainian)
5. *Naukovo-doslidna robota (NDR) № 279 «Obsledovanie i ispytanie zheleznodorozhnogo mosta cherez r. Mokraya-Moskovka na 188 km linii Dolgintsevo-Volnovakha Pridneprovskoy zheleznoy dorogi»*. (1970). HNDL shtuchnykh sporud DNUZT. (in Russian)
6. *NDR № 603 vid 22.04.2004 r. «Vyznachennya vantazhopidyomnosti prohonovykh budov l=55,0 m na mostu cherez richku Pivdenny Buh na 49 km liniyi Vapnyarka- Khrystynivka i rozrobka rekomendatsiy po pidhotovtsi mostu do shvydkisnoho rukhu poyizdiv»*. (2004). GNDL shtuchnykh sporud DNUZT. (in Ukrainian)
7. *NDR № 604 «Obstezhennya i vyprobuvannya metalevoyi prohonovoyi budovy z poverkhovoyu proyiznoyu chastynoyu mosta 995 km liniyi Shevchenko – Pomichna ta rozrobka rekomendatsiy po pidsylennyu balok proyiznoyi chastyny, v yakykh vynykly i rozvyvayut'sya trishchyny»*. (2004). GNDL shtuchnykh sporud DNUZT. (in Ukrainian)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

8. NDR № 94/2011-Tstekh-177/2011-TsYu vid 30.09.2011 r. «Provedennya doslidzhen' stanu zaliznychnykh metalovykh mostiv z dvopo-verkhovoyu proyiznoyu chastynoyu ta shlyakhy yikh rekonstruktsiyi pid suchasni, vymohy». (2011). Kyiv «Ukrzaliznytsia». (in Ukrainian)
9. Raschetnyy modul Selenia. Retrieved from <http://www.itech.net.ua/ru/calculation-module-selena> (in Ukrainian)
10. Bokarev, S. A., Zhunev, K. O., & Usol'tsev, A. M. (2018). Stress-strain behavior of welded joints in railway girders. *Magazine of Civil Engineering*, 8, 119-129. (in English)
11. Diachenko, L., Benin, A., Smirnov, V., & Diachenko, A. (2018). Rating of dynamic coefficient for simple beam bridge design on high-speed railways. *Civil and Environmental Engineering*, 14(1), 37-43. DOI: <https://doi.org/10.2478/cee-2018-0005>
12. Glovnea, M., Manolache-Rusu, C., & Suci, C. (2019, June). Modeling of stress and strain states induced by torsion of straight rods with elliptical cross sections. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 591, pp. 1-11). Iasi, Romania. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/591/1/012047> (in English)
13. Kitov, Y., Verevicheva, M., Vatulia, G., Orel, Y., & Deryzemlia, S. (2017). Design solutions for structures with optimal internal stress distribution. *MATEC Web of Conferences* (Vol. 133, pp. 1-4). DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713303001> (in English)
14. Kluchnik, S. V. (2017). Stress-strain state of beam staged connection point of the railway bridge track-way. *Science and Transport Progress*, 3(69), 160-170. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/104762> (in English)

Надійшла до редколегії: 02.10.2020

Прийнята до друку: 02.02.2021

ЗМІСТ

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

**Л. В. АМЕЛІНА, М. М. БІЛЯЄВ, О. В. БЕРЛОВ,
О. О. ВЕРГУН, Т. І. РУСАКОВА**
Моделювання забруднення довкілля в разі емісії аміаку
з пошкодженого трубопроводу 5

**М. М. БІЛЯЄВ, М. В. ЛЕМЕШ, В. О. ЗАДОЯ,
П. Б. МАШИХІНА, Л. Г. ТАТАРКО,
З. М. ЯКУБОВСЬКА**
Моделювання біологічного очищення стічних вод
в аеротенку з рухомим біоценозом 15

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

В. В. БУРЧЕНКОВ
Удосконалення методики розміщення периферійних
пристроїв контролю технічного стану рухомого
складу 25

**Т. В. БУТЬКО, В. М. ПРОХОРОВ,
Л. О. ПАРХОМЕНКО, А. О. ПРОКОПОВ**
Удосконалення технології пасажирських інтермодальних
перевезень із залученням залізничного транспорту
в умовах розвитку туризму 37

**Д. М. КОЗАЧЕНКО, А. І. ВЕРЛАН,
Р. Г. КОРОБІЙОВА**
Розвиток аналітичних методів розрахунку норм часу на
маневрові операції 51

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Д. П. ХОДОСКІН
Визначення резервів зниження затримок і збільшення
пропускної здатності вулично-дорожньої мережі
м. Гомель як фактор скорочення збитків в дорожньому
русі 65

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

І. В. ДОМАНСЬКИЙ, В. О. ВАСЕНКО
Удосконалення відеовимірювальних систем діагностики
електротягової мережі 73

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Ю. І. ГЕЗЕНЦВЕЙ, Д. О. БАННІКОВ
Застосування дрібнозернистих термозміцнених сталей для
підвищення експлуатаційних якостей бункерних ємностей
із тонкостінних оцинкованих профілів 84

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Л. А. МУРАДЯН, І. В. ПІЦЕНКО, В. Ю. ШАПОШНИК
Математична модель визначення ризиків на залізничному
транспорті під час діагностики буксових вузлів вантажних
вагонів 94

О. В. ФОМІН, А. О. ЛОВСЬКА
Дослідження вертикальної динаміки несучих конструкцій
вантажних вагонів із круглих труб 104

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

С. В. КЛЮЧНИК
Дослідження роботи вузла поперхового сполучення балок
проїзної частини залізничного моста 115

CONTENTS

ECOLOGY AND INDUSTRIAL SAFETY

**L. V. AMELINA, M. M. BILIAIEV, O. V. BERLOV,
O. O. VERHUN, T. I. RUSAKOVA**
Modeling of Environmental Pollution by Ammonia Emission
from a Damaged Pipeline 5

**M. M. BILIAIEV, M. V. LEMESH, V. O. ZADOIA,
P. B. MASHYKHINA, L. H. TATARKO,
Z. M. YAKUBOVSKA**
Simulation of Biological Wastewater Treatment in Aerotanks
with Moving Biocenosis..... 15

OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS

V. V. BURCHENKOV
Improving the Methodology of Placing Peripheral Devices for
Monitoring the Technical Condition of Rolling Stock 25

**T. V. BUTKO, V. M. PROKHOROV,
L. O. PARKHOMENKO, A. O. PROKOPOV**
Improvement of Technology of Passenger Intermodal
Transportation with Involvement of Railway Transport in the
Conditions of Tourism Development 37

**D. M. KOZACHENKO, A. I. VERLAN,
R. H. KOROBIOVA**
Development of Analytical Methods for Calculating Time
Standards for Shunting Operations..... 51

RAILROAD AND ROADWAY NETWORK

D. P. KHODOSKIN
Determination of Reserves for Reducing Delays and
Increasing the Capacity of the Street-Road Network in Gomel
as a Factor of Reducing Losses in Traffic 65

INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL MODELLING

I. V. DOMANSKYI, V. O. VASENKO
Improvement of Video Measuring Systems for Electric
Traction Network Diagnostics..... 73

MATERIAL SCIENCE

Y. I. HEZENTSVEL, D. O. BANNIKOV
Use of Fine-Grained Heat-Strengthened Steels to Increase the
Operation Qualities of Bunker Capacities from Thin-Walled
Galvanized Profiles 84

ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION

**L. A. MURADIAN, I. V. PITSENKO,
V. Y. SHAPOSHNYK**
Mathematical Model of Risks in Railway Transport During
Diagnostics of Axle Boxes of Freight Cars 94

O. V. FOMIN, A. O. LOVSKA
Research of the Vertical Dynamics of the Supporting
Structures of Freight Cars Made of Round Pipes 104

TRANSPORT CONSTRUCTION

S. V. KLIUCHNYK
Operation Study of the Node of Stringer Staged Connection
Point of the Railway Bridge Track-Way..... 115

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

До публікації в журналі приймаються статті українською 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 А4, враховуючи таблиці, ілюстрації, список використаних джерел. Статті, більші за обсягом, можуть бути прийняті до розгляду на підставі рішення редколегії.

Для здачі статті до друку авторам необхідно надати наступні документи:

- 1) файл зі статтею та друкований примірник рукопису з підписами всіх співавторів на останньому аркуші роботи;
- 2) оригінал Ліцензійного договору з підписами всіх співавторів;
- 3) файл з відомостями про кожного з авторів – прізвище, ім'я, по-батькові повністю, посада, місце роботи, наукове звання, науковий ступінь, контактна інформація (телефон, адреса електронної пошти), код ORCID. Відомості про авторів подаються трьома мовами – українською, російською та англійською;
- 4) Оригінал експертного висновку.

Увага! Згідно з міжнародними стандартами якості наукових публікацій необхідним є: наявність авторських розширених (250-300 слів) і структурованих резюме (рефератів – abstracts), у т.ч. англійською мовою, рецензій, присланих списків літератури в романському алфавіті тощо.

Виклад основного матеріалу статті повинен мати такі елементи:

- **вступ:** постановка проблеми, аналіз останніх досліджень;
- **мету;**
- **методику:** виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Докладно описують загальну методику дослідження, щоб його результати могли бути відтворені: описується послідовність виконання дослідження, обґрунтовується вибір використовуваних і викладається суть запропонованих методів і моделей, змістовно визначається, що саме досліджувалося кожним методом;
- **результати:** містять експериментальні чи теоретичні дані, отримані в роботі, для демонстрації того, що отримано нове рішення проблеми, і що робота є значним кроком вперед у порівнянні з попередніми дослідженнями. Дані подаються у формі таблиць, графіків, діаграм, рівнянь, фотографій, рисунків, статистичними оцінками. Результати повинні бути викладені коротко і чітко, при цьому містити досить інформації для оцінки зроблених висновків, також має бути очевидно, чому для аналізу обрані саме ці дані;
- **наукову новизну та практичну значимість.** Наукова новизна отриманих результатів викладається аргументовано, коротко і чітко. До наукової новизни не можна відносити прикладні результати (способи, пристрої, методики, схеми, алгоритми). Практичне значення отриманих результатів становлять відомості про використання результатів досліджень або рекомендації з їх використання;
- **висновки:** необхідно навести досягнуті кількісні та якісні показники дослідження, викласти рекомендації з їх використання.

З усіх питань звертайтеся до редакції журналу за адресою:

Науково-технічна бібліотека (ауд. 166),
Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,
вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна,
49010
e-mail: visnik@diit.edu.ua

Сайт журналу: <http://stp.diit.edu.ua/>

Наукове видання

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

№ 1 (91) 2021

(українською, російською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – О. В. Помінова

Комп'ютерне верстання – О. В. Помінова

Літературна обробка – С. П. Лагдан

Формат 60×84¹/₈. Ум. друк. арк. 15,11. Тираж 100 пр. Зам. №02/01

**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

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 397 від 03.04.2001 р.



Scientific Edition

**NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU.
VİSNIK DNİPROPETROVS'KOGO NACİONAL'NOGO UNİVERSİTETU
ZALİZNIČNOGO TRANSPORTU**

=

SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

No. 1 (91) 2021

(in Ukrainian, Russian and English languages)

Responsible for issue – O. V. Pominova

Desktop publishing – O. V. Pominova

Redaction – S. P. Lahdan

Format 60×84¹/₈. Conventional printed sheet 15,11. Circulation 100. Order no. 02/01

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

