

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ  
УКРАЇНСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО  
ТРАНСПОРТУ**

**Випуск 209**

**Харків 2024**



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**ПІВНІЧНО-СХІДНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР  
ТРАНСПОРТНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ**

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ  
УКРАЇНСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

*Випуск 209*

**Харків 2024**

## **УДК 656.2(062)**

У Збірнику наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту публікуються результати наукових досліджень, наукові та конструкторські розробки та інші матеріали вчених, фахівців залізничного транспорту і промислових підприємств, спрямовані на вирішення сучасних завдань і проблем організації перевезень та управління на транспорті, рухомого складу і тяги поїздів, транспортного будівництва та залізничної колії, теплоенергетики та матеріалознавства, автоматики, телемеханіки та зв'язку тощо.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту призначений для інженерно-технічних працівників, магістрантів, здобувачів вищої освіти і науковців залізничного транспорту та інших галузей промисловості.

З електронною версією збірника можна ознайомитися на сайті: <https://bit.ly/3vVHlv3>.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus (Польща).

З реєстрацією збірника можна ознайомитися на сайті <http://jml2012.indexcopernicus.com>.

**Google Scholar профіль:** <https://scholar.google.com.ua>

**Веб-сторінка збірника:** <https://kart.edu.ua/unit/zbirnik-ukrsurt>

### **Реферативна база**

**«Наукова періодика України»:** <http://csw.kart.edu.ua>

**ISSN (p) 1994-7852**

**ISSN (online) 2413-3795**

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 21515 - 11415ПП від 27.07.2015 р. Друкується за рішенням вченої ради університету, протокол № 8 від 25 жовтня 2024 р.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що внесені до Переліку наукових фахових видань України, у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 15.10.2019 р. № 1301).

# **ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ УКРАЇНСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS OF THE UKRAINIAN STATE  
UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT**

*Випуск 209*

«Збірник наукових праць УкрДУЗТ» включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що внесені до Переліку наукових фахових видань України, у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 15.10.2019 р. № 1301).

Статті друкуються в авторській редакції мовою оригіналу.  
Усі статті пройшли подвійне сліпе наукове рецензування.

Відповідальний за випуск Кальченко С. А.

Редактор Ібрагімова Н. В.

---

КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Підписано до друку 25.10.2024 р.  
Формат паперу А4. Папір писальний.  
Умовн. друк. арк. 6,75. Тираж 50. Замовлення № .

Видавець Український державний університет залізничного транспорту,  
61050, Харків-50, майдан Феєрбаха, 7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.

**Редакційна колегія**

Головний редактор – Вовк Руслан Володимирович, доктор фізико-математичних наук, професор, УкрДУЗТ

Випусковий редактор – Харін Руслан Олександрович, УкрДУЗТ

**Залізничний транспорт (273)**

Пузир В. Г., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Фомін О. В., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)  
Путято А. В., д.т.н., доцент (ГДТУ ім. П. О. Сухого, Республіка Білорусь)  
Горобченко О. М., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)  
Дацун Ю. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Мартинов І. Е., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Vureika G., dsc, professor (VGTU, Литва)  
Михалків С. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Ловська А. О., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)

**Будівництво та цивільна інженерія (192)**

Бліхарський З. Я., д.т.н., професор  
(НУ Львівська політехніка)  
Борзяк О. С., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Ватуля Г. Л., д.т.н., професор (ХНУМГ)  
Лобяк О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Орел Є. Ф., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Плугін А. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Плугін Д. А., д.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Пушкарьова К. К., д.т.н., професор (КНУБА)  
Толмачов С. М., д.т.н., професор (ХНАДУ)  
Трикоз Л. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Шабанова Г. М., д.т.н., професор (НТУ ХП)  
Шмуклер В. С., д.т.н., професор (ХНУМГ)  
Fisher Hans-Bertram., dr. ind., professor (Bauhaus-Universität Weimar F.A., Німеччина)  
Опанасенко О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

**Механічна інженерія (131, 132, 133)**

Астанін В. В., д.т.н., професор (НАУ м. Київ)  
Воронін С. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Геворкян Е. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Ковальова І. М., к.т.н., доцент (НАНБ, Білорусь)  
Онопрейчук Д. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Стефанов В. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Тимофеев С. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Тимофеева Л. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Федориненко Д. Ю., д.т.н., професор (Tohoku University, Японія)

**Транспортні технології (275)**

Панченко С. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Бутько Т. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Прохорченко А. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Шраменко Н. Ю. д.т.н., професор (ДБТУ)  
Мороз М. М. д.т.н., професор (КНУ, м. Кременчук)  
Кириллова О. В., д.т.н., доцент (ОНМУ, м. Одеса)  
Бабаєв М. М., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Лаврухін О. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Потапов Д. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Ходаківський О. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

**Геодезія та землеустрій (193)**

Eimuntas Paršeliūnas, Prof. Habil Dr. (VGTU, Литва)  
Jūrate Sužiedelytė Visockienė, Assoc. Prof. Dr.  
(VGTU, Литва)  
Угненко Є. Б., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Маланчук М. С., д.т.н., доцент (НУ «Львівська політехніка»)  
Церклевич А. Л., д.т.н., доцент (НУ «Львівська політехніка»)  
Viselga Gintas, Assoc. Prof. Dr. (VGTU, Литва)  
Мамонов К. А., д.е.н., професор (ХНУМГ)  
Савенко В. Я., д.т.н., професор (НТУ, м. Київ)

**Теплоенергетика (144)**

Каграманян А. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Мороз В. І., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Фалендиш А. П., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Грицук І. В., д.т.н., доцент (ХМДА, м. Херсон)  
Сотник М. І., д.т.н., доцент (СДУ, м. Суми)  
Дешко В. І., д.т.н., професор (НТУ, м. Київ)  
Бабіченко Ю. А., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Pavlenko A., dsc. tech., profesor (KUT, Poland)  
Bartoszewicz J., dsc. tech., profesor (PUT, Poland)  
Tomaszewski F., phd, profesor (PUT, Poland)



## ЗМІСТ

### Механічна інженерія (131, 132, 133)

- Ремарчук М. П., Суранов О. О., Стефанов С. О., Васянович Р. С., Кебко О. В.*  
Ресурсні випробування ущільнень зворотного руху при забезпеченні сталих умов навантаження 6
- Lalazarova N., Komarova G., Afanasieva O., Popova O.* Ways of increasing the machinability of high-strength cast iron 18

### Будівництво та цивільна інженерія (192)

- Левщанов С. В.* Методи і практики навчання і застосування згорткових нейронних мереж для виявлення різних дефектів на поверхнях будівельних конструкцій 25
- Дорошенко О. Ю.* Досвід застосування способів відновлення пошкоджених залізобетонних конструкцій у транспортному будівництві 34

### Залізничний транспорт (273)

- Калабухін Ю. Є., Мартинов І. Е., Труфанова А. В., Мартинов С. І.* Аналіз показників деповського ремонту пасажирських вагонів 43
- Кузишин А. Я., Ковальчук В. В.* Дослідження вертикальних і горизонтальних деформацій пневматичної ресори швидкісного рухомого складу в межах стрілки стрілочного переводу 55
- Мартинов І. Е., Шовкун В. О., Труфанова А. В., Литовченко О. М., Дмитренко М. В., Балашов О. О.* Дослідження технічного стану універсальних напіввагонів 66
- Курган М. Б., Курган Д. М., Байдак С. Ю., Новік Р. Б., Хмелевська Н. П.* Обґрунтування доцільності перебудови однієї з колій двоколіїної ділянки на колію європейського стандарту (1435 мм) 75

### Транспортні технології (275)

- Гриценко Н. В., Панченко Н. Г.* Організація протидій негативному наслідку впливу ризиків у логістичних транспортних системах 91

**МЕХАНІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ (131, 132, 133)**

---

УДК 621:62-762

**РЕСУРСНІ ВИПРОБУВАННЯ УЩІЛЬНЕНЬ ЗВОРОТНОГО РУХУ  
ПРИ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ СТАЛИХ УМОВ НАВАНТАЖЕННЯ**

Д-р техн. наук М. П. Ремарчук, канд. техн. наук О. О. Суранов,  
аспіранти С. О. Стефанов, Р. С. Васянович, зав. навч. лаб. О. В. Кебко

**RESOURCE TESTS OF REVERSE SEALS PROVIDING CONSTANT LOAD  
CONDITIONS**

Dr. Sc. (Tech.) M. Remarchuk, PhD (Tech.) O. Suranov,  
postgraduate student S. Stefanov, postgraduate student R. Vasianovych,  
the head of the educational laboratory O. Kebko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.209.2024.314342>

*Анотація.* До найбільш розповсюджених конструктивних елементів у структурі сучасних технічних систем, зокрема землерийних, підйомно-транспортних і залізничних машин, належать різні ущільнення, що забезпечують герметизацію рухомих і нерухомих спряжень таких машин.

На підставі досліджень виявлені фактори, що мають найбільший вплив, до яких можна віднести величину дії тиску рідини, її температуру, швидкість поступального або обертального руху, геометричні розміри поверхні герметизації та інші. Результати виконаних робіт дали змогу створити удосконалений імітатор-стенд для випробування ущільнення з дотриманням сталих факторів у процесі дослідження, стенд для проведення ресурсних випробувань ущільнень, максимально наближених до режиму їхнього функціонування в експлуатаційних умовах роботи.

**Ключові слова:** ущільнення, випробування, тиск, швидкість, температура, сила тертя, стенд, імітатор, гідроциліндр.

*Abstract.* The most widespread structural elements in the structure of modern technical systems, in particular, in earthmoving, lifting and transport and railway machines, include various seals that provide sealing of moving and stationary couplings of these machines. Losses of working fluids during the operation of the above-mentioned machines require daily refueling of the working containers with fluids. External fluid losses significantly affect the ecological state of nature and especially soil fertility. Internal fluid losses affect the productivity of these machines, as well as inefficient fuel consumption during the operation of these machines.

On the basis of the above, the process of a comprehensive study of the performance of seals to determine their characteristics, in particular, the resource of their work and the establishment of external and internal liquid losses, is a very relevant direction today. The number of factors that affect the performance of the seal is more than thirty factors. Of all these factors, the most influential were identified, which include the magnitude of the effect of liquid pressure and its temperature, the speed of translational or rotational movement, the geometric dimensions of the sealing surface, and others. The sealing test process can be classified into tests in simulators, on specialized stands, and in real working conditions of sealing in the structure of the above machines. One of the most effective



directions for establishing the efficiency of the seal is tests in simulators and when tests are carried out on specialized stands.

Bench tests require careful preparation and the use of high-precision devices for recording the studied parameters and at the same time require compliance with stable research conditions that significantly affect the performance of the seal. The results of experimental studies in the created simulator made it possible to reveal the patterns of changes in the frictional force in the sealing zone depending on the geometric dimensions of the seal, the effect of liquid pressure and its temperature, and the speed of movement of the seal relative to the fixed surface being sealed.

The conducted research made it possible to create a more advanced simulator for compaction testing with the observance of constant factors in the research process. Also, create a stand for carrying out resource tests of compaction as close as possible to the mode of their operation in operational working conditions.

**Key words:** compaction, test, pressure, speed, temperature, friction force, stand, simulator, hydraulic cylinder.

**Вступ.** До найбільш розповсюджених конструктивних елементів у структурі сучасних технічних систем, зокрема землерийних, підйомно-транспортних і залізничних машин, належать різні ущільнення, що забезпечують герметизацію

рухомих і нерухомих спряжень таких машин [1]. Конструктивні виконання різних за формою виконання ущільнень для забезпечення герметизації рухомих спряжень, подано на рис. 1.

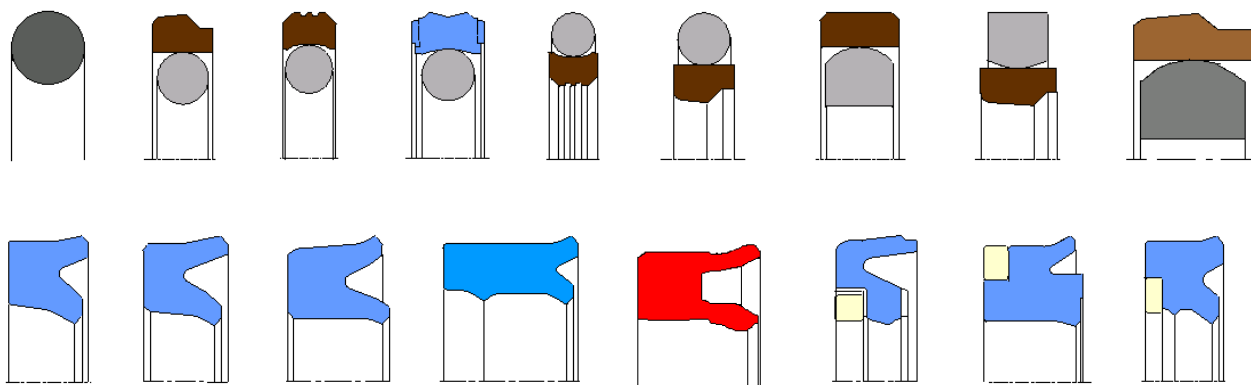


Рис. 1. Загальний вигляд ущільнень

Такі ущільнення широко застосовують переважно в рухомих і нерухомих спряженнях силових гідроциліндрів, як це зображено на рис. 2. Ущільнення запобігають проникненню частинок бруду і вологи з навколишнього середовища [2, 3].

Зовнішні і внутрішні втрати робочих рідин у силових гідроциліндрах під час їхньої роботи на вказаних вище машинах

потребують проведення щоденного дозавправлення рідинами робочих ємностей.

Зовнішні втрати рідини суттєво впливають на екологічний стан природи і особливо родючість ґрунтів, а внутрішні втрати рідини – на зниження продуктивності вказаних машин, а також спричиняють неефективні витрати палива в процесі роботи таких машин.

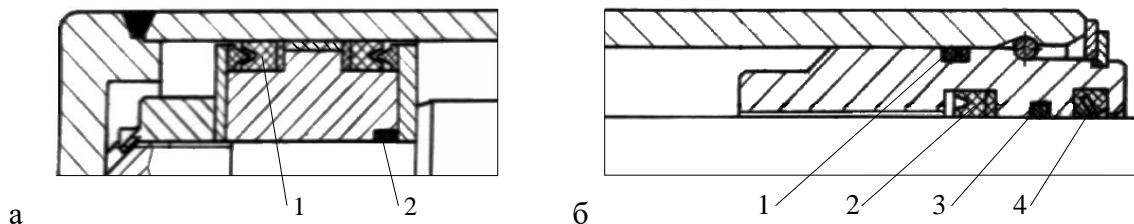


Рис. 2. Розташування ущільнень у рухомих і нерухомих спраженнях

На підставі наведеного процес всебічного дослідження працездатності ущільнення для визначення їхніх характеристик, зокрема ресурсу їхньої роботи, і встановлення зовнішніх і внутрішніх втрат рідини є на сьогодні досить актуальною проблемою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вирішенню проблеми підвищення працездатності ущільнення в складі силових гідроциліндрів присвячено ряд наукових джерел [4, 5].

За даними досліджень, у зоні контакту ущільнення з робочою поверхнею виникає сила тертя, яка залежить від великої кількості факторів, і аналітично описати її неможливо. Зокрема, на силу тертя ущільнення при герметизації спраження, крім тиску рідини та її температури, впливає відносна швидкість руху, геометричні параметри поверхні, яку герметизують, і багато інших факторів. Дослідженням втрат робочої рідини в процесі функціонування ущільнення і ресурсу роботи в структурі силових циліндрів присвячені джерела [6, 7]. Понад тридцять факторів впливають на працездатність ущільнення. Із усіх цих факторів виявлено ті, що впливають найбільше, до яких можна віднести величину дії тиску рідини, її температуру, швидкість поступального або обертального руху, геометричні розміри поверхні герметизації та інші. Аналітичного опису закономірностей впливу всіх факторів на величину зусилля при терті ущільнення в процесі герметизації в рухомому спраженні на сьогодні не існує.

У роботах [8, 9] подана інформація у вигляді часткового вирішення такого питання. Для розкриття повноти встановлення сили тертя в ущільненні, що виникає в зоні герметизації в рухомому спраженні, потрібно провести додаткові дослідження, базовані на застосуванні методології планування багатofакторних експериментів із виявленням особливостей їх виконання.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Дослідити силу тертя, що виникає в зоні герметизації ущільнення в рухомому спраженні поршень – гільза циліндра на основі застосування методики планування багатofакторного експерименту. Базуючись на отриманих результатах дослідження, створити імітатор-стенд для визначення працездатності ущільнення при дотриманні високого рівня стабільності основних факторів і стенд для проведення ресурсних випробувань ущільнення в структурі силових гідроциліндрів, максимально наближених до експлуатаційних режимів їхньої роботи.

**Основна частина дослідження.** Проведені пошукові експерименти дали змогу виявити, що при установленому режимі в ущільненні сила тертя поршня нелінійно залежить від швидкості відносного переміщення. У зв'язку з цим для визначення сили тертя в ущільненнях поршня був прийнятий квадратичний поліном і використаний центральний композиційний рототабельний план (ЦКРП).

Кодування факторів, що мають найбільший вплив, зокрема швидкості руху ущільнення, тиску рідини і температури рідини, проводили за формулою [10]

$$x_{i\phi} = \frac{z_i - x_{i0}}{\delta_i}, \quad (1)$$

де  $x_{i\phi}$  – кодовані значення факторів (1, - 1, 0 та інші);

$z_i$  – натуральні значення факторів на  $i$ -му рівні;

$x_{i0}$  – значення  $i$ -го фактора на нульовому рівні;

$\delta_i$  – інтервал варіювання  $i$ -го фактора.

Значення факторів у кодовому та натуральному вираженні подано в табл. 1.

Таблиця 1

Впливові параметри та їхні значення при проведенні експериментів

Умови експериментів	Фактори		
	$z_1$ (v, м/с)	$z_2$ , (р, МПа)	$z_3$ (t, °С)
Нульовий рівень $x_{i0}$	0,22	7,6	45
Інтервал варіювання $\delta_i$	0,11	4,5	20
Нижній рівень $x_{i\phi} = -1$	0,11	3,1	25
Верхній рівень $x_{i\phi} = +1$	0,33	12,1	65
Зіркові плечі			
$x_{i\phi} = -1,682$	0,036	0	11
$x_{i\phi} = +1,682$	0,405	15,2	7

Під час дослідження для визначення сили тертя ущільнення при герметизації поршня була створена лабораторна установка (рис. 3). На ній можна дослідити процес герметизації з'єднання поступального руху та закономірності зміни величини зусилля на тертя за результатами впливу вказаних вище факторів на підставі методики планування багатофакторного експерименту, зокрема при використанні ЦКРП [10].

За рис. 3 досліджено роботу двох ущільнень 1, розміщених на поршнях 2, які з'єднані штоком 3, довжина якого менше довжини циліндра 4.

Складові лабораторної установки подано у вигляді привідного гідроциліндра 12, який жорстко з'єднаний із силовим вимірвальним циліндром 8 через

кульковий шарнір 7, який з'єднаний зі штоком 3 і двома поршнями 2 з розміщеними на них дослідними ущільненнями 1, вмонтованими в полуму циліндрі 4. Усі складові розташовані на монтажному столі універсального стенда 10 конструкції НДІбуддормаш.

Процес навантаження ущільнювачів 1 тиском рідини в полуму циліндрі 4 забезпечений подаванням рідини від ручної насосної установки 15 через канал у центрі по довжині гільзи циліндра 4. Переміщення обох поршнів 2 з ущільнювачами 1 з заданою швидкістю руху здійснюється привідним гідроциліндром 12 через універсальний кульковий шарнір 7 і силовий вимірвальний циліндр 8 з вмонтованим у його порожнину датчиком тиску 9.

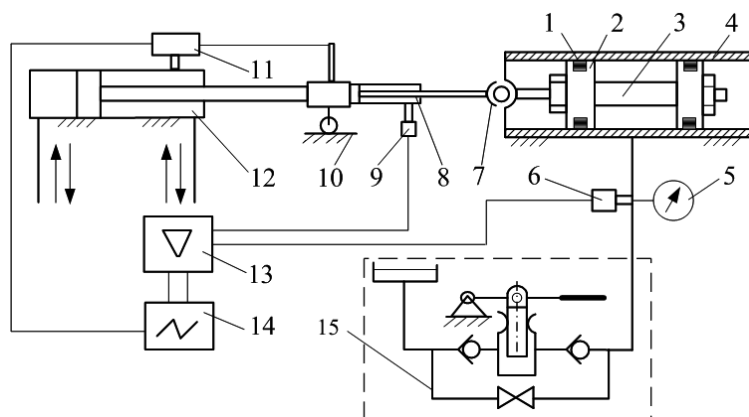


Рис. 3. Загальний вигляд лабораторної установки

Вимірювання величини зусилля на тертя в ущільненнях 1 з підвищенням тиску рідини при застосуванні ручної насосної установки 15 забезпечено за рахунок контролю за зростанням тиску рідини у штоковій порожнині силового вимірювального циліндра 8 і реєстрації

зміни величини цього тиску рідини датчиком тиску 9. Контроль швидкості руху забезпечено створеним датчиком 11 реєстрації шляху і реєстрації часу при проходженні цього шляху, конструкція якого наведена на рис. 4.

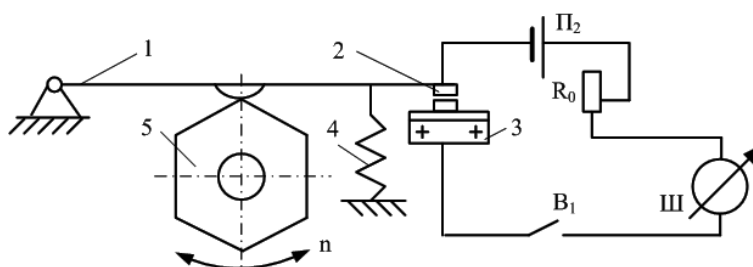


Рис. 4. Датчик контролю шляху проходження ущільненнями

Регулювання величини швидкості руху ущільнювачів 1 на поршнях 2 забезпечено за рахунок зміни подавання рідини до гідроциліндра 12 від насосної установки стенда конструкції НДІбуддормаш (на рис. 3 не показано).

Температурне навантаження для ущільнювачів 1 у полуму циліндрі 4 створено гарячим повітряним потоком, направленим по периметру і довжині цього циліндра 4 завдяки використанню кожуха спеціальної форми (на рисунку не показаний), який забезпечував рівномірне нагрівання всіх складових включаючи

ущільнення 1. Контролювали температуру рідини між поршнями за зовнішніми торцевими поверхнями поршнів 2 і циліндра 4.

Для реєстрації тиску рідини між ущільненнями 1 у замкнутій порожнині полого циліндра 4 використали датчик тиску рідини 6, а для реєстрації зусилля на подолання тертя в ущільненнях – датчик тиску 9, інформація від яких направляється на підсилювач 13 і осцилограф 14.

Інформація від датчика контролю шляху, пройденого штоком гідроциліндра 12, та інша інформація направляються від

підсилювача 13 на осцилограф 14 (рис. 5). Отже, факторами для дослідження роботи ущільнення, що мають найбільший вплив, є тиск, температура рідини, швидкість переміщення ущільнення та його

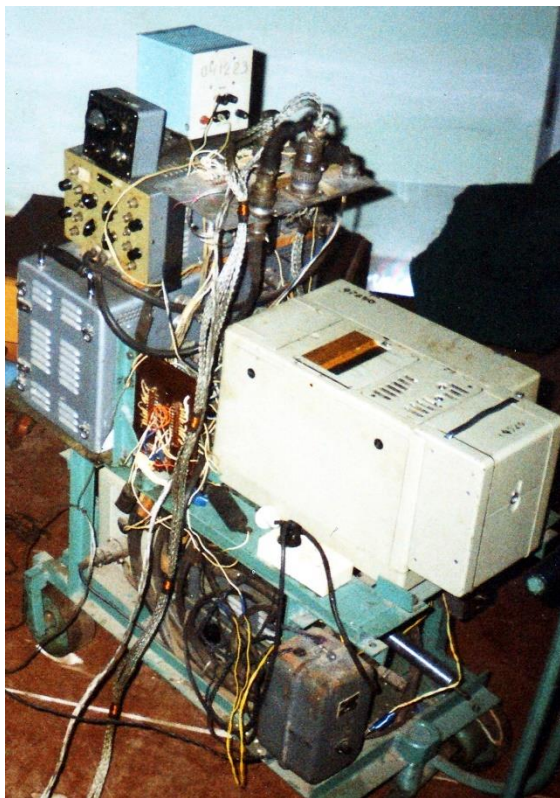


Рис. 5. Дослідна апаратура

Цифри на рис. 6 позначають таке: 1 – шлях; 2 – час; 3 – тиск рідини; 4 – зусилля на тертя в ущільненнях при герметизації спряження поршень - гільза циліндра. Зусилля 4, що виникає в зоні тертя ущільнення, є для них загальним, причому

конструктивний параметр у вигляді зовнішнього діаметра для ущільнення поршня.

Результати експериментів, отриманих за дослідною апаратурою, подано у вигляді типових осцилограм (рис. 6).

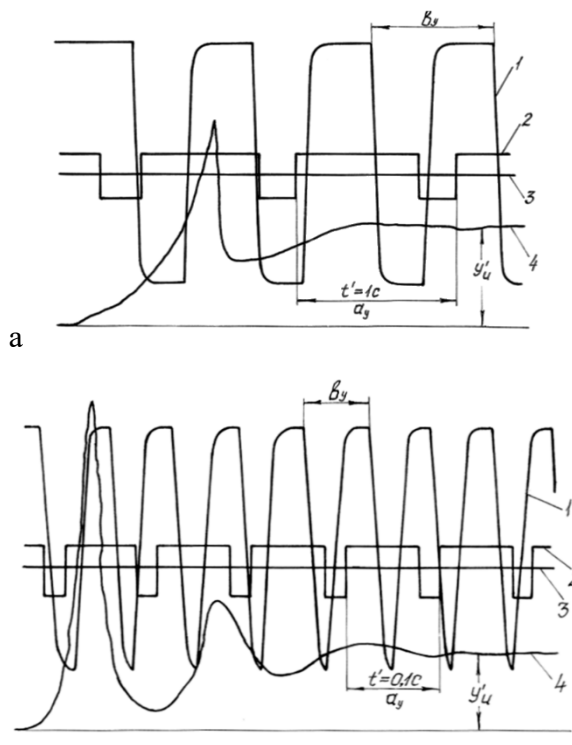


Рис. 6. Осцилограми тертя в ущільненнях:  
а –  $v = 0,035$  м/с;  $p = 7,6$  МПа;  $t = 45$  °С;  
б –  $v = 0,405$  м/с;  $p = 7,6$  МПа;  $t = 45$  °С

величина зусилля на тертя для одного ущільнення складає половину загального зусилля на тертя.

Дослідження проводили за матрицею ЦКРП, результати яких подано в табл. 2.

Таблиця 2

Матриця проведення експериментів і їхні результати

Дослід	План				Результати дослідження	
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	експеримент	розрахунок
					$Y_u$	$\bar{Y}_u$
1	2	3	4	5	6	7
1	+1	-1	-1	-1	220	218,5
2	+1	+1	-1	-1	140	141,1
3	+1	-1	+1	-1	530	533,6

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
4	+1	+1	+1	-1	410	416,1
5	+1	-1	-1	+1	250	248,5
6	+1	+1	-1	+1	180	170,9
7	+1	-1	+1	+1	610	613,5
8	+1	+1	+1	+1	500	495,9
9	+1	-1,682	0	0	460	457,0
10	+1	+1,682	0	0	290	293,0
11	+1	0	-1,682	0	70	75,9
12	+1	0	+1,682	0	620	614,2
13	+1	0	0	-1,682	300	293,9
14	+1	0	0	+1,682	380	386,2
15	+1	0	0	0	335	330,04
16	+1	0	0	0	330	330,04
17	+1	0	0	0	335	330,04
18	+1	0	0	0	325	330,04
19	+1	0	0	0	325	330,04
20	+1	0	0	0	330	330,04

Опускаючи всі проміжні результати обчислень і статистичних перевірок, отримаємо математичну модель, яка

адекватно описує результати експериментів у кодованих змінних [10],

$$y_u = 330,04 - 48,76 \cdot x_1 + 160,0 \cdot x_2 + 27,42 \cdot x_3 - 10,0 \cdot x_{12} + 12,5 \cdot x_{23} + 15,92 \cdot x_1^2 + 5,32 \cdot x_2^2 + 3,55 \cdot x_3^2, \quad (2)$$

Зусилля на тертя для одного ущільнення в натуральних значеннях факторів за усталеного режиму роботи з урахуванням ще додаткового фактора у

вигляді діаметра ущільнювача, прийнятого на підставі проведення однофакторного експерименту, визначено за формулою

$$P_{tr} = 0,33 \exp(0,014 \cdot d) \cdot [206,21 - 868,64 \cdot v + 29,8 \cdot p - 0,46 \cdot t + 1315,7 \cdot v^2 + 0,26 \cdot p^2 + 0,0088 \cdot t^2 - 20,0 \cdot p \cdot v + 0,14 \cdot p \cdot t], \quad (3)$$

де  $d$  – зовнішній діаметр ущільнень для поршня, мм;

$v$  – швидкість переміщення поршня разом з ущільненням, м/с;

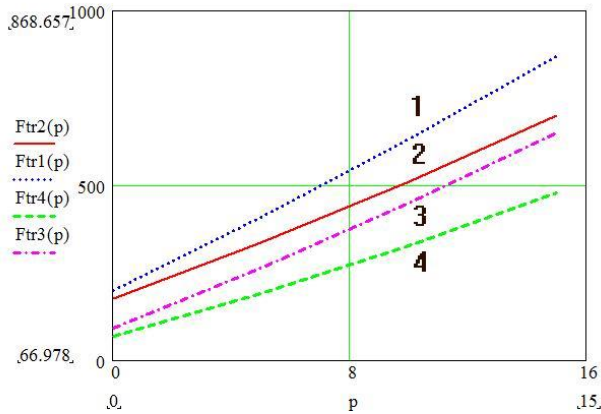
$p$  – робочий тиск, МПа;

$t$  – температура робочої рідини, яка сприймається ущільненням у зоні герметизації спряження поршень – гільза циліндра, °С.

Зовнішній діаметр ущільнень для поршня (прийнято величини зі значеннями від 50 до 140 мм). Як основне дослідження ущільнення прийнято ущільнення з діаметром поршня 80 мм.

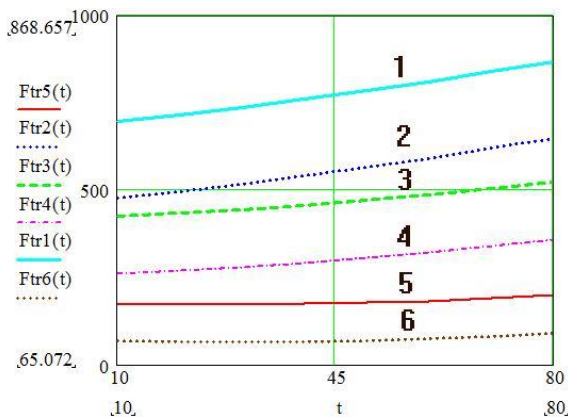
Результати розрахунків за формулою (3) наведено на рис. 7-10.





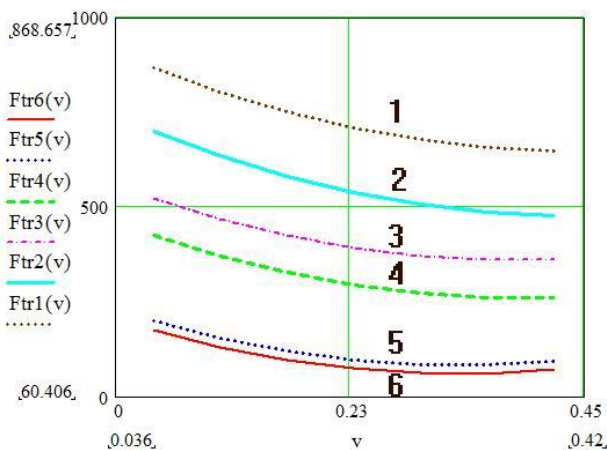
- 1 –  $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $v = 0,036\text{ м/с}$ ;  $d = 80\text{ мм}$ ;
- 2 –  $t = 11\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $v = 0,036\text{ м/с}$ ;  $d = 80\text{ мм}$ ;
- 3 –  $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $v = 0,405\text{ м/с}$ ;  $d = 80\text{ мм}$ ;
- 4 –  $t = 11\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $v = 0,405\text{ м/с}$ ;  $d = 80\text{ мм}$

Рис. 7. Зусилля тертя в ущільненнях залежно від рівня тиску рідини



- 1 –  $p = 15\text{ МПа}$ ;  $v = 0,036\text{ м/с}$ ;  $d = 80\text{ мм}$ ;
- 2 –  $p = 15\text{ МПа}$ ;  $v = 0,405\text{ м/с}$ ;  $d = 80\text{ мм}$ ;
- 3 –  $p = 7,6\text{ МПа}$ ;  $v = 0,036\text{ м/с}$ ;  $d = 80\text{ мм}$ ;
- 4 –  $p = 7,6\text{ МПа}$ ;  $v = 0,405\text{ м/с}$ ;  $d = 80\text{ мм}$ ;
- 5 –  $p = 0\text{ МПа}$ ;  $v = 0,036\text{ м/с}$ ;  $d = 80\text{ мм}$ ;
- 6 –  $p = 0\text{ МПа}$ ;  $v = 0,405\text{ м/с}$ ;  $d = 80\text{ мм}$

Рис. 8. Зусилля тертя в ущільненнях залежно від температури рідини



- 1 –  $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $p = 15\text{ МПа}$ ;  $d = 80\text{ мм}$ ;
- 2 –  $t = 11\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $p = 15\text{ МПа}$ ;  $d = 80\text{ мм}$ ;
- 3 –  $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $p = 7,6\text{ МПа}$ ;  $d = 80\text{ мм}$ ;
- 4 –  $t = 11\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $p = 7,6\text{ МПа}$ ;  $d = 80\text{ мм}$ ;
- 5 –  $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $p = 0\text{ МПа}$ ;  $d = 80\text{ мм}$ ;
- 6 –  $t = 11\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $p = 0\text{ МПа}$ ;  $d = 80\text{ мм}$

Рис. 9. Зусилля тертя залежно від швидкості руху ущільнення





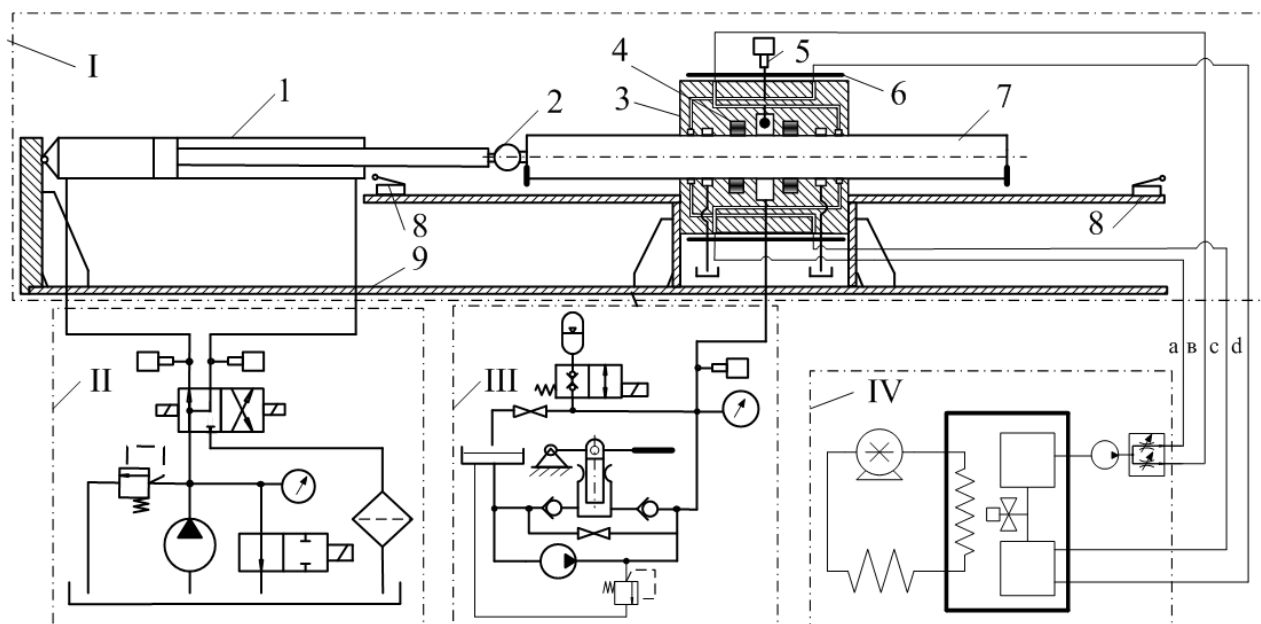


Рис. 11. Схема імітатора-стенда для дослідження зусилля тертя при герметизації рухомого спряження штока-напрямна поверхня

До основних складових імітатора-стенда належать: 1 – гідроциліндр привода штока імітатора; 2 – пристрій для вимірювання сили тертя в процесі роботи ущільнення; 3 – імітатор для дослідження роботи ущільнення; 4 – канали в імітаторі для охолодження ущільнення; 5 – пристрій для вимірювання тиску рідини; 6 – кожух імітатора; 7 – шток імітатора; 8 – вимикачі для реверсування рухом штоком гідроциліндра 1; 9 – рама імітатора-стенда.

Для дотримання однакової швидкості руху штока силового циліндра 1 (рис. 11) необхідні дві умови. Перша – особливе проектування і виготовлення силового гідроциліндра, при якому співвідношення між діаметром штока  $d$  і поршнем  $D$  має бути

$$d/D = 0,707. \quad (4)$$

Друга умова – необхідність застосування в гідросистемі привода руху штока гідроциліндра спеціального гідророзподільника з диференційною схемою підключення обох порожнин цього гідроциліндра. Дотримання цих умов дасть

зможу забезпечити однакові швидкості прямого і зворотного напрямків руху штока гідроциліндра 1 і високу якість вимірювання зусилля тертя при герметизації рухомого спряження в імітаторі.

Для проведення прискорених ресурсних досліджень працездатності ущільнення в структурі силового циліндра створено стенд [13], що забезпечує максимальне наближення до режиму, характерного для експлуатаційних умов роботи (рис. 12).

Характерною відмінністю цього стенда є застосування двох циліндрів привідного 1 і навантаженого 18 (дослідного) силового гідроциліндрів. Причому дослідний силовий гідроциліндр 18, крім навантаження від привідного циліндра, також може сприймати тиск рідин на трьох різних рівнях, створений спеціальними навантажувальними клапанами 6-8. Крім того, на досліджуваній гідроциліндр можуть діяти вібраційне навантаження завдяки застосуванню вібратора 23 і радіальне навантаження через застосування спеціального пристрою 19.

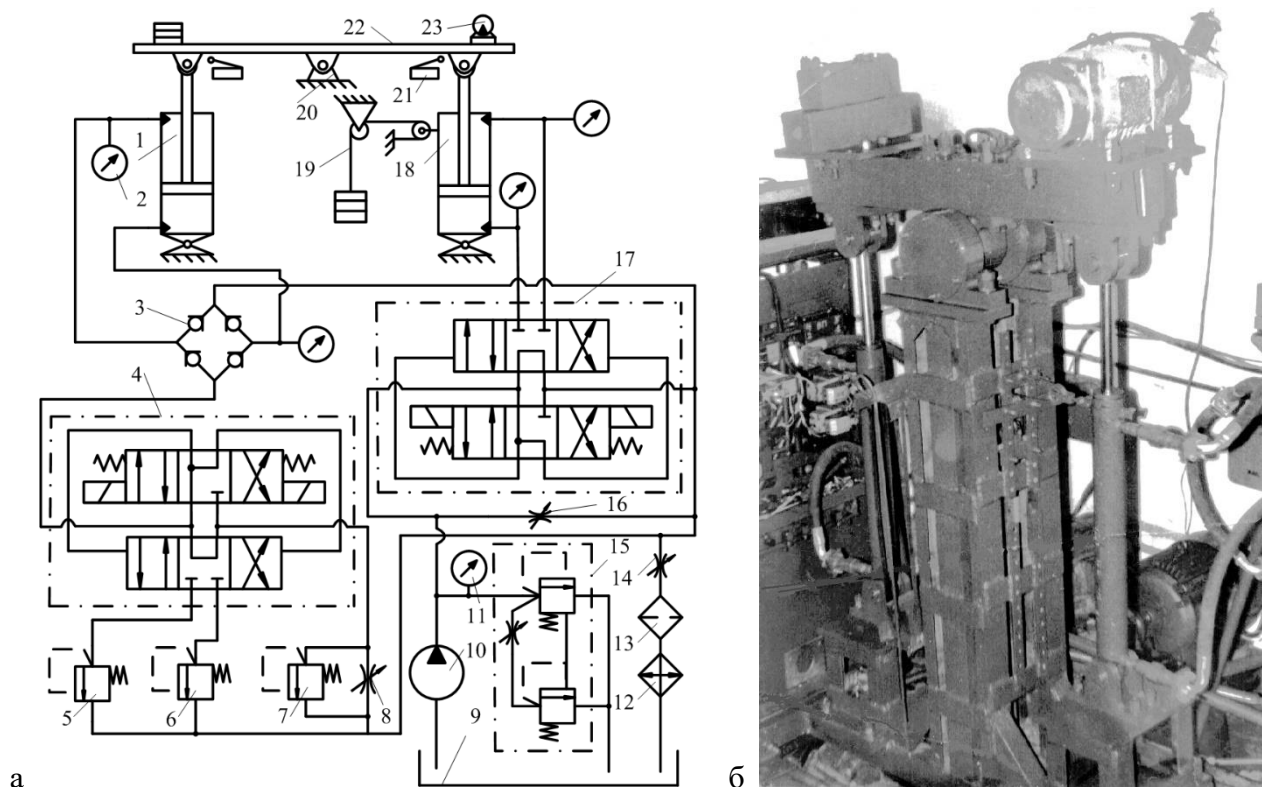


Рис. 12. Стенд для прискорених випробувань працездатності ущільнення в складі силового циліндра [13]: а – гідросхема стенда; б – реалізація стенда

До основних складових стенда для ресурсних випробувань силових циліндрів належать: 1, 18 – циліндри привідний і випробувальний; 2, 11 – манометри; 3 – блок зворотних клапанів; 4, 17 – двокаскадні електрогідравлічні гідророзподільники; 5, 6, 7 – однокаскадні запобіжні клапани; 8, 14, 16 – регульовані дроселі; 9 – масляний резервуар; 10 – гідравлічний насос; 12 – масляний радіатор; 13 – фільтр; 15 – двокаскадний запобіжний клапан; 19 – система радіального навантаження гідроциліндра; 20 – рама стенда; 21 – вимикачі для реверсування рухом штоків гідроциліндрів; 22 – коромисло для

з'єднання штоків гідроциліндрів; 23 – вібратор для навантаження гідроциліндра.

**Висновки.** На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки. Отримані результати повністю узгоджені з характерними закономірностями, виявленими на підставі відомих досліджень [5]. Виконані експериментальні дослідження дають змогу сформулювати умови для проектування різних систем у вигляді імітатор-стенд і стенд для проведення довготривалих ресурсних випробувань ущільнень у режимі зворотно-поступального руху, характерного для експлуатаційних умов роботи.

### Список використаних джерел

1. Каталог ущільнень. Профіль ущільнення поршня. URL: <https://sju.ua/katalog-uplotnenij/profil/uplotnenija-porshnja> (дата звернення: 24.12.2023).

2. Группа компаний ЭЛКОНТ™. Эффективные уплотнения и опорные элементы для подвижных соединений гидросистем. *Строительные и дорожные машины*. 2003. № 6. С. 31–33.
3. Онищенко О. Г., Дураченко Г. Ф. Гідро- та пневмоприводи: навч. посіб. Полтава: ПолтНТУ, 2009. 202 с.
4. Марутов В. А., Павловский С. А. Гидроцилиндры. Москва: Машиностроение, 1966. 172 с.
5. Кондаков Л. А. Уплотнения гидравлических систем. Москва: Машиностроение, 1972. 240 с.
6. Музыкин Ю. Д., Мироненко Ю. Д. Измерение утечки через уплотнения возвратно-поступательных соединений силовых гидроцилиндров. *Вестник НТУ Украины «КПИ»: Машиностроение*. Киев: НТУУ «КПИ», 2002. Вып. 42, Т. 2. С. 34–37.
7. Состояние уплотнений определяет срок службы гидроцилиндров. *Строительные и дорожные машины*. 2003. № 2. С. 26–28.
8. Ремарчук М. П. Гідромеханічний і загальний ККД «гідромотор-колесо» механізму переміщення тихохідної машини. *Наук. вісник будівництва, ХДТУБА*. Харків, 2006. Вип. 35. С. 174–183.
9. Визначення стану рухомих ущільнень за величиною зусилля на тертя в залежності від рівня навантаження / М. П. Ремарчук, Я. В. Чмуж, О. О. Суранов та ін. *The 11th International scientific and practical conference «Modern problems of science, education and society». January 8-10, 2024 SPC «Sciconf.com.ua»*. Kyiv, Ukraine. 2024. С. 477-483.
10. Винарский М. С., Лурье М. В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. Киев: Техніка, 1975. 167 с.
11. Симак Э. Л. Универсальный стенд для испытаний гидро-распределителей. *Строительные и дорожные машины*. 1989. № 2. С. 9–10.
12. Тарнопольский В. М., Лопата В. П., Ремарчук Н. П. Режимы работы и испытаний гидроцилиндров строительных и дорожных машин. *Горные, строительные, дорожные и мелиоративные машины. Республ. межвед. науч.-техн. сб.* Киев: Техніка, 1986. Вып. 39. С. 106–109.
13. А. с. 1550235 СССР, МКИ F 15 В 19/00. Способ ресурсных испытаний гидроцилиндров / В. В. Ничке, А. Ф. Момот, Н. П. Ремарчук, В. Ф. Быканов, Е. В. Волянский. № 4357438/31–29; заявл. 04.01.88; опубл. 15.03.90, Бюл. № 10. 3 с.

---

Ремарчук Микола Парфенійович, доктор технічних наук, професор кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-4003-5107. Тел.: +38 (057) 730-10-72. E-mail: remarchuk@ukr.net.

Суранов Олексій Олексійович, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-8449-2038. Тел.: +38(093) 69-58-907. E-mail: lhornet.hneu@gmail.com.

Стефанов Сергій Олександрович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-4686-1757. Тел.: +38 (099) 566-07-46. E-mail: sergey\_stefanov@ukr.net.

Васянович Роман Сергійович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0003-8582-151X. Тел.: 38 (095) 372-37-32. E-mail: vas.romuch@gmail.com.

Кебко Олександр Вікторович, завідувач навчальної лабораторії кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6292-1505. Тел.: +38 (099) 034-76-07. E-mail: kebko.a@ukr.net.

Remarchuk Mykola, Dr. Sc. (Tech.), professor, department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-4003-5107. Tel.: +38 (057) 730-10-72. E-mail: remarchuk@ukr.net.

---

Suranov Oleksii, PhD (Tech), Sr. lecturer, department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-8449-2038. Tel.: +38(093) 69-58-907. E-mail: lhornet.hneu@gmail.com.

Stefanov Serhii, postgraduate student, department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-4686-1757. Tel.: +38 (099) 566-07-46. E-mail: sergey\_stefanov@ukr.net.

Vasianovych Roman, postgraduate student, department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0003-8582-151X. Tel.: +38 (095) 372-37-32. E-mail: vas.romuch@gmail.com.

Kebko Oleksandr, the head of the educational laboratory, department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6292-1505. Tel.: +38 (099) 034-76-07. E-mail: kebko.a@ukr.net.

Статтю прийнято 18.08.2024 р.

УДК 629.341

## WAYS OF INCREASING THE MACHINABILITY OF HIGH-STRENGTH CAST IRON

PhD (Tech.) N. Lalazarova, PhD (Tech.) G. Komarova, PhD (Tech.) O. Afanasieva,  
PhD (Tech.) O. Popova

## НАПРЯМИ ПІДВИЩЕННЯ ОБРОБЛЮВАНОСТІ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ

Кандидати техн. наук Н. О. Лалазарова, Г. Л. Комарова, О. В. Афанасьєва, О. Г. Попова

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.209.2024.314345>

*Abstract.* Industry is in need of high-strength cast irons with a high level of operational properties. The problem is that such cast iron is characterized by a low level of machinability by cutting. The work presents the results of research in the following areas of improving machinability: heat treatment of cast iron, machining and hardening of hard alloy tools, processing using a polymer-containing lubricating and cooling fluid.

*Keywords:* high-strength cast iron, machinability, heat treatment, work-hardening treatment, lubricating and cooling fluid.

*Анотація.* Промисловість потребує високоміцних чавунів із високим рівнем експлуатаційних властивостей. Проблема полягає в тому, що такі чавуни мають невисокий рівень оброблюваності різанням. Метою є розроблення комплексу методів покращення оброблюваності високоміцного чавуну, які стосуються властивостей оброблюваного матеріалу, інструменту і характеру їхньої взаємодії. Для дослідження структури використовували оптичний цифровий мікроскоп, зносу інструменту – інструментальний мікроскоп. Тангенціальну складову сили різання та її коливання досліджували за допомогою спеціального динамометра. У роботі наведені результати досліджень із таких напрямів покращення оброблюваності: термічна обробка чавуну, обробно-зміцнююча обробка твердосплавного інструменту, обробка з використанням полімервмісної змащувально-охолоджуючої рідини. На оброблюваність значний вплив має хімічна і структурна неоднорідність чавуну, пов'язана з ліквідацією хімічних елементів. У роботі неоднорідність

високоміцного чавуну визначають за коливаннями динамічної складової сили різання, а відносну оброблюваність – відносно неоднорідності сірого чавуну, який прийнято як еталон. За оптимальний режим термічної обробки запропоновано нормалізацію з міжкритичного інтервалу, яка зменшує неоднорідність чавуну та одночасно забезпечує достатньо високий рівень експлуатаційних властивостей за перерізом деталі і є найбільш економічною. Неоднорідність чавуну сприяє інтенсифікації зносу інструменту. Проведення нормалізації дає змогу підвищити швидкість різання при точінні гексанітом-Р в 1,2 рази. Наприклад, комплексний підхід до покращення оброблюваності (використання обробно-зміцнюючої дробоструминної обробки твердосплавного інструменту і полімервмісної ЗОР) дає змогу підвищити швидкість різання при точінні високоміцного нормалізованого чавуну відносно литого стану з  $V_{60} = 2,5$  м/с до  $V_{60} = 4,5$  м/с.

**Ключові слова:** високоміцний чавун, оброблюваність, термічна обробка, обробно-зміцнююча обробка, змащувально-охолоджуюча рідина.

**Introduction.** Currently, high-strength nodular graphite cast iron (HSNGCI) is widely used as a structural material, which combines the manufacturability of gray cast iron with a set of properties higher than those of ductile and, in some cases, even cast and forged steel [1]. The expected significant growth in the world production of vehicles and engineering products will increase the demand for cast iron products and their nomenclature.

In this regard, the industry needs to use cast irons with a high level of operational properties, whose introduction is restrained by the low level of their machinability by cutting.

**Analysis of recent research and publications.** The properties of the material are determined by its composition and structure. Cast irons are characterized by significant chemical and structural inhomogeneity. A wide range of operational properties of cast iron are obtained by changing the chemical inhomogeneity and structure of the metal matrix [2, 3]. Favourable casting properties make it possible to make high-quality castings with minimal wall thickness from high-strength nodular graphite cast iron [4].

Distribution shafts and crankshafts of cars, combine harvesters, diesel locomotives, toothed gears and other parts that work in difficult conditions are made of high-strength cast iron: they are subjected to variable loads, significant contact pressure, and actively wear

out. To obtain the necessary set of properties, cast iron products are alloyed and subjected to strengthening heat treatment [5]. In this regard, production is faced with the need to process not only low-strength cast irons, but also cast irons subject to hardening treatment in various modes, which are selected based on the working conditions of the parts [6].

Due to the fact that cast irons have significant chemical and structural inhomogeneity and can have a high level of mechanical properties, they are characterized by low machinability.

Machinability by cutting is a complex of technological characteristics that determine the efficiency of material processing. It is the most important factor affecting productivity, quality and cost of production. Despite this, there is no generally accepted approach to the problem of machinability.

A systematic approach to machinability involves its comprehensive consideration, since an isolated study of any, even an important indicator, cannot lead to an optimal solution in terms of the entire complex of properties [7].

Machinability can be evaluated by a large number of parameters: cutting force and temperature, chip shrinkage, cutting speed, wear intensity, tool stability, chip volume, cost and productivity of processing, quality

characteristics of the surface layer of the part, relative machinability coefficient, energy characteristics, etc.

The choice of one or another machinability indicator depends on the needs of production and its goals. For example: under conditions of shortage of any type of cutting tool, you should choose an indicator that ensures a decrease in its costs (maximum stability); with high requirements for the quality of the treated surface – roughness and other quality indicators, etc.

Information can be found in the literature on determining the machinability of high-strength cast iron by stability indicators, by the coefficient of relative machinability (relative to the machinability of gray cast iron), by empirical dependencies (by chemical composition, by mechanical properties – hardness, strength, plasticity indicators).

Thus, machinability is a complex concept that is determined by the state of the processed material, the cutting tool and the nature of their interaction. The main factors stemming from the features of the composition and structure of cast iron, which ensure the machinability of high-strength nodular graphite cast iron, are: inhomogeneity, microstructure and hardness of cast iron.

It is possible to improve the machinability of high-strength nodular graphite cast iron in the following ways: regardless of the cutting process, due to various actions on the material of the product; due to the influence on the tool and processing conditions during the cutting process.

The first group combines the methods of changing machinability, which are carried out before the process of mechanical processing and independently of it, for example, during the metallurgical cycle due to a change in the chemical composition during the manufacture of the workpiece, due to heat treatment. These factors can be used if it is technologically and economically possible to change the technology of the casting process, if the processes of additional alloying and heat treatment do not

have a negative effect on obtaining the required set of properties of the processed part.

Annealing cast iron to improve machinability is usually an intermediate operation, after which it is necessary to carry out final processing, which makes the process of obtaining a finished product significantly longer and more expensive.

The second group includes methods of improving machinability, which are implemented in the process of cutting: changing the properties, design, and geometry of the tool. In many cases, this is the easiest way to solve the machinability problem. It is promising to use tool-hardening treatment, whose possibilities when cutting high-strength nodular graphite cast iron have not yet been studied.

The third group includes methods that affect the nature of the interaction of the tool with the processed workpiece: elements of the cutting mode, lubricating and cooling fluid (LCF), heating cutting, with anticipatory plastic deformation, etc. [7]

The use of LCF is a promising direction, as currently a large number of universal LCF with a huge spectrum of action have been created.

Machinability can be improved by using either one of the methods (for example, heat treatment). More efficiency can be achieved by using several methods at the same time. Since machinability is a complex concept, in order to improve it, it is necessary to develop a set of methods that would have to do with the properties of the processed material, the tool, and the nature of their interaction.

Based on the analysis of literary data, the purpose and objectives of the research were determined.

**Goal and task setting.** The goal is to develop a complex of methods for improving the machinability of high-strength cast iron, which deal with the properties of the processed material, the tool, and the nature of their interaction.

In order to achieve the set goal, it is necessary to give the reasons for the low

machinability of high-strength nodular graphite cast iron; to develop recommendations for improving the machinability of cast irons by heat treatment, tool hardening treatment and the use of LCF.

**The main part of the study.** The machinability of high-strength cast iron is

determined by its chemical (especially silicon liquation) and structural inhomogeneity (in cast iron, ferrite is located around graphite inclusions), which causes fluctuations in the dynamic component of the cutting force and negatively affects the stability of the cutting tool (Fig. 1).

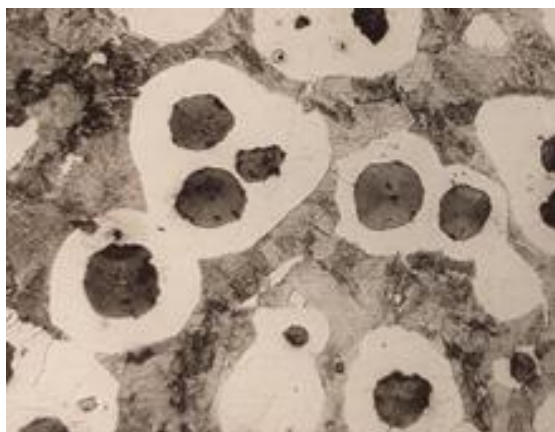


Fig. 1. Microstructure of cast iron in the cast state

An optical digital microscope was used to study the microstructure.

This implies the method of improving machinability by heat treatment, which affects the degree of inhomogeneity of cast iron.

The degree of inhomogeneity of cast iron is determined by the results of statistical processing of fluctuations in the tangential component of the cutting force, which was studied using a special dynamometer:

$$K_H = \frac{V_{\theta c}}{V_{c c}} \quad (1)$$

where  $V_{\theta c}$  – is the coefficient of variation of the instantaneous values of the cutting force for high-strength nodular graphite cast iron;

$V_{c c}$  – is the coefficient of variation of instantaneous cutting force values for gray cast iron.

The coefficient of inhomogeneity, as a complex characteristic of cast iron, determines

its machinability  $K_o$  – coefficient of relative machinability

$$K_o = \frac{K_{H c c}}{K_H} = \frac{1}{K_H} \quad (2)$$

For practical application, it is necessary to know the absolute value of machinability. Estimated values of cutting speeds at a durability of 60 min were determined for the investigated cast irons when processed with superhard tool material – hexanite-P:

$$V_{60} = K_o \cdot V_{c c} \quad (3)$$

where  $V_{c c}$  is a cutting speed when processing gray cast iron, m/s.

As indicators of machinability, the ratio of relative machinability and cutting speed at a durability of 60 min was used.

Cast iron is characterized by an increased degree of inhomogeneity and a reduced level of machinability ( $K_n = 1,7$ ,  $K_o = 0,6$ ,

$V_{60} = 3,0$  m/s). Traditionally, annealing is used to improve the machinability of cast iron, which evens out chemical and structural inhomogeneity, reduces hardness, and significantly improves machinability ( $K_n = 1,1$ ,  $K_o = 0,9$ ,  $V_{60} = 4.8$  m/s). However, annealing increases the time of cast iron processing, reduces its productivity, and requires one more processing – the final one, which ensures obtaining the required set of properties in the cross-section of the part. The analysis of literary sources showed that normalization from the inter-critical interval (ICI) can be such a heat treatment. It reduces the inhomogeneity of cast iron, respectively, improves machinability relative to the cast state and provides a high level of mechanical properties ( $K_H = 1,36$ ,  $K_o = 0,73$ ,  $V_{60} = 3,6$  m/s). The given research results confirm that machinability is determined by the inhomogeneity of cast iron and normalization with ICI can be considered the optimal heat treatment, both in terms of machinability and economy. For processing cast iron, an ultra-hard tool material based on cubic boron nitride - hexanite-P is used, which has a high level of physical and mechanical properties, and is inert to the processed material.

A high degree of inhomogeneity of cast iron contributes to the intensification of the cutting tool wear. Carbide tools are most often used when processing products from high-strength nodular graphite cast iron. One of the ways to increase its wear resistance is the processing and strengthening treatment.

When processing cast iron, cyclic loads occur, causing periodic changes in tangential and normal stresses on the contact surfaces of the tool, which causes chipping of the cutting edge. These stresses affect the bonding and the carbide phase of the hard alloy in different ways. Therefore, hard alloy wear at high speeds occurs either as a result of fatigue destruction of carbide grains, when small particles are removed from their worn surface, or due to the removal of carbide grains as a result of fatigue destruction of the bond.

The research was carried out on high-strength cast iron with a hardness of 275–285 HBW after normalization during turning using cutters with pentagonal plates made of BK8 hard alloy, which have the following geometric parameters:  $\varphi = 60^\circ$ ,  $\varphi_1 = 10^\circ$ ,  $\gamma = -8^\circ$ ,  $\gamma = 8^\circ$ .

The plates were subjected to vibro-abrasive and shot-blast hardening. Vibro-abrasive processing was carried out on a special BM40C vibro-abrasive machine. The plates were strengthened in the environment of the battle of abrasive circles of 10–20 mm granulation weighing 60 kg, with a frequency of 46 Hz, an amplitude of 0,6 mm. All plates were strengthened simultaneously with continuous washing with soda solution. The properties of the tool during vibro-abrasive hardening are increased due to the optimal radius of rounding of cutting edges and tops, low roughness of cutting surfaces and edges, favourable surface relief, as well as slander, allotropic transformations and residual stresses in the surface layer at a depth of up to 0.01 mm [8].

Shot blast hardening was carried out on a special tool set with a shot-blasting wheel with a diameter of 350 mm and a rotation frequency of  $3600 \text{ min}^{-1}$ . At the same time, 6 plates, fixed on the cover of the installation in a special device, were strengthened with shot DCK-0.3 without LCFs.

Tool stability  $T$  (min) was used as a machinability characteristic. The cutting mode was:  $t = 0,4$  mm;  $S = 0,07$  mm/rev;  $V = 5,2$  m/s. The wear criterion (0.6 mm), the value of resistance (7 – 20 min) and the level of cutting modes were close to those used in production. To reduce the complexity of the experiments, the cutting speed was slightly forced, each experiment was repeated 4 times.

The plates were tested on a 16K625 machine during longitudinal turning without LCF. Strength tests were carried out by gradually increasing the feed until the plate breaks –  $S_p$  (mm/rev). With a cutting depth of 2,5 mm and a cutting speed of 0,32 m/s, the feed was increased from 0.78 mm/rev according to



the number of machine feeds, each experiment was repeated 10 times. The dimensions and topography of the fractures were close to those during turning of gray cast iron. Tool wear was measured under an instrument microscope.

The tests showed that after vibro-abrasive processing, the maximum value of strength (amount of fracture feed) was obtained for the radius of the cutting edge rounding  $\rho = 20 \mu\text{m}$ .

The maximum stability and strength of the tool during shot blasting is ensured by shot blasting for 80 s due to a small rounding of the cutting edges and the creation of residual compressive stresses in the surface layer. The level of compressive residual stresses in the surface layer reaches 1200 MPa for the carbide phase, and 400 MPa for the cobalt phase. Shot-blast hardening of the tool is more effective than vibro-abrasive when processing high-strength cast iron.

An effective way to improve machinability is the use of LCF.

The application of LCF for the purpose of intensification of mechanical processing of parts from high-strength nodular graphite cast iron has not yet been widely used [9]. The greatest reduction in axial cutting force, drilling moment and increase in tool stability during drilling is provided by Ukrinol-1 LCF, and OCM-3 when threading. However, the research has not covered a significant group of liquids with a higher level of functional properties. These are polymer-containing multifunctional liquids, whose use in the processing of cast iron parts is promising.

The mechanism of action of polymer-containing media is based on the Rebinder effect. A polymer-containing liquid, for example, of the MXO-69 brand, facilitates the plastic deformation and destruction of normalized cast iron (the coefficient of shrinkage during processing of cast iron is reduced by 20 %), which contributes to the reduction of all component cutting forces (reduction of the component cutting force  $P_z$  by 18–20 %), the coefficient of friction is reduced (by 16–18 %), which helps to lessen the cutting temperature.

The presence of a polymer-containing medium affects the nature of chip formation, improves chip dispersion, and conditions for its removal from the cutting zone.

Treatment with a polymer-containing liquid ensures a 30% reduction in the roughness of the treated surface of normalized cast iron. The roughness was measured with a TR200 model roughness meter.

The use of a polymer-containing liquid when turning normalized high-strength cast iron with a carbide tool provides a 1,4-fold increase in cutting speed.

Thus, a comprehensive approach to improving machinability (for example, the use of tool hardening treatment, polymer-containing LCF) allows to increase the cutting speed when turning high-strength normalized cast iron relative to the cast state from  $V_{60} = 2,5 \text{ m/s}$  to  $V_{60} = 4,5 \text{ m/s}$ .

**Conclusion.** The reduced machinability of high-strength nodular graphite cast iron is explained by its high degree of chemical and structural inhomogeneity.

Machinability as a complex concept requires a complex approach to its improvement.

Heat treatment allows to reduce the degree of inhomogeneity of cast iron and improve its machinability relative to the cast state. Normalization with inter-critical interval is a rational mode of heat treatment, in terms of machinability and ensuring the required level of operational properties.

The use of machining and strengthening shot blasting of a carbide tool helps to significantly increase its strength and stability.

Mechanical processing using a polymer-containing LCF, which has a multifunctional effect on the cutting process, makes it possible to increase the cutting speed by 1,4 times when processing with a carbide tool.

For example, a comprehensive increase in the machinability of cast iron using tool hardening treatment and polymer-containing LCF allows almost doubling the cutting speed with a hard alloy tool.

### References

1. Савуляк В. І., Янченко О. Б. Економічні технології високоміцних графітованих сплавів заліза: монографія. Вінниця : ВНТУ, 2014. 160 с.
2. Сучасні уявлення про структуроутворення у графітованих чавунах (огляд) / А. М. Верховлюк та ін. *Металознавство та обробка металів*. 2018. № 1. С. 9-22.
3. 50th Census of World Casting Production : Modern Casting, December 2016. P. 25–29.
4. Doru M. Stefanescu. ASM Handbook, Volume 1A: Cast Iron Science and Technology. ASM International, 2017. 772 p. ISBN: 978-1-62708-133-7.
5. Волощенко С. М. Створення наукових засад структуроутворення в чавуні для підвищення зносостійкості змінних деталей сільгосптехніки та транспорту: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.02. Київ, 2017. 236 с.
6. A Review on Heat Treatment of Cast Iron: Phase Evolution and Mechanical Characterization / Ojo Jeremiah Akinribide and others. *Materials*. 2022, 15(20), 7109. <https://doi.org/10.3390/ma15207109>.
7. A review on the machining of cast irons / José Aécio G. de Sousa, Wisley Falco Sales, Alisson Machado. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. February 2018. 94(1). <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1140-1>.
8. A review on micro-blasting as surface treatment technique for improved cutting tool performance/ Mahendra Gadge, Gaurav M. Lohar, Satish Chinchankar. *Materials Today Proceedings*. May 2022. 64(1–2). P. 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.196>.
9. Application of coolants during tool-based machining – A review / Khor Zheng Yang and others. *Ain Shams Engineering Journal*. Vol. 14, Is. 1, February 2023, 101830. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101830>.

---

Lalazarova Nataliia, PhD, Associate Professor, Department of Technology of Metals and Materials Science. <https://orcid.org/0000-0002-2138-9081>. Tel.: +38 (095) 390-38-16. E-mail: [lalaz1932@gmail.com](mailto:lalaz1932@gmail.com). Kharkiv National Automobile and Highway University.

Komarova Hanna, PhD, Associate Professor, department of wagon engineering and product quality. <https://orcid.org/0000-0001-8597-58-91>. Tel.: +38 (067) 999-85-77. E-mail: [anna.kom3793@gmail.com](mailto:anna.kom3793@gmail.com). Ukrainian State University of Railway Transport.

Afanasieva Olga, PhD, Associate Professor, Physical Foundations of Electronic Engineering Department. <https://orcid.org/0000-0002-5382-2986>. Tel.: +38(096)-525-62-35. E-mail: [7584839@ukr.net](mailto:7584839@ukr.net). National University of Radio Electronics.

Popova Olena, PhD, Associate Professor, Department of Composite Structures and Aviation Materials. <https://orcid.org/0000-0003-3955-3852+38>. Tel.: +38 (067) 570-12-17. E-mail: [o.popova@khai.edu](mailto:o.popova@khai.edu). Kharkiv National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute».

Лалазарова Наталія Олексіївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри технології металів та матеріалознавства, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. <https://orcid.org/0000-0002-2138-9081>. Тел.: +38 (095) 390-38-16. E-mail: [lalaz1932@gmail.com](mailto:lalaz1932@gmail.com).

Комарова Ганна Леонідівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. <https://orcid.org/0000-0001-8597-58-91>. Тел.: +38 (067) 999-85-77. E-mail: [anna.kom3793@gmail.com](mailto:anna.kom3793@gmail.com).

Афанасьева Ольга Валентинівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри фізичних основ електронної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки. <https://orcid.org/0000-0002-5382-2986>. Тел.: +38 (096) 525-62-35. E-mail: [7584839@ukr.net](mailto:7584839@ukr.net).

Попова Олена Георгіївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри композитних конструкцій та авіаційного матеріалознавства, Харківський національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «ХАІ». <https://orcid.org/0000-0003-3955-3852+38>. Тел.: +38 (067) 570-12-17. E-mail: [o.popova@khai.edu](mailto:o.popova@khai.edu).

Статтю прийнято 26.09.2024 р.

**БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)**

---

УДК 69.059.1

**МЕТОДИ І ПРАКТИКИ НАВЧАННЯ І ЗАСТОСУВАННЯ ЗГОРТКОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ РІЗНИХ ДЕФЕКТІВ НА ПОВЕРХНЯХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

Учений із даних С. В. Левщанов

**METHODS AND PRACTICES OF TRAINING AND APPLICATION OF CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS FOR DETECTING VARIOUS DEFECTS ON THE SURFACES OF BUILDING STRUCTURES**

Data scientist S. Levshchanov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.209.2024.314400>

***Анотація.** Предметом дослідження у статті є практика впровадження та методика застосування типів штучного інтелекту – згорткових нейронних мереж і науки про дані для виявлення різних дефектів на поверхнях будівельних конструкцій. Мета роботи – виявити переваги і недоліки практики впровадження та застосування технологій згорткових нейронних мереж разом з іншими програмними і апаратними компонентами для автоматизації традиційних методів виконання робіт із моніторингу технічного стану зовнішніх поверхонь будівель і споруд. У статті вирішують такі завдання: обґрунтування ефективності впровадження технологій згорткових нейронних мереж і методів науки про дані; їх практичне застосування з програмними та апаратними технологіями для автоматизації традиційних методів виконання робіт із виявлення різних дефектів на поверхнях будівельних конструкцій в індустрії будівництва та експлуатації будівель і споруд; показати проблеми та недоліки даних методів і технологій. Для вирішення цих завдань використовували комплексний підхід із застосуванням загальнонаукових і спеціальних методів досліджень (аналізу, пояснення, узагальнення, порівняння). Отримано такі результати: встановлено особливості, що впливають на точність аналізу зібраних даних, застосовуваних технологіями нейронних згорткових мереж для виявлення різних дефектів на поверхнях будівельних конструкцій; відображено практики і методи більш ефективного і точного застосування такої технології. Висновки: проведене дослідження дало змогу визначити практичні можливості та проблеми, що є в такій технології; розроблено рекомендації щодо ефективного використання цієї технології; виявлено чинники, що впливають на ефективніше використання цієї технології у промисловості.*

***Ключові слова:** штучний інтелект, наука про дані, згорткові нейронні мережі, виявлення дефектів на конструкціях.*

***Abstract.** The subject of research in this article is the practice of implementing and applying types of artificial intelligence – convolutional neural networks and data science - to detect various defects on the surfaces of building structures. The purpose of the study is to identify the advantages and disadvantages of implementing and using convolutional neural network technologies together with other software and hardware components to automate traditional methods of monitoring the*

*technical condition of the external surfaces of buildings and structures. The article solves the following tasks: to substantiate the effectiveness of implementation of convolutional neural network technologies and data science methods; to apply them in practice with software and hardware technologies to automate traditional methods of performing work on detecting various defects on the surfaces of building structures in the construction and operation of buildings and structures; to show the problems and shortcomings of these methods and technologies. To solve the tasks, an integrated approach was used with the use of general scientific and special research methods (analysis, explanation, generalisation, comparison). The following results have been obtained: the features that affect the accuracy of the analysis of the collected data used by neural convolutional network technologies to detect various defects on the surfaces of building structures have been identified; practices and methods for more efficient and accurate application of this technology have been reflected. Conclusions: the study allowed to identify the practical opportunities and problems that exist in this technology; recommendations for the effective use of this technology were developed; factors influencing the more efficient use of this technology in industry were identified.*

**Keywords:** artificial intelligence, data science, convolutional neural networks, detection of defects in structures.

**Вступ.** Будівельна галузь є одним із найбільших секторів світової економіки. Нині галузь має низку проблем: низька продуктивність; нестача інновацій [1]. У будівельній галузі автоматизовані системи виконують завдання точніше, ніж традиційні методи, забезпечуючи більш якісні результати і меншу кількість помилок. У зв'язку з цим ця тематика є затребуваною для вивчення і потребує додаткових оглядових досліджень, які відстежують тенденції впровадження нових технологій у будівельний сектор [2].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Згорткові нейронні мережі (CNN) використовують для виявлення деформацій різних будівельних конструкцій: дороги, мости і тунелі, несучі стіни. CNN забезпечує ефективний і точний моніторинг [3].

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) здійснюють фото- і відеозйомку і за допомогою бездротової мережі передають матеріал для подальшої обробки та аналізу навченим за допомогою технологій машинного навчання згортковим нейронним мережам. Це значно розширює можливості та частоту обстеження інфраструктурних об'єктів [4].

Виявлення об'єктів за допомогою CNN, таких як тріщини, є важливою

складовою застосування технології машинного навчання. Це дає змогу застосовувати більш ефективні методи контролю цілісності, якості та раннього виявлення деформацій і руйнувань об'єктів інфраструктури, оскільки візуальне обстеження є основним методом виявлення тріщин чи деформацій. У зв'язку з цим стала поширеною практика застосування безпілотних літальних апаратів, здатних за рахунок своєї маневреності подолати всі перешкоди і успішно зібрати необхідні дані. Однак ручний аналіз цих даних є трудомістким процесом, може забирати багато часу і схильний до помилок через втручання людини. Автоматичне виявлення тріщин на зображеннях і відео можливе завдяки досягненням у технологіях машинного навчання [5], у тому числі автоматичне виявлення тріщин при огляді будівель, які були пошкоджені внаслідок природних чи техногенних катаклізмів і становлять потенційну небезпеку для обстеження традиційними методами [3, 4].

**Визначення мети та завдання дослідження.** На сьогодні досвід застосування технології згорткових нейронних мереж у сфері будівництва та експлуатації будівель і споруд мало вивчений, тому існує потреба в огляді методик і практик застосування для

розуміння ефективності та оцінювання всіх переваг. Існує кілька наукових статей, у яких використано різні методи навчання та застосування CNN для виявлення тріщин на фото і відео, що показують різний результат. У зв'язку з цим ця наукова робота має на меті створення комплексного аналізу за методами застосування CNN для виявлення найбільш ефективного. Спеціалістам-практикам можна використовувати це дослідження як довідковий матеріал, що допоможе генерувати більше інновацій у галузі будівництва та сприяти розвитку будівельної галузі.

#### **Основна частина дослідження.**

Спочатку після появи штучного інтелекту області його практичного застосування були обмежені, оскільки ця технологія не мала великого визнання серед дослідників і фахівців. Згодом технологія штучного інтелекту починає набувати важливого значення з появою нових алгоритмів, які продовжують розвиватися та удосконалюватися. Згорткові нейронні мережі є цими алгоритмами. Вони використовують шари зв'язаних вузлів для імітації нейрологічної системи під час вирішення завдань. Ефективність такого алгоритму полягає в додаткових шарах, які він використовує для кращого вилучення характеристик (особливостей) завдання, яке намагається вирішити. Методи машинного навчання знайшли своє ефективне застосування в обслуговуванні цивільної інфраструктури, у тому числі для перевірки, моніторингу та оцінювання стану громадянської інфраструктури, яка потребує багато часу та зусиль при використанні традиційних методів. Дослідники в галузі машинного навчання за допомогою згорткових нейронних мереж підвищують точність і надійність виявлення різних дефектів під час обслуговування цивільної інфраструктури. Тріщини та будь-які зовнішні дефекти в будівельних конструкціях виявляють за допомогою техніки неруйнівного контролю. Візуальний

огляд із використанням фотографій високої роздільної здатності є однією з таких технік разом із такими техніками, як використання георадара, ультразвукового контролю, термографії. Візуальний огляд із використанням фотографій високої роздільної здатності має істотну перевагу порівняно з вищевказаними та іншими традиційними техніками неруйнівного контролю для обстеження будівель і споруд. Для візуального огляду з використанням фотографій високої роздільної здатності використовують безпілотні літальні апарати, оскільки вони дають можливість віддаленого моніторингу об'єктів і важкодоступних місць.

Згорткові нейронні мережі використовують методи глибокого навчання для розпізнавання об'єктів, завдяки чому вони можуть аналізувати різні дані і розпізнавати об'єкти.

Перший метод застосування навченої моделі CNN є використання її для автоматизованого аналізу зображень фасадної плитки зовнішніх стін будівель. На жаль, цей метод має два обмеження: 1) навчена модель не може виявляти кілька типів дефектів одночасно; 2) навчена модель може виявляти лише зображення з видимими дефектами.

Для цього методу використовують модель згорткової нейронної мережі VGG-16 (Visual Geometry Group), що дає змогу перетворити вхідні дані фото у формат, зрозумілий для наступних шарів нейронної мережі (рис. 1), які будуть виконувати аналіз зображень. Class Activation Mapping (CAM) – це клас-дискримінаційний метод візуалізації для нейронної мережі, який допомагає покращити інтерпретованість моделі для детального розпізнавання та виявлення. Із застосуванням цих двох компонентів було розроблено модель глибокого навчання, здатну розпізнати такі дефекти, як сколи, розтріскування фасадних плиток будівель.

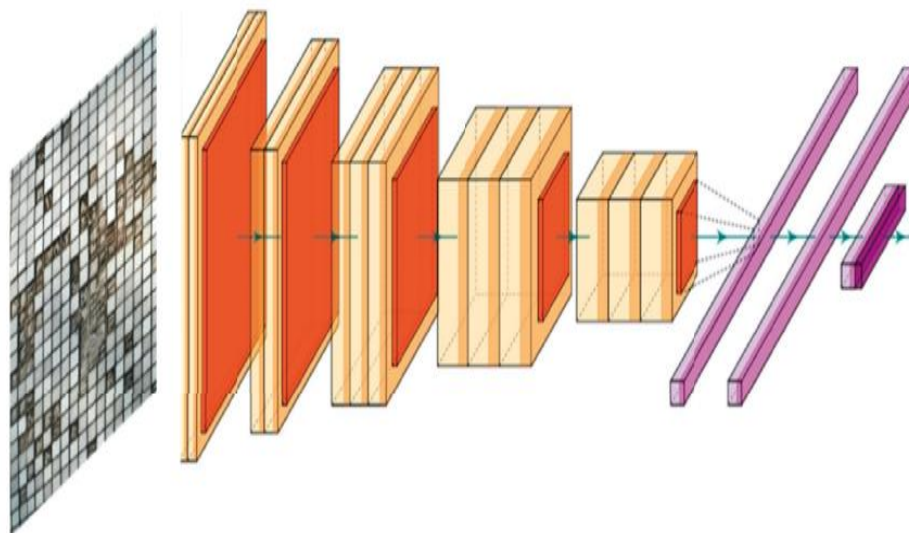


Рис. 1. VGG-16 для перекладного навчання зліва направо:  
Вхідне зображення; Шар згортки; Шар об'єднання; Повністю зв'язаний шар; Шар Somax;  
Клас виходу [3]

Для навчання цієї моделі були використані зображення з різними дефектами фасадних стін (рис. 2), спеціально оброблені зі зміною їхнього розміру, що суттєво покращило сприйняття і навчання мережі. Потім було застосовано трансферне навчання (TL) – це метод машинного навчання, за якого модель, попередньо навчену виконувати одне завдання, налаштовують для виконання нового завдання, пов'язаного з попереднім. Цей метод використовували одночасно з VGG-16 та ImageNet – колекцією з більш ніж 14 мільйонів різних зображень, використовуваних для навчання моделей і САМ для їх локалізації, щоб гарантувати здатність моделі глибокого навчання розпізнавати необхідні об'єкти.

Для збору даних для аналізу за допомогою БПЛА було знято 5680 зображень фасадної плитки. Ці зображення мали відмінності в роздільній здатності та розмірі, оскільки зйомка відбувалася з різних кутів і дистанцій. Для уніфікації цих зображень для подальшої обробки моделлю ці зображення були нарізані на зображення з роздільною здатністю 224x224 і 3024x4032 пікселів.

Потім для автоматичного виявлення дефектів було застосовано навчену за допомогою трансферного навчання модель нейронної мережі VGG-16. Результати аналізу показали, що модель може виявляти дефекти фасадної плитки на зображеннях з точністю від 78 до 100 % [3].

Як уже було зазначено, порівняно з традиційними методами виявлення зовнішніх дефектів у будівельних конструкціях використання БПЛА недороге та забезпечує більшу мобільність, ефективність і безпеку для інспекторів. Однак на ефективність цього методу можуть суттєво вплинути клімат, освітлення, вітер і зони з джерелами технічних перешкод для використання дронів, що обмежує широке впровадження та застосування цього методу в галузі експлуатації та будівництва.

Інший метод використання CNN складається з трьох частин: 1) обробка зображень на основі ознак для вилучення особливостей зображень і подальше об'єднання їх в одне велике зображення; 2) виявлення тріщин за допомогою моделі глибокого навчання; 3) визначення їхніх координат відносно розташування на зображеннях.



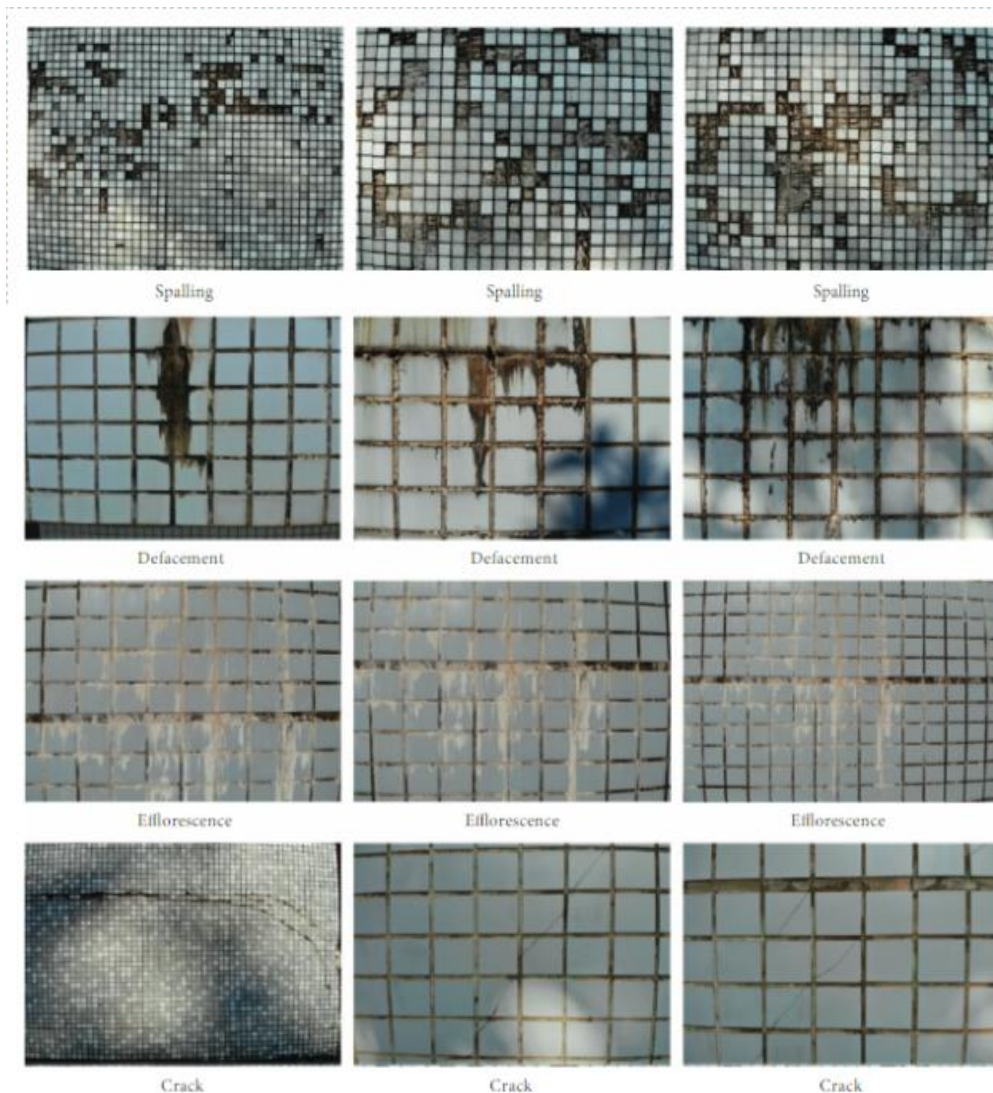


Рис. 2. Приклади зображень набору даних для навчання [3]

Для навчання наступної моделі використовували 56 000 зображень мостових настилів, стін і тротуарів гарної якості для кожної категорії, як з тріщинами, так і без них (рис. 3).

Для виявлення тріщин, як і в попередньому прикладі, застосовували CNN на основі моделі VGG16, бо ця модель має широке використання через її високу продуктивність, разом із базою даних ImageNet, розробленою для візуального розпізнавання об'єктів і трансферного навчання. Потім на основі інформації про місцезнаходження БПЛА при зніманні за

допомогою вбудованої камери об'єкта, що обстежували, і роботи алгоритму глибокого навчання вдалося визначити розташування тріщин у світовій системі координат і створити повну карту тріщин, які відмічені червоним, з інформацією про це.

Отримані за допомогою БПЛА зображення фасадної стіни були оброблені і зібрані в одне велике зображення (рис. 4), щоб подолати обмеження дозволу камери. Для подальшої обробки використовували модель CNN, спеціально навчену для виявлення будь-яких тріщин на зображеннях.



Рис. 3. Приклади зображень, що використовують для навчання: зображення з тріщинами (перші три рядки) і зображень без тріщин (останні три рядки) [4]



Рис. 4. Зшиті в одне зображення [4]



За допомогою інформації, отриманої з вбудованих датчиків у БПЛА, були визначені розташування тріщин у світовій

системі координат (рис. 5). Такий підхід збільшує ефективність і швидкість обстеження великих конструкцій.

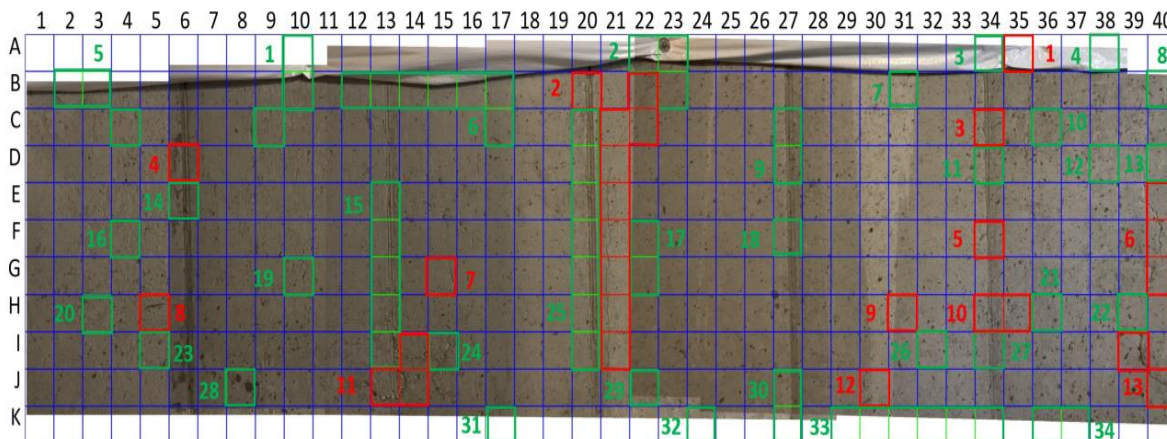


Рис. 5. Зшиті в одне зображення з координатами [4]

Як видно з цього дослідження, за допомогою поєднання можливості виявлення тріщин із визначенням їх розташування можна підвищити ефективність використання навчених моделей CNN.

Для виявлення тріщин у цьому методі була використана модель VGG16. Вона підтримує зображення розміром 224 на 224 і має три канали, використовує 16 згорткових шарів із фільтрами  $3 \times 3$  для оптимального вилучення ознак вхідних зображень. У моделі останній шар max-pooling підключений до одного повністю зв'язаного шару довжиною 4096 нейронів, який потім підключений до шару softmax для 1000 класифікацій. Отже, вихідні дані по суті є реальним значенням від 0 до 1. При перевірці 1 і 0 являють собою максимальну впевненість щодо наявності чи відсутності тріщин. А точність як під час перевірки, так і навчання значно перевищує 99% [4].

У третьому методі збору даних застосовували два БПЛА роторного типу, з'єднаних через бездротове передавання даних із спеціальним програмним забезпеченням (СПО) на персональному комп'ютері. У СПО було заздалегідь задано маршрут польоту, що забезпечило

ефективне охоплення зони перевірки і дало змогу уникнути зайве знімання (рис. 6). Також була задана дистанція 1,2 м між дронами і об'єктом для отримання уніфікованих даних.

Перед використанням модель CrackClassCNN (рис. 7) була навчена за допомогою SDNET2018 – великого набору даних з 56 000 зображень (різні конструкції прогонів мостів, стін та доріг), спеціально призначеного для навчання, перевірки та порівняльного аналізу алгоритмів на основі штучного інтелекту, орієнтованих на виявлення тріщин у бетоні.

Для подальшого аналізу було зібрано 150 зображень і 20 хвилин відеоданих. На зібраних зображеннях є тріщини, структурні деформації і навіть сліди корозії. Через те що під час знімання обидва БПЛА через вітер і роботу гвинтів були схильні до вібрацій, це спричинило розмиття зображень. Для усунення дефектів було застосовано MPRNet – багатоетапну прогресивну архітектуру відновлення зображень, що усунуло всі дефекти. Потім для виявлення тріщин на отриманих зображеннях було використано модель CrackClassCNN.

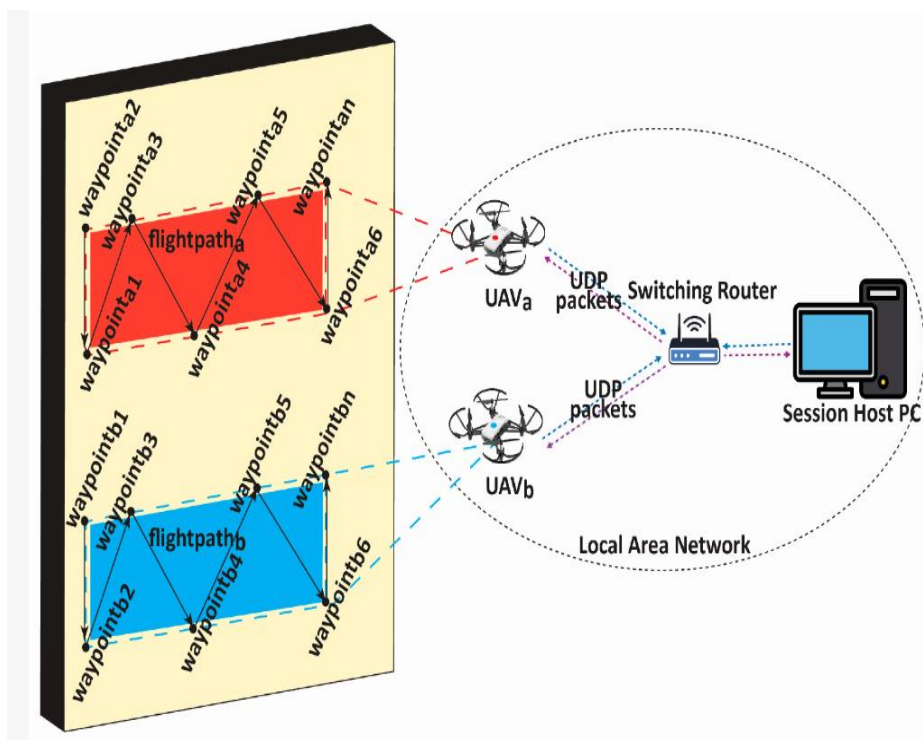


Рис. 6. Комунікаційна мережа для збирання даних за допомогою БПЛА [5]

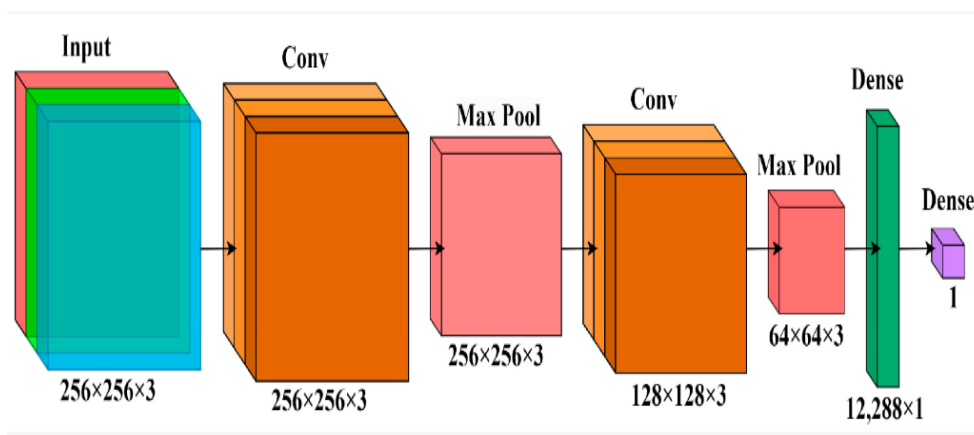


Рис. 7. Архітектура CrackClassCNN використовує складені згорткові шари для локального виділення ознак, а потім шари максимального об'єднання для зменшення розмірів. Щільно з'єднаний шар завершується однею нейронним вихідним шаром, оптимізуючи швидкість і точність виявлення тріщин [5]

Для отримання деталізації тріщин на зображенні на рівні пікселів зображення з виявленими тріщинами були оброблені

моделлю сегментації Segment Anything Model (SAM). Результат обробки показує, що точність досягла 95,02 % (таблиця) [5].

Таблиця

Точність розпізнавання дефектів на фото- і відеозображеннях за допомогою різних методів навчання і застосування згорткових нейронних мереж

Метод	Точність	Примітка
1	від 78 до 100 %	Середнє значення 90 %
2	99 %	
3	95,02 %	

У першому методі, як видно в таблиці, мінімальна точність розпізнавання була найнижчою порівняно з наступними методами. Так само навчена модель згорткової нейронної мережі не мала функціональності, що дало змогу одночасно виявляти декілька типів дефектів.

Другий метод істотно відрізняється від першого тим, що отримані за допомогою БПЛА зображення були склеєні в одне велике зображення, щоб подолати обмеження роздільної здатності камери. Потім навчена модель CNN аналізувала склеєне зображення та виявляла тріщини на зображеннях. За допомогою інформації, отриманої з датчиків БПЛА та аналізу моделі CNN, було встановлено розташування тріщин у світовій системі координат, створивши цілісну карту. Ця карта з усіма виявленими тріщинами суттєво допомагає покращити ефективність подальших дій для великих об'єктів інфраструктури та великих будівельних конструкцій. А точність як під час перевірки, так і навчання перевищує 99 %, що є найвищим середньостатистичним показником порівняно з двома іншими методами.

Третій метод застосування моделі CNN – методологія обробки, яка дає змогу автоматично виявляти і сегментувати зображення з тріщинами. Модель CrackClassCNN була навчена в мережі на наборі даних SDNET2018, зображеннях настила моста, і досягла точності 95,02 %, що є вище, ніж першого методу, але нижче, ніж другого методу. Модель CrackClassCNN має швидший час виведення даних через

простішу структуру. Також цей метод включає навчання декодера крайової маски з використанням попередньо навченої базової моделі Vision Transformer Base (ViT-B) як контрольної точки. На додачу така методологія багатоетапної обробки забезпечує продуктивність, близьку до реального часу, гарантуючи ефективно та своєчасне виявлення тріщин.

Методи аналізу зображень за допомогою згорткових нейронних мереж виявлення дефектів є ефективною альтернативою ручним методам перевірки попри те, що методи виявлення дефектів на основі аналізу зображень можуть залежати від якості зображень, знятих із різних дистанцій, а також штучних і природних умов.

**Висновки.** Проведений огляд і аналіз різних методів навчання та застосування CNN для виявлення тріщин на фото та відео показав, що всі методи мають свої недоліки та переваги, що істотно впливає на їх застосування. Найбільш ефективним методом, за показниками точності та практики застосування для великих об'єктів інфраструктури та великих будівельних конструкцій, є другий метод завдяки можливості визначення координат тріщин і створення карти, що значно спрощує подальші етапи роботи з ремонту об'єктів. Подальшим напрямом дослідження є покращення функціональності цього методу шляхом включення можливості визначення довжини та ширини тріщин, що буде корисним для наступного етапу робіт із ремонту виявлених тріщин.

*Список використаних джерел*

1. Nikmehr M. B., Hosseini R., Martek I., Zavadskas E. K., Antucheviciene J. Digitalization as a Strategic Means of Achieving Sustainable Efficiencies in Construction Management: A Critical Review. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, No. 9. P. 5040. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13095040>.
2. Liu Y., Alias A. H., Haron N. A., Bakar N. A., Wang H. Robotics in the Construction Sector: Trends, Advances, and Challenges. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2024. P. 71–72. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10846-024-02104-4>.
3. Kung R.-Y., Pan N.-H., Wang C. C. N., Lee P.-C. Application of deep learning and unmanned aerial vehicle on building maintenance. *Advances in Civil Engineering*. 2021. Vol. 2021, No. 1. P. 1–12. DOI: 10.1155/2021/5598690 (last access 17.08.2024).
4. Choi D., Bell W., Kim D., Kim J. UAV-Driven Structural Crack Detection and Location Determination Using Convolutional Neural Networks. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 8. P. 35. DOI: 10.3390/s21082650 (last access 25.08.2024).
5. Egodawela S., Khodadadian Gostar A., Buddika H. A. D. S., Dammika A. J., Harischandra N., Navaratnam S., Mahmoodian M. A Deep Learning Approach for Surface Crack Classification and Segmentation in Unmanned Aerial Vehicle Assisted Infrastructure Inspections. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 6. DOI: 10.3390/s24061936 (last access 05.09.2024).

---

Левщанов Сергій Валерійович, учений із даних, ФЛП Позаштатний консалтинг. ORCID iD: 0009-0004-6624-0928. Тел.: +38098299 0537. E-mail: devops8me@proton.me.

Levshchanov Sergii, Data Scientist, FLP Freelance Consulting. ORCID iD: 0009-0004-6624-0928. Tel.: +38098299 0537. E-mail: devops8me@proton.me.

Статтю прийнято 20.09.2024 р.

**УДК 666.972.16**

**ДОСВІД ЗАСТОСУВАННЯ СПОСОБІВ ВІДНОВЛЕННЯ ПОШКОДЖЕНИХ  
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ У ТРАНСПОРТНОМУ БУДІВНИЦТВІ**

**Канд. техн. наук О. Ю. Дорошенко**

**EXPERIENCE IN THE APPLICATION OF METHODS OF RESTORATION  
OF DAMAGED REINFORCED CONCRETE STRUCTURES IN TRANSPORT  
CONSTRUCTION**

**PhD (Tech.) A. Doroshenko**

**DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.209.2024.314452>**

*Анотація.* Дані свідчать про те, що самовідновлення бетону може бути досягнуто шляхом введення в бетонну матрицю бактерій. Незважаючи на те, що деякі дослідники проводили експерименти з різними видами бактерій, ще потрібно точно ідентифікувати ідеальне поєднання таких чинників, як види бактерій, типи мінерального субстрату, типи матеріалів-носіїв і кількість кожного з цих компонентів для якісного прориву в розв'язанні проблеми отримання самовідновлювальних бетонів і залізобетонних конструкцій. У статті

наведено результати дослідження з розроблення технології отримання матеріалів із біодобавками, вивчення процесу усунення тріщин у бетоні та встановлення фізико-технічних властивостей бетонів, модифікованих мікробіологічною добавкою, і відновлених матеріалів.

**Ключові слова:** бактерії, самовідновлювальні бетони, мікробіологічні добавки, тріщини, фізико-технічні властивості бетонів.

**Abstract.** Evidence suggests that concrete self-healing can be achieved by introducing bacteria into the concrete matrix. Despite the fact that a number of researchers have conducted experiments with different types of bacteria, the ideal combination of factors such as bacterial species, types of mineral substrate, types of carrier materials and the amount of each of these components has yet to be identified to make a qualitative breakthrough in solving the problem of self-healing concrete and reinforced concrete structures.

The paper presents the results of a study on the development of a technology for obtaining materials with bio-additives, the study of the process of crack repair in concrete, and the establishment of physical and technical properties of concrete modified with a microbiological additive and restored materials.

The article analyses the processes of structure formation, physical and mechanical properties of concrete and other cement composites, ways to improve them, degradation processes, damage and defects that reduce the durability of reinforced concrete structures, as well as methods of their repair and restoration. Based on the analysis of existing approaches to the creation of concrete using biotechnology and self-healing processes of defective reinforced concrete structures, theoretical prerequisites for the development of technology for the creation of concrete modified with microbiological additives and self-healing structures are developed.

It is concluded that it is potentially possible to heal cracks in concrete under the control of bacteria as a result of mineral sludge formation. However, some areas of this concept require further development. It is necessary to clarify how effectively the deposition of minerals produced by bacteria seals large cracks, i.e. how much the permeability of cracked concrete is reduced to prevent corrosion of embedded reinforcement and thus increase the service life of the building material. In addition, it is necessary to select bacterial species that remain viable when introduced into the concrete matrix for at least the expected service life of the structure. Despite the fact that no qualitative breakthrough has yet been achieved in the field of concrete self-healing, this is a very promising area of research.

**Keywords:** bacteria, self-healing concrete, microbiological additives, cracks, physical and technical properties of concrete.

**Вступ.** Відомо, що тварини і рослини мають природну здатність за відносно короткий проміжок часу самостійно заліковувати невеликі тілесні ушкодження без будь-якого зовнішнього впливу. Те саме можна спостерігати в старих конструкціях – тріщини невеликих розмірів самоусуваються в результаті повторної кристалізації кальциту. Досвід показує, що під час експлуатації залізобетонні конструкції мають і значні пошкодження як тріщини великих розмірів, які не можуть самозаліковуватися без активізації процесів, що призводить до погіршення їхньої якості

та скорочення очікуваного терміну експлуатації.

Дані свідчать про те, що самовідновлення бетону може бути досягнуто шляхом введення в бетонну матрицю бактерій. Незважаючи на те, що деякі дослідники проводили експерименти з різними видами бактерій, ще потрібно точно ідентифікувати ідеальне поєднання таких чинників, як види бактерій, типи мінерального субстрату, типи матеріалів-носіїв і кількість кожного з цих компонентів для якісного прориву в розв'язанні проблеми

отримання самовідновлювальних бетонів і залізобетонних конструкцій.

У статті наведено результати дослідження з розроблення технології отримання матеріалів з біодобавками, вивчення процесу усунення тріщин у бетоні та встановлення фізико-технічних властивостей бетонів, модифікованих мікробіологічною добавкою, і відновлених матеріалів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вивченню технології отримання бетонів, модифікованих мікробіологічною добавкою, і відновлення міцності й довговічності самовідновлювальних залізобетонних конструкцій при заліковуванні тріщин присвячені роботи E. Voguet, V. Ramarkrichnan, Chun Xiang Qian, P. Ehogh, W. De Muynck, H. M. Jonkers, J. Park, V. Achal, Jing Xu, S. R. Ghosh, H. M. Jonkers, V. S. Whiffin, K. Van Tittelboom, M. D. Hager, J. Y. Wang, Hua Xia, L. Zong, C. Edvardsen, C. A. Clear, T. Nishiwoki, H. Mihashi та ін.

Ученими було висловлено припущення, що іммобілізовані в бетонній матриці бактеріальні спори, які перебувають у стані спокою, але життєздатні, стають метаболічно активними, щойно через новоутворені тріщини проникає волога. Потім ці тріщини затягуються внаслідок знаходження кальциту, утвореного в результаті життєдіяльності мікроорганізмів.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою статті є дослідження самовідновлювальних бетонів, модифікованих мікробіологічною добавкою.

Завдання дослідження проаналізувати процеси структуроутворення, фізико-механічні властивості бетонів та інших цементних композитів, способи їх поліпшення, деградаційні процеси, пошкодження та дефекти, що знижують довговічність залізобетонних конструкцій, а також способи їхнього ремонту і відновлення. На основі аналізу сучасних підходів до створення бетонів за допомогою біотехнологій і процесів самовідновлення

дефектних залізобетонних конструкцій розробити теоретичні передумови з розроблення технології створення бетонів, модифікованих мікробіологічною добавкою і самовідновлювальних конструкцій.

**Основна частина дослідження.** Із постійним удосконаленням наявних матеріалів, що зумовлюють істотний технічний та економічний ефект завдяки унікальному поєднанню властивостей, намітилися тенденції створення нових матеріалів, здатних до активної взаємодії із зовнішніми чинниками.

Такі матеріали отримали назву «інтелектуальних». Вони здатні «відчувати» свій фізичний стан, зовнішні впливи та особливо реагувати на ці «відчуття», тобто здійснювати самодіагностику щодо виникнення та розвитку дефекту, його усунення і стабілізування свого стану у критичних зонах. Внаслідок різноманіття властивостей «інтелектуальних» матеріалів їх застосування дасть змогу контролювати і прогнозувати стан різних конструкцій і споруд у потрібний момент і навіть на важкодоступних ділянках, значно підвищити ресурс систем і їхню надійність [14, 31].

Були розроблені різні хімічні методи створення самовідновлювального бетону [5, 22, 29, 30]. За деякими пропозиціями, відновлювальний засіб помістили всередину мікрокапсул. При розтріскуванні бетону вони руйнувалися, вивільняючи відновлювальний засіб, який заповнював тріщини. Випробувано безліч відновлювальних засобів, як-от епоксидні смоли, ціанакрилати, розчини діоксиду кремнію в лузі [31] тощо. Виявлено, що матеріал може відновити свою механічну міцність майже настільки, як і в разі цементування тріщин вручну. Такі засоби мають деякі загальні якості: низьку в'язкість для забезпечення ширшої області ремонту і відмінного зчеплення між поверхнями тріщини, а також достатню капілярну силу для переміщення відновлювального засобу вглиб тріщини.

Однією з проривних технологій у сфері отримання ефективних будівельних матеріалів є біотехнології, засновані на використанні мікроорганізмів. На високому науково-технологічному рівні розроблено матеріали, одержувані за допомогою мікробіологічного синтезу. До них насамперед належать деревні пластики, клеї, біосуперпластифікатори і пінобетони [2, 34].

Багато дослідників вивчали застосування кальциту, що виробляють бактерії, для підвищення терміну експлуатації цементних споруд і відновлення будівель [9, 11, 12, 35] за допомогою усунення тріщин, підвищення міцності бетону, зниження проникності, зменшення водопоглинання.

Більш ефективну ліквідацію тріщин за рахунок застосування мікроорганізмів порівняно з традиційними способами ремонту автори робіт [8, 28, 32, 33] проводили з використанням ґрунтових бактерій *Bacillus pasteurii*, іммобілізованих і захищених у поліуретановому полімері, вапні, тонкому кремнеземельному порошку і золі-виносі. У результаті міцність на стиск і жорсткість відновленого бетону значно підвищилися. При цьому з'ясувалося, що міцність на стиск була приблизно на 5 % вищою, ніж у зразках без іммобілізації мікроорганізмів у пустотах матеріалу.

Результати дослідження [7] підтвердили позитивну перспективу використання виробленого бактеріями *Bacillus sphaericus* карбонату для усунення тріщин у бетоні. Дослідники повідомили про повну герметизацію штучно створених тріщин завширшки 0,3 мм і завглибшки 10 мм і зазначили, що проникність бетону була значно меншою, ніж під тріщинами, які були зашпаровані цементним розчином. У роботі [6] зазначено, що при обробці кальцитом мікробіологічного походження міцність на стиск оброблених зразків може бути відновлена до 84 %.

Були проведені випробування з метою вивчення доцільності застосування

біологічного бетону для підвищення міцності на стиск бетону і цементного розчину [1, 2, 10, 13, 17, 33]. Під час експериментальних досліджень у бетонну суміш вводили різні мікроорганізми.

У роботі [30] вивчали включення до цементного розчину бактерій *Bacillus pasteurii* у різних концентраціях. На 7-й і 28-й день спостерігали значне збільшення міцності на стиск бетонів, зумовлене наявністю в матриці достатньої кількості органічних речовин завдяки бактеріальній біомасі. У дослідженні [26] вивчали вплив нового типу термофільних анаеробних мікроорганізмів *Shewanella* на міцність на стиск зразків цементного розчину. На 28-й день відзначено підвищення цього показника на 25...30 %.

Автори роботи [27] вибрали для введення в зразки бетону бактерій *Bacillus pseudofirmus* і *Bacillus cohnii* і виявили 10 % збільшення міцності на стиск. Водночас у роботі [20] вивчали бактерії *Sporosarcina pasteurii*, введені в кубики цементного розчину, і відзначили збільшення міцності на стиск на 17 %. 22 % її збільшення спостерігали дослідники [25] в результаті обробки зразків цементного розчину мікроорганізмами *Arthrobacter crystallopoietes*. У цьому дослідженні з чотирьох обраних видів мікроорганізмів, а саме *Sporosarcina soli*, *Bacillus massiliensis*, *Arthrobacter crystallopoietes* і *Lysinibacillus fusiformis*, найбільше підвищення міцності зумовили бактерії *Arthrobacter crystallopoietes*.

Тим часом при змішуванні бактерій *Bacillus* зі зразком цементного розчину відзначено збільшення міцності на стиск на 36 % [33]. У роботі [26] вивчали вплив бактерій *Sporosarcina pasteurii* на міцність на стиск цементного бетону з добавкою золи-виносу. Повідомляли про максимальне збільшення цього параметра на 22 %. У цьому дослідженні в цемент вводили добавки золи-виносу (у кількості 10, 20 і 30 % за масою) і три різні концентрації бактеріальних клітин (103, 105 і



107 клітин/мл). Збільшення міцності на стиск відбувалося за рахунок осадження кальциту на поверхні бактеріальних клітин і осідання цих клітин у порах.

Автори роботи [15] зосередилися на багаторівневому дослідженні механічних властивостей бетону з додаванням відновлювального засобу на основі бактерій, що не мають уролітичної активності. Під час дослідження на макромасштабні механічні виміри для оцінювання механічних властивостей бетону в процесі його руйнування та відновлення проведено випробування на вигин із прикладанням зосередженого навантаження в чотирьох точках і вимірювання швидкості ультразвукового імпульсу. Крім того, визначали нанотвердість вдавлюванням кульки як наномеханічне випробування для дослідження наномеханічних властивостей осаджених мінералів і сили їхнього зчеплення з бетоном. Експериментальні результати показали, що на ефективність затягування тріщин сильний вплив має джерело кальцію. Випробування на визначення швидкості ультразвукового імпульсу і вигин із застосуванням навантаження в чотирьох точках показали, що максимальний ефект загоєння (тобто максимальний коефіцієнт відновлення міцності під час вигину і максимальний модуль пружності) було отримано за умови двокомпонентного самовідновлення в присутності глутамату кальцію.

Згинальні характеристики ЕСС-матеріалів із додаванням мікроорганізмів оцінено в роботі [24]. Після розтріскування та загоєння тріщин суміші з додаванням біологічного відновлювального засобу демонстрували дещо краще відновлення міцності за вигину та згинальної здатності порівняно з контрольними сумішами, що не включали відновлювальний засіб біологічного походження.

Важливою характеристикою, яка впливає на тривалість терміну експлуатації бетону, є проникність. У бетон із високою

проникністю просочуються вода і забруднювальні речовини, які впливають на структурну цілісність і довговічність бетону. Тому бетон із низькою проникністю має більш тривалий термін експлуатації [33].

Оскільки осадження бактерій відбувається переважно на поверхні, то відкладення кальциту можна розглядати як утворення ізолюючого шару [3]. Проникність можна вивчати за результатами випробувань на карбонізацію, оскільки відомо, що зниження газопроникності внаслідок обробки поверхні призводить до підвищення стійкості до карбонізації та проникнення хлоридів. У дослідженні [3] отримано дані про підвищення стійкості бетону до дії луку, циклів заморожування-відтавання, усадки під час висихання та зменшення проникності, що спостерігається при додаванні бактеріальних клітин.

У роботі [17] наведено результати вивчення залежності проникності бетону від утворення осаду карбонату кальцію шляхом внесення мікроорганізмів *Bacillus sphaericus* у кубики з цементного розчину. При цьому спостерігали значне зниження проникності порівняно з необробленими зразками цементного розчину.

У дослідженні [33] відзначено значне зниження водопроникності кубиків цементного розчину, оброблених бактеріями *Sporosarcina pasteurii*. Вважають, що нижча проникність кубиків з інкорпорованими бактеріями може бути зумовлена наявністю щільнішого міжфазного кордону, утвореного між заповнювачем і бетонною матрицею внаслідок осадження кальциту.

У роботі [36] дослідники вивчали вплив на водопроникність бактерій *Bacillus pasteurii* і спостерігали аналогічний результат. Крім того, порівняно з необробленим зразком кубики цементного розчину з інкорпорованими бактеріями *Bacillus* продемонстрували шестикратне зниження поглинання води [33].



У дослідженні [26] спостерігали восьмикратне зменшення проникності хлорид-іонів під час вивчення впливу бактерій *Sporosarcina pasteurii* на цементний бетон із добавкою золи-виносу. Вважають, що таке зниження проникності може бути пов'язане з наявністю в бетоні осажденного кальциту. Крім того, у роботі [4] повідомлено про зниження водопроникності на 68 %, коли для дослідження процесів самовідновлення у зразок цементного розчину помістили капсульовані в гідрогель спори *Bacillus sphaericus*.

У роботі [26] спостерігали чотирикратне скорочення поглинання води бетоном із добавкою золи-виносу, у який ввели бактерії. Було помічено, що при введенні бактерій у бетон із добавкою золи-виносу його водопоглинальна здатність зменшується зі збільшенням концентрації бактерій. Максимальне зниження показника спостерігали за концентрації бактерій 105 клітин/мл для всіх зразків бетону з добавкою золи-виносу. У цьому дослідженні наявність бактерій призвела до значного зниження поглинання води порівняно з контрольними зразками. Осадження шару карбонату кальцію на поверхні та всередині пор бетонних зразків зумовило зменшення водопоглинання.

Дані роботи [16] показали, що значення коефіцієнта сорбції для 28-денних біологічно оброблених зразків бетонного розчину з додаванням тонкого кремнеземного порошку і без нього було на 42...48 % і 57...64 % нижчим, ніж відповідне значення для необроблених зразків. Отримані результати свідчать, що у випадку звичайних зразків навіть за значного зниження сорбційної здатності бактеріальна обробка зразків із тріщинами не зменшувала величину цього параметра до того самого значення, що й у зразків без тріщин. Значення коефіцієнтів сорбції зразків із додаванням тонкого кремнеземного порошку, підданих бактеріальній обробці, були дуже близькі до

значень коефіцієнтів сорбції біологічно оброблених зразків без тріщин.

Однією з основних причин втрати несучої здатності або стійкості будівельних конструкцій вважають корозію сталі в бетоні. Проникність і корозія взаємопов'язані, оскільки проникність зумовлює проникнення в бетон хлорид-іонів і домішок, що спричиняє корозію сталі, а отже, впливає на тривалість терміну служби бетону. Зазначено, що осадження карбонату кальцію сприяло зниженню проникності через закупорювання шляхів проникнення домішок у бетонну матрицю [27]. У дослідженні [18] спостерігали значне зниження корозії сталевий арматури завдяки зменшенню просочування води і хлорид-іонів у результаті осадження кальциту, виробленого мікроорганізмами *Sporosarcina pasteurii* і *Bacillus*.

За хімічною природою базових речовин, що використовують у процесі самовідновлення, їх можна віднести до двох різних категорій – залежні та автономні. Залежним матеріалам, які беруть участь у загоєнні тріщин, для стимулювання процесу потрібен зовнішній вплив – нагрівання або освітлення, тоді як автономним матеріалам будь-які зовнішні стимули не потрібні. Наявність пошкодження вже є сигналом для запуску процесу самовідновлення [18, 37].

Інша класифікація – поділ самовідновлювальних матеріалів на зовнішні та внутрішні. По-перше, процес загоєння ґрунтований на застосуванні зовнішніх регенерувальних компонентів, таких як мікро- або нанокапсули [37]. Для надання матеріалам здатності самовідновлення в їхню матрицю навмисно вбудовують капсули, і з пошкодженням вміст цих капсул діє як рухома фаза. На відміну від цього, для внутрішніх самовідновлювальних матеріалів ніяких особливих регенерувальних речовин не потрібно. Зазвичай протікає процес внутрішнього самовідновлення. Однак він не завжди можливий [37].

До нинішнього часу в більшості випадків бактеріальний бетон застосовували для обробки для ліквідації наслідків тріщиноутворення. Це не можна вважати суто «самовідновленням», оскільки його застосовували після розтріскування [7, 8, 28, 32, 33]. У цих дослідженнях виявили ефективне закупорювання тріщин і відновлення механічної міцності бетону, зумовлене наявністю в матриці достатньої кількості органічних речовин завдяки присутності мікробної біомаси. Проведено лише кілька досліджень істинного самовідновлення бактеріального бетону [21, 26]. Також здійснено незначну кількість експериментів із самовідновлення ЕСС-матеріалів із додаванням мікроорганізмів [24]. Їхні результати свідчать про те, що іммобілізовані бактерії є проміжною ланкою при осадженні мінералів. Встановлено, що бактерії та деякі види необхідних поживних речовин не мають

негативного впливу на характеристики міцності бетону [2, 19].

**Висновки.** Зроблено висновок про потенційну можливість заліковування тріщин у бетоні під контролем бактерій у результаті утворення мінерального осаду. Однак деякі напрями цієї концепції потребують подальшого розроблення. Слід уточнити, наскільки ефективно осадження вироблених бактеріями мінералів ущільнює тріщини великих розмірів, тобто наскільки знижується проникність потрісканого бетону, щоб запобігти корозії вбудованої арматури і в такий спосіб збільшити термін експлуатації будівельного матеріалу. Крім того, необхідно вибрати види бактерій, які залишаються життєздатними при впровадженні в бетонну матрицю принаймні протягом передбачуваного терміну служби конструкції. Незважаючи на те, що досі не досягнуто якісного прориву в галузі самовідновлення бетону, це дуже перспективний напрям досліджень.

### Список використаних джерел

1. Achal V., Mukherjee A., Reddy M. S. Microbial concrete: A way to enhance the durability of concrete buildings. *Journal of Materials in Civil engineering*. 2011. Vol. 23. № 6. P. 730–734.
2. Achal V. Microbial remediation of defects in building materials and structures: PhD thesis. India: Thapar University, Patiala, 2010. P. 1–263.
3. Ahmad S., Sal-lam Y. S., Al-Hawas M. A. Effects of Key Factors on Compressive and Tensile Strengths of Concrete Exposed to Elevated Temperatures. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2014. 39(6). P. 4507–4513.
4. Knorre H., Krumbein W. Bacterial calcification. *Microbial Sediments*. Springer-Verlag, R. E. Riding, S. M. Awramik (eds.). Berlin, Germany, 2000. P. 25–31.
5. Bang S. S., Galinat J. K., Ramakrishnan V. Calcite precipitation induced by polyurethane immobilized *Sporosarcina pasteurii*. *Enzyme and Microbial Technology*. 2001. Vol. 28, № 4. P. 404–409.
6. Biomediated precipitation of calcium carbonate metastable phases in hypogean environments: A short review / S. Sanchez-Moral, J. C. Canaveras, L. Laiz [et. al.]. *Geomicrobiology Journal*. 2003. Vol. 20(5). P. 491–500.
7. Cihan M. T., Güner A., Yüzer N. Response surfaces for compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*. 2013. № 40. P. 763–774.
8. De Infusies en de Ontdekking der Bacterien, Jaarboek van de Koninklijke Akademie v. Wetenschappen / M. Beijerinck. Muller, Amsterdam, 1913.

9. Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials / W. De Muynck, D. Debrouwer, N. DeBelie, W. Verstraete. *Cement and Concrete Research*. 2008. Vol. 38, № 7. P. 1005–1014.
10. De Muynck W., Kathelijn C., Belie N. De. Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete. *Construction and Building Materials*. 2008. Vol. 22(5). P. 875–885.
11. Edvardsen C. Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. *ACI Materials Journal*. 1999. Vol. 96, № 7. P. 448–454.
12. Feldman R. F. The effect of sand cement ration and silica fume on the microstructure of mortars. *Cement and Concrete Research*. 1986. Vol. 16, № 3. P. 31–39.
13. Ghosh S. K. (ed.) *Self-healing materials: fundamentals, design strategies, and applications*, Wiley WCH, Weinheim. 2009. P. 183–218.
14. Guadalupe Sierra-Beltran M., Jonkers H. M., Schlangen E. Characterization of sustainable biobased mortar for concrete repair. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 67, № 9. P. 344–352.
15. Trends in Participation in Higher Education by Gender / N. Guppy, S. Gilbert, J. Curtis et al. (eds). *Social Inequality in Canada: Patterns, Problems, Policies*. Toronto: Prentice Hall, 1988.
16. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete / H. M. Jonkers, A. Thijssen, G. Muyzer [et al.]. *Ecological engineering*. 2010. Vol. 3, № 62. P. 230–235.
17. Jonkers H. M. At two component bacteria based self-healing concrete. *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II*. 2009. № 3. P. 215–220.
18. Jonkers H. M., Schlangen E. Development of a bacteria-based self-healing concrete. *Tailor Made Concrete Structures- New Solution for Society*. 2008. P. 425–430.
19. Jonkers H. M. Self-healing concrete: a biological approach. *Self-healing Materials: An Alternative Approach to Centuries of Materials Science, Springer – 2007*. 2007. P. 195–204.
20. Joseph C., Jefferson A., Canoni M. Issues relating to the autonomic healing of cementitious materials. *1st international conference on self-healing materials: Noordwijk aan Zee, the Netherlands*. 2007. P. 53.
21. Knorre H. V., Krumbein W. E. Bacterial calcification. *Microbial Sediments, Springer*. 2000. P. 25–31.
22. Lotfy A., Hossain K. M. A., Lachemi M. Lightweight Self-consolidating Concrete with Expanded Shale Aggregates: Modelling and Optimization. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2015. № 9(2). P. 185–206.
23. Microbial mediated deterioration of reinforced concrete structures / S. M. Wei, S. M. Sanchez, D. Trejo, C. Gillis. *International Biodeterioration and Biodegradation*. 2010. Vol. (8). P. 748–754.
24. Nabil B., Aissa A., Aguida B. I. Effectiveness of different solutions to reduce plastic shrinkage in hot climate concreting. *2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*. 2010. P. 853–863.
25. Broad spectrum pro-quorum-sensing molecules as inhibitors of virulence in vibrios / W. L. Ng, L. Perez, J. Cong, M. F. Semmelhack, B. L. Bassler. *PLoS Pathog* 8. 2012.
26. O'Reilly K. T., Crawford R. L. Degradation of pentachlorophenol by polyurethane immobilized *Flavobacterium* cells. 1989. Vol. 55(9). P. 2113–2118.
27. Patil A. A. Effect of curing condition on strength of geopolymer concrete. *Advances in Concrete Construction*. 2014. Vol. 2, № 1. P. 29–37.
28. Forage nonstructural carbohydrates and nutritive value as affected by time of cutting and species / S. Pelletier, G. F. Tremblay, G. Belanger [et al.]. 2010. Vol. 102 (5). P. 1388–1398.

29. Tai C. Y., Chen F. B. Polymorphism of CaCO<sub>3</sub> precipitated in a constant-composition environment. *AIChE Journal*. 1998. Vol. 44 (8). P. 1790–1798.
30. Fortina M. G., Manachini P. L. Production in seawater of thermostable alkaline protease by a halotolerant strain of *Bacillus licheniformis*. *Biotechnol. Lett.* 1998. Vol. 20. P. 565–568.
31. Raijiwala D. B., Patil H. S. High Performance Green Concrete. *Civil Engineering and Architecture*. 2013. Vol. 1 (1). P. 1–6.
32. Ramachandran S. K., Ramakrishnan V., Bang S. S. Remediation of concrete using microorganisms. *ACI Materials Journal*. 2001. Vol. 98, № 1. P. 3–9.
33. Ramakrishnan V., Bang S. S., Deo K. S. A novel technique for repairing cracks in high performance concrete using bacteria. *Proc. international conference on high performance high strength concrete, Perth, Australia*. 1998. P. 597–618.
34. Sahmaran M., Li V. C. Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes flyash. *Cement and Concrete Research*. 2009. Vol. 39. № 11. P. 1033–1043.
35. Silica fume in concrete. *ACI materials journal*. 1987. P. 158–166.
36. Wang X., Ruckenstein E. A novel support for the immobilization of lipase and the effects of the details of its preparation on the hydrolysis of triacyl glycerides. 1993. Vol. 7, № 2. P. 117–122.
37. Growth propagation of yeast in linear arrays of microfluidic chambers over man generations / L. Wang, J. Liu, X. Li [et al.]. *Biomicrofluidics*. 2011. Vol. 5, № 4. P. 44118–44119.

---

Дорошенко Олександра Юріївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничної колії та колійного господарства, Державний університет інфраструктури та технологій. ORCID iD: 0000-0002-6724-0709. Тел.: (067)758-57-33. E-mail: sane4kador@gmail.com.

Doroshenko Aleksandra, PhD (Tech). Associate Professor, department of railway track and track economy State University of Infrastructure and Technology. ORCID iD: 0000-0002-6724-0709. Tel.: (067)758-57-33. E-mail: sane4kador@gmail.com.

Статтю прийнято 29.09.2024 р.

## ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)

---

УДК 629.454.2

### АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ДЕПОВСЬКОГО РЕМОНТУ ПАСАЖИРСЬКИХ ВАГОНІВ

Доктори техн. наук Ю. Є. Калабухін, І. Е. Мартинов,  
канд. техн. наук А. В. Труфанова, асп. С. І. Мартинов

### ANALYSIS OF THE INDICATORS OF THE DEPOT REPAIR OF PASSENGER CARS

Dr. Sc. (Tech.) Yu. Ye. Kalabukhin, Dr. Sc. (Tech.) I. E. Martynov,  
PhD (Tech.) A. V. Trufanova, postgraduate student S. I. Martynov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.209.2024.314443>

***Анотація.** У статті наведено результати аналізу основних показників деповського ремонту пасажирських вагонів. Проаналізовано структуру обсягу деповського ремонту пасажирських вагонів з урахуванням їхнього терміну експлуатації, типу вагона та підприємств-виробників. Виконано порівняльний аналіз середньої собівартості одиниці деповського ремонту пасажирського вагона за типами та підприємствами-виробниками. Досліджено вплив терміну експлуатації вагона на динаміку зміни середньої собівартості одиниці деповського ремонту.*

***Ключові слова:** пасажирський вагон, термін експлуатації, підприємство-виробник, деповський ремонт, собівартість, експлуатаційні витрати.*

***Abstract.** The article presents the results of the analysis of the technical characteristics of passenger cars and the main indicators of depot repairs of passenger cars.*

*The indicators of depot repairs of passenger cars on the Southern Railway by types and manufacturers of cars for the period from 2015 to 2020 were studied. The data analysis indicates that in the overall structure of the volume of depot repairs of passenger cars by type, compartment cars predominate, while interregional passenger cars have the smallest share.*

*In the overall structure of the volume of passenger cars depot repairs by manufacturing enterprises, cars of the Kryukovsky Railway Car Building Works predominate, while the smallest share is made in Germany.*

*The largest number of depot repairs were carried out for sleeping, compartment and interregional cars built by the Kryukovsky Railway Car Building Works. The age of the cars that underwent depot repairs during the period from 2015 to 2020 ranges 10 to 20 years. The age of the majority of non-compartment cars that underwent depot repairs during the specified period ranges 30 to 40 years.*

*The analysis shows that the cost of depot repairs of a sleeping car built by the Tver Carriage Works is lower than the cost of depot repairs of a sleeping car built by the Kryukovsky Railway Car Building Works. The cost of depot repairs of German and Russian compartment cars is lower than the cost of depot repairs of a compartment car built by the Kryukovsky Railway Car Building Works.*

*It was established that the cost of depot repairs of a compartment car built by the Kryukovsky Railway Car Building Works is lower, and the cost of an interregional car is higher than the cost of depot repairs of a sleeping car of the same manufacturer.*

*The analysis shows an almost annual increase in cost over the period, which is due to an increase in material and labor costs.*

**Keywords:** *passenger car, term of operation, company-producer, depot repair, cost, operating expenses.*

**Вступ.** Однією з функцій філії «Пасажи́рська компанія» АТ «Укрзалі́зниця» є підтримання пасажирських вагонів у працездатному стані. Компанія включає підприємства, які забезпечують підготовку вагона до рейсу (вагонні дільниці), і проведення всіх видів ремонтів (деповський (ДР), капітальний (КР-1 і КР-2), капітально-відновлювальний (КВР)).

Пасажи́рські вагони мають тривалий життєвий цикл, і витрати на стадіях життєвого циклу, пов'язані з підтриманням їх у працездатному стані, перевищують витрати на придбання нового рухомого складу. Тому зростають вимоги щодо комплексної оптимізації витрат на експлуатацію та відновлення рухомого складу.

Деповський ремонт пасажирських вагонів, який виконують на підприємствах філії «Пасажи́рська компанія» АТ «Укрзалі́зниця», є однією з важливіших технологічних складових забезпечення безпеки пасажирських перевезень і їхньої конкурентоспроможності.

Рівень собівартості одиниці деповського ремонту пасажирського вагона значною мірою впливає на рівень експлуатаційних витрат залізничного транспорту. У свою чергу собівартість залежить від багатьох чинників: типу пасажирського вагона, терміну його експлуатації, рівня спрацювання та технічного стану.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання забезпечення функціонування пасажирського господарства АТ «Укрзалі́зниця» розглянуто в багатьох дослідженнях. Так, у статтях [1, 2] автори аналізують стан

пасажи́рського вагонного парку і доходять висновку, що значна частина пасажирських вагонів власності АТ «Укрзалі́зниця» була виготовлена ще наприкінці 80-х років і в 90-ті роки минулого сторіччя, а їх спрацювання досягає 90 %. Фактично на сьогодні припинили своє існування виробники тих вагонів. Автори вважають, що стан пасажирського рухомого складу підійшов до критичної межі та потребує негайного оновлення.

Фахівцями кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту та кафедри вагонів Українського державного університету науки і технологій було проведено дослідження і з використанням методів математичної статистики встановлені залежності величин зносів і пошкоджень металоконструкцій рами та кузова пасажирських вагонів різних років випуску у вагонах, що відпрацювали свій ресурс [3, 4].

Питання реорганізації пасажирського комплексу залізничного транспорту висвітлені в статтях В. М. Самсонкіна та ін. [5, 6]. Автори доходять висновку, що для забезпечення пасажирських перевезень на належному рівні необхідна закупівля пасажирських вагонів нового покоління та проведення модернізації інфраструктури. АТ «Укрзалі́зниця» самостійно без залучення сторонніх інвесторів це завдання вирішити не може.

В умовах тотального дефіциту коштів на оновлення пасажирського рухомого складу для підтримання вагонного парку доцільно використовувати капітально-відновлювальний ремонт пасажирських вагонів (КВР) із подовженням терміну

експлуатації. Автори статей [7-9] вважають, що використання сучасних технологій для модернізації пасажирських вагонів із вичерпаним терміном експлуатації дасть змогу забезпечити необхідний комфорт пасажиром. Питанням організації технічного обслуговування пасажирських вагонів після проведення КВР присвячені статті [10, 11].

Сучасному стану і перспективам розвитку, динаміці і тенденції розвитку залізничних перевезень присвячені роботи [12-14]. Авторами досліджено обсяги перевезення пасажирів різними видами транспорту в Україні та виявлено причини їх зменшення.

Методичні підходи до визначення економічної ефективності впровадження нових типів пасажирських вагонів розглянуто у статті [15]. У дослідженні [16] проаналізовано динаміку собівартості ремонтів вагонного парку, запропоновано шляхи вдосконалення амортизаційної та інвестиційної політики.

У статті [17] розглянуто розрахунок вартості життєвого циклу пасажирських транспортних засобів. Для отримання об'єктивних результатів була розроблена математична модель, яка виражає витрати на придбання і, в основному, на експлуатацію та обслуговування.

**Мета і завдання дослідження.** Метою статті є аналіз основних характеристик парку пасажирських вагонів регіональної філії Південна залізниця та показників деповського ремонту пасажирських вагонів за період 2015-2020 років.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати структуру парку пасажирських вагонів регіональної філії Південна залізниця;
- розглянути структуру обсягу деповського ремонту пасажирських вагонів з урахуванням їхнього терміну експлуатації, типу вагона і підприємств-виробників;
- отримати структуру експлуатаційних витрат на проведення

деповського ремонту пасажирських вагонів за типами та підприємствами-виробниками;

- виконати порівняльний аналіз середньої за період з 2015 по 2020 рік собівартості одиниці деповського ремонту пасажирського вагона за типами та підприємствами-виробниками;

- проаналізувати індекс зміни середньої собівартості одиниці деповського ремонту за групою вікового стану пасажирського вагона.

**Основна частина дослідження.** Парк пасажирських вагонів, експлуатований регіональною філією Південна залізниця, складається зі спальних, купейних, некупейних і міжобласних вагонів. Поштові, багажні, вагони-ресторани тощо в рамках цієї статті не розглядали.

Практично всі спальні вагони побудовані на Крюківському вагонобудівному заводі (КВБЗ). Купейні вагони виготовляли на КВБЗ і заводі «Аммендорф» (Німеччина). Також наявні декілька одиниць виготовлення Тверського вагонобудівного заводу (ТВЗ). Усі некупейні вагони (некупейні) виготовлені на ТВЗ. Розподіл вагонів між виробниками наведено на рис. 1.

У табл. 1 наведено розподіл пасажирських вагонів за терміном експлуатації в роках.

Очевидно, що давно відпрацювали свій ресурс купейні вагони німецького виробництва та некупейні. З купейних вагонів 92,5 % пройшли КВР, а серед некупейних ця цифра складає 66,7 %.

Отримані результати дали можливість проаналізувати основні показники деповського ремонту – це кількість відремонтованих вагонів за типами у фізичних і приведених вагонах, собівартість одиниці ремонту за типом вагона, експлуатаційні витрати обсягу ремонту вагонів, у тому числі за типами.

Собівартість одиниці ремонту залежить від типу вагона, його технічного та вікового стану, а також підприємства-виробника.

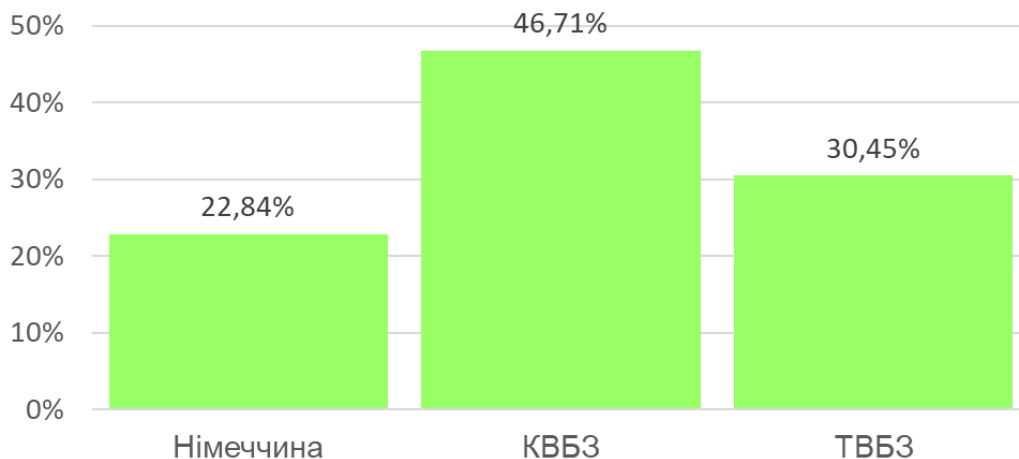


Рис. 1. Розподіл вагонів між виробниками

Таблиця 1

Розподіл вагонів за терміном експлуатації, %

Тип вагона	Виробник		
	«Аммендорф»	КВБЗ	ТВЗ
Купейний	38,14	14,00	22,30
Спальний		16,73	16,60
Некупейний			38,06
Міжобласний		19,86	

Для аналізу було досліджено показники деповського ремонту пасажирських вагонів за типами і виробниками за період з 2015 по 2020 рік. За цей період деповський ремонт було здійснено спальним, купейним, некупейним і міжобласним пасажирським вагонам

виробництва Крюківського вагонобудівного заводу (КВБЗ), заводу «Аммендорф», Тверського вагонобудівного заводу (ТВЗ). Загальну структуру обсягу деповського ремонту за типами пасажирських вагонів наведено на рис. 2, підприємствами-виробниками цих вагонів – на рис. 3.

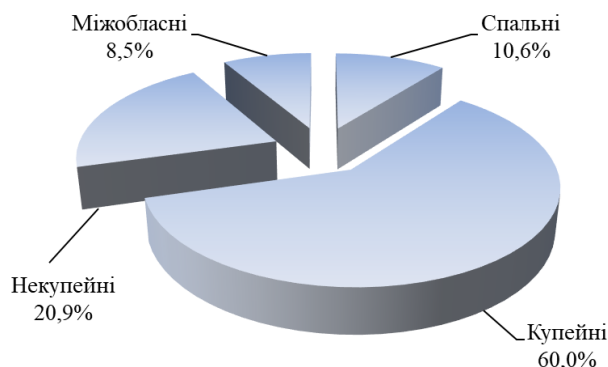


Рис. 2. Загальна структура обсягу деповського ремонту пасажирських вагонів за типами



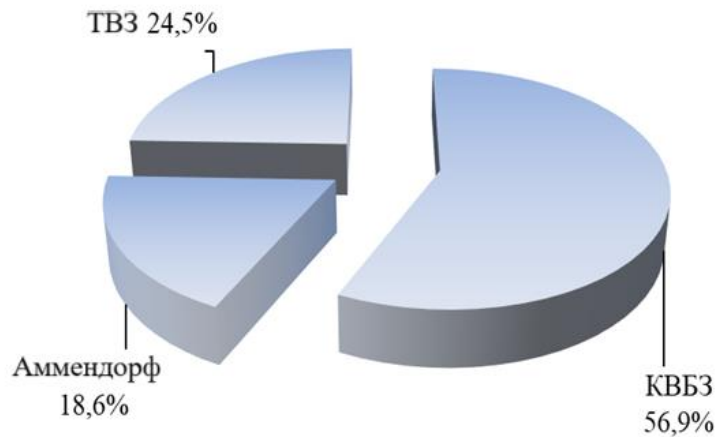


Рис. 3. Загальна структура обсягу деповського ремонту пасажирських вагонів за підприємствами-виробниками

Аналіз наведених даних вказує на те, що в загальній структурі обсягу деповських ремонтів пасажирських вагонів за типами значну частку (60 %) складають купейні вагони, найменшу (8,5 %) – міжобласні пасажирські вагони.

У загальній структурі обсягу деповських ремонтів пасажирських вагонів

за підприємствами-виробниками значну частку (56,9 %) складають вагони будівництва КВБЗ, найменшу (18,6 %) – виробництва «Аммендорф».

У табл. 2 наведено структуру обсягу деповського ремонту пасажирських вагонів за типами і виробниками за період з 2015 по 2020 рік.

Таблиця 2

Структура обсягу деповського ремонту пасажирських вагонів за типами виробниками за період з 2015 по 2020 рік, %

Тип вагона	Підприємство-виробник пасажирського вагона			
	КВБЗ	«Аммендорф»	ТВЗ	Разом
Спальні	88,89	-	11,11	100
Купейні	65,10	30,98	3,92	100
Некупейні	-	-	100	100
Міжобласні	100	-	-	100

За досліджуваний період найбільшу кількість деповських ремонтів було здійснено спальним, купейним і міжобласним вагонам побудови КВБЗ, що в структурі складає відповідно 88,9, 65,1 і 100 %. Усі некупейні вагони, яким було здійснено деповський ремонт, виробництва ТВЗ.

Аналіз терміну експлуатації пасажирських вагонів, які пройшли деповський ремонт за період з 2015 по 2020 рік, вказує на те, що на 01.09.2024 року він знаходиться в межах від 6,7 до 54,1 року. Середній термін експлуатації складає 26 років.

У табл. 3 наведено результати аналізу структури обсягу деповського ремонту пасажирських вагонів за період з 2015 по

2020 рік з урахуванням їхнього вікового стану.

Таблиця 3

Результати аналізу структури обсягу деповського ремонту пасажирських вагонів з урахуванням їхнього терміну експлуатації, %

Тип вагона	Група вагонів за терміном експлуатації						Разом
	до 10 років	10-20 років	20-30 років	30-40 років	40-50 років	50-60 років	
Спальний	-	100	-	-	-	-	100
Купейний	1,96	62,75	4,31	19,22	9,41	2,35	100
Некупейний	-	-	15,73	41,57	37,08	5,62	100
Міжобласний	-	55,56	44,44	-	-	-	100

Проведений аналіз вказує на те, що вік усіх спальних вагонів (100 %), основної частки купейних (62,8 %) і міжобласних (55,6 %) вагонів, яким було проведено деповський ремонт протягом періоду з 2015 по 2020 рік, складає від 10 до 20 років. Вік основної частки некупейних вагонів, яким було проведено деповський ремонт протягом вказаного періоду, складає від 30 до 40 років.

Аналіз структури обсягу деповського ремонту пасажирських вагонів за період з 2015 по 2020 рік за віковими групами (табл. 4) вказує на те, що основна частка відремонтованих вагонів припадає на купейні вагони майже за всіма віковими групами та некупейні вагони за віковими групами від 20 до 60 років.

Таблиця 4

Результати аналізу структури обсягу деповського ремонту пасажирських вагонів за терміном експлуатації, %

Тип вагона	Група вагонів за терміном експлуатації					
	до 10 років	10-20 років	20-30 років	30-40 років	40-50 років	50-60 років
Спальний	-	20,0	-	-	-	-
Купейний	100	71,11	26,83	56,98	42,11	54,55
Некупейний	-	-	34,15	43,02	57,89	45,45
Міжобласний	-	8,89	39,02	-	-	-
Разом	100	100	100	100	100	100

Аналіз структури обсягу деповського ремонту пасажирських вагонів за період з

2015 по 2020 рік за віковими групами та підприємствами-виробниками (табл. 5)

вказує на те, що 90,1 % обсягу ремонту вагонів виробництва КВБЗ заводу припадає на вікову групу від 10 до 20 років, вагонів

«Аммендорф» –вікова група від 30 до 40 років – 62,03 %, вагонів ТВЗ – вікова група від 30 до 40 років – 35,6 %.

Таблиця 5

Результати аналізу структури обсягу деповського ремонту пасажирських вагонів за терміном експлуатації та підприємствами-виробниками, %

Підприємство-виробник	Група вагонів за терміном експлуатації						Разом
	до 10 років	10-20 років	20-30 років	30-40 років	40-50 років	50-60 років	
КВБЗ	2,07	90,08	7,85	-	-	-	100
«Аммендорф»	-	-	-	62,03	30,38	7,59	100
ТВЗ	-	6,73	21,15	35,58	31,73	4,81	100

Аналіз структури обсягу деповського ремонту пасажирських вагонів за період з 2015 по 2020 рік за підприємствами-виробниками в межах вікових груп (табл. 6) вказує на те, що основна частка ремонту вагонів віком до 10 років і від 10 до 20 років припадає на вагони КВБЗ – відповідно 100 і 96,9 %, обсяг ремонту вагонів за віковими групами більше 30 років – вагони виробництва «Аммендорф» та ТВЗ.

У табл. 7 наведено структуру експлуатаційних витрат на проведення деповського ремонту пасажирських вагонів за типами та їх виробниками за період з 2015 по 2020 рік.

За досліджуваний період найбільша частка експлуатаційних витрат на проведення деповського ремонту припадає на спальні, купейні та міжобласні вагони будівництва Крюківського вагонобудівного заводу – відповідно 89,7, 69,2 і 100 %. Це пояснюється найбільшою кількістю деповських ремонтів вагонів цього типу та виробника порівняно з пасажирськими вагонами інших виробників.

У табл. 8 наведено результати порівняльного аналізу середньої за період із 2015 по 2020 рік собівартості одиниці деповського ремонту пасажирського вагона за типами та підприємствами-виробниками.

Таблиця 6

Результати аналізу структури обсягу деповського ремонту пасажирських вагонів, %

Підприємство-виробник	Група вагонів за терміном експлуатації					
	до 10 років	10-20 років	20-30 років	30-40 років	40-50 років	50-60 років
КВБЗ	100	96,89	46,34	-	-	-
«Аммендорф»	-	-	-	56,98	42,11	54,55
ТВЗ	-	3,11	53,66	43,02	57,89	45,45
Разом	100	100	100	100	100	100

Таблиця 7

Структура експлуатаційних витрат на проведення деповського ремонту пасажирських вагонів за типами та їх виробниками, %

Тип вагона	Підприємство-виробник пасажирського вагона			Разом
	КВБЗ	«Аммендорф»	ТВЗ	
Спальні	89,72		10,28	100
Купейні	69,19	27,13	3,68	100
Некупейні			100	100
Міжобласні	100			100

Таблиця 8

Результати порівняльного аналізу середньої за період з 2015 по 2020 рік собівартості одиниці деповського ремонту пасажирського вагона за типами та підприємствами-виробниками, %

Тип вагона	Підприємство-виробник пасажирського вагона		
	КВБЗ	«Аммендорф»	ТВЗ
Спальні	100	-	91,6
Купейні	100	82,4	88,3

Проведений аналіз вказує на те, що собівартість деповського ремонту спального вагона будівництва ТВЗ на 8,4 % нижче собівартості деповського ремонту спального вагона будівництва КВБЗ. Собівартість деповського ремонту купейного вагона будівництва заводу «Аммендорф» на 17,6 %, а будівництва ТВЗ на 11,7 % нижче собівартості деповського ремонту купейного вагона будівництва КВБЗ.

У табл. 9 наведено результати порівняльного аналізу середньої за період з 2015 по 2020 рік собівартості одиниці деповського ремонту за типами пасажирського вагона різних виробників.

Проведений аналіз вказує на те, що собівартість деповського ремонту купейного вагона будівництва КВБЗ на

1,7 % нижче, а міжобласного вагона на 11,5 % вище собівартості деповського ремонту спального вагона того самого виробника. Собівартість деповського ремонту купейного вагона будівництва ТВЗ на 5,2 % нижче, а некупейного вагона на 25,8 % нижче собівартості деповського ремонту спального вагона того самого виробника.

У табл. 10 наведено результати порівняльного аналізу середньої за період з 2015 по 2020 рік собівартості одиниці деповського ремонту за типом пасажирських вагонів і групою їхнього вікового стану. За базу порівняння за кожним типом пасажирського вагона прийнято найменший рівень середньої собівартості одиниці деповського ремонту за групою їхнього вікового стану.

Таблиця 9

Результати порівняльного аналізу середньої за період із 2015 по 2020 рік собівартості одиниці деповського ремонту за типами пасажирського вагона різних виробників, %

Тип вагона	Підприємство-виробник пасажирського вагона	
	КВБЗ	ТВЗ
Спальні	100	100
Купейні	98,3	94,8
Некупейні	-	74,2
Міжобласні	111,5	-

Таблиця 10

Результати порівняльного аналізу середньої за період 2015-2020 років собівартості одиниці деповського ремонту за типом пасажирських вагонів і групою їхнього терміну експлуатації, %

Тип вагона	Група вагонів за терміном експлуатації					
	до 10 років	10-20 років	20-30 років	30-40 років	40-50 років	50-60 років
Купейний	106,9	153,5	160,6	126,3	133,9	100
Некупейний			162,8	139,4	124,7	100
Міжобласний		100	107,9			

У табл. 11 наведено результати порівняльного аналізу середньої за період з 2015 по 2020 рік собівартості одиниці деповського ремонту за підприємством-виробником пасажирських вагонів і групою їхнього вікового стану. За базу порівняння за кожним підприємством-виробником пасажирського вагона прийнято найменший рівень середньої собівартості одиниці деповського ремонту за групою їхнього вікового стану.

Середній темп зміни середньої собівартості одиниці деповського ремонту за групою вікового стану пасажирського вагона  $\bar{T}_i$  розраховують за формулою

$$\bar{T}_i = \sqrt[5]{\frac{C_{i2020}}{C_{i2015}}}$$

де  $C_{i2020}, C_{i2015}$  – середня собівартість одиниці деповського ремонту пасажирського вагона за  $i$ -ю віковою групою станом відповідно на 2020 та 2015 роки, грн.

У табл. 12 і на рис. 4 наведено результати аналізу індексу зміни середньої собівартості одиниці деповського ремонту за групою вікового стану пасажирського вагона.

Таблиця 11

Результати порівняльного аналізу середньої за період 2015-2020 років собівартості одиниці деповського ремонту за підприємством-виробником пасажирських вагонів і групою їхнього вікового стану, %

Виробник	Підприємство-виробник пасажирського вагона (група вагонів за віковим станом)					
	до 10 років	10-20 років	20-30 років	30-40 років	40-50 років	50-60 років
КВБЗ	100	145,9	171,9			
«Аммендорф»				126,3	133,9	100
ТВЗ		162,4	171,9	139,4	124,7	100

Таблиця 12

Результати аналізу індексу зміни середньої собівартості одиниці деповського ремонту за групою вікового стану пасажирського вагона

Група вагонів за віковим станом	Індекс зміни за роками, %						Середній темп зміни
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	
10-20 років	100	102,7	169,8	229,4	320,3	316,2	1,259
20-30 років	100	78,3	152,9	211,5	204,8	351,8	1,286
30-40 років	100	121,9	176,1	237,4	320,3	363,7	1,295
40-50 років	100	110,8	151,6	232,3	377,9	248,5	1,200
50-60 років	100	190,5	206,1	208,4	-	-	1,277
Середня собівартість	100	109,4	169,1	233,9	311,0	348,7	1,284

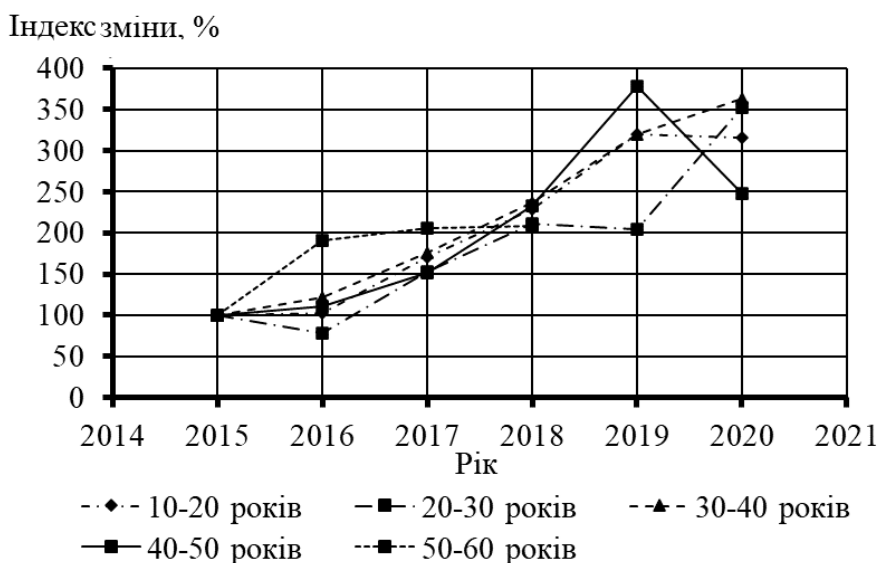


Рис. 4. Залежність індексу зміни середньої собівартості одиниці деповського ремонту

Проведений аналіз вказує на щорічне зростання собівартості за період, що обумовлено зростанням матеріальних витрат і витрат на оплату праці.

**Висновки:**

- проаналізовано структуру парку пасажирських вагонів регіональної філії Південна залізниця, визначено основні типи експлуатованих пасажирських вагонів;

- розглянуто структуру обсягу деповського ремонту пасажирських вагонів за період 2015-2020 років. Встановлено, що найменшу частку в обсязі деповського ремонту складають міжобласні вагони, а найбільшу – купейні. Проаналізовано структуру обсягу деповського ремонту пасажирських вагонів за віковими групами. Основна частка ремонту вагонів віком до 10 років і від 10 до 20 років припадає на вагони КВБЗ, обсяг ремонту вагонів за віковими групами більше 30 років – вагони виробництва «Аммендорф» і ТВЗ;

- досліджено структуру експлуатаційних витрат на проведення деповського ремонту пасажирських вагонів

за типами і підприємствами-виробниками. Найбільша частка експлуатаційних витрат на проведення деповського ремонту припадає на спальні, купейні та міжобласні вагони будівництва КВБЗ;

- виконано порівняльний аналіз середньої собівартості одиниці деповського ремонту пасажирського вагона за типами і підприємствами-виробниками. Визначено, що серед купейних вагонів найбільшу собівартість деповського ремонту мають вагони побудови КВБЗ;

- проаналізовано індекс зміни середньої собівартості одиниці деповського ремонту за групою вікового стану пасажирського вагона. Спостерігають щорічне зростання собівартості деповського ремонту, що обумовлено зростанням матеріальних витрат і витрат на оплату праці для його проведення.

Результати проведеного дослідження в подальшому можуть бути використані для техніко-економічної оцінки ремонтної складової життєвого циклу пасажирського вагона.

*Список використаних джерел*

1. Божок Н. О., Булгакова Ю. В., Пуларія А. Л. Дослідження сучасного стану парку пасажирських вагонів. *Проблеми економіки транспорту: зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. 2014. Вип. 8. С. 78-87.
2. Лобойко Л. М., Бараш Ю. С. Стан вагонного парку та вагоноремонтної бази в Україні. *Проблеми економіки транспорту: зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. 2007. Вип. 19. С. 176-182.
3. Мартинов І. Е., Труфанова А. В., Павленко Ю. С., Сергієнко М. О. Аналіз технічного стану кузовів пасажирських вагонів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Транспортне машинобудування*. 2018. № 45 (1321). С. 41-46.
4. Шикунів О. А., Рейдемейстер О. Г., Анофрієв В. Г. Дослідження граничного стану пасажирських вагонів. *Вагонний парк*. 2012. № 12. С. 4-6.
5. Самсонкін В. М. Про підвищення ефективності пасажирських перевезень на залізничному транспорті. *Залізничний транспорт України*. 2004. № 1. С. 43-45.
6. Самсонкін В. М., Гудков О. М. Основи реорганізації пасажирського комплексу залізничного транспорту. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2009. № 25. С. 78-81.
7. Єжов Ю. В., Павленко Ю. С., Войтенко О. І., Речкалов В. С. Капітально-відновлювальний ремонт пасажирських вагонів локомотивної тяги як засіб забезпечення



залізниць рейковим рухомим складом. *Рейковий рухомий склад : зб. наук. пр.* 2018. Вип. 17. С. 51-61.

8. Маркуш А. В. К вопросу обновления парка пассажирских вагонов депо станции Николаев Одесской железной дороги. *Матеріали дистанційної інтернет-конференції фахівців державної санітарно-епідеміологічної служби на залізничному транспорті.* Харьков, 2006. С. 21-22.

9. Бараш Ю. С. Стратегія раціонального оновлення пасажирського вагонного парку в умовах дефіциту інвестицій. *Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп ім. академіка В. Лазаряна.* 2006. Вип. 10. С. 130-140.

10. Остапюк Б. Я. Подовження терміну експлуатації пасажирських вагонів. *Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп ім. академіка В. Лазаряна.* 2004. Вип. 4. С. 165-173.

11. Лобойко Л. М. Проблемы и перспективы пассажирского вагоностроения в Украине. *Залізничний транспорт України.* 2006. № 3. С. 3-9.

12. Мірошник Р. О., Федак К. Я. Стратегічні напрями розвитку залізничного транспорту. *Економіка та суспільство.* 2021. № 32. URL: [http://www.economyandsociety.in.ua/journal/9\\_ukr/70.pdf](http://www.economyandsociety.in.ua/journal/9_ukr/70.pdf).

13. Стасюк О. М., Чмирьова Л. Ю., Федяй Н. О. Ринки вантажних та пасажирських перевезень в Україні: проблеми та тенденції. *Ефективна економіка.* 2020. № 9. URL: <http://www.economy.nauka.com.ua/?op=1&z=8199>.

14. Стасюк О. М. Основні тенденції ринку вантажних залізничних перевезень України. *Збірник наукових праць Одеського національного економічного університету.* 2022. № 3-4. С. 74-80.

15. Гненный Н. В., Гненный О. Н. Определение экономической эффективности пассажирского вагона нового типа. *Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна.* Дніпропетровськ, 2007. Вип. 14. С. 255-260. DOI: 10.15802/stp2007/18173.

16. Лучко И. Н., Кассир В. В. Пути повышения надежности и эффективности работы вагонного парка в свете предстоящего Евро-2012. *Проблеми економіки транспорту: зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна.* 2011. Вип. 2. С. 89-93. DOI: 10.15802/pte.v0i2.16768.

17. Modelling of life cycle cost of conventional and alternative vehicles Jan Furchl\*, Vlastimil Konečný<sup>1,2</sup> & Zdeněk Krobot<sup>1,2</sup> Scientific Reports | (2022) 12:10661 | <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14715-8>.

18. Теорія економічного аналізу: навч. посіб. / О. І. Дацій [та ін.]. Дніпропетровськ, 2014. 235 с.

19. Волкова Н. А., Подвальна Н. Е. Організація та методика економічного аналізу: навч. посіб. Одеса: ОДЕУ, 2013. 267 с.

---

Калабухін Юрій Євгенович, доктор технічних наук, професор кафедри маркетингу, комерційної діяльності та економічної теорії, Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейербаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3693-7607>. Тел.: (057) 057-730-10-47. E-mail: kalabuxin-fet@ukr.net.

Мартинов Ігор Ернстович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0481-3514>. Тел.: (057) 730-10-36. E-mail: martinov.hiit@gmail.com.

Труфанова Альона Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості, Український державний університет залізничного транспорту. <https://orcid.org/0000-0003-1702-1054>. Тел.: (057) 730-10-35. E-mail: alena.hiit.vagons@gmail.com.

Мартинов Станіслав Ігорович, аспірант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1826-6053>. Тел.: +38 (050) 303-98-50. E-mail: st.mrtntv@gmail.com.

---

Kalabukhin Yuri, Sc. (Tech). Professor, Department of marketing, business activity and economic theory, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3693-7607>. Tel.: (057) 057-730-10-47. E-mail: kalabuxin-fet@ukr.net.

Martynov Igor, Dr. Sc. (Tech). Professor, head department of wagons engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0481-3514>. Tel.: (057) 730-10-36. E-mail: martinov.hiit@gmail.com.

Trufanova Alena, Associate Professor, Department of wagons engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. <https://orcid.org/0000-0003-1702-1054>. Tel.: (057) 730-10-35. E-mail: alena.hiit.wagons@gmail.com.

Martynov Stanislav. Postgraduate student, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1826-6053>. Tel.: +38 (050) 303-98-50. E-mail: st.mrtvn@gmail.com.

Статтю прийнято 17.09.2024 р.

УДК 629.4.027.31-272.82

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕРТИКАЛЬНИХ І ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ПНЕВМАТИЧНОЇ РЕСОРИ ШВИДКІСНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ В МЕЖАХ СТРІЛКИ СТРІЛОЧНОГО ПЕРЕВОДУ

Доктор філософії А. Я. Кузишин, д-р техн. наук В. В. Ковальчук

### INVESTIGATION OF VERTICAL AND HORIZONTAL DEFORMATIONS OF THE PNEUMATIC SPRING OF A HIGH-SPEED MOVING VEHICLE IN THE LIMITS OF THE ARROW OF THE ARROW GEAR

PhD A. Kuzyshyn, Doctor of Technical Sciences V. Kovalchuk

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.209.2024.314240>

***Анотація.** Розроблено методологію натурних випробувань динамічної поведінки пневматичної ресори швидкісного рухомого складу з використанням рухомої випробувальної установки. Методом експериментальних досліджень визначено вертикальні та горизонтальні деформації пневматичної ресори в межах стрілки стрілочного переводу. Встановлено, що вертикальні деформації пневматичної ресори при русі установки по стрілочному переводу в пошерстному і протишерстному напрямках є більшими за горизонтальні. У протишерстному напрямку руху випробувальної установки вертикальні деформації пневматичної ресори є більшими порівняно з протилежним напрямком руху, а горизонтальні деформації за будь-якого напрямку руху стрілочним переводом не значно змінюють свою величину. Визначено середні значення максимальних вертикальних і горизонтальних деформацій пневматичної ресори швидкісного рухомого складу в межах стрілки стрілочного переводу.*

***Ключові слова:** швидкісний рухомий склад, пневматична ресора, стрілочний перевід, вертикальна деформація ресори, випробувальна установка*

***Abstract.** The object of the research is the pneumatic spring of the second stage of the spring suspension of the high-speed rolling stock of the railway. The vertical and horizontal deformations of the pneumatic spring within the scope of the arrow translation are studied. For constructive reasons, two sections of the turnout were chosen, namely the section of the tip of the spikes and the*

section of the root of the spikes. In order to determine the deformations of the pneumatic spring, a methodology for its full-scale testing has been developed, which includes the use of a test rig that has a rigid metal frame on which the pneumatic spring and measuring equipment are installed. High-frequency potentiometric linear displacement sensors were used to measure vertical and horizontal deformations. In accordance with the developed complex program of field tests, records of vertical and horizontal deformations of the pneumatic spring of the high-speed rolling stock were obtained during the movement of the turn signal in the forward and opposite directions. It was found that the vertical deformations of the pneumatic spring within the range of movement by the arrow transfer in the furrow and anti-furrow directions are greater than the horizontal ones. In addition, in the opposite direction of movement of the test rig, the vertical deformations of the pneumatic spring are larger compared to the opposite direction of movement. It was established that the maximum values of the vertical deformations of the pneumatic spring are within the range of 3.14–5.05 mm in the wool direction and 4.88–5.95 mm in the anti-wool direction. The maximum values of horizontal deformations are within 1.62–2.94 mm and 1.30–2.53 mm, respectively. It was established that the average value of the vertical and horizontal deformations of the pneumatic spring of the high-speed rolling stock within the range of the arrow of the turnout is: for forward motion – 3.85 mm and 2.02 mm, for forward motion – 5.48 mm and 1.82 mm, respectively. The obtained results will make it possible to proceed to the determination of the dynamic characteristics of the pneumatic spring, and at the stage of designing high-speed rolling stock to study its dynamic indicators and traffic safety indicators under different operating conditions.

**Keywords:** high-speed rolling stock, pneumatic spring, turnout, vertical deformation of the spring, test facility.

**Вступ.** Умовою безпечної експлуатації рухомого складу є дотримання в допустимих межах показників динамічних якостей механічної частини рухомого складу, які включають показники, що оцінюють віброзахисні властивості механічної частини, і показники безпеки руху [1, 2].

Рівень зазначених показників залежить від конструктивних особливостей рухомого складу та умов його взаємодії з рейковою колією. Конструктивними особливостями швидкісного рухомого складу є використання у другому ступені ресорного підвішування пневматичної ресори (рис. 1), характеристиками якої є жорсткість і демпфування, змінювані внаслідок перетікання повітря з пневматичної ресори в додатковий резервуар і навпаки [3].

Основним збурювальним фактором механічної частини рухомого складу є конструктивні та експлуатаційні особливості рейкової колії, а також особливості її взаємодії з рухомим складом,

включаючи його рух у прямих і кривих ділянках колії, а також стрілочними переводами. Експлуатація рухомого складу стрілочними переводами накладає основні обмеження експлуатаційної швидкості, оскільки в механічній частині рухомого складу виникають додаткові динамічні сили. Ці сили спричиняють значні деформації в'язей між конструктивними елементами рухомого складу, що призводить до збільшення показників динамічних якостей механічної частини рухомого складу.



Рис. 1. Пневматична ресора швидкісного рухомого складу

Також слід зазначити, що деформації пневматичної ресори як основного конструктивного елемента механічної частини швидкісного рухомого складу залежать не тільки від умов взаємодії рухомого складу з рейковою колією, а також і конструктивних особливостей самої ресори.

Тому актуальним завданням є встановлення деформацій пневматичної ресори швидкісного рухомого складу в межах стрілки стрілочного перевалу, що дасть змогу перейти до встановлення динамічних характеристик пневматичної ресори і на етапі проектування рухомого складу досліджувати його динамічні показники та показники безпеки руху, враховуючи різні умови експлуатації.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Протягом останніх років відбувається активне дослідження динамічної поведінки пневматичної ресори рухомого складу за різних умов її експлуатації.

Розглянуто вплив пневматичної системи ресорного підвішування на комфортність руху рухомого складу [4]. Проведено експериментальне визначення динамічної жорсткості пневматичної ресори залежно від тиску, об'єму додаткового резервуара і діаметра з'єднувального трубопроводу. Встановлено, що в діапазоні частот від 6 до 14 Гц робота пневматичної системи ресорного підвішування є нелінійною, а жорсткість змінюється залежно від амплітуди збурення. Показано, що вертикальні прискорення швидкісного рухомого складу переважно залежать від показників демпфування пневматичної системи ресорного підвішування, що впливає на комфортність руху рухомого складу. Однак дослідження динамічної поведінки пневматичної ресори в межах руху рухомого складу стрілочним перевалом не проводили.

Для дослідження динамічної поведінки пневматичної системи ресорного підвішування розроблено два різних

підходи: квазістатичний і динамічний [5, 6]. За квазістатичного підходу частота збурювальної сили становила 0,05 Гц, а динамічного – до 20 Гц. При дослідженні застосовано три режими деформації пневматичної ресори: вертикальні, бокові та крен. Встановлено, що бокова деформація та деформація крену пневматичної ресори не впливають на створювану вертикальну силу. Однак збурення відбувалося за косинусоїдальним законом, що не дає змогу врахувати реальні умови експлуатації рухомого складу.

У роботі [7] проведено випробування пневматичної ресори відповідно до стандарту EN13597 при вертикальному навантаженні 109,8 кН з амплітудою  $\pm 10$  мм і частотою збурення від 0,5 до 10 Гц. Досліджено вплив довжини та діаметра з'єднувального трубопроводу, а також об'єму додаткового резервуара на динамічні характеристики пневматичної системи ресорного підвішування.

Експериментально досліджено вертикальну жорсткість пневматичної ресори [8]. Амплітуда і частота збурення становили 10 мм і 0,125 Гц відповідно. Результати використані для перевірки адекватності аналітичної формули визначення вертикальної жорсткості пневматичної ресори. Встановлено, що значення вертикальної жорсткості, отримані за аналітичною формулою, набагато менші, ніж експериментальні результати для випадку, коли пневматична ресора оснащена додатковим резервуаром великого об'єму.

У роботі [9] авторами на основі термодинаміки та гідродинаміки створено математичну модель вертикальної жорсткості пневматичної ресори. Проведені експериментальні дослідження дали змогу перевірити адекватність запропонованої математичної моделі та дослідити вплив геометричних параметрів пневматичної ресори і з'єднувального трубопроводу на вертикальну жорсткість пневматичної ресори.

Експериментально досліджено вплив клапана висото-регулювання і перепаду тиску між пневматичними ресорами на динамічну роботу пневматичної системи ресорного підвішування та відповідно силову взаємодію рухомого складу з рейковою колією [10]. Чисельні результати, отримані за допомогою запропонованої моделі, чітко вказують на важливість моделювання нелінійних характеристик потоку вирівнювальних клапанів і клапанів перепаду тиску для оцінювання безпеки рухомого складу при роботі на низьких швидкостях у кривих ділянках залізничної колії.

У роботі [11] авторами досліджено вплив початкового кута важеля висото-регулювання на дисбаланс вертикального навантаження на колеса колісної пари при проходженні рухомого складу кривих ділянок залізничної колії.

У роботі [12] проведено моделювання поведінки пневматичної ресори у вертикальному та горизонтальному напрямках. Для цього в середовищі AMESim було створено 3D-модель пневматичної ресори і проведено випробування на жорсткість із використанням як експериментальних стендів, так і моделювання.

Теоретичними та експериментальними методами досліджено динамічну поведінку пневматичної системи ресорного підвішування залежно від типу з'єднувального трубопроводу [13]. Встановлено, що для демпфування низькочастотних збурень рекомендовано застосовувати тип з'єднувального трубопроводу «сильфон-труба-додатковий резервуар», а високочастотних збурень – «сильфон-додатковий резервуар».

У роботі [14] досліджено динамічні характеристики пневматичної ресори без з'єднувального трубопроводу певної довжини. У такій системі демпфування відбувається внаслідок перетікання повітря з пневматичної ресори безпосередньо в додатковий резервуар і навпаки через сильфонний отвір. Для цього

використовували вібростенд, який генерував синусоїдальні збурення з певною амплітудою і частотою.

Проведений аналіз науково-дослідних праць [4–14] показує, що питання дослідження динамічних характеристик пневматичної ресори швидкісного рухомого складу досліджували особливо ретельно. Це пов'язано з їхнім безпосереднім впливом на динамічні показники та показники безпеки руху рухомого складу. Однак як збурення пневматичної ресори приймають синусоїдальну нерівність, що не дає змогу дослідити динамічну поведінку пневматичної ресори за різних умов її експлуатації.

Тому на полігоні залізничної колії за допомогою розробленої випробувальної установки проведено експериментальні дослідження вертикальних і горизонтальних деформацій пневматичної ресори в межах стрілочного перевалу. При цьому збурення з боку рейкової колії мають випадковий характер, що дає змогу відтворити реальні умови експлуатації рухомого складу.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою роботи є експериментальне визначення вертикальних і горизонтальних деформацій пневматичної ресори швидкісного рухомого складу в межах стрілки стрілочного перевалу в пошерстному та протишерстному напрямках руху.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Розробити методологію експериментальних досліджень динамічної поведінки пневматичної ресори швидкісного рухомого складу при взаємодії з рейковою колією в межах стрілочного перевалу.

2. Встановити вертикальні та горизонтальні деформації пневматичної ресори швидкісного рухомого складу при взаємодії з рейковою колією в межах стрілки стрілочного перевалу в пошерстному та протишерстному напрямках.

**Основна частина дослідження.**

Дослідження вертикальних і горизонтальних деформацій пневматичної ресори швидкісного рухомого складу проводили на

полігоні залізничної колії в межах стрілочного перевалу. Вигляд випробувального полігона та випробувальної установки наведено на рис. 2.



Рис. 2. Випробувальна установка пневматичної ресори швидкісного рухомого складу

Випробувальна установка складається:

- із несучої П-подібної конструкції, вузли якої жорстко з'єднані між собою, а низ оперто на чотири рухомих металевих колеса, які мають поперечний профіль, що дає змогу контактувати з гостряками та рамними рейками стрілочного перевалу;

- пневматичної ресори швидкісного рухомого складу, яка нижньою металевою пластиною оперта на верх П-подібної несучої рами конструкції і з'єднана з нею нерухомо за допомогою чотирьох болтів;

- високочастотних потенціометричних датчиків лінійних переміщень, якими вимірюють вертикальні та горизонтальні деформації пневматичної ресори. Датчики переміщень нерухомою корпусною частиною зафіксовані струбцинами до спеціально вмонтованих квадратних рамок

П-подібної несучої рами. При цьому рухома частина датчиків торкається поверхні ресори. Відлік вважають нульовим;

- ноутбука, на якому встановлено спеціалізоване програмне забезпечення для зчитування вимірних значень вертикальних і горизонтальних деформацій. Усі виміряні дані деформацій пневматичної ресори зберігають у пам'яті комп'ютера, у подальшому обробляють та аналізують у лабораторних умовах;

- запрограмованого аналогово-цифрового перетворювача, до каналів якого через механічні роз'єми підключено лінійні датчики переміщень.

Унаслідок проїзду випробувальної установки стрілочним перевалом відбувається коливання пневматичної ресори. Основними збудниками коливань на стрілочному перевалі є ділянки 1 і 2 (рис. 3).





Рис. 3. Характерні ділянки на стрілочному переводі, які викликають значні збурення пневматичної ресори

Ділянка 1 – від другої перевідної тяги стрілочного переводу в бік кореня гостряків довжиною 1,0 м, а ділянка 2 – корінь гостряків стрілочного переводу. При русі випробувальної установки по ділянці 1 відбуваються не тільки значні вертикальні деформації ресори, а додатково виникають і горизонтальні. У випадку проїзду випробувальної установки по ділянці 2 переважальними є вертикальні деформації пневматичної ресори, що пов'язано із проїздом колеса установки стикової нерівності (стик величиною 12 мм).

Програмою експериментів передбачено одночасне вимірювання вертикальних і горизонтальних деформацій пневматичної ресори при проїзді установки в напрямках

від вістря гостряків до кореня гостряків стрілочного переводу і зворотному напрямку. У результаті здійснено по шість проїздів в одному та другому напрямках по стрілочному переводу. Виміряні дані вертикальних і горизонтальних переміщень пневматичної ресори після кожного проїзду випробувальної установки зберігали в окремому файлі на комп'ютері.

**Результати досліджень.** Провівши натурні випробування пневматичної ресори швидкісного рухомого складу, отримано синхронні записи її вертикальних і горизонтальних деформацій при русі ділянками 1 і 2 стрілочного переводу в пошерстному та протишерстному напрямках (рис. 4–7).

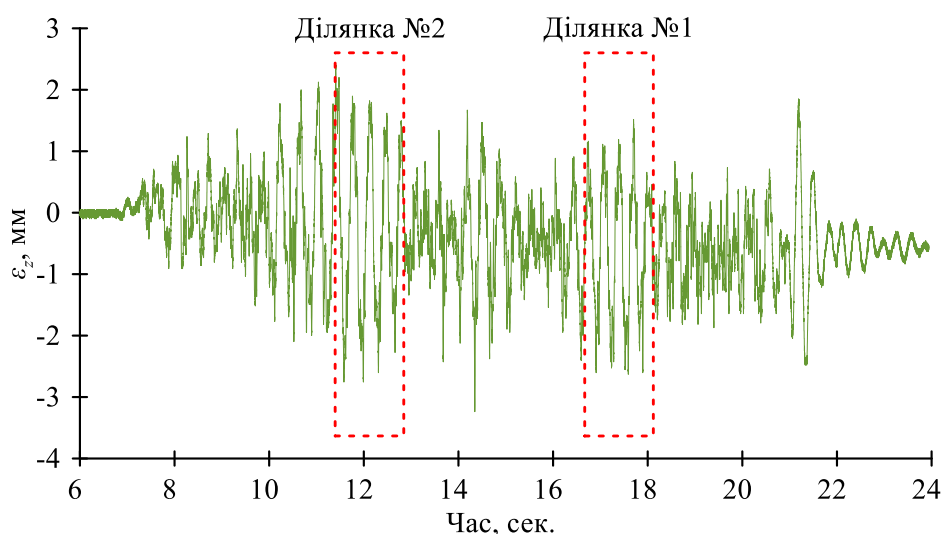


Рис. 4. Запис вертикальних деформацій пневматичної ресори в напрямку до вістря гостряків стрілочного переводу



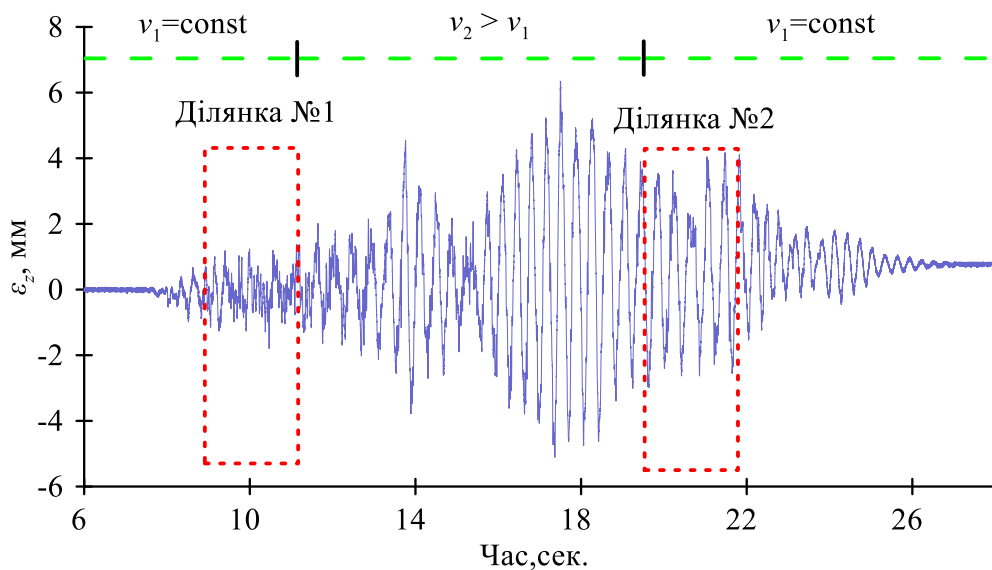


Рис. 5. Запис вертикальних деформацій пневматичної ресори в напрямку до кореня гостряків стрілочного переводу

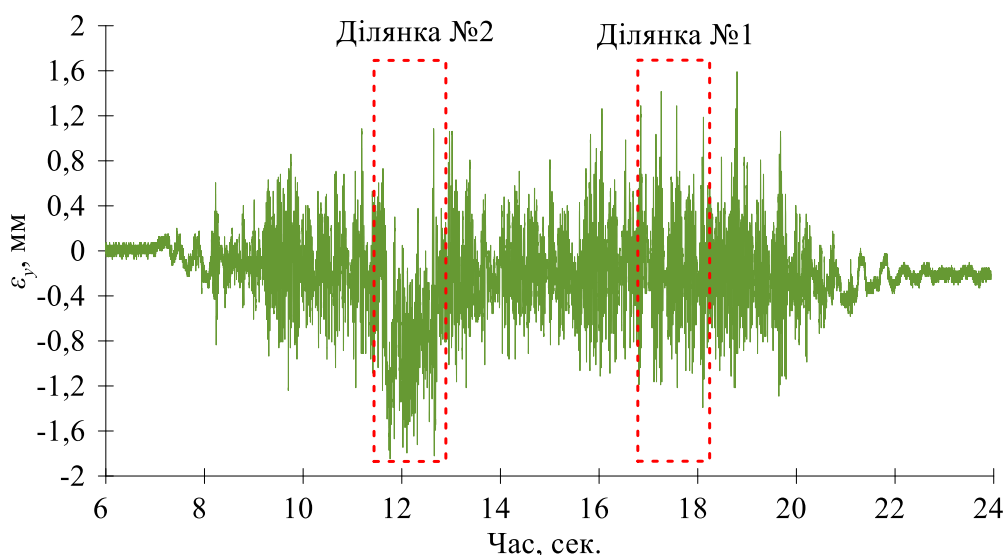


Рис. 6. Запис горизонтальних деформацій пневматичної ресори в напрямку вістря гостряків стрілочного переводу

Аналіз рис. 4–7 показує, що вертикальні деформації пневматичної ресори в межах руху стрілочним переводом у пошерстному та протишерстному напрямках є більшими за горизонтальні. Крім того, у напрямку руху випробувальної установки до кореня гостряків вертикальні деформації пневматичної ресори є більшими порівняно з протилежним

напрямком руху. Це можна пояснити особливостями вкочування колеса на вістря гостряка та ударним навантаженням, що виникає внаслідок руху по стику в межах ділянки кореня гостряків. Слід зазначити, що горизонтальні деформації за будь-якого напрямку руху стрілочним переводом є практично однаковими.

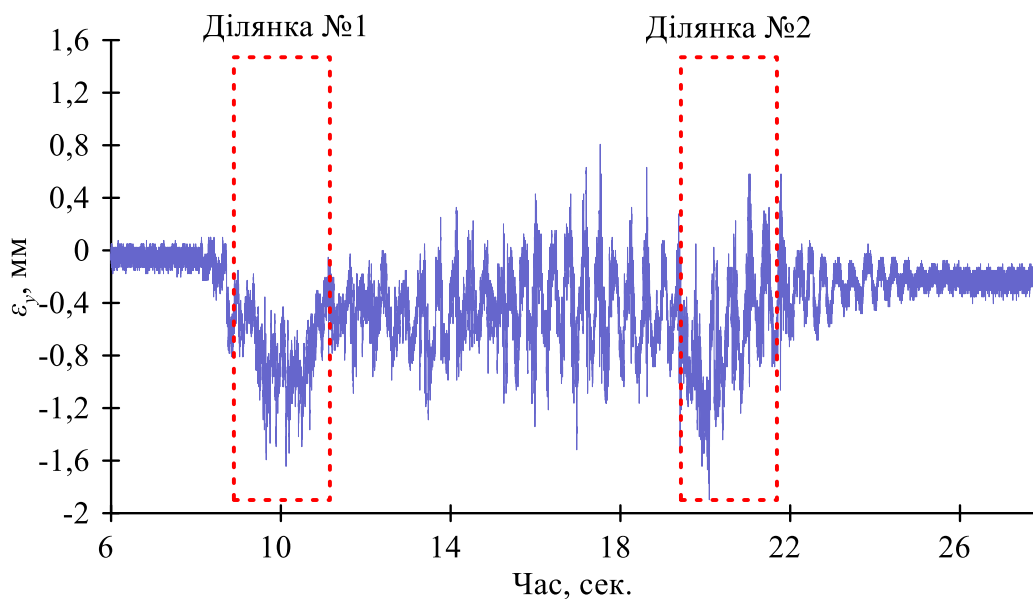


Рис. 7. Запис горизонтальних деформацій пневматичної ресори в напрямку до кореня гостряків стрілочного переводу

У результаті 14 проїздів випробувальної установки по ділянках 1 і 2 стрілочного переводу в пошерстному та протишерстному напрямках встановлено максимальні значення вертикальних деформацій пневматичної ресори – 3,14–5,05 мм у пошерстному напрямку та 4,88–5,95 мм у протишерстному напрямку. Максимальні значення горизонтальних деформацій – 1,62–2,94 мм і 1,30–2,53 мм відповідно.

На рис. 5 показано, що при русі випробувальної установки по ділянках 1 і 2 її швидкість була постійною ( $v_1 = \text{const}$ ). Проте між цими ділянками швидкість випробувальної установки змінювалася, збільшуючись (рівноприскорений рух) і зменшуючись (рівноуповільнений рух) відповідно, що призводило до збільшення та зменшення вертикальних деформацій пневматичної ресори.

Маючи діапазони максимальних значень вертикальних і горизонтальних деформацій пневматичної ресори, знайдемо їхні середні значення (рис. 8, 9).

Із рис. 8, 9 випливає, що середні значення вертикальних деформацій пневматичної ресори швидкісного рухомого складу в межах стрілки стрілочного переводу для пошерстного руху складають 3,85 мм, для протишерстного – 5,48 мм. Відповідно значення горизонтальних деформацій пневматичної ресори складають 2,02 і 1,82 мм.

На основі отриманих результатів можна встановлювати динамічні характеристики пневматичної ресори, використання яких ще на етапі проектування швидкісного рухомого складу дасть змогу досліджувати його динамічні показники та показники безпеки руху за різних умов експлуатації.

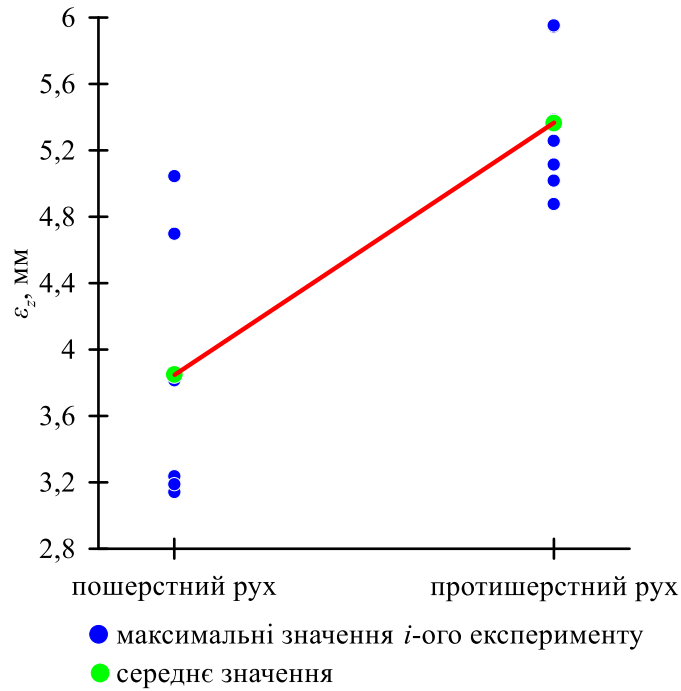


Рис. 8. Середні значення вертикальних деформацій пневматичної ресори в пошерстному та протишерстному напрямках руху стрілочним переводом

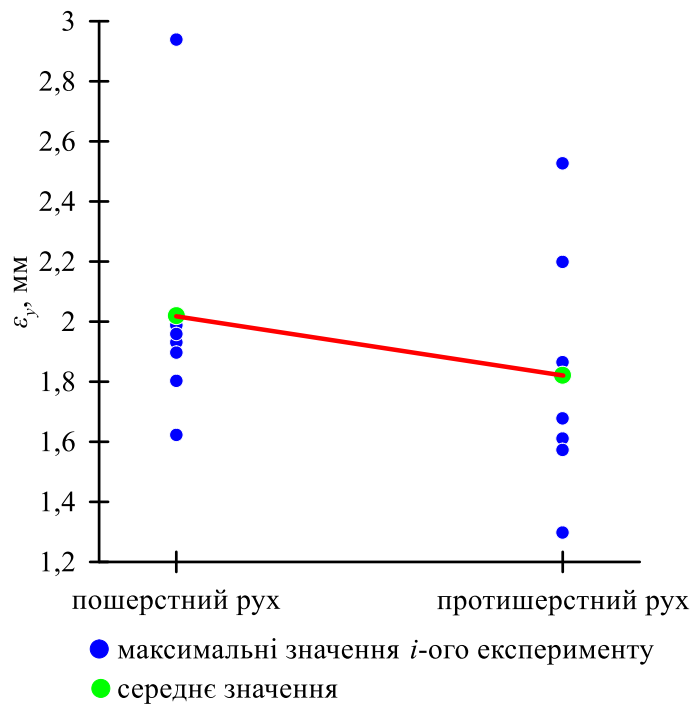


Рис. 9. Середні значення горизонтальних деформацій пневматичної ресори в пошерстному та протишерстному напрямках руху стрілочним переводом

**Висновки.** Розроблено методологію натурних випробувань пневматичної ресори швидкісного рухомого складу в умовах руху стрілочним переводом.

Встановлено, що вертикальні деформації пневматичної ресори в межах руху стрілочним переводом у пошерстному та протишерстному напрямках є більшими за горизонтальні. Крім того, у протишерстному напрямку руху випробувальної установки вертикальні деформації пневматичної ресори є більшими порівняно з протилежним

напрямок руху, а горизонтальні деформації за будь-якого напрямку руху стрілочним переводом є практично однаковими.

Середнє значення отриманих вертикальних деформацій пневматичної ресори швидкісного рухомого складу в межах стрілки стрілочного переводу для пошерстного руху складає 3,85 мм, а протишерстного – 5,48 мм. При цьому середнє значення горизонтальних деформацій пневматичної ресори складають 2,02 і 1,82 мм відповідно.

### Список використаних джерел

1. Kuzyshyn A., Batig A., Kostritsa S., Sobolevska J., Kovalchuk V., Dovhanyuk S., Voznyak O. Research of safety indicators of diesel train movement with two-stage spring suspension. *BulTrans 2018: 10th Intern. Sci. Conf. on Aeronautics, Automotive and Railway Engineering and Technologies*. Vol. 234 (2018). <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823405003>.
2. Kuzyshyn A., Batig A., Kostritsa S., Sobolevska J., Dovhaniuk S., Dzhus V. Study of the Dynamic Behavior of Rolling Stock using a Computer Experiment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 15th Intern. Sci. and Techn. Conf. «Problems of the railway transport mechanics» (PRTM 2020)*. Vol. 985. Dnipro, Ukraine (2020). DOI: 10.1088/1757-899X/985/1/012002.
3. Kuzyshyn A., Kovalchuk V., Sobolevska Y., Royko Y., Kravets I. Determining the effect of additional tank volume and air pressure in the spring on the dynamic indicators of a pneumatic system of spring suspension in high-speed railroad rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. 3/7 (129). P. 47–62. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.304051>.
4. Alonso A., Giménez J. G., Nieto J., Vinolas J. Air suspension characterisation and effectiveness of a variable area orifice. *Vehicle System Dynamics*. 2010. Vol. 48. Iss. sup1. P. 271–286. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423111003731258>.
5. Facchinetti A., Mazzola L., Alfi S., Bruni S. Mathematical modelling of the secondary airspring suspension in railway vehicles and its effect on safety and ride comfort. *Vehicle System Dynamics*. 2010. Vol. 48. Iss. sup1. P. 429–449. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2010.486036>.
6. Mazzola L., Berg M. Secondary suspension of railway vehicles – air spring modelling: performance and critical issues. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2014. Vol. 228. Iss. 3. P. 225–241. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409712470641>.
7. Sayyaadi H., Shokouhi N. Effects of air reservoir volume and connecting pipes length and diameter on the air spring behavior in rail vehicles. *Iranian Journal of Science and Technology Transaction B: Engineering*. 2010. Vol. 34, № B5. P. 499–508.

8. Li X., He Y., Liu W., Wei Y. Research on the vertical stiffness of a rolling lobe air spring. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 2015. Vol. 230. Iss. 4. P. 1172–1183. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409715585370>.
9. Xu L. Mathematical modeling and characteristic analysis of the vertical stiffness for railway vehicle air spring system. *Mathematical Problems in Engineering*. 2020. Vol. 220. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/2036563>.
10. Nakajima T., Shimokawa Y., Mizuno M., Sugiyama H. Air Suspension System Model coupled with leveling and differential pressure valves for railroad vehicle dynamics simulation. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*. 2014. Vol. 9. Iss. 3. P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4026275>.
11. Tanaka T., Sugiyama H. Prediction of railway wheel load unbalance induced by air suspension leveling valves using quasi-steady curve negotiation analysis procedure. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part K: J. Multi-Body Dyn.* 2019. 234. P. 19–37. DOI: 10.1177/1464419319867179.
12. Qi Z, Li F, Yu D. A three-dimensional coupled dynamics model of the air spring of a high-speed electric multiple unit train. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2017. 231(1). P. 3-18. DOI:10.1177/0954409715620534.
13. Gao H. X., Chi M. R., Zhu M. H., Wu P. B. Study on different connection types of air spring. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 423–426. P. 2026–2034. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.423-426.2026>.
14. Sihong Z., Jiasheng W., Ying Z. Research on theoretical calculation model for dynamic stiffness of air spring with auxiliary chamber. *2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* (Harbin, 3-5 Sept. 2008). Harbin, 2008. P. 2–7. DOI: <https://doi.org/10.1109/vppc.2008.4677717>.

---

Кузишин Андрій Ярославович, доктор філософії, доцент кафедри залізничного транспорту, Інститут механічної інженерії та транспорту національного університету «Львівська політехніка». ORCID 0000-0002-3012-5395. Тел.: +38(098)116-99-47. E-mail: [andrii.y.kuzyshyn@lpnu.ua](mailto:andrii.y.kuzyshyn@lpnu.ua).

Ковальчук Віталій Володимирович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри залізничного транспорту, Інститут механічної інженерії та транспорту національного університету «Львівська політехніка». ORCID 0000-0003-4350-1756. Тел.: +38(097)223-72-43. E-mail: [kovalchuk.diit@gmail.com](mailto:kovalchuk.diit@gmail.com).

Kuzyshyn A., PhD, Associate Professor, Department of Railway transport, Institute of Mechanical Engineering and Transport. Lviv Polytechnic National University. ORCID 0000-0002-3012-5395. Tel.: +38(098)116-99-47. E-mail: [andrii.y.kuzyshyn@lpnu.ua](mailto:andrii.y.kuzyshyn@lpnu.ua).

Kovalchuk V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Railway transport, Institute of Mechanical Engineering and Transport. Lviv Polytechnic National University. ORCID 0000-0003-4350-1756. Tel.: +38(097)223-72-43. E-mail: [kovalchuk.diit@gmail.com](mailto:kovalchuk.diit@gmail.com).

Статтю прийнято 1.10.2024 р.

УДК 629.463.001

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ УНІВЕРСАЛЬНИХ НАПІВВАГОНІВ

Д-р техн. наук І. Е. Мартинов, кандидати техн. наук В. О. Шовкун, А. В. Труфанова, аспіранти О. М. Литовченко, М. В. Дмитренко, О. О. Балашов

## THE STUDY OF THE TECHNICAL CONDITION OF GONDOLA CARS

Dr. Sc. (Tech.) I. E. Martynov, Cand. Sc. (Tech.) V. O. Shovkun, PhD (Tech) A. Trufanova, postgraduate students O. M. Lytovchenko, M. V. Dmytrenko, O. O. Balashov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.209.2024.314256>

***Анотація.** У статті наведено результати аналізу технічного стану універсальних напіввагонів. Показано, що значна частина напіввагонів мають середній термін служби понад тридцять років і вичерпали свій ресурс.*

*Проаналізовано основні причини відмов, що призвели до відчеплення вагона від поїзда на шляху прямування, серед яких переважають пошкодження елементів кузова. Далі йдуть відмови автоматичних гальм і колісних пар. Серед пошкоджень кузовів напіввагонів найчастіше спостерігають несправності заборів кришок розвантажувальних люків, тріщини та злами верхніх і вертикальних листів поперечних балок рами.*

*Проаналізовано вплив типу конструктивного елемента, що відмовив, на середній термін відновлення працездатності напіввагонів.*

***Ключові слова:** напіввагон, кузов, балка, тріщина, відмова, працездатність, ремонт.*

***Abstract.** The article presents the results of the analysis of the technical condition of gondola cars owned by the transport operator BGS rail. The composition of the model range of the car fleet was analysed. It is shown that 14 % of gondola cars produced by Uralvagonzavod have an average service life of over thirty years and have exhausted their service life. Gondola cars of models 12-757 and 12-753 of Kryukov Carriage Works have also exhausted their service life. A positive factor is the presence of innovative cars model 12-7023 produced by KVSZ and 12-4106 model produced by PJSC Dneprovagonmash in the car fleet. Their average age is 6.5 years.*

*An analysis of the main causes of failures that caused the car to uncouple from the train along the route was carried out. In the first place are damage to body elements. This is followed by failures of automatic brakes and wheel sets.*

*Among the damage to gondola car bodies, the first place is taken by malfunctions of the locks on the unloading hatch covers, followed by cracks and breaks in the upper and vertical sheets of the frame cross beams. Broken weld seams of braces and broken linings also pose a serious danger.*

*Failures of auto brakes are caused by loosening of air duct pipes, brake equipment and welded shoes.*

*The main causes of damage to wheel pairs are unacceptable wear of the flange. Among axle box assemblies, the vast majority of failures are caused by excessive heating of the bearings.*

*Failures of automatic coupling equipment are most often caused by fractures of the centering beam and breaks (cracks) of the pendulum suspension. Cracks and other malfunctions of the automatic coupling body are also observed.*

*The bogies mostly have broken springs and mismatched sliding clearances. Also, a quarter of the uncoupled bogies have expired service life of their elements.*

*The average recovery time for gondola cars was analyzed. Due to malfunctions of axlebox units, cars are under repair for more than 15 days, due to failures of wheel pairs - 11.55 days. The least time is spent on auto brakes – 4.2 days.*

*An analysis of the damage to the bodies of various gondola cars models showed that gondola cars of models 12-9745 and 12-9790 are in the worst technical condition. The least susceptible to damage are the «innovative» gondola cars of models 12-7023 and 12-4106.*

**Keywords:** *gondola car, body, beam, crack, failure, operability, repair.*

**Вступ.** Залізниці України щорічно забезпечують більшість перевезень вантажів, особливо в далекому сполученні. Але конкурентоспроможність залізниць останніми роками стала зменшуватися. Парк вантажних вагонів суттєво зношений фізично: майже 80 % робочого парку експлуатують із неодноразово подовженим терміном експлуатації. Але вагони застарілі не лише фізично, а й морально: технічні рішення, використані в них, були запропоновані ще в 70-80-х роках ХХ століття. Інноваційний рухомий склад закупали в незначній кількості переважно приватні перевізники.

Серед різноманіття типів і моделей вантажних вагонів особливе місце займають універсальні напіввагони (НПВ). Вони є наймасовішим і найбільш дефіцитним типом вантажного рухомого складу. Напіввагони експлуатують у дуже складних умовах: постійний вплив зовнішнього середовища, відсутність захисту від атмосферних опадів, пошкодження при завантаженні та розвантаженні тощо. Тому дуже актуальним є дослідження з визначення рівня технічного стану напіввагонів залежно від моделі і терміну експлуатації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням підвищення надійності і працездатності НПВ присвячено значну кількість досліджень. Так, автори статей [1-3] розглядають питання пошкодження напіввагонів при розвантаженні грейферами та доходять висновку, що найменш надійними елементами конструкції кузова напіввагона є кришки розвантажувальних люків, торцеві стіни. Але особливо небезпечними є місця

обпирання проміжних стояків бокової стіни на проміжні поперечні балки рами.

Автори роботи [4] стверджують, що в НПВ найбільше спрацювання мають двотавр хребтової балки, горизонтальна полиця нижньої обв'язки, верхні листи проміжної і шворневої балки. Щодо кузова, то найчастіше спостерігають деформації його елементів (вигини, вм'ятини, розриви тощо).

У статті [5] подано результати дослідження впливу роду вантажу, що перевозять, на виникнення пошкоджень кузова.

У дослідженнях [6, 7] розглянуто процес виникнення відмов вагонів як результат взаємодії між напіввагоном і зовнішніми впливами (експлуатаційними навантаженнями, умовами середовища тощо), а також механічними, фізичними і хімічними процесами, які відбуваються в компонентах напіввагона в процесі експлуатації.

Автори статей [8, 9] стверджують, що після семи-восьми років експлуатації кожен напіввагон у середньому сім-десять разів на рік надходить у ремонт. Пошкодження вказують на те, що значна частка відмов кузовів напіввагонів пов'язана з інтенсивними корозійними процесами, викликаними впливом вантажу, що перевозять.

Публікація [10] присвячена аналізу конструктивних особливостей напіввагонів нового покоління, їхніх переваг і недоліків, особливо напіввагонів виробництва Крюківського вагонобудівного заводу.

У статті [11] подано результати статистичного аналізу розподілу відмов елементів конструкції напіввагонів. Автори



доходять висновку, що для опису напрацювання доцільно використовувати нормальний закон розподілу.

У роботі [12] проаналізовано результати експлуатації універсальних напіввагонів на залізницях Казахстану.

Очевидно, що, незважаючи на значну кількість досліджень цього напрямку, поза увагою дослідників залишилися питання аналізу технічного стану універсальних напіввагонів, порівняння надійності моделей різних виробників із різним терміном експлуатації.

**Мета і завдання дослідження.** Метою статті є аналіз технічного стану універсальних напіввагонів власності приватного оператора перевезень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати парк універсальних напіввагонів приватної власності за моделями і терміном експлуатації;
- проаналізувати їхній технічний стан і визначити пошкоджуваність елементів конструкції універсального НПВ;

- дослідити час відновлення працездатності НПВ;
- порівняти пошкоджуваність НПВ різних моделей.

**Основна частина дослідження.** Парк вантажних вагонів приватного оператора перевезень «BGS rail» складається переважно з вагонів-хоперів і напіввагонів. До парку напіввагонів (НПВ) входять моделі 12-119, 12-132, 12-141 виробництва АТ «НПК» Уралвагонзавод», модель 12-9745 виробництва Попаснянського та Панютинського вагоноремонтних заводів АТ «Укрзалізниця», моделі 12-9933 і 12-9790 виробництва АТ «Дизельний завод», модель 12-1704 виробництва ПАО «Азовзагальмаш» і модель 12-4106 виробництва ПАО «Днепровагонмаш». НПВ моделей 12-757, 12-783 і 12-7023 виготовлені на Крюківському вагонобудівному заводі (КВБЗ).

Розподіл кількості НПВ за моделями показаний на рис. 1, а за терміном експлуатації – на рис. 2.

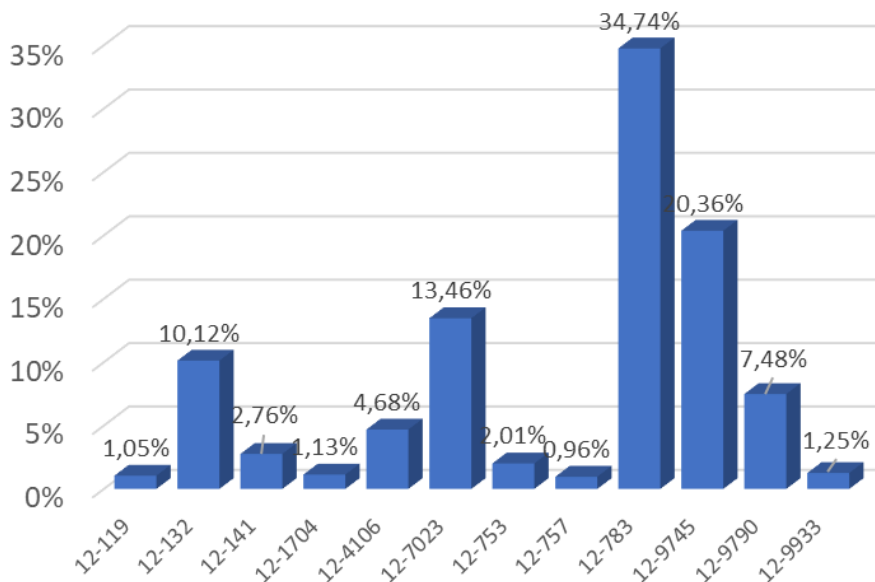


Рис. 1. Розподіл вагонів між виробниками

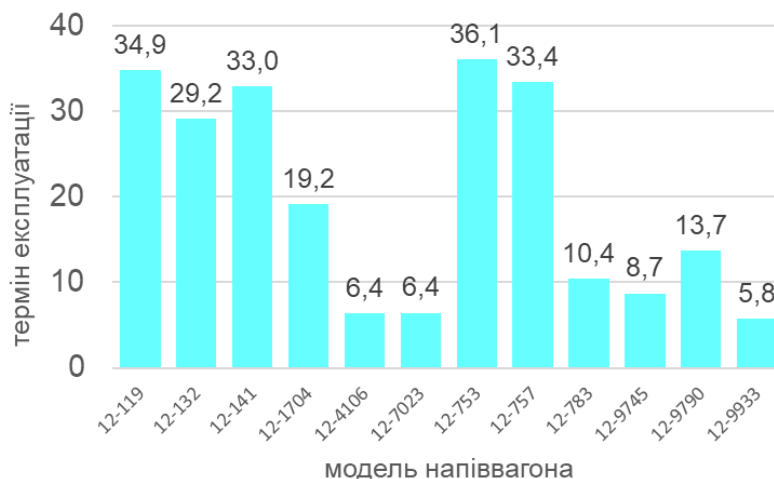


Рис. 2. Середній термін експлуатації різних моделей напіввагонів

Напіввагони моделей 12-119, 12-132, 12-141 складають майже 14 % загальної кількості НПВ. Вони мають найбільший термін експлуатації – у середньому понад 30 років. Ці НПВ вже вичерпали свій ресурс (22 роки), а їхній термін служби продовжували.

Те саме можна сказати про НПВ Крюківського вагонобудівного заводу моделей 12-753 і 12-757. Їхній термін експлуатації також перевищив 30 років.

В інших моделей вагонів термін експлуатації ще не вичерпаний. Особливо слід зазначити про наявність НПВ моделі 12-7023, виготовлені на КВБЗ. Це так звані «інноваційні» вагони з покращеними техніко-економічними характеристиками.

На рис. 3 подано розподіл несправностей універсальних НПВ (усіх моделей) за елементами конструкції.

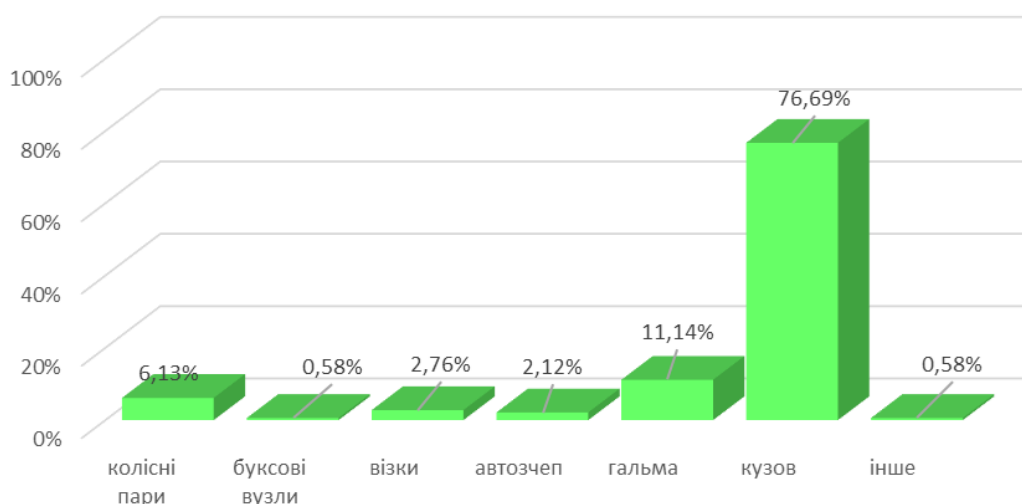


Рис. 3. Розподіл несправностей універсальних НПВ за видами відмов

Очевидно, що більшість – це пошкодження кузова. Далі йдуть відмови автоматичних гальм і колісних пар.

У табл. 1 наведено розподіл пошкоджень елементів універсальних напіввагонів (усіх моделей).

Таблиця 1

Пошкодження елементів кузовів універсальних напіввагонів

Вид пошкодження	Кількість
Уширення кузова більше 75 мм на один бік	0,04 %
Обрив зварного шва стояка	2,26 %
Обрив зварних швів розкосів	0,04 %
Пошкодження обв'язувальних брусів	0,21 %
Пошкодження обшивки кузова	0,08 %
Несправність запору дверей	0,04 %
Відсутність кришки люка	0,04 %
Пошкодження кришки люка і петель	0,33 %
Несправність запору люка	64,13 %
Пошкодження (обрив) сходів / поручнів / підніжок	0,08 %
Тріщина / злам сходів, поручнів і підніжок	0,50 %
Тріщина / злам верхньої обв'язки напіввагона	0,04 %
Тріщина у вузлах сполучення хребтової та шворневої балок рами вагона	0,04 %
Послаблення кріплення п'ятника	0,25 %
Обрив по зварюванню, розрив накладок	2,34 %
Тріщина / злам верхнього / вертикального листа поперечної балки рами	29,22 %
Злам / тріщина / обрив розкосів	0,04 %
Наскрізний корозійний знос бічних стін понад 25 % їхньої поверхні	0,13 %
Інше	0,17 %
Разом	100 %

Серед пошкоджень кузовів НПВ на першому місці знаходяться несправності запорів кришок розвантажувальних люків, далі – тріщини та злами верхніх і вертикальних листів поперечних балок рами. Також серйозну небезпеку являють обриви зварних швів розкосів і розриви накладок.

У табл. 2 наведено розподіл пошкоджень гальмової системи універсальних напіввагонів (усіх моделей).

Найчастіше автогальма відмовляють через ослаблення кріплення труб повітропроводу і гальмівного обладнання та завари башмаків, далі – несправності повітророзподільника, гальмового циліндра та кінцевих кранів.

Основними причинами бракування колісних пар є неприпустимий знос гребеня (82,2 % загальної кількості відчеплень через відмови колісних пар).

Таблиця 2

## Пошкодження елементів автоматичних гальм універсальних напіввагонів

Вид пошкодження	Кількість
Несправність авторежиму та його привода	0,58 %
Несправність регулятора гальмівної передачі важеля	2,02 %
Несправність розподільника повітря	10,09 %
Несправність гальмівного циліндра	7,49 %
Несправність кінцевого крана	6,63 %
Зрив корончатої гайки триангеля	0,29 %
Обрив кронштейна двокамерного резервуара повітророзподільника	0,29 %
Несправність трійника повітропроводу гальмівної магістралі	2,02 %
Несправність балки авторежиму або її кріплення	0,29 %
Відсутність або пошкодження балки авторежиму	0,58 %
Ослаблення кріплення труб повітропроводу і гальмівного обладнання	36,02 %
Обрив / злам повітропроводу і підвідних труб гальмівної магістралі	1,44 %
Злам важелів і тяг гальмівної важільної передачі	1,15 %
Знос втулок триангеля	0,58 %
Завар башмака	19,31 %
Злам запобіжних скоб горизонтальних тяг гальмівної важільної передачі	0,29 %
Розрегулювання важільної передачі	2,31 %
Несправність ручного стоянкового гальма	0,86 %
Тріщина / злам підвіски гальмівного башмака	1,44 %
Розукомплектування ручного стоянкового гальма	6,05 %
Інше	0,29 %
Разом	100 %

Серед буксових вузлів переважна більшість відмов викликана надмірним нагрівом підшипників (94,44 %). У візків переважають злами пружин (30,23 %) і невідповідність зазорів ковзунів (19,77 %). Також 23,26 % відчеплених візків мають прострочений термін експлуатації своїх елементів.

Розподіл причин відмов автозчепного обладнання НПВ наведено на рис. 4.

Найчастіші відмови автозчепного обладнання – це злами центрувальної балочки та обриви (тріщини) маятникової підвіски. Також спостерігають тріщини та інші несправності корпусу автозчепу.

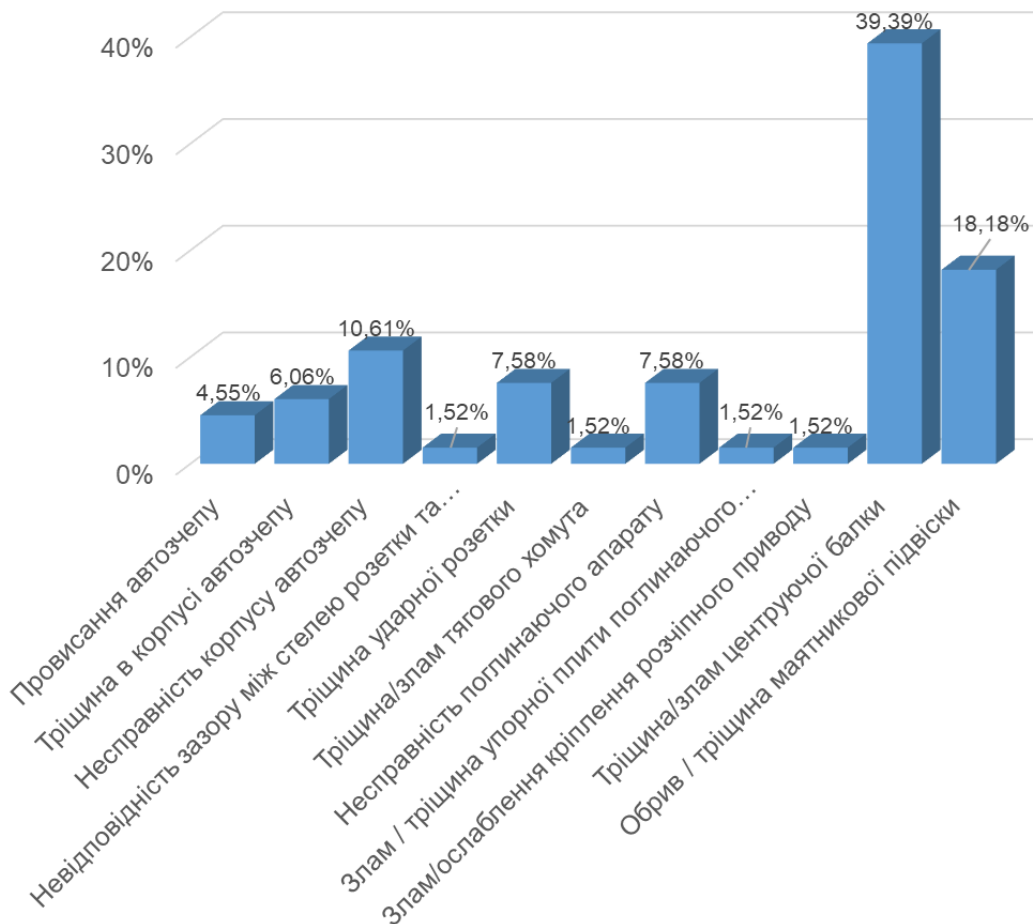


Рис. 4. Розподіл причин відмов автозчепного обладнання універсальних НПВ

На рис. 5 зображено розподіл часу відновлення працездатності НПВ. Понад 15 діб ремонтують НПВ із відмовами буксових вузлів, а НПВ із відмовами колісних пар – 11,55 доби. Найменше часу витрачають на відновлення працездатності НПВ з відмовами автогалъм – 4,2 доби.

Отримані результати дали змогу порівняти різні моделі НПВ за рівнем надійності (рис. 6).

Найчастіше отримують пошкодження старі моделі НПВ 12-1704 і 12-753, сучасні моделі 12-9790 і 12-9745. Найбільш надійними є сучасні НПВ моделей 12-4106 і 12-7023.

**Висновки:**

- проаналізовано парк універсальних напіввагонів приватної власності за

моделями і терміном експлуатації. Визначено модельний ряд і кількість НПВ, що вже вичерпали свій ресурс, а їхній термін експлуатації перевищив 30 років;

- проаналізовано технічний стан елементів конструкції універсального НПВ. Визначено, що переважну більшість відчеплень викликають пошкодження кузова. На другому місці – відмови автоматичних галъм;

- досліджено час відновлення працездатності НПВ. Визначено, що найдовше ремонтують НПВ із відмовами буксових вузлів. Найменше часу витрачають на відновлення працездатності НПВ із відмовами автогалъм;

- порівняно ушкоджуваність НПВ різних моделей. Визначено, що найчастіше

отримають пошкодження старі моделі НПВ 12-1704 і 12-753, сучасні моделі 12-9790 і 12-9745. Найбільш надійними є сучасні НПВ моделей 12-4106 і 12-7023.

Отримані результати дають змогу сформулювати стратегію ремонту і технічного обслуговування НПВ приватної власності з урахуванням фактичного технічного стану та рівня надійності.

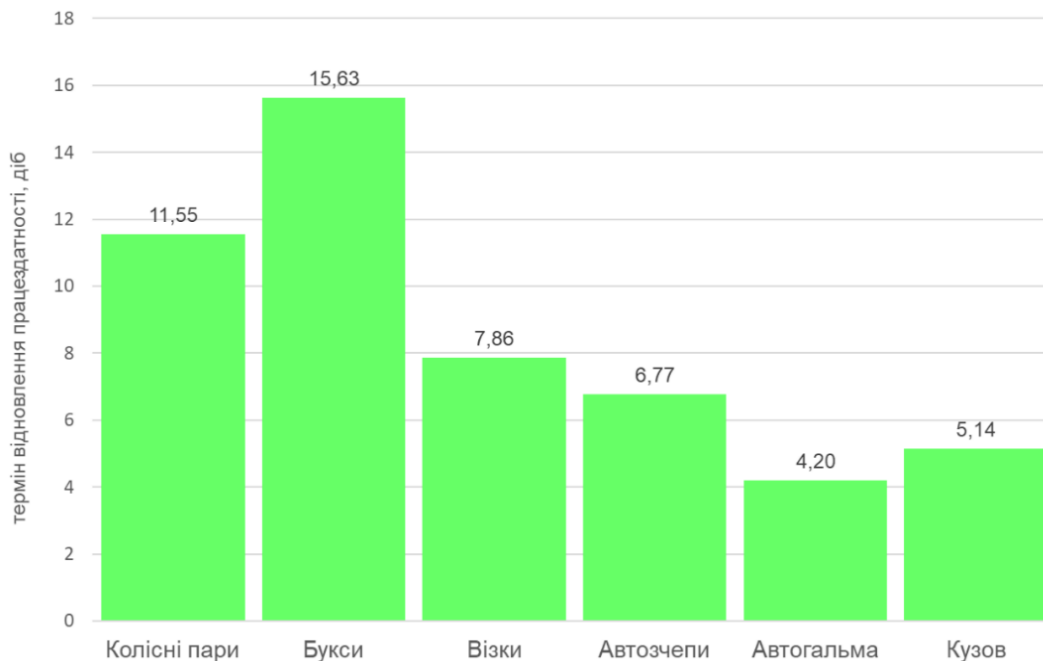


Рис. 5. Час відновлення працездатності елементів універсальних НПВ

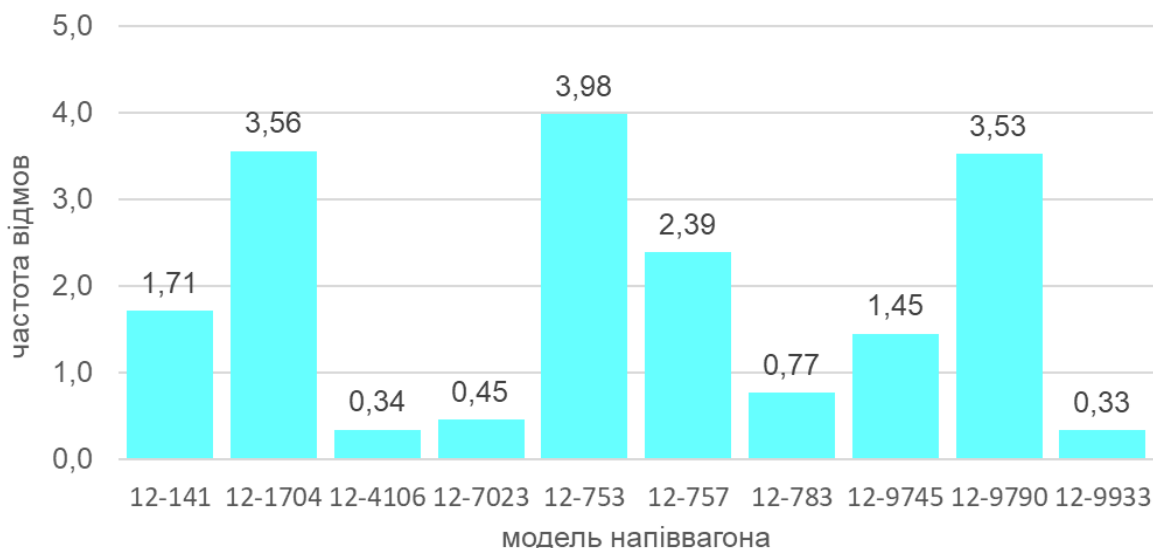


Рис. 6. Частота відмов універсальних НПВ різних моделей

Список використаних джерел

1. Візняк Р. І., Чепурченко І. В., Шевченко В. О. Піввагон і грейфер: вічна проблема несумісності. *Вагонный парк*. 2011. № 1. С. 24-28.
2. Візняк Р. І., Чепурченко І. В., Яценко А. О. Особливості визначення експлуатаційних навантажень кузова напіввагона та шляхи удосконалення його конструкції з метою забезпечення міцності і збереження. Збірник наукових праць УкрДУЗТ. 2016. Вип. 159. С. 91-97. DOI:10.18664/1994-7852.159.2016.67018.
3. Сендеров Г. К., Глаголев Е. В., Поздина Е. А. Обеспечение сохранности полувагонов при грейферной выгрузке грузов. *Железнодорожный транспорт. Серия «Вагоны и вагонное хозяйство»*. Ремонт вагонов. 2001. Вып. 1. С. 1-8.
4. Фомін О. В., Бурлуцький О. В. Аналіз та класифікація пошкоджень універсальних напіввагонів, які виникають за час їх життєвого циклу. *Вісник Вінницького політехнічного інституту. Серія «Машинобудування і транспорт»*. 2012. № 4. С. 163-167.
5. Кузнецов С. А., Паршин П. В. Анализ технического состояния полувагонов в зависимости от рода перевозимого груза. *Деп. в ЦНИИ ТЭИ МПС: науч.-техн. сб.* 2004. № 6438. С. 18-21.
6. Болотин М. М., Воротников В. Г. Отказы и срок службы грузового вагона. *Мир транспорта*. 2012. № 2. С. 152-161.
7. Мурадян Л. А. Відмови та безвідмовність вагонів як складові експлуатаційної надійності. *Вісник НТУ «ХПИ»*. Серія «Механіко-технологічні системи та комплекси». 2015. № 52(1161). С. 127-130.
8. Федосов-Ніконов Д. В., Стринжа А. М., Шамшей Д. О., Полулях В. М. Дослідження корозійних пошкоджень елементів вагонів під час технічного діагностування. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2019. № 3 (251). С. 181-184.
9. Конюхов А. Д. Коррозия и надежность железнодорожной техники. *Железнодорожный транспорт*. 1997. № 1. С. 42-47.
10. Myamlin S. V., Keбал I. U., Kolesnykov S. R. Design review of gondola car. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2014. № 6 (54). С. 136-145. <https://doi.org/10.15802/stp2014/33773>.
11. Ivanova T. V., Petrov V. A., Nalabordin D. G. (2015). Statistical estimation of mean time to failure of gondola cars between repairs. *Dependability*. 2015;(1):32-38. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2015-0-1-32-38>.
12. Karibzhanov E. A. Freight wagons in Kazakhstan: improving technical condition. *Cars and car economy*. 2009. 4(20). С. 34-36.

---

Мартинів Ігор Ернстович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-0481-3514. Тел.: (050) 300-31-60. E-mail: martinov.hiit@gmail.com.

Труфанова Альона Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-1702-1054. Тел.: (050) 520-17-81. E-mail: alena.hiit.vagons@gmail.com.

Шовкун Вадим Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-1826-6053. Тел.: (050) 520-17-81. E-mail: vadimshovkun62@gmail.com.

Литовченко Олександр Миколайович, аспірант кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-1826-6053. Тел.: +38 (050) 3039850. E-mail: rokada\_t@ukr.net.

---

Дмитренко Максим Володимирович, аспірант кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0000-2712-2495. Тел.: +38 (067) 399 6881. E-mail: lemtr21@gmail.com.

Балашов Олександр Олександрович, аспірант кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0007-6155-601X. Тел.: +38 (050 3039850). E-mail: balashov@kart.edu.ua.

Martynov Igor, Dr. Sc. (Tech). Professor, head department of wagons engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0481-3514>. Tel.: (057) 730-10-36. E-mail: martinov.hiit@gmail.com.

Trufanova Alyona, PhD (Tech). Associate Professor department of wagons engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-1702-1054. Tel.: (050) 520-17-81. E-mail: alena.hiit.vagons@gmail.com.

Shovkun Vadim, PhD (Tech). Associate Professor department of wagons engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-1826-6053. Tel.: (050) 520-17-81. E-mail: vadimshovkun62@gmail.com.

Lytovchenko Oleksandr. Postgraduate student, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-1826-6053. Tel.: +38 (050) 3039850. E-mail: rokada\_t@ukr.net.

Dmytrenko Maksym. Postgraduate student, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0000-2712-2495. Tel.: +38 (067) 399 6881. E-mail: lemtr21@gmail.com.

Balashov Oleksandr. Postgraduate student, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0007-6155-601X. Tel.: +38 (050 3039850). E-mail: balashov@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 10.10.2024 р.

УДК 625.112:656.222.4

## **ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ПЕРЕБУДОВИ ОДНІЄЇ З КОЛІЙ ДВОКОЛІЙНОЇ ДІЛЯНКИ НА КОЛІЮ ЄВРОПЕЙСЬКОГО СТАНДАРТУ (1435 мм)**

**Доктори техн. наук М. Б. Курган, Д. М. Курган,  
канд. техн. наук С. Ю. Байдак, старш. викл. Р. Б. Новік,  
асп. Н. П. Хмелевська**

## **JUSTIFICATION OF THE FEASIBILITY OF RECONSTRUCTING ONE TRACK OF A DOUBLE-TRACK SECTION TO THE EUROPEAN STANDARD GAUGE (1435 mm)**

**Dr. Sc. (Tech.) M. Kurhan, Dr. Sc. (Tech.) D. Kurhan, PhD (Tech) S. Baidak, Sr. lecturer  
R. Novik, postgraduate student N. Khmelevska**

**DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.209.2024.314320>**

***Анотація.** У статті систематизовано наукові розробки з проблеми проектування й реконструкції залізничних ліній під європейську ширину колії 1435 мм. Дослідження виконано з використанням методів графоаналітичного моделювання. Методика полягає в застосуванні розробленої математичної моделі, яка дає змогу оцінювати різні сценарії пропускної спроможності напрямку, використовуючи графіки оволодіння перевезеннями. У роботі отримано прогнозовані обсяги перевезень за песимістичним, раціональним і оптимістичним сценаріями, за яких може бути доцільна перебудова двоколіїної ділянки на дві одноколіїні з*



шириною колії 1435 і 1520 мм. Запропоновано науковий підхід, за яким можна оцінювати різні сценарії пропускної спроможності двох одноколійних ділянок із шириною колій 1520 мм (наявна) і 1435 мм (перебудована), використовуючи методи графоаналітичного моделювання. На основі результатів вітчизняних і зарубіжних наукових розробок намічено шляхи вирішення проблеми, що стосується будівництва залізниць європейського стандарту на території України з урахуванням сучасної інфраструктури, геополітичних, топографічних та інших умов. Переваги такого рішення: економія коштів (не потрібно перебудовувати одну з колій); збереження з'єднання з країнами, які використовують колію 1520 мм; можливість організувати рух поїздів із різною шириною колії.

**Ключові слова:** залізнична колія наявна 1520 мм, колія європейського стандарту 1435 мм, реконструкції сучасних напрямків, пропускна спроможність, провізна спроможність, графік оволодіння перевезеннями.

**Abstract.** The article systematizes scientific developments concerning the design and reconstruction of railway lines to the European track gauge of 1435 mm. Drawing on the experience of European countries, the study investigates the conditions under which it is feasible to implement a project solution involving the reconstruction of a double-track section into two single-track sections with different gauges: one track remains at 1520 mm, while the other is converted to 1435 mm. The research was conducted using graph-analytical modeling methods. The methodology involves the use of a developed mathematical model that allows for evaluating different scenarios of line capacity using transportation mastery graphs. The study forecasts transportation volumes under pessimistic, rational, and optimistic scenarios, under which the reconstruction of a double-track section into two single-track sections with gauges of 1435 mm and 1520 mm may be justified. A scientific approach is proposed, enabling the evaluation of various capacity scenarios for two single-track sections with gauges of 1520 mm (existing) and 1435 mm (reconstructed), using graph-analytical modeling methods. Based on the results of domestic and foreign scientific developments, potential solutions are outlined for the construction of European standard railways in Ukraine, considering existing infrastructure, geopolitical, topographical, and other conditions. The advantages of this solution include cost savings (as one track does not need to be rebuilt), maintaining connections with countries that use the 1520 mm gauge, and the ability to organize train movements with different track gauges.

**Keywords:** existing 1520 mm track gauge, European standard 1435 mm gauge, reconstruction of existing routes, line capacity, transportation capacity, transportation mastery graph.

**Вступ.** У листопаді 2022 року Європейська комісія і Європейський банк реконструкції та розвитку (ЄБРР) спільно подали план відновлення України, який містить перехід на європейську колію 1435 мм. Цей крок має на меті покращити інтеграцію України з європейським транспортним ринком, стимулювати торгівлю та економічне зростання. У 2023 році Європейська комісія спільно з Україною розробили детальну стратегію переходу на євроколію. Ця стратегія містить оцінювання вартості проекту, план поетапного впровадження і визначення джерел фінансування [1].

Отже, актуальним завданням на сьогодні є розроблення теоретико-методологічних підходів і практичних рекомендацій щодо визначення технічних можливостей створення залізничних магістралей в Україні за європейським стандартом. І хоч повний перехід на європейську колію – довгострокова перспектива, проте це необхідний крок. Саме тому слід зробити його одним із пріоритетних напрямів і максимально залучати до нього іноземних інвесторів, зокрема Європейський Союз, який усе більше демонструє зацікавленість в інтеграції України у свою економіку та

логістичну інфраструктуру. Можливості та шляхи реалізації проєкту «Євроколія» опрацьовує міністерство упродовж кількох років, однак його практичне втілення передбачає проведення попередніх досліджень щодо вантажо- та

пасажиропотоків, а також розроблення техніко-економічного обґрунтування.

Євроколію для швидкісних перевезень планують будувати від кордону з Польщею в Мостиськах і Раві-Руській до Львова, між Львовом і Києвом і Чопом, а також від Львова до кордону з Румунією (рис. 1) [2, 3].



Рис. 1. План будівництва ділянок залізниць європейського стандарту

Частина стратегії з інтеграції залізничних мереж України, яку розробили Європейська комісія і Європейський інвестиційний банк, передбачає, що нова магістральна мережа колії 1435 мм працюватиме для міжнародних пасажирських поїздів, перевезення вантажів у контейнерах чи на платформах паралельно з наявною 1520 мм для місцевих і регіональних пасажирських поїздів і великовагових вантажів.

Виникає питання «як буде збудована нова колія?». Якщо це двоколійна ділянка, то можливі декілька варіантів: одна колія залишиться з шириною 1520 мм, а інша буде перекладена на 1435 мм; одна з колій стане суміщеною (1435/1520 мм); можливо, буде

збудована нова колія шириною 1435 мм на новому маршруті. Кожен із цих варіантів потребує різних інвестицій і забезпечує різний рівень пропускної та провізної спроможності. Розглянемо це питання на прикладі деяких проєктів.

1. На ділянці Ужгород – Чоп на сьогодні є тільки колія 1520 мм. До 1996-1998 років існувала колія 1435 мм, яку було демонтовано. Проєктом передбачено відновлення колії 1435 мм. Довжина ділянки становить 27,5 км. Реалізацію проєкту заплановано на 2024-2027 роки.

2. Напрямок Мостиська – Львів (Скнилів) перетворюють на дві одноколійні ділянки, тобто непарна колія залишиться 1520 мм, а парна буде перекладена на колію

європейського стандарту 1435 мм. Довжина ділянки становить 62,5 км. Реалізацію проєкту заплановано на 2025-2028 роки.

3. На ділянці Львів (Брюховичі) – Рава-Руська довжиною 58 км колія 1520 мм буде замінена на колію 1435 мм, а колія 1520 мм з Рава-Руської буде капітально відремонтована до Червонограда.

Станом на 1 грудня 2023 року жоден із проєктів не розпочато. Триває пошук джерел фінансування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Підвищенню пропускної спроможності одноколіїних залізниць присвячені роботи як закордонних, так і вітчизняних фахівців. У Європі найпоширеніший метод аналізу пропускної спроможності надає Міжнародний союз залізниць (UIC) – код 406. Він був впроваджений у 1987 році та з того часу оновлювався кілька разів. Метод UIC 406 ґрунтується на імітаційному моделюванні роботи залізниці. Він дає змогу прогнозувати вплив різних факторів на пропускну спроможність: тип і характеристики поїздів (довжина, швидкість, час зупинки), інфраструктура залізниці (кількість колій, довжина перегонів, наявність роз'їздів), система управління рухом (графіки руху, правила пересування).

Зростаючий попит на пасажирські та вантажні перевезення транспортування в поєднанні з обмеженими капітальними вкладеннями для розширення залізничної інфраструктури США потребує більш ефективного використання поточної потужності ліній. У статті [4] використано результати понад 50 попередніх досліджень, виконаних у США та Європі, щоб описати різні визначення пропускної спроможності залізниці та підходи, а потім класифікувати їх на основі кожного з них. Методи потужності зазвичай поділяють на аналітичні та методи моделювання, але в цій статті також подано третій, «комбінований», підхід, який використовує як аналітичний, так і симуляційний підходи.

У статті [5] розглянуто можливе підвищення пропускної спроможності ділянки між двома станціями одноколіїної залізничної лінії за рахунок використання розширеної зони станційних стрілочних пунктів і методи оцінювання пропускної здатності такої залізничної інфраструктури, де частина одноколіїної ділянки, не обладнана, наприклад, лінійними блоками або іншими системами сигналізації та централізації, стає частково двоколіїною. Як приклад розглянуто напрямок у міській агломерації Градец – Кралоуве та Пардубіце та її околицях (100 км на схід від Праги), де є 60 ділянок одноколіїної лінії з середньою довжиною перегонів 7,4-10,0 км. Дослідження проводили на трьох рівнях. Перший є лише аналітичним, другий базований на розробленій власній мезоскопічній стохастичній симуляційній моделі, а третій – на стохастичній мікросимуляційній моделі, розробленій за допомогою програмного забезпечення OpenTrack. Запропоновані методи розширили сучасні загальні підходи до оцінювання пропускної спроможності.

У роботі [6] подано модель ціноутворення розподілу пропускної спроможності залізничної інфраструктури. Ціни на розподіл пропускної спроможності залізничної інфраструктури змодельовані з урахуванням усіх економічно обґрунтованих витрат. Структура моделі розроблена як набір розрахункових блоків у Microsoft Excel. Рекомендовані ціни на пропускну спроможність залізниці були знайдені шляхом моделювання набору варіантів. Надано рекомендації для різних умов експлуатації.

Проведений авторами роботи [7] аналіз показав, що перевезення в поєднанні з більшими швидкістю і частотою руху пасажирських поїздів, що курсують на одній колії, можуть призвести до збільшення заторів у багатьох місцях. Щоб задовольнити цей попит і підтримувати трафік, необхідні інвестиції в проєкти для збільшення пропускної спроможності

багатьох ліній. Дослідження дало змогу знайти найбільш ефективну стратегію розширення потужностей одноколієних ліній. Програмне забезпечення було використано для проведення експериментів, що моделюють роботу дорожнього руху на таких лініях. Отримані результати показали, що для одноколієної лінії найкраща стратегія – це будівництво нових роз'їздів між наявними станціями.

Пропускна спроможність одноколієних залізниць обмежена у зв'язку з зайнятістю ділянки колії поїздом, що блокує інші поїзди, які мають рухатися в протилежному напрямку, і, отже, створюючи низьку частоту руху поїздів і подовжений час перебування на станції. Обмеження потужності стає більш інтенсивним, оскільки в експлуатації задіяний графік руху, що призводить до великої залежності і взаємодії поїздів один з одним. Автор робить висновок, що визначення факторів для максимізації пропускної спроможності перегонів і станцій є життєво важливим завданням [8]. Параметри процесу моделювання використані для аналітичного оцінювання потужності станцій.

У роботі [9] зазначено, що попит на вантажні залізничні перевезення в Північній Америці суттєво зросте в найближчому майбутньому. Крім того, державні органи прагнуть збільшити швидкість і частоту курсування пасажирських поїздів. Мережа залізниць одноколієна з роз'їздами для схрещення і обгону поїздів. Автори вважають, що розширення інфраструктури можливе через будівництво додаткової головної колії, необхідної для підтримки спроможності мережі за умов збільшення залізничного руху.

Ще на початку 1990-х років почали розробляти системи на основі ERTMS/ETCS (Європейська система управління залізничним рухом/Європейська система управління поїздами), оскільки вони гарантують сумісність на європейському рівні, а також значно покращують

продуктивність залізничних систем. У цьому контексті в статті [10] аналізують використання HD-ERTMS (тобто ERTMS високої щільності), яку зазвичай застосовують у випадку залізничних вузлів двоколієних і одноколієних залізничних ліній. Попередні результати показали, що HD-ERTMS дає змогу відправляти послідовні пакети поїздів в одному напрямку, збільшуючи пропускну спроможність лінії до 60 %.

Згідно з цілями європейської транспортної політики передбачено, що до 2030 року транспортна система має стати більш конкурентоспроможною та ефективною у використанні ресурсів. Це висуває високі вимоги до залізничної інфраструктури, яка здебільшого працює в змішаному режимі пасажирських і вантажних перевезень. Мета статті [11] полягає в тому, щоб запропонувати процедури, які дадуть змогу просто і точно визначити кількісну оцінку переваг для підвищення пропускної спроможності лінії. Методичний підхід до визначення показників пропускної спроможності було розглянуто на прикладі вантажного залізничного коридору «Янтар», який з'єднує Балтійське море з Чорним. Він проходить через кілька європейських країн, у тому числі через Словаччину. Аналітичні процедури були запропоновані відповідно до методології, використовуваної на залізницях Словаччини, а питання якості були оцінені з використанням нового підходу для визначення оптимальної та критичної пропускної спроможності.

У 2017 році були опубліковані результати наукового дослідження [12]. Мета цього звіту – аналіз можливостей збільшення пропускної спроможності для майбутніх вантажних поїздів на період 2030-2050 років, оціненої для різних сценаріїв і комбінацій інфраструктури й поїздів. Встановлено, що пропускна спроможність одноколієної колії сильно залежить від відстані між станціями і швидкості поїздів. Зазначено, що швидші

вантажні поїзди можуть збільшити пропускну спроможність протягом дня, створюючи більше інтервалів між швидкими пасажирськими поїздами та мінімізуючи обгони. Навіть якщо швидші поїзди дорожчі, загальна вартість може бути нижчою за умови підвищення продуктивності, коли можна зробити ще один оборот локомотива або рухомого складу за день.

Для розрахунку пропускну спроможності залізничних колій у роботі [13] використовували методику, розроблену національною залізничною компанією Словаччини *Železnice Slovenskej Republiky (ŽSR)*, ґрунтовану на графіковій діаграмі руху поїздів (*graph schedule diagram*) і використовувану для прогнозування максимальної кількості поїздів, які можуть курсувати ділянкою колії протягом певного періоду часу. Для прогнозування впливу нового типу поїзда на пропускну спроможність залізничної колії в розрахунках використовували перспективний поїзд із такими параметрами: довжина, швидкість, час зупинок на станціях, міжстанційна відстань. Наведено результати практичної пропускну спроможності конкретної ділянки для поточного стану без реконструктивних заходів і після запропонованих заходів.

У роботі авторів [14] викладено теоретичні відомості про розрахунки пропускну спроможності залізничних напрямків за різного технічного оснащення. Розглянуто питання її підвищення за рахунок зміни способів організації руху поїздів і підвищення технічного оснащення інфраструктури і тягового забезпечення, особливо посилення пропускну спроможності за рахунок електрифікації залізничних ліній, пом'якшення профілю колії та зменшення міжпоїзних інтервалів.

У роботі [15] зазначено, що на сьогодні актуальною проблемою є також підвищення ефективності роботи залізничного транспорту промислових

підприємств. Метою дослідження є розроблення заходів щодо підвищення пропускну та провізної спроможності залізничної інфраструктури промислових підприємств в умовах збільшення обсягів перевезення вантажів. Дослідження виконано з використанням методів графоаналітичного моделювання.

Одноколіїні ділянки залізниць зазвичай мають потрібну пропускну спроможність, яка в деяких випадках значно менша за наявну. У цьому випадку виникає потреба в посиленні технічної оснащеності таких ділянок. При розробленні та аналізі таких варіантів розрахунок наявної пропускну спроможності виконують аналітично, але при розробленні графіка руху поїздів таку пропускну спроможність не завжди вдається реалізувати. У статті [16] розглянуто варіанти прокладання ниток графіка поїздів на обмежувальному перегоні за різних варіантів технічного оснащення суміжних перегонів – одноколіїні та двоколіїні. Встановлено, що різні варіанти прокладання ниток на графіку поїздів впливають на величину періоду графіка руху поїздів і, як наслідок, наявну пропускну спроможність одноколіїної ділянки. Для визначення пропускну спроможності реальних, нових чи реконструйованих ділянок найбільш перспективним, вважають автори, є побудова варіантних графіків руху поїздів для різних його видів, їх порівняння і вибір кращого. Таке рішення дає змогу також оцінити ефективність можливого збільшення пропускну спроможності ділянок за різних варіантів їх технічного посилення.

У роботі [17] на прикладі залізничних напрямків із тепловозною тягою, які з'єднують Україну з Польщею, досліджено ефективність їх електрифікації для підвищення пропускну спроможності. Для досягнення цієї мети в дослідженні проаналізовано ряд проєктів, за якими заплановано електрифікацію сучасних одноколіїних залізниць. За результатами розрахунків зроблено висновок, що



експлуатаційні показники залежать від технічного оснащення залізниць, на які впливають обрис поздовжнього профілю, величини ухилів, тип електровозів, маса рухомого складу тощо.

Короткий огляд наукових праць дав змогу виявити фактори, які впливають на рівень пропускної спроможності одноколієних ділянок, а також розглянути заходи для посилення потужності залізниць.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Мета роботи полягає в дослідженні умов, за яких доцільно застосування проектного рішення, що передбачає перебудову двоколієної ділянки на дві одноколієні з різною шириною колії: одна колія залишається шириною 1520 мм, другу перекладають на ширину 1435 мм.

**Основна частина дослідження.** Перебудова ділянки Мостиська-Львів (Скнилів) на дві одноколієні ділянки 1520 і 1435 мм має переваги і недоліки. Доцільність такого рішення буде залежати від конкретних умов і завдань. Дослідження виконано з використанням методів графоаналітичного моделювання. Методика

полягає в застосуванні розробленої математичної моделі для оцінювання різних сценаріїв пропускної спроможності напрямку, використовуючи графіки оволодіння перевезеннями.

**Характеристика об'єкта дослідження.** Одним із напрямків, що включений у транс'європейську транспортну мережу (TEN-T), є Балтійсько-Адріатичний коридор, що з'єднає Балтійське та Адріатичне моря, проходячи через Львів. Ділянка Львів – Мостиська – Держкордон є частиною цього коридору, що веде до Польщі, вона і є об'єктом дослідження (рис. 2).

На цьому напрямку залізничний транспорт відіграє ключову роль, має досить хороше технічне оснащення, проте це не виключає виконання робіт із реконструкції інфраструктури з метою підвищення швидкостей руху і збільшення пропускної й провізної спроможності, будівництва транспортно-логістичних термінальних комплексів, без яких мультимодальні перевезення та інтермодальні технології організувати неможливо [18].



Рис. 2. Схема ділянки Балтійсько-Адріатичного коридору  
Краків – Медика – Мостиська – Львів

Крім транзитних, коридор відіграє важливу роль і у внутрішньому сполученні, оскільки перетинає промислово розвинений регіон Сілезії з великими гірничодобувними та металургійними підприємствами.

Ділянка Львів – Мостиська-2 двоколієна, електрифікована на постійному

струмі, має довжину близько 84 км, обслуговувана Львівською дистанцією колії, забезпечує вихід до Польщі. Для обслуговування поїздів використовують електровози ЧС7 у пасажирському русі та ВЛ11 – у вантажному. На цій ділянці розташовано 11 станцій: Львів, 5 парк,

Рудний, Мшана, Затока, Городок, Родатичі, Судова Вишня, Хоросниця, Мостиська-2, Мостиська-1. Максимальну швидкість для пасажирських поїздів встановлено 120 км/год, для вантажних – 80 км/год. Маса вантажного поїзда у прямому та зворотному напрямках відповідно 5000/4500 т, пасажирського – 800 т. Довжина приймально-відправних колій 850 м, система СЦБ – автоблокування.

Аналіз гістограми (рис. 3) показує, що найбільша кількість ухилів знаходиться в діапазоні до 4 %. Їхня питома вага

становить 83,4 % загальної довжини. Керівний ухил – 8 %.

З гістограми на рис. 4 випливає, що з загальної кількості кривих – 28,1 % – питома вага кривих радіусів до 1200 м, що можуть обмежувати встановлену швидкість 120 км/год, складає 12,1 %. Характерна велика кількість обмежень за параметрами складових кривих – наявні криві радіусів більше 1000, але з короткими довжинами перехідних кривих, які також можуть обмежувати швидкість через круте відведення підвищення зовнішньої рейки.

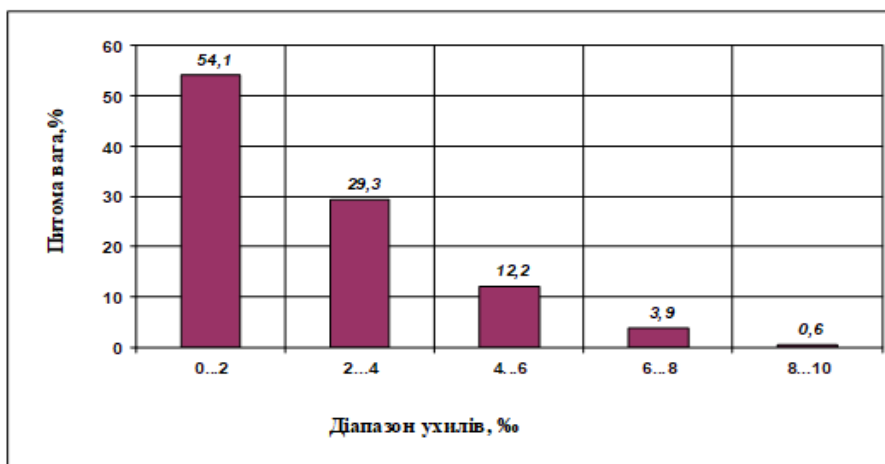


Рис. 3. Гістограма розподілу ухилів

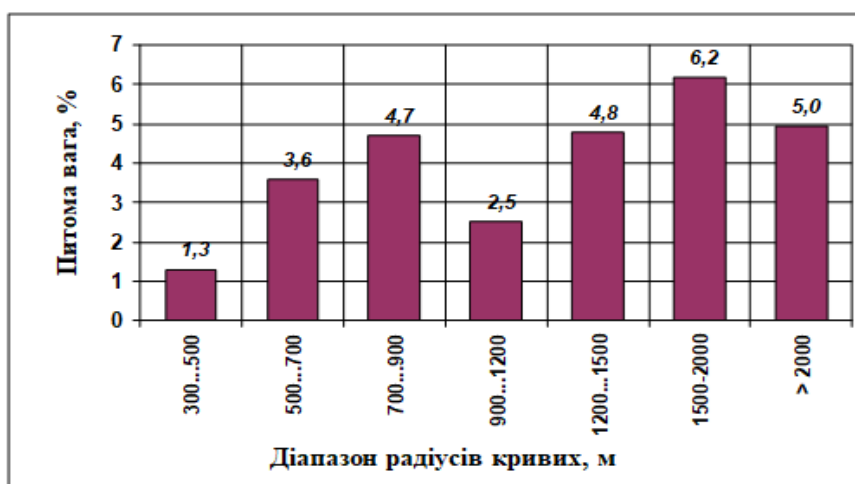


Рис. 4. Гістограма розподілу радіусів кривих

Аналіз технічного стану верхньої будови колії виконано на основі рейко-шпально-баластової карти. З аналізу наведених показників видно, що залізниця належить до IV категорії [19]. Безстикова колія укладена рейками типу Р65, новими I групи, 1 класу і старопридатними типу Р65, I групи придатності.

Загальна кількість штучних споруд на ділянці – 81 шт., із них залізобетонних мостів – 16, кам'яних труб – 8, залізобетонних труб – 8, металевих мостів – 4.

Для визначення наявної пропускної спроможності для електричної тяги (локомотив ВЛ-11м) були виконані тягові розрахунки за сертифікованою програмою «MoveRW», розробленою на кафедрі транспортної інфраструктури УДУНТ. Як вихідні дані задано параметри поздовжнього профілю та плану лінії, обмеження в кривих на роздільних пунктах та інших бар'єрних місцях, а також дані про

рухомий склад. Результати наведено в табл. 1 і на рис. 4.

Пропускную спроможність одноколіїних перегонів за парного непакетного графіка визначали в парах поїздів на добу за формулою [20]

$$N_n = \frac{(1440 - t_{техн}) \cdot \alpha_n}{T_{nn}}, \quad (1)$$

де  $T_{nn}$  – період парного непакетного графіка, хв;

$t_{техн}$  – тривалість технологічного «вікна»;  
 $\alpha_n$  – коефіцієнт надійності.

$$T_{nn} = t_x^m + t_x^o + \tau_1 + \tau_2, \text{ хв.}, \quad (2)$$

де  $t_x^m, t_x^o$  – час руху по перегону в парному і непарному напрямках з урахуванням часу на розгін і уповільнення, хв;

$\tau_1, \tau_2$  – станційні інтервали, хв.

Таблиця 1

Наявна пропускна спроможність (локомотив ВЛ11у, 4000 т)

Номер	Перегін	Довжина перегону, км	Час ходу, хв		Пропускна спроможність, пар поїздів на добу
			парний	непарний	
1	2	3	4	5	6
1	Львів – Рудно	5,50	6,7	7,5	51
2	Рудно – Мшана	10,80	9,8	10,6	40
3	Мшана – Затока	7,30	7,6	8,3	47
4	Затока – Городок	9,13	8,5	9,5	44
5	Городок – Родатичи	9,35	9,0	10,3	42
6	Родатичи – Судова Вишня	9,27	8,7	9,5	44
7	Судова Вишня – Хоросниця	8,86	8,6	9,4	44
8	Хоросниця – Мостиська-1	10,40	9,5	9,9	42
9	Мостиська-1 – Мостиська-2	7,58	9,3	8,1	45
10	Мостиська-2 – Держжордон	5,54	6,0	7,7	52

З аналізу даних табл. 1 і рис. 5 випливає, що пропускна спроможність одноколіїних ділянок складає 40-42 пари

поїздів на добу, що в три-чотири рази менше, ніж могла забезпечити двоколіїна ділянка Львів – Мостиська.



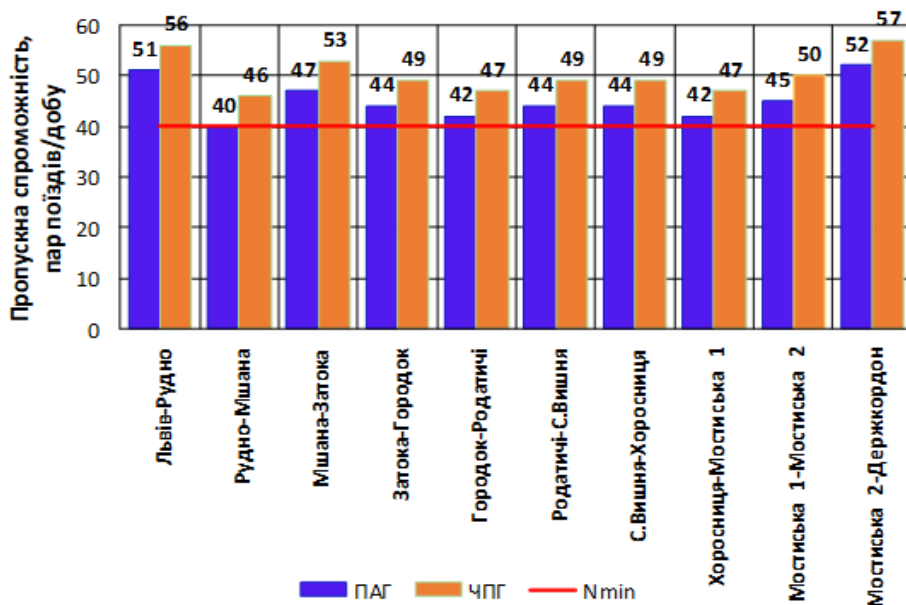


Рис. 5. Поперегінна пропускна спроможність:  
 ПАГ – паралельний графік; ЧПГ – частково-пакетний графік;  
 $N_{min}$  – мінімальна пропускна спроможність

Чи є прийнятним рішення щодо перебудови двокільної ділянки на дві одноколійні 1520 мм і 1435 мм і як на цьому напрямку можна оволодіти прогнозними обсягами перевезень?

Актуальним є питання підвищення пропускної спроможності львівського напрямку для забезпечення вантажоперевезень від «Сухого порту» до країн Європи.

У 2017 році АТ «Укрзалізниця» анонсувала створення «Сухого порту» на станції Скнилів і у 2018 було підписано меморандум про співпрацю з компанією DP World. DP World – світовий лідер у логістиці, один із найбільших світових операторів портів і логістичних комплексів. У 2019 році розроблено техніко-економічне обґрунтування проєкту, а у 2020 році проєкт затверджено наглядовою радою АТ «Укрзалізниця». Проєкт передбачає будівництво термінального комплексу зі складами, перевантажувальними майданчиками, офісними приміщеннями та іншою інфраструктурою. Площа «Сухого

порту» становитиме 35 га, пропускна спроможність – до 1 млн контейнерів на рік. За даними DP World, середня вага контейнера становить приблизно 7 т. Отже, «Сухий порт» може забезпечити перевезення до 7 млн т вантажів на рік (песимістичний прогноз).

Окрім контейнерів, «Сухий порт» може перевозити насипні (зерно, руда, вугілля), генеральні (машини, обладнання, продукти харчування), небезпечні вантажі (хімічні речовини, нафтопродукти). «Сухий порт» може бути частиною мультимодальних перевезень – залізничне й автомобільне, залізничне й морське тощо.

Очікують, що торгівля з Європою буде зростати, що призведе до збільшення попиту на перевезення (оптимістичний прогноз). Модернізація залізничної інфраструктури в Україні та Європі дасть змогу збільшити пропускну спроможність і зробити перевезення більш ефективними.

Фактори, які можуть впливати на додаткові перевезення: економічна ситуація в країні та світі, політична ситуація, вартість

перевезень, конкуренція з іншими маршрутами.

Маршрути транспортування залізничним транспортом від портів будуть залежати від ряду факторів:

– місцезнаходження порту. Чорноморські порти мають з'єднання з центральними та західними регіонами України, а також країнами Європи;

– вид і характеристики вантажу: різні види вантажів можна перевозити різними маршрутами;

– бюджет: вартість перевезення буде залежати від відстані, типу вагона та інших факторів;

– час доставлення: час у дорозі буде залежати від маршруту, типу поїзда та інших факторів.

Ось деякі з можливих маршрутів транспортування залізничним транспортом до Львова (Скнилів) від портів Чорноморськ, Южний, Азовські (після визволення України від окупації) і Дунайські порти.

«Сухий порт» у Скнилеві буде зв'язаний залізничною лінією з портом у Чорноморську. Це дасть змогу переміщати вантажі між морськими суднами і залізничними вагонами без необхідності перевалки вантажів із судна на судно.

Порт знаходиться на перетині важливих транспортних артерій, що сполучають Східну та Центральну Європу, Азію та Європу, Південь і Північ і ведуть через Індійський океан, Атлантику та Середземне море. Завдяки порту Україною налагоджено міжнародні зв'язки з понад сотнею світових країн. Чорноморський порт знаходиться у 12 милях на південний захід від Одеси на берегах Сухого лиману і належить до найбільших в Україні

Відстань від порту Чорноморський до ст. Скнилів становить близько 1000 км. Маршрут руху залізничного транспорту від порту Чорноморський до ст. Скнилів є прямим, проходить через такі міста, як Чорноморськ, Одеса, Жмеринка, Львів,

Мостиська. Тривалість поїздки становить близько 24 год.

Отже, «Сухий порт» у Скнилеві можна розглядати як логістичний термінал, який розташований всередині країни, але безпосередньо зв'язаний із морським портом. Ось як це може працювати на практиці:

1. Морське судно прибуває в порт у Чорноморську.

2. Вантажі з морського судна перевантажують у залізничні вагони.

3. Сформований вантажний поїзд прямує до «Сухого порту» близько ст. Львів.

4. Вантажі з залізничних вагонів перевантажують на інші залізничні вагони або вантажні автомобілі.

5. Вантажі доставляють до споживачів у Західній Україні.

Цей процес дає змогу уникнути витрат на перевалки вантажів із судна на судно, що може призвести до суттєвого зниження витрат на транспортування вантажів.

Переваги будівництва «Сухого порту» у Скнилеві:

– зменшення витрат на транспортування вантажів;

– підвищення ефективності логістичних процесів;

– створення нових робочих місць;

– розвиток регіональної економіки.

«Сухий порт» у Скнилеві може стати важливим логістичним хабом для заходу України і сприяти його економічному розвитку.

Проведений аналіз основ визначення пропускної спроможності залізничної інфраструктури в межах ринково-орієнтованого підходу підтверджує недосконалість сучасних методів розрахунку пропускної спроможності на залізницях України. Необхідність знання величини пропускної спроможності, більш наближеної до реальних експлуатаційних умов роботи, потребує введення додаткового поняття – практична пропускна спроможність. За таких умов потрібні

дослідження щодо методів розрахунку практичної пропускної спроможності для врахування експлуатаційної надійності системи перевезень [21], зокрема з урахуванням стану колії [22].

Слід зазначити, що остаточний перелік додаткових перевезень буде залежати від попиту на перевезення. Оскільки на сьогодні прогноз перевезень скласти практично неможливо, то в роботі зроблено

спробу розглянути різні сценарії щодо перспективних обсягів перевезень (табл. 2) за формулою

$$G_t = G_0 + \Delta G_t^n, \quad (3)$$

де  $G_0$  – початкове значення, млн т/р.;

$\Delta G_t$  – приріст, млн т/р.;

$n$  – показник сценарію.

Таблиця 2

Прогноз обсягів перевезень

Сценарій	$G_0$	$\Delta G_t$	$n$
Песимістичний	8	1,0	0,8
Реалістичний	15	1,0	1,0
Оптимістичний	22	1,0	1,2

Відповідно до формули (3) був розрахований на кожний рік вантажопотік ( $G_t$ ), визначені кількість вантажних поїздів за формулою і провізна спроможність залізничної лінії, млн т/р.:

$$n_t^e = \frac{G_t \cdot \gamma \cdot 10^6}{365 \cdot Q_{нт}}, \quad (4)$$

$$G = \frac{365 \cdot n_{вант} \cdot Q_{нт}}{\gamma \cdot 10^6}, \quad (5)$$

де  $Q_{нт}$  – середня маса поїзда нетто, т,

$$Q_{нт} = Q_{ун} \cdot \eta \cdot \mu,$$

де  $\eta = 0,70-0,74$  – коефіцієнт, що враховує тару вагонів;

$\mu = 0,80-0,90$  – коефіцієнт, що враховує структуру вантажопотоку;

$\gamma = 1,05-1,15$  – коефіцієнт нерівномірності перевезень;

$n_{вант}$  – кількість вантажних поїздів, пар поїздів за добу,

$$n_{вант} = n_{max} \cdot (1 - p) - E_{нас} \cdot n_{нас} - E_{зб} \cdot n_{зб} + n_{зб}, \quad (6)$$

де  $p$  – коефіцієнт резерву пропускної спроможності (0,15-0,20);

$E_{нас}, E_{зб}$  – коефіцієнти знімання пасажирських і збірних поїздів,  $E_{нас} = 1,3; E_{зб} = 1,5$ ;

$n_{нас}, n_{зб}$  – кількість збірних і пасажирських поїздів,  $n_t^{нас} = 0,3 \cdot t + 2,5$ ;

$n_t^{зб} = 0,1 \cdot t + 3,9$ .

Коефіцієнти знімання та інші необхідні показники були прийняті відповідно до роботи [20].

**Аналіз результатів дослідження.** За результатами тягових розрахунків встановлено, що перегони неідентичні за часом руху (рис. 5), а тому пропускна спроможність за непакетного паралельного

графіка коливається від 40 до 52 пар поїздів/добу.

За результатами розрахунків (формули (1)-(6)) побудовано графік оволодіння перевезеннями (рис. 6).

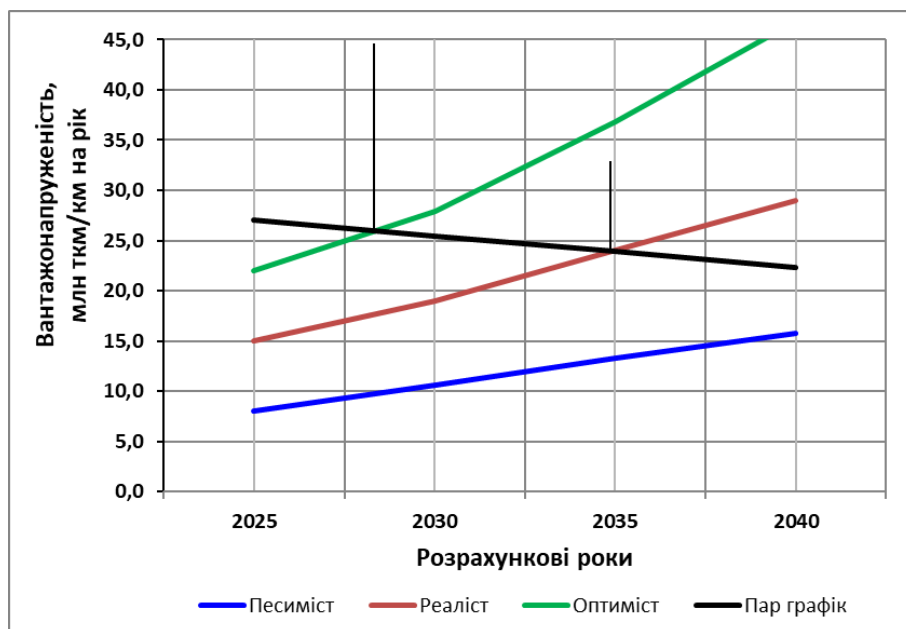


Рис. 6. Графік оволодіння перевезеннями за паралельного графіка руху поїздів

З графіка випливає, що за песимістичного прогнозу одноколіїні залізниці на напрямку Львів (Скнилів) – Мостиська забезпечують потрібні обсяги перевезень 15 млн т на 2040 рік; реалістичного прогнозу забезпечені перевезення до 2035 року, оптимістичного прогнозу – до 2027 року.

У випадку прогнозних обсягів за оптимістичним чи реалістичним сценаріями можна запропонувати організацію перевезень за частково-пакетним графіком (рис. 7).

За такої організації перевезень будуть забезпечені потрібні обсяги перевезень (реалістичний прогноз – до 2038 року, оптимістичний прогноз – до 2031 року).

**Висновки.** Напрямок Мостиська – Львів (Скнилів) перетворюється на дві одноколіїні ділянки 1520 і 1435 мм.

Пропускна спроможність знижується в тричотири рази порівняно з двоколіїним напрямком.

Проведені розрахунки й отримані результати за математичною моделлю, що враховує графік оволодіння перевезеннями, показали, що за песимістичного прогнозу обсягів перевезень до 2040 року одноколіїні залізниці на напрямку Львів (Скнилів) – Мостиська забезпечують потрібні обсяги перевезень 15 млн т на 2040 рік, за реалістичного прогнозу забезпечують перевезення до 2035 року, за оптимістичного – до 2027 року.

У випадку необхідності збільшення провізної спроможності може бути рекомендована організація руху поїздів за частково-пакетним графіком. За такої організації перевезень будуть забезпечені потрібні обсяги перевезень (реалістичний

прогноз – до 2038 року, оптимістичний – до 2031 року).

Перехід із двоколіїної ділянки Мостиська – Львів (Скнилів) на дві одноколіїні 1520 і 1435 мм має переваги і недоліки. Переваги такого рішення: економія коштів (не потрібно перебудовувати одну з колій; збереження з'єднання з країнами, які використовують колію 1520 мм; можливість організувати рух

поїздів із різною шириною колії. Недоліки: ускладнення експлуатації, оскільки потрібно мати рухомий склад і інфраструктуру під колію 1520 і 1435 мм; зниження пропускної спроможності; незручності для пасажирів при пересадці з однієї колії на іншу. Доцільність такого рішення буде залежати від конкретних умов і завдань, прогнозних обсягів перевезень.

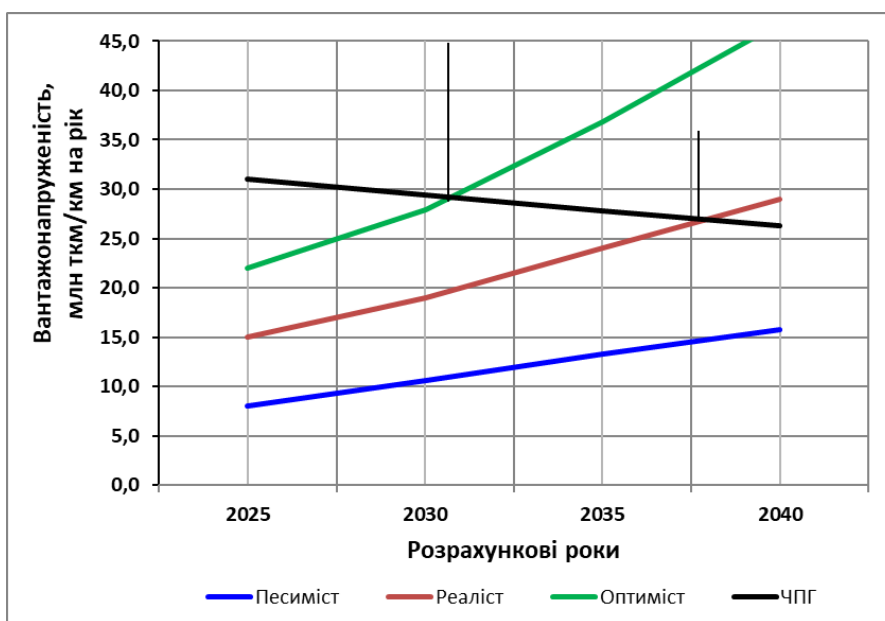


Рис. 7. Графік оволодіння перевезеннями за частково-пакетного графіка руху поїздів

### Подяка

Дослідження, результати яких викладені в цій статті, проводили за підтримки гранта Національного фонду досліджень України під час реалізації проєкту «Наукове обґрунтування впровадження європейської колії на території України в повоєнний період» (реєстраційний номер проєкту 2022.01/0021), який було отримано в рамках конкурсу «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди».

### Список використаних джерел

1. Євросоюз розробив стратегію переходу України на євроколію: карта. URL: <https://biz.liga.net/ua/all/transport/novosti/evrosoyuz-razrabotal-strategiyu-perehoda-ukrainy-na-evroputi-karta> (дата звернення 02.10.2024).
2. На Львівщині збудують залізничну колію за європейським стандартом. URL: <https://forpost.lviv.ua/novyny/43414-na-lvivshchyni-zbuduiut-zaliznychnu-koliiu-za-ievropeiskym-standartom> (дата звернення 02.10.2024).

3. Польський СРК та «Укрзалізниця» спільно працюватимуть над будівництвом високошвидкісної залізниці. URL: [https://cfts.org.ua/news/2023/01/19/polskiy\\_cpk\\_ta\\_ukrzaliznitsya\\_spilno\\_pratsyuvatimut\\_nad\\_budivnitstvo\\_visokoshvidkisno\\_zaliznitsi\\_73421](https://cfts.org.ua/news/2023/01/19/polskiy_cpk_ta_ukrzaliznitsya_spilno_pratsyuvatimut_nad_budivnitstvo_visokoshvidkisno_zaliznitsi_73421) (дата звернення 02.10.2024).
4. Pouryousef H., Lautala P., White T. Railroad capacity tools and methodologies in the U.S. and Europe. *J. Mod. Transport*. 2015. Vol. 23(1). P. 30-42. URL: <https://doi.org/10.1007/s40534-015-0069-z>.
5. Bulíček J., Nachtigall P., Široký J., Tischer E. Improving single-track railway line capacity using extended station switch point area *Journal of Rail Transport. Planning & Management*. 2022. Vol. 24. 100354. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2022.100354>.
6. Široký J., Nachtigall P., Gašparík J., Čáp J. Calculation Model of Railway Capacity Price in the Czech Republic. *Promet-Traffic & Transportation*. 2021. Vol. 33(1). P. 91-102. URL: <https://doi.org/10.7307/ptt.v33i1.3544>.
7. Shih M.-C., Dick C. T., Sogin S. L., Barkan C. P. L. Comparison of Capacity Expansion Strategies for Single-Track Railway Lines with Sparse Sidings. *Transportation Research Record*. 2014. Vol. 2448. P. 53–61. URL: <https://doi.org/10.3141/2448-07>.
8. Kinfe S. Capacity estimation of new single track stations : Master thesis November 2012 Division of Transportation and Logistics KTH Railway Group. : Stockholm, Sweden. 2012. 78 p. URL: [https://www.kth.se/polopoly\\_fs/1.491061.1550157598!/X12\\_036\\_report.pdf](https://www.kth.se/polopoly_fs/1.491061.1550157598!/X12_036_report.pdf) (дата звернення 02.10.2024).
9. Sogin S. L., Lai Y-C (Rex), Dick C. T. Barkan C. P. Analyzing the transition from single- to double-track railway lines with nonlinear regression analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2016. Vol. 230(8). P. 1877-1889. URL: <https://doi.org/10.1177/0954409715616998>.
10. D'Acierno L., Napolitano M., De Matteis L., D'Avino M., D'Avanzo S., Botte M. The Adoption of the HD-ERTMS for Improving the Capacity of Single-Track Railway Lines. 2023 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2023 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Madrid, Spain. 2023. P. 1-4. URL: <https://doi.org/10.1109/EEEIC/ICPSEurope57605.2023.10194602>.
11. Bulková Z., Gašparík J., Mašek J., Zitrický V. Analytical Procedures for the Evaluation of Infrastructural Measures for Increasing the Capacity of Railway Lines. *Sustainability*. 2022. Vol. 14(21). 14430. URL: <https://doi.org/10.3390/su142114430>.
12. Line capacity and train capacity for future rail freight corridors. KTH, Stockholm, 2017. 75 p. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1651030/FULLTEXT01.pdf> (дата звернення 02.10.2024).
13. Ricci S., Eupták V., Chovancová M. Baseline Model to Increase Railway Infrastructure Capacity on a Single-Track Section: a Case Study. *LOGI – Scientific Journal on Transport and Logistics*. 2017. Vol. 8(2). P. 69-80. URL: <https://doi.org/10.1515/logi-2017-0018> (дата звернення 02.10.2024).
14. Козаченко Д. М., Папахов О. Ю., Логвінова Н. О. Пропускна та провізна спроможність залізниць: навч. посіб. для студ. ВНЗ. Дніпро: Дніпропетр. нац. ун-т залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2017. 108 с.
15. Козаченко Д. М., Малашкін В. В., Березовий О. Л., Іскра О. Л. Дослідження пропускної та провізної спроможності залізничної інфраструктури гірничо-збагачувального комбінату в умовах збільшення обсягів перевезення сировини. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2020. Вип. 20. С. 86-93.

16. Березовий М. І., Шепета, А. М., Малашкін, В. В. Теоретичні основи визначення пропускної здатності одноколіїних ділянок. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2015. № (8). С. 13–19. URL: <https://doi.org/10.15802/tstt2014/38078>.
17. Курган М. Б., Хмелевська Н. П., Байдак С. Ю. Дослідження ефективності електрифікації одноколіїних залізниць для підвищення пропускної спроможності. *Електрифікація транспорту*. 2015. № 9. С. 44-49. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/eltr\\_2015\\_9\\_8](http://nbuv.gov.ua/UJRN/eltr_2015_9_8).
18. Курган М. Б., Курган Д. М. Науково-технічне забезпечення залізничного сполучення Україна – Євросоюз : монографія. Дніпро: Дніпропетр. нац. ун-т залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна; Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2018. 268 с.
19. ДБН В.2.3-019:2018. Державні будівельні норми України. Споруди транспорту. Залізничні колії 1520 мм. Норми проектування. Київ: Мінрегіонбуд, 2008. 126 с
20. Інструкція з розрахунку наявної пропускної спроможності залізниць України ЦД-0036: затв. наказом Укрзалізничці від 14 березня 2001 р. № 143/Ц. Київ: Мін-во трансп. та зв'язку України, 2002. 376 с.
21. Прохорченко А. В. Проблеми розрахунку пропускної спроможності залізничної інфраструктури в умовах ринкових відносин. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2014. № 4. С. 36-41.
22. Потапов Д. О., Вітольберг В. Г., Чесак С. С. Аналітичний огляд сучасних методів оцінювання стану залізничної колії. *Збірник наукових праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2024. Вип. 207. С. 76-89. URL: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.207.2024.301999>.
- 

Курган Микола Борисович, доктор технічних наук, професор кафедри транспортної інфраструктури, Український державний університет науки і технологій. ORCID iD: 0000-0002-8182-7709. Тел.: +38 (056) 373-15-48. E-mail: [m.b.kurhan@ust.edu.ua](mailto:m.b.kurhan@ust.edu.ua).

Курган Дмитро Миколайович, доктор технічних наук, професор кафедри транспортної інфраструктури, Український державний університет науки і технологій. ORCID iD: 0000-0002-9448-5269. Тел.: +38 (056) 373-15-42. E-mail: [d.m.kurhan@ust.edu.ua](mailto:d.m.kurhan@ust.edu.ua).

Байдак Сергій Юрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортної інфраструктури, Український державний університет науки і технологій. ORCID iD: 0000-0002-7909-8527. Тел.: +38 (056) 373-15-48. E-mail: [s.y.baidak@ust.edu.ua](mailto:s.y.baidak@ust.edu.ua).

Новік Руслан Борисович, старший викладач кафедри військової підготовки спеціалістів Держспецтрансслужби, Український державний університет науки і технологій. ORCID iD: 0000-0002-2571-6641. Тел.: +38 (056) 373-15-48. E-mail: [r.b.novik@ust.edu.ua](mailto:r.b.novik@ust.edu.ua).

Хмелевська Неля Петрівна, аспірантка кафедри транспортної інфраструктури, Український державний університет науки і технологій. ORCID iD: 0000-0002-2360-8671. Тел.: +38 (056) 373-15-48. E-mail: [n.p.hmelevska@ust.edu.ua](mailto:n.p.hmelevska@ust.edu.ua).

Kurhan Mykola, Dr. Sc. (Tech.), full professor, Department Transport Infrastructure, Ukrainian State University of Science and Technologies. ORCID iD: 0000-0002-8182-7709. Tel.: +38 (056) 373-15-48. E-mail: [m.b.kurhan@ust.edu.ua](mailto:m.b.kurhan@ust.edu.ua).

Kurhan Dmytro, Dr. Sc. (Tech.), full professor, Department Transport Infrastructure, Ukrainian State University of Science and Technologies. ORCID iD: 0000-0002-9448-5269. E-mail: [d.m.kurhan@ust.edu.ua](mailto:d.m.kurhan@ust.edu.ua).

Baidak Serhii, PhD (Tech). Associate Professor, Department Transport Infrastructure, Ukrainian State University of Science and Technologies. ORCID iD: 0000-0002-7909-8527. E-mail: [s.y.baidak@ust.edu.ua](mailto:s.y.baidak@ust.edu.ua).

Novik Ruslan, Senior Lecturer, Department of Military Training of Specialists of the State Special Transport Service, Ukrainian State University of Science and Technologies. ORCID iD: 0000-0002-2571-6641. E-mail: [r.b.novik@ust.edu.ua](mailto:r.b.novik@ust.edu.ua).

Khmelevska Nela, postgraduate student, Department Transport Infrastructure, Ukrainian State University of Science and Technologies. ORCID iD: 0000-0002-2360-8671. E-mail: [n.p.hmelevska@ust.edu.ua](mailto:n.p.hmelevska@ust.edu.ua).

Статтю отримано 04.10.2024 р.

## ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)

---

УДК 656.330.12

### ОРГАНІЗАЦІЯ ПРОТИДІЙ НЕГАТИВНОМУ НАСЛІДКУ ВПЛИВУ РИЗИКІВ У ЛОГІСТИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМАХ

Канд. екон. наук Н. В. Гриценко, д-р екон. наук Н. Г. Панченко

### ORGANIZATION OF COUNTERMEASURES AGAINST THE NEGATIVE IMPACT OF RISKS IN LOGISTICS TRANSPORT SYSTEMS

Phd (Ekon) N. V. Hrytsenko, Doctor of Econ. Sciences N. G. Panchenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.209.2024.314337>

**Анотація.** Стаття присвячена питанню ефективного ухвалення управлінських рішень при організації протидії негативним наслідкам впливу ризиків у логістичних транспортних системах. У контексті нестабільності нинішніх економічно-політичних умов нашої країни це питання стає все більш актуальним. Ураховуючи притаманні ризики як зовнішнього, так і внутрішнього характеру, пов'язані з логістикою і транспортними системами, вирішення цього питання стає необхідним. За таких умов ці ризики поділяють на дві категорії: внутрішні, присутні на всіх етапах ланцюжка постачання-виробництво-продаж, і зовнішні ризики, на які впливає навколишнє середовище. У дослідженні було сформовано фундаментальні характеристики процесу управління ризиками і розроблено комплекс управлінських заходів зниження транспортних ризиків для логістичних транспортних систем. Результатами цього дослідження є системний підхід до управління ризиками логістичної транспортної системи.

**Ключові слова:** ризики, транспортні системи, управління ризиками, транспортно-логістична система, аналіз ризиків.

**Abstract.** The article is devoted to the issue of effective management decision-making in the organization of counteracting the negative consequences of the impact of risks in logistics transport systems. The purpose of the article is to identify risks in the logistics transport system and provide adaptive information on risk management strategies and recommendations. Modernization of the management mechanism based on risk management tools is relevant to ensure the efficiency and reliability of the logistics transport system at all its levels. The study established the fundamental characteristics of the risk management process and developed a set of management measures to reduce transport risks for logistics transport systems. This set of measures significantly affects the reduction of the negative impact of risks on each of the components of the transport and logistics system at different levels of management and is the basis for the integration of management methods, models and tools into a single mechanism, which is a systematic approach to risk management of the logistics transport system. The results of this study create a comprehensive basis for risk management of the logistics transport system. The results of this study indicate that the proposed systematic approach to risk management of the logistics transport system can be defined as an integrated management of business processes related to the promotion of products and the corresponding flows from their source to the final consumer. The effectiveness of this approach has been demonstrated in achieving optimal efficiency of transport enterprises. In the light of the above considerations, the



*implementation of this systemic approach serves to create an appropriate organizational basis for the implementation of countermeasures against the negative consequences of the impact of risks in logistics transport systems. In essence, it is a risk management tool.*

**Keywords:** risks, transport systems, risk management, transport and logistics system, risk analysis.

**Вступ.** Логістична транспортна система охоплює безліч різних процесів, починаючи від руху товарів у ринковому просторі і закінчуючи їх транспортуванням. На ці процеси впливає низка факторів ризику, які впливають на їхню загальну функціональність. Відомо, що управління ризиками – це процес виявлення та оцінювання потенційних небезпек у логістиці підприємств [2]. У сфері транспортної логістики керівники повинні вміти оцінювати вплив різних факторів ризику на результати діяльності логістичних транспортних систем і ухвалювати зважені рішення про захист від ризиків і вживати заходів для пом'якшення ризиків. Тобто керівник має бути обізнаним у секторі управління ризиками та в ланцюгах доставлення, а також володіти певними знаннями з аналізу ризиків для їх мінімізації та запобігання наслідкам від них. Логістичні транспортні системи мають вагомий вплив на економіку країни, і тому вкрай необхідною є їхня безперешкодна робота, а отже, це наукове дослідження щодо напряму організації протидії негативним наслідкам впливу ризиків у логістичних транспортних системах є актуальним. Для забезпечення ефективної роботи будь-якого транспортного підприємства, як і економічної системи в цілому, необхідна наявність ефективної системи управління ризиками, особливо виявлення і надання адаптивної інформації про стратегію і рекомендації з управління ризиками. Така система міститиме низку управлінських дій інтегрованого характеру, спрямованих на виявлення, аналіз і регулювання ризиків у розрізі конкретного об'єкта. Основне призначення такої системи – забезпечення максимальної ефективності управління ризиками для організації

протидії негативним наслідкам впливу ризиків у логістичних транспортних системах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питаннями та вирішенням основних завдань щодо організації протидії наслідкам впливу ризиків у логістичних транспортних системах займалися такі вчені, як Бродецький Г. Л., Бутов А. М., Дейнека О. Г. Загорна Т. О., Коніщева Н. Й., Кондратенко Н. О., Короткий Ю. В., Кривов'язюк І. В., Мамчин М. М., Шостак Л. В., і багато інших науковців, однак, урахувавши безліч особливостей сучасних ризиків, які впливають на ухвалення ефективних управлінських рішень у роботі логістичних транспортних систем, питання організації протидії цим ризикам на сьогодні так і залишається відкритим. Тому ця стаття присвячена системному підходу до управління ризиками логістичної транспортної системи і питанням ухвалення ефективних управлінських рішень з урахуванням протидії негативним наслідкам впливу ризиків у логістичній транспортній системі.

**Визначення мети та завдання дослідження** полягає у вивченні системи управління ризиками, пропонуванні гнучкої стратегії та розробленні системного підходу до управління ризиками логістичної транспортної системи.

**Основна частина дослідження.** Модернізація механізму управління на основі інструментів управління ризиками є актуальною для забезпечення ефективності та надійності логістичної транспортної системи на всіх її рівнях. Це комплекс управлінських рішень, спрямованих на своєчасну ідентифікацію самих ризиків, факторів ризику та негативного впливу цих факторів, для зменшення їхнього впливу на

систему як нині, так і в майбутньому. Виходячи з цього, слід виокремити певні впровадження технології управління ризиками в діяльності логістичної

транспортної системи. Основу для управління ризиками створюють фундаментальні характеристики процесу управління ризиками (рис. 1).

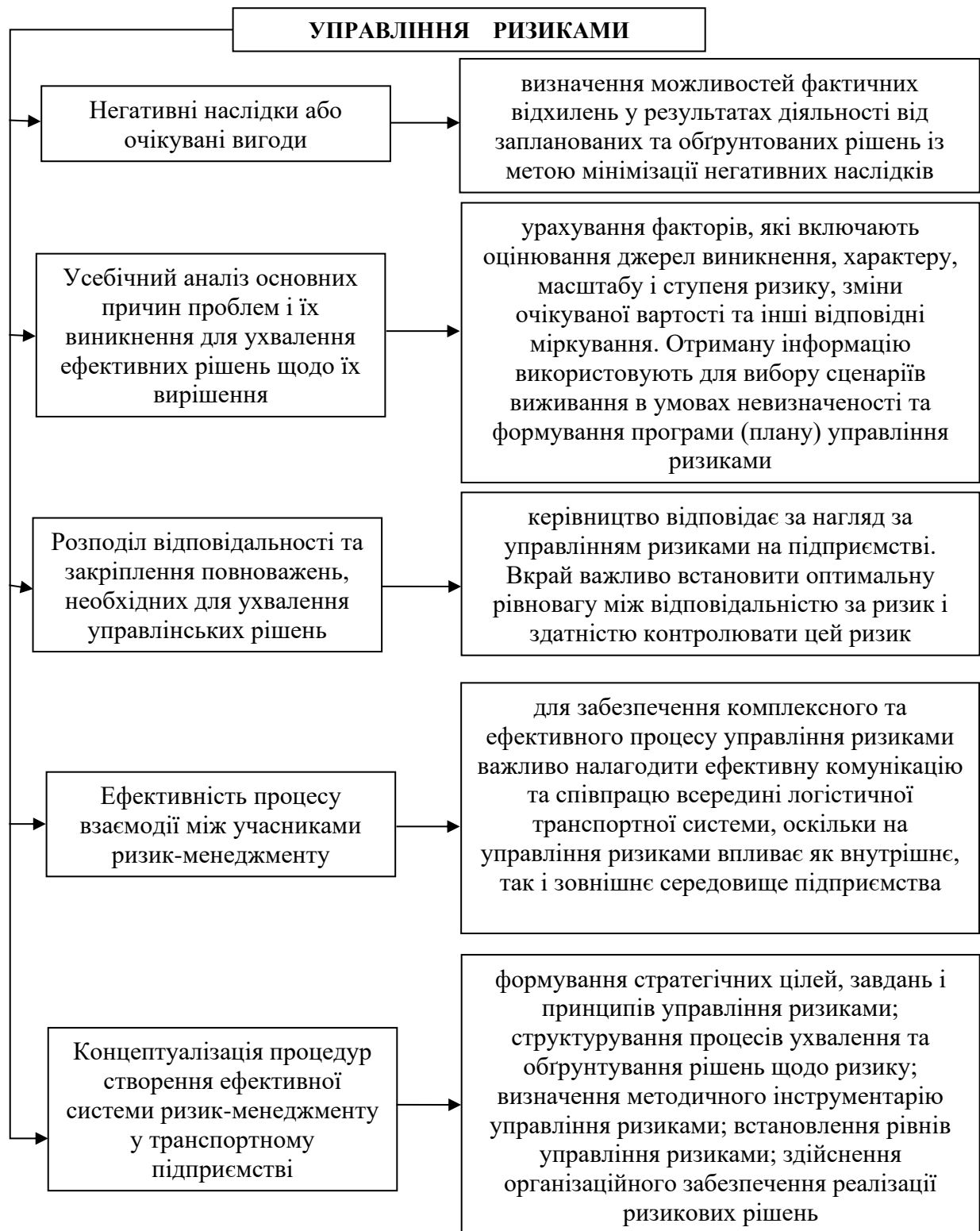


Рис. 1. Фундаментальні характеристики процесу управління ризиками [2, 4, 6]

Організована система, яка охоплює сукупність процедур і технологій, що дають змогу ідентифікувати, аналізувати та оцінювати ризики, і є системою управління ризиками. Ефективне впровадження такої системи на підприємстві сприятиме більш структурованому та ефективному підходу до управління логістичними транспортними системами. Координування відповідно до мети і політики транспортного підприємства підвищить гнучкість і адаптивність діяльності транспортного підприємства, мінімізуючи його ризики.

За теорією ризику, будь-які розробки, особливо інноваційні, передбачають певну кількість специфічних особливостей. Отже, щоб досягти успіху на сучасному транспортному ринку, необхідно постійно впроваджувати нові технології та йти на ризики. Звичайно, такий підхід неминуче підвищує рівень ризику, але він є необхідною частиною збереження конкурентоспроможності транспортних логістичних систем. Це означає, що керівник або підприємець, або менеджер не повинен уникати ризику, а радше вміти оцінювати його ступінь і ефективно ним управляти. Управління ризиками є невід'ємною складовою стратегічного підходу до сприяння своєчасному виявленню потенційних факторів, які можуть спричинити виникнення несприятливих тенденцій у функціонуванні логістичної транспортної системи.

Для проектування системи управління ризиками логістичних транспортних систем необхідно почати з синтезу ризиків для кожної складової логістики, включаючи закупівлю (постачання), виробництво, транспорт, збут, склад, та обґрунтувати варіанти управлінських рішень щодо відмінностей в управлінні, які у свою чергу мають бути підпорядковані основній меті управління ризиками – зменшенню негативного впливу ризиків.

На операційному рівні управління ризиками розробляють рішення, які потребують негайного впровадження

відповідно до основних логістичних ризиків (для кожного з них), раніше виділені для кожної підсистеми. Тактичний рівень управління є узагальненням оперативного рівня рішень, що сприяє їх посиленню та узагальненню. Стратегічний рівень управління складається з рішень, планованих до реалізації, і є складовою загальної системи управління ризиками логістичних транспортних підприємств.

Підсистема управління ризиками постачальників визначила ці ризики як такі, що викликають особливе занепокоєння для досліджуваних транспортних підприємств:

- втрата матеріальних ресурсів;
- невіправдане підвищення цін;
- порушення графіків часу доставлення;
- погіршення якості послуг;
- невиконання договорів із вантажовласниками.

Виходячи з цього необхідно розглянути набір управлінських заходів щодо зниження витрат на постачання (рис. 2).

Формулювання логістичної стратегії є складним і тривалим процесом. У деяких випадках може бути недостатньо інформації, наприклад, про наявність сировини або транспортних засобів для доставлення замовлень.

Слід зазначити, що за стратегії управління ризиками необхідно приділяти значну увагу активному застосуванню новітніх технологій, маркетинговому дослідженню ринку, підвищувати якість планування роботи транспортної системи для раціонального використання потужностей системи і, головне, забезпечити безперебійний логістичний транспортний процес. Однак такі виклики часто спонукають до впровадження інноваційних методів доставлення, ідентифікації постачальників, формування замовлень і їх виготовлення з орієнтацією на потреби споживачів. Зрештою, ефективність логістичної транспортної системи має значний вплив на майбутнє всієї країни.



Рис. 2. Система стратегії управління ризиками [3, 5]

Дослідження підтверджують, що на сьогодні в управлінні транспортними ризиками особливої уваги потребують такі ризики:

- збільшення часу на транспортування;
- втрати або пошкодження товару при транспортуванні;
- збільшення ціни на паливе, а відтак, і транспортні послуги;
- помилки у виборі виду транспорту;
- неправильна організації процесу транспортування.

Звичайно, будь-яке підприємство стикається з певними ризиками у своєму функціонуванні, і транспортна система не є виключенням. Системи закупівель, виробництва, збуту, обслуговування та безпосередньо функціонування

транспортної діяльності – усі ці дії можуть бути ризикованими. Отже, формулювання стратегії управління логістикою для транспортної системи забезпечує комплексний і детальний огляд основних процесів діяльності та їхніх оптимальних конфігурацій.

Слід визнати, що формулювання стратегії управління ризиками логістики транспортних систем у сучасному контексті потребує розгляду безлічі викликів і обмежень.

На нашу думку, виходячи з проведеного аналізу ризиків, доцільно буде використовувати саме такий комплекс управлінських заходів зниження нинішніх транспортних ризиків для логістичних транспортних систем, як показано на рис. 3.



Рис. 3. Комплекс управлінських заходів зі зниження транспортних ризиків для логістичних транспортних систем [2, 4]

Цей комплекс заходів дуже знижує негативний вплив ризиків на кожен зі складових транспортно-логістичної системи на різних рівнях управління та слугує основою для інтеграції методів, моделей та інструментів управління в єдиний механізм, який являє собою системний підхід до управління ризиками логістичної транспортної системи. Такий підхід доречний для системно-функційного дослідницького визначення кожного компонента логістичної транспортної системи як окремих керівних підсистем, а також функційних зв'язків між ними та зовнішнім середовищем (рис. 4).

Метою управління ризиками логістичної транспортної системи є впровадження ефективних методів зниження ризиків, оцінювання їхньої ефективності та встановлення комплексу заходів для забезпечення неприпустимості виникнення ризику або мінімізації його

негативних наслідків у майбутньому. Цей системний підхід об'єднує взаємозв'язок методів управління ризиками для логістичної транспортної системи, подані критерії розподілу ризиків і можливі стратегії. Такий системний підхід дає змогу охопити об'єкт, суб'єкт і механізм, а також принципи та інструменти управління ризиками. Це забезпечує зручність при врахуванні особливостей виникнення різних видів ризиків.

Управління ризиками логістичної транспортної системи передбачає використання методів уникнення або зменшення ризику. Ці методи оцінюють, щоб переконатися, що вони працюють. Критерії розподілу ризиків і стратегії використовують разом, щоб це сталося. Цей системний підхід охоплює всі аспекти управління ризиками, полегшуючи розгляд різних типів ризиків.



Рис. 4. Системний підхід до управління ризиками логістичної транспортної системи [2, 3, 5]

За допомогою системного підходу до управління ризиками логістичної транспортної системи є можливість врахувати та скорегувати негативні наслідки непередбачуваної ситуації, яка може виникнути в будь-якому з елементів транспортного ланцюга. У результаті є потенційна можливість значно зменшити негативний вплив на діяльність логістичної транспортної системи або взагалі уникнути його. Практичне застосування системного підходу в логістичних транспортних системах дає можливість вчасно організувати протидію негативним наслідкам впливу ризиків, що підтверджує виконання мети і завдання цього дослідження і з урахуванням сучасних реалій нашого життя, які впливають на економіку країни, і політичної ситуації, яка склалася, роблять питання управління ризиками актуальними.

Системний підхід до управління ризиками логістичної транспортної системи дає змогу повніше зрозуміти потенційні ризики як на мікро-, так і макрорівнях.

Застосування транспортно-логістичною системою рекомендованих підходів управління ризиками сприятиме підвищенню ефективності на операційному рівні управління її діяльністю і сприятиме забезпеченню основи для відповідних управлінських рішень щодо ідентифікації, аналізу та оцінювання ризиків. Відповідно ці рішення ґрунтуються на визначенні заходів, спрямованих на зменшення негативного впливу цих ризиків.

Незважаючи на такий підхід, який є традиційним, у сучасних реаліях виникає потреба в більш інноваційних підходах, так званих логістичних бізнес-підходах. Логістичний бізнес-процес є комплексом операцій і функцій, які перетворюють початкові ресурси підприємства в результат, який відповідає стратегіям логістичного транспортного підприємства.

Системний підхід управління ризиками в логістичній транспортній системі є виявленням поточного стану, аналізом ризиків, які безпосередньо

впливають на її функціонування, виявленням «слабких місць». На основі цього аналізу розробляють комплексні управлінські рішення, спрямовані на зміну системи управління транспортною системою шляхом використання конкурентних переваг транспортного підприємства за кожною складовою. Це передбачатиме оптимізацію функцій логістичних бізнес-процесів, які взаємопов'язані та реалізують рух матеріальних потоків.

**Висновки.** Отже, системний підхід до управління ризиками логістичної транспортної системи можна визначити як інтегроване управління бізнес-процесами просування продукції та супутніх потоків від її джерела до кінцевого споживача з метою досягнення максимальної ефективності діяльності підприємства. Спираючись на такий підхід, ми отримуємо відповідну організацію протидій негативному наслідку впливу ризиків у логістичних транспортних системах. По суті це є інструментом ризик-менеджменту.

Управління ризиками в логістичних транспортних системах передбачає використання процесів системного підходу, у тому числі зворотної логістики, що спричиняє розпізнавання та реєстрацію всіх переміщень, що підтверджує доцільність застосування системного підходу до логістичних транспортних бізнес-процесів і дає можливість отримати найліпші результати ефективності роботи транспортного підприємства. У результаті отримуємо підвищення конкурентних переваг, що призведе до економічного ефекту, який буде застосовано до кожного елемента транспортно-логістичної системи, і усуне виявлені труднощі.

Оцінювання ефективності наявних логістичних бізнес-процесів дасть змогу виявити напрями вдосконалення, а системний підхід до управління ризиками в логістичній транспортній системі буде застосовано для корегування організаційної структури транспортної компанії та її логістичної системи. Це призведе до

високого рівня ефективності та надійності логістичної транспортної системи, а також

підвищення рівня ефективності та надійності відносно конкурентів.

### Список використаних джерел

1. Бутов А. М. Перспективи використання логістичних стратегій для забезпечення конкурентоспроможності підприємства. *Економічний аналіз: зб. наук. праць / Тернопільський національний економічний університет*. Тернопіль: Видавничо-поліграфічний центр Тернопільського національного економічного університету «Економічна думка», 2013. Т. 14. № 2. С. 124–131.
2. Гришко В. В., Гунченко М. В. Системний аналіз ризиків у логістичній діяльності промислового підприємства. *Науковий вісник Міжнародного гуманітарного університету. Серія: Економіка і менеджмент*. 2016. Вип. 17. С. 54–58.
3. Дейнека О. Г. Транспортна логістика в умовах реформування залізничного транспорту. *Маркетинг і логістика в системі менеджменту пасажирських перевезень на залізничному транспорті : матеріали III Міжнар. наук.-практ. конф.* Київ : ДАЗТУ, 2012. С. 62.
4. Загорна Т. О., Ткачова А. В. Управління ризиками в логістичній системі підприємства. *Економіка Крима*. 2019. № 27. С. 89–93.
5. Коніщева Н. Й., Трушкіна Н. М. Управління логістичною діяльністю промислових підприємств. *Економіка промисловості*. 2015. № 1. С. 114–123.
6. Кондратенко Н. О., Лобашов О. О. Інструменти управління та методи оцінки ризиків у логістичних системах. *Комунальне господарство міст*. 2012. № 102. С. 343–350.
7. Короткий Ю. В. Оцінка логістичних ризиків машинобудівного підприємства. *Економічні науки. Серія: Облік і фінанси*. 2014. № 11 (2). С. 159–167.
8. Кривов'язюк І. В., Кулик Ю. М. Невизначеність і ризик як фактори зниження рівня надійності логістичних систем. *Економічні науки. Серія: Економіка та менеджмент*. 2021. № 8 (26). С. 166–181.
9. Мамчин М. М., Русановська О. А. Вплив логістичних ризиків на підвищення ефективності діяльності підприємств. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2022. № 720. С. 45–51.
10. Шостак Л. В. Формування логістичного потенціалу підприємства. *Вісник Одеського національного університету*. 2015. Т. 20. Вип. 4. С. 151–154.

Гриценко Наталя Валеріївна, кандидат економічних наук, доцент кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2901-1411>. Тел.: +38(050)-582-44-32. E-mail: [gritsenkonatal@gmail.com](mailto:gritsenkonatal@gmail.com).

Панченко Наталя Георгіївна, доктор економічних наук, професор кафедри вищої математики та фізики, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2195-202X>. E-mail: [math@kart.edu.ua](mailto:math@kart.edu.ua).

Hrytsenko Natalya Valeriivna PhD (Tech). Associate Professor, department of transport systems and logistics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2901-1411>. Tel.: +38(050)-582-44-32. E-mail: [gritsenkonatal@gmail.com](mailto:gritsenkonatal@gmail.com).

Panchenko N.G., Professor of "Higher Mathematics and Physics" department, Doctor of Econ. Sciences, Professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2195-202X>. E-mail: [math@kart.edu.ua](mailto:math@kart.edu.ua).

Статтю прийнято 19.09.2024 р.



