

УДК 629.4.014.1

DOI: 10.47675/2304-6309-2023-26-7-23

О.М. Сафронов

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходько 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна
Телефон: (05366) 6-03-24, E-mail: safronov.am84@gmail.com
ORCID 0000-0002-5865-7751

Ю.Я. Водянніков

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька 33, м. Кременчук, Полтавської обл., 39621, Україна
Телефон: +38 (05366) 6-20-43, E-mail: office@ukrndiv.com.ua
ORCID 0000-0002-6111-7128

А.О. Сулим

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна
Телефон: (05366) 6-03-54, E-mail: sulim1.ua@gmail.com
ORCID 0000-0001-8144-8971

О.М. Багров

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна
Телефон: (05366) 6-11-80, E-mail: anbagrov@meta.ua
ORCID 0000-0002-8984-7595

ОЦІНКА ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ЗАЛІЗНИЧНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

В цій статті розглянуто наявні критерії оцінки залишкового ресурсу залізничного рухомого складу. Залишковий ресурс залізничного рухомого складу можливо визначати за такими критеріями: за досягненням напруження межі пластичності матеріалу, за межею витривалості, за накопиченими пошкодженнями під час дії ударних навантажень. Перший критерій застосовується за низької корозійної стійкості матеріалу залізничного рухомого складу та обумовлений впливом як атмосферних опадів, так і агресивних середовищ. Другий критерій застосовується для визначення довговічності конструкції та характеризується коефіцієнтом запасу втоми. Третій критерій використовується для підтвердження заданого продовження строку служби залізничного рухомого складу. Проаналізовано методології, а також розрахункові залежності під час визначення залишкового ресурсу залізничного рухомого складу для кожного із розглянутих критеріїв оцінки. Наведено приклад оцінки залишкового ресурсу вагона-цистерни моделі 15-1404 за накопиченими пошкодженнями під час дії позовжених ударних навантажень.

© Сафронов О.М., Водянніков Ю.Я., Сулим А.О., Багров О.М., 2023

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Викладений матеріал в цій статті сприятиме удосконаленню процедури продовження строку експлуатації залізничного рухомого складу шляхом формування комплексного підходу до оцінки його залишкового ресурсу, що в цілому дозволить підвищити безпеку перевезень на залізничному транспорті.

Ключові слова: залізничний рухомий склад, залишковий ресурс, коефіцієнт опору втоми, корозія, ударні навантаження.

Вступ та постановка проблеми. У зв'язку з обмеженим придбанням АТ «Укрзалізниця» нового залізничного рухомого складу за останні роки відбулось значне старіння експлуатаційного парку. Для недопущення різкого зменшення експлуатаційного парку залізничної техніки та стабільного забезпечення залізничних перевезень за умов дотримання необхідного рівня їх безпеки відбувається продовження строку служби залізничного рухомого складу замість списання. Продовження строку служби залізничного рухомого складу виконується за результатами оцінки його залишкового ресурсу

Оцінка залишкового ресурсу залізничного рухомого складу включає комплекс робіт, що охоплює обстеження технічного стану їх металоконструкцій (технічне діагностування) та проведення контрольних випробувань кузовів, рам і надресорних балок візків, та дозволяє зробити обґрунтування продовження його строку служби після виконання рекомендованого обсягу ремонтних робіт.

Аналіз останніх досліджень. Оцінка залишкового ресурсу залізничного рухомого складу з метою продовження строку служби залежно від його типу виконують відповідно до вимог [1–5] або інших затверджених нормативних документів установленим порядком.

Останнім часом питання продовження строку експлуатації залізничного рухомого складу понад призначений заводом-виробником розглядалось в роботах Мямліна С.В. [6, 7], Сапронової С.Ю., Ткаченка В.П. [8–10], Єжова Ю.В., Павленка Ю.С. [11–13], Мартинова І.Е. [14, 15], Фоміна О.В., Прокопенка П.М. [16, 17], Кари С.В., Леонця В.А., Петренка В.О. [18, 19].

В роботах Мямліна С.В. [6, 7] виконано оцінку залишкового ресурсу пасажирських вагонів, у тому числі із наявними осередками корозії хребтової балки. Роботи Сапронової С.Ю. та Ткаченка В.П. [8–10] направлені на дослідження залишкового ресурсу вантажних та пасажирських вагонів, у тому числі спеціального рухомого складу. Дослідження Єжова Ю.В. та Павленка Ю.С. [11–13] присвячено удосконаленню діючої системи продовження строку експлуатації пасажирських вагонів та дослідженню технічного стану несних металоконструкцій кузовів вагонів метрополітену. В статтях Мартинова І.Е. [14, 15] наведено аналіз технічного стану пасажирських вагонів та їх рам. Дослідження Фоміна О.В. та Прокопенка П.М. [16, 17] направлені на оцінку залишкового ресурсу вантажних вагонів. Роботи Кари С.В., Леонця В.А. та Петренка В.О. [18, 19] присвячено дослідженню несних конструкцій тепловозів.

За результатами аналізу досліджень останнього періоду встановлено, що питання продовження строку служби різного типу залізничного рухомого складу та оцінки його залишкового ресурсу останнім часом постійно розглядаються, що свідчить про важливість, актуальність та необхідність подальшого розвитку досліджень за цим напрямком.

Мета статті – проаналізувати існуючі критерії оцінки залишкового ресурсу залізничного рухомого складу, а також описати методології та розрахункові залежно-

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

сті під час визначення залишкового ресурсу залізничного рухомого складу для кожного критерію оцінки.

Матеріал та результати досліджень. Методика продовження строку експлуатації залізничного рухомого складу передбачає проведення цілого ряду досліджень, що включають розгляд та аналіз нормативно-технічної документації на рухомий склад, збір та первинну обробку інформації про його технічний стан, обробку та аналіз отриманої інформації в процесі технічного діагностування, визначення залежності корозійної стійкості матеріалу від часу експлуатації, оцінку залишкового ресурсу конструкції.

Головним показником оцінки залишкового ресурсу залізничного рухомого складу є втрачання конструкцією несної здатності. Втрачання несної здатності можливо визначати за такими важливими критеріями як:

- досягнення у відповідних елементах і вузлах залізничного рухомого складу межі плинності під час дії статичного навантаження з урахуванням коефіцієнта динаміки. Такі напруження виникають внаслідок зниження опору поперечного перерізу елемента конструкції через високу інтенсивність корозії матеріалу;
- межа витривалості, яку визначають за коефіцієнтом опору втомі;
- кількість циклів поздовжніх навантажень (співударянь), що характеризуються числом накопичених пошкоджень протягом встановленого строку служби.

Перший критерій застосовується для оцінки корозійної стійкості матеріалу залізничного рухомого складу, що обумовлено впливом атмосферних опадів та агресивного середовища. Метою цього дослідження є отримання функціональної залежності стоншення поперечного перерізу конструктивних елементів від часу експлуатації (строку служби). Визначення ступеня корозійного пошкодження основних несних елементів металоконструкцій вагонів здійснюється за результатами вимірювання фактичних товщин елементів. Величина корозії визначається як різниця між фактичними (вимірними) та номінальними товщинами. При цьому вимірювання фактичної товщини елементів проводиться ультразвуковими товщиномірами (рис. 1), а номінальні товщини визначають за технічною та конструкторською документацією з плюсовим допуском.



Рис. 1. Процес заміру фактичної товщини хребтової балки вантажного вагона

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Дані замірів товщини (стоншення елементів) групуються за строком служби залізничного рухомого складу з інтервалом часу напрацювання Δt та піддаються статистичній обробці, що полягає у визначенні:

– середнього значення (математичного очікування) за формулою (1):

$$\bar{m}_{\Delta h_i} = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} h_{ij}}{N_i^{3T}} \quad (1)$$

де $\bar{m}_{\Delta h_i}$ – середнє значення (математичне очікування) величини стоншення елементів рухомого складу в i -му інтервалі;

h_{ij} – значення j -ої вимірної товщини елемента вагона в i -му інтервалі;

N_i^{3T} – кількість замірів в i -му інтервалі;

– середньоквадратичного відхилення за формулою (2):

$$S_{\Delta h_i} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_i} (h_{ij} - \bar{m}_{\Delta h_i})^2}{N_i^{3T} - 1}} \quad (2)$$

Величини замірів товщини у кожному часовому зрізі групуються на класи (інтервали) за правилом Штюргеса згідно з виразом (2.12) [20, 21]:

$$k \approx 1 + 3,32 \lg(N_i^{3T}) \quad (3)$$

де k - кількість класів.

Нульова гіпотеза про рівність (однорідність) середніх значень для кожного інтервалу оцінюється за допомогою критерію Стьюдента [20–22].

Оцінкою σ^2 служить вибіркова повна (загальна) дисперсія S^2 , а інтервальною оцінкою математичного очікування i_m – вибіркове загальне середнє значення $\bar{m}_{\Delta h_i}$. Довірчі інтервали для i_m і σ^2 для $p = N_i^{3T} - 1$ ступенів свободи визначають з виразів (4), (5):

$$\bar{m}_{\Delta h_i} - \frac{S_i}{\sqrt{N_i^{3T}}} t_{\alpha, p} < i_m < \bar{m}_{\Delta h_i} + \frac{S_i}{\sqrt{N_i^{3T}}} \quad (4)$$

$$\frac{S_i^2 (N_i^{3T} - 1)}{\chi_{P_1}^2} < \sigma^2 < \frac{S_i^2 (N_i^{3T} - 1)}{\chi_{P_2}^2} \quad (5)$$

Значення $t_{\alpha, p}$, $\chi_{P_1}^2$ і $\chi_{P_2}^2$ визначаються за таблицями залежно від числа ступенів свободи і вибіркового рівня довірчої ймовірності.

За даними вимірів товщини елемента для кожного часового зрізу будуються кумулятивна лінія, гістограма і полігон розподілу, за якими проводиться вибір теоретичного закону розподілу.

Для нормального розподілу, щільність імовірності випадкової величини визначається за формулою (6):

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (6)$$

де σ – середньоквадратичне відхилення теоретичного розподілу;

x – випадкова величина;

μ – середнє значення (математичне очікування) теоретичного розподілу.

Перевірка гіпотези нормального розподілу для класу вибірок виконується з використанням критерію Пірсона [20–22].

У разі прояву функціональної залежності величини стоншення від часу експлуатації, проводиться вирівнювання методом найменших квадратів математичних очікувань відхилень товщини елементів від номінальних значень. Як апроксимуючу функцію приймають поліном (7) щодо незалежної змінної t – часу напрацювання (обирається лінійний, квадратичний та кубічний):

$$\begin{aligned} f_1(t) &= a + bt; \\ f_2(t) &= a + bt + ct^2; \\ f_3(t) &= a + bt + ct^2 + dt^3, \end{aligned} \quad (7)$$

де a, b, c, d – невідомі коефіцієнти.

Поліном обирають, виходячи з найменшої величини залишкової дисперсії, яка визначається за формулою (8) [21, 23]:

$$\bar{S}_{\text{зал}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^K (\bar{m}_{\Delta h_i} - m_i^*)^2}{K - 1 - p}, \quad (8)$$

де $\bar{m}_{\Delta h_i}$ – математичне очікування величини товщини елемента в i -ому інтервалі;

m_i^* – аналітичне значення цієї ж величини;

K – кількість інтервалів часу напрацювання;

p – кількість ступенів свободи,

а також максимального значення критерію Фішера за формулою (9) [20, 23]:

$$F = \frac{S_{\Delta}^2}{\bar{S}_{\text{зал}}^2}, \quad (9)$$

де S_{Δ}^2 – дисперсія випадкової величини при рівні значущості 5%.

Коефіцієнти a_0, a, b, c, d визначаються з розв'язання системи алгебраїчних рівнянь (10)–(12), які мають вигляд:

– для полінома першого степеня

$$\begin{cases} a_0 + b \sum_i x_i = \sum_i y_i \\ a \sum_i x_i + b \sum_i x_i^2 = \sum_i x_i y_i \end{cases} \quad (10)$$

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

– для полінома другого степеня

$$\begin{cases} a_0 + b \sum_i x_i + c \sum_i x_i^2 = \sum_i y_i \\ a \sum_i x_i + b \sum_i x_i^2 + c \sum_i x_i^3 = \sum_i x_i y_i \\ a \sum_i x_i^2 + b \sum_i x_i^3 + c \sum_i x_i^4 = \sum_i x_i^2 y_i \end{cases} \quad (11)$$

– для полінома третього степеня

$$\begin{cases} a_0 + b \sum_i x_i + c \sum_i x_i^2 + d \sum_i x_i^3 = \sum_i y_i \\ a \sum_i x_i + b \sum_i x_i^2 + c \sum_i x_i^3 + d \sum_i x_i^4 = \sum_i x_i y_i \\ a \sum_i x_i^2 + b \sum_i x_i^3 + c \sum_i x_i^4 + d \sum_i x_i^5 = \sum_i x_i^2 y_i \\ a \sum_i x_i^3 + b \sum_i x_i^4 + c \sum_i x_i^5 + d \sum_i x_i^6 = \sum_i x_i^3 y_i \end{cases} \quad (12)$$

За обраним поліномом залежності стоншення елементів від строку експлуатації визначається залишковий ресурс, за якого часовий опір поперечного перерізу стане рівним мінімально допустимому за умовою досягнення межі плинності за виразом (13):

$$\sigma_{пл} = \frac{M}{W(h_{кр})} \quad (13)$$

де $\sigma_{пл}$ – межа плинності матеріалу;

M – згинальний момент від статичного навантаження з урахуванням коефіцієнта динаміки;

W – момент опору поперечного перерізу елемента або вузла;

$h_{кр}$ – критичне значення товщини стінок поперечного перерізу елемента, що визначається за формулою (14):

$$h_{кр} = h_{ном} - \lambda_{\Delta h}(t_{кр}), \quad (14)$$

де $h_{ном}$ – номінальна товщина стінок елемента або вузла рухомого складу;

$\lambda_{\Delta h}(t_{кр})$ – критичне стоншення стінок елемента або вузла рухомого складу за час експлуатації t .

Коефіцієнт стоншення в заданий момент часу визначають за формулою (15):

$$\lambda_{\Delta h} = \frac{h_{факт}}{h_{ном}} \quad (15)$$

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

де $h_{\text{факт}}$ – фактична товщина елемента конструкції за результатами вимірювання.
При цьому фактичне значення границі втоми з урахуванням строку експлуатації може бути визначене за виразом (16):

$$\sigma_{a,N}^{\text{факт}} = \frac{\sigma_{a,N}}{\lambda_{\Delta h}}, \quad (16)$$

де $\sigma_{a,N}$ – розрахункова границя втоми за симетричного циклу напружень, приведена до бази випробувань $N_0=10^7$.

Оскільки границя міцності пропорційна площі поперечного перерізу, то мінімальна площа ($F_{\text{кр}}$) перерізу визначається за формулою (17):

$$F_{\text{кр}} = F_{\text{ном}} \cdot \frac{\sigma_{\phi}}{\sigma_{\text{пл}}}, \quad (17)$$

де $F_{\text{ном}}$ - номінальна площа поперечного перерізу елемента, що відповідає технічній документації;

σ_{ϕ} - фактичне напруження в елементі конструкції.

Отримані залежності товщини елементів від часу експлуатації використовуються для визначення залишкового ресурсу за формулою (18):

$$T_{\text{зал}} = T_{\text{н}} \cdot \lambda_{\Delta h}(t) K_N, \quad (18)$$

де $T_{\text{н}}$ – призначений строк служби рухомого складу;

$\lambda_{\Delta h}(t)$ – залежність коефіцієнта стоншення від часу експлуатації вагона;

K_N – коефіцієнт, що враховує нелінійність коефіцієнта стоншення та запас за критичним станом.

В початковий момент експлуатації рухомого складу $\lambda_{\Delta h}(t)=1$ та $K_N=1$.

Перевагою такого критерію оцінювання залишкового ресурсу є врахування одного з основних критеріїв втоми – корозійного зносу. Недолік – відсутність врахування накопичених пошкоджень, викликаних порушеннями технічних вимог під час експлуатації та понаднормових навантажень.

Другий критерій. Одним із варіантів оцінки залишкового ресурсу несних елементів рухомого складу є визначення його за критерієм втомної довговічності за багатоперіодного динамічного навантаження.

Вихідним співвідношенням для визначення строку служби несних елементів конструкції вагона є вираз (19) [24, 25]:

$$n = \frac{\sigma_{a,N}}{\sigma_e} \leq [n], \quad (19)$$

де n – коефіцієнт запасу опору втомі;

σ_e – еквівалентне розрахункове експлуатаційне напруження, приведене до напруження симетричного циклу і бази випробувань $N_0=10^7$;

$[n]$ – допустимий коефіцієнт запасу опору втомі.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Границя втоми натурної деталі розраховується за формулою (20) [24, 25]:

$$\sigma_{a,N} = \bar{\sigma}_{a,N} (1 - z_p \nu_{\sigma_{a,N}}) \quad (20)$$

де $\bar{\sigma}_{a,N}$ – середнє (медіанне) значення границі втоми деталі;

z_p – квантиль розподілу за імовірності $P=0,95$;

$\nu_{\sigma_{a,N}}$ – коефіцієнт варіації границі втоми деталі.

Для визначення границі втоми натурних деталей шляхом проведення вібраційних випробувань використовують формулу (21) [24]:

$$\bar{\sigma}_{a,N} = \sqrt{\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^k \sigma_{ei}^m n_{ei}} \quad (21)$$

де $m=4$ – рекомендоване значення показника степеня кривої втоми елементів рухомого складу;

N_0 – базова кількість циклів;

σ_{ei} – величини напружень, отриманих під час вібраційних випробувань і приведених до еквівалентних симетричних;

n_{ei} – кількість циклів навантаження, реалізованих на i -му інтервалі;

k – кількість інтервалів навантаження.

Згідно з нормативною документацією вплив асиметрії циклів динамічних напружень на накопичення втомних пошкоджень у конструкції не враховується, тому приймається $\sigma_{ei} = \sigma_{ea_i}$.

Разом з тим, для проведення перевірного розрахунку коефіцієнта запасу опору втомі та оцінювання залишкового ресурсу, вплив асиметрії циклів навантаження враховують шляхом його приведення до амплітуд еквівалентних симетричних циклів із використанням ідеалізованої діаграми Гудмана граничних амплітуд циклів і приведення їх до еквівалентної амплітуди симетричного граничного циклу за подобою амплітуд за виразом (22) [26]:

$$\sigma_{ei} = \frac{\sigma_{ea_i}}{\left(1 - \frac{\sigma_{em_i}}{\sigma_B}\right)} \quad (22)$$

де σ_{ea_i} – амплітуди динамічних напружень, отримані в процесі випробувань;

σ_{em_i} – амплітуди постійних складових напружень, реалізованих у процесі випробувань;

σ_B – границя міцності елемента дорівнює границі міцності матеріалу.

Розрахункові величини амплітуд динамічних напружень визначаються за формулою (23) [24]:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{T_p f_e d_e}{N_0}} \quad (23)$$

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

де T_p – сумарна дія експлуатаційних навантажень;
 f_e – центральна (ефективна) частота процесу зміни динамічних напружень;
 d_e – питома напрацювання несної конструкції (визначає відмінність умов експлуатації однотипних несних елементів).

Величина T_p згідно з чинними нормативами обчислюється за виразом (24) [24]:

$$T_p = B \cdot T_n = 365 \cdot 10^3 \cdot T_n \cdot \frac{\bar{\xi}_c}{V} \quad (24)$$

де B – коефіцієнт переведення календарного розрахункового строку служби в роках за час безперервного руху в секундах;

$\bar{\xi}_c$ – середньодобовий пробіг рухомого складу, км/добу;

V – середня технічна швидкість руху.

Ефективна частота зміни динамічних напружень визначається за формулою (25) [24, 25]:

$$f_e = \frac{a}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{f_{ст}}} \quad (25)$$

де a – коефіцієнт, що залежить від типу рухомого складу;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння;

$f_{ст}$ – статичний прогин вагона.

Питома напрацювання d_e визначається відповідно до формули (26) [25, 27]:

$$d_e = \sum_{j=1} K_{дiлj} \sum_{v_i}^{N_{v_i}} T_{v_i} \sum_{\sigma_i}^{N_{\sigma_i}} \sigma_{a_i}^m P_{\sigma_i} \quad (26)$$

де $K_{дiлj}$ – середня частка протяжності прямих ($j = 1$), кривих ділянок колії ($j = 2$) і стрілочних переводів ($j = 3$) у загальній довжині залізничних ліній;

N_{σ_i} та N_{v_i} – прийняті кількість розрядів амплітуд напружень i -ому інтервалу швидкостей та кількість розрядів швидкостей руху;

T_{v_i} – частка часу, що припадає на експлуатацію в i -ому інтервалі швидкостей;

σ_{a_i} – рівень (розряд) амплітуди динамічних напружень;

P_{σ_i} – частота (імовірність) появи амплітуд напружень з рівнем σ_{a_i} в i -ому інтервалі швидкостей руху вагона.

Оцінка залишкового ресурсу елемента за критерієм втомної довговічності за багатоциклового динамічного навантаження здійснюється за формулою (27) [24]:

$$T_{зал} = \frac{\left(\frac{\sigma_{a_i} N}{[n]}\right) \cdot N_0}{B f_e d_e} \quad (27)$$

Основною перевагою такого методу оцінки залишкового ресурсу є достатня точність отриманого результату, оскільки враховується одночасно фактичний корозійний знос та накопичені пошкодження деталі в експлуатації. Основним недоліком є необхідність застосування спеціалізованого випробувального обладнання (стендів)

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

на втомне руйнування деталі, наслідком чого є висока вартість дослідження. Особливо високою є вартість проведення досліджень за критерієм втомної довговічності для габаритних несних елементів рухомого складу (хребтової балки, бічної поздовжньої рами тощо).

Під час проведення контрольних вібраційних випробувань на втому рам та надресорних балок візків рухомого складу можливо використовувати спеціалізований випробувальний стенд типу 2CO (рис. 2).



Рис. 2. Зовнішній вигляд стенду типу 2CO

На практиці, зазначений метод здебільшого застосовується для визначення залишкового ресурсу рам, надресорних балок візків, шворневих, кінцевих балок рухомого складу.

Третій критерій (оцінка залишкового ресурсу за результатами випробувань на співудар). Оцінка залишкового строку служби рухомого складу за результатами ударних ресурсних навантажень виконується за критерієм накопичених пошкоджень з урахуванням поздовжнього та вертикального динамічного навантаження, які діють на рухомий склад. У процесі експлуатації поздовжні навантаження визначають за результатами випробувань на співудар. Під час випробувань на співудар узагальнений розподіл повторюваності поздовжніх сил стиснення та розтягнення приймають як вихідний (експлуатаційний) спектр навантаження вагона [24]. Узагальнений розподіл приймають за припущення однакової пошкоджувальної дії розтягувальних та стискальних сил у кожному інтервалі їх розподілу. Вертикальні навантаження визначають за результатами статичних, динаміко-міцнісних випробувань або випробувань скиданням з клинів.

Величина еквівалентного зусилля співудару $P_{екв}$, приведена до розрахункової бази випробувань, визначається за формулою (28) [27]:

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

$$P_{екв} = \frac{N_{заг}^{розр}}{N_0} \cdot \sum_{i=1} F_i^m \cdot p_i = \sqrt[m]{\frac{N_{заг}^{розр}}{N_0} \sum_{i=1} F_i^m \cdot p_i}, \quad (28)$$

де $N_{заг}^{розр}$ – загальна розрахункова кількість циклів дії імпульсів поздовжніх ударних сил;

F_i^m і p_i – величини динамічних поздовжніх сил та імовірності їх виникнення, що визначаються за таблицями 5.3 і 5.4 [27].

Загальна розрахункова кількість циклів дії поздовжніх сил протягом розрахункового періоду експлуатації вагона для загальної мережі пробігу визначається за формулою (29) [27]:

$$N_{заг}^{розр} = N_{заг}^{уд} \cdot T_n \cdot k_{реж} \cdot k_{уд} \quad (29)$$

де $N_{заг}^{уд}$ – загальна кількість циклів ударних поздовжніх сил за один рік;

$k_{реж}$ – коефіцієнт, що враховує вплив порожнього пробігу;

$k_{уд}$ – коефіцієнт, що враховує несиметричність навантаження конструкції.

Кількість циклів за один рік експлуатації для поздовжнього навантаження визначаються за формулою (30) [27]:

$$N_C^I = N_{заг}^{уд} \cdot T_{розр} \cdot k_{реж} \cdot k_{уд} \quad (30)$$

де $T_{розр}$ – розрахунковий період експлуатації (1 рік).

Кількість циклів вертикальних коливань за один рік строку служби визначається за формулою (31) [24, 27]:

$$N_C^{II} = 365 \cdot 10^3 \cdot f_e \cdot \frac{\bar{\xi}_C}{V} \quad (31)$$

Залишковий строк служби рухомого складу визначається за формулою (32) [24]:

$$T_{зал} = \frac{\left(\frac{\sigma_{a,N}}{[n]}\right)^m \cdot N_0}{N_C^I \cdot \sum_j (\sigma_{aj}^I) \cdot P_j^I + N_C^{II} \cdot \sum_j (\sigma_{aj}^{II}) \cdot P_j^{II}} \quad (32)$$

де $\sigma_{aj}^I, \sigma_{aj}^{II}$ – амплітуди динамічних напружень, приведені до симетричного циклу для кожного виду експлуатаційних навантажень (поздовжнього та вертикального) та їх діапазонів, МПа;

P_j^I, P_j^{II} – імовірність появи амплітуди з рівнем $\sigma_{aj}^I, \sigma_{aj}^{II}$ в j -му інтервалі швидкостей руху від дії поздовжнього та вертикального навантажень.

В якості прикладу розглянемо результати залишкового ресурсу вагона цистерни моделі 15-1404 [28] від дії поздовжніх ударних навантажень за силами накопичених пошкоджень. Вибір режиму навантаження здійснювався з урахуванням наступних вхідних даних, які характеризують умови експлуатації:

- величина еквівалентного зусилля співудару $P_{екв}=2,5$ МН;

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

- призначений строк служби вагона цистерни до списання 20 років;
- коефіцієнт порожнього пробігу $K_{пор}=0,45$ [27];
 - загальна кількість циклів ударних поздовжніх сил за один рік $N_{заг}^{уд}=20200$ [17];
 - коефіцієнт, що враховує несиметричність навантаження конструкції $k_{уд}=0,6$ [17].

Загальне розрахункове число циклів від дії поздовжнього навантаження за один рік експлуатації вагона цистерни становить:

$$N_C^I = N_{заг}^{уд} \cdot T_{розр} \cdot k_{реж} \cdot k_{уд} = 20200 \cdot 1 \cdot 0,55 \cdot 0,6 = 6666 \text{ циклів.}$$

З урахуванням $P_{екв}=2,5$ МН та за даними таблиці 5.3 [27] базова кількість циклів складе:

$$N_0 = \frac{N_{заг}^{розр}}{P_{екв}^m} \cdot \sum_{i=1} F_i^m \cdot p_i =$$

$$= \frac{6666}{2,5^4} \cdot (0,25^4 \cdot 0,1258 + 0,6^4 \cdot 0,2852 + 1^4 \cdot 0,2802 + 1,4^4 \cdot 0,1832 + 1,8^4 \cdot 0,0772 + 2,24 \cdot 0,0359 + 2,64 \cdot 0,0208 + 34 \cdot 0,0023 + 3,44 \cdot 0,0003 + 3,84 \cdot 0,0001) = 661$$

цикл.

Враховуючи, що досліджуваний вагон не проходить сортування на гірках, експертно зменшуємо число еквівалентних сил у 2 рази, тоді остаточне розрахункове число базових циклів становить: $N_0 = 661 \cdot 0,5 \approx 331$ цикл.

Розрахункова сила накопичених пошкоджень за один рік становить:

$$P_{розр} = P_{екв}^m \cdot N_0 = 2,5^4 \cdot 331 = 12929 \text{ МН.}$$

Випробування на співудар виконувався шляхом накочування вагона-бійка на досліджувану цистерну, що стоїть в упорі (рис. 3). Гістограма розподілу сил співудару представлена на рис. 4, а суму накопичених пошкоджень представлено в табл. 1.

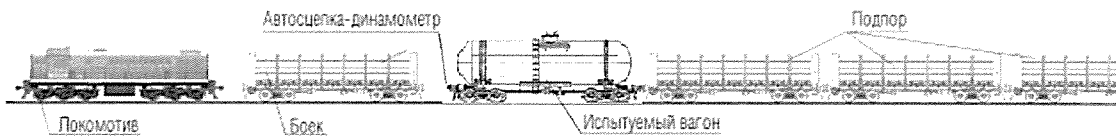


Рис. 3. Схема розташування рухомого складу під час випробувань на співудар

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

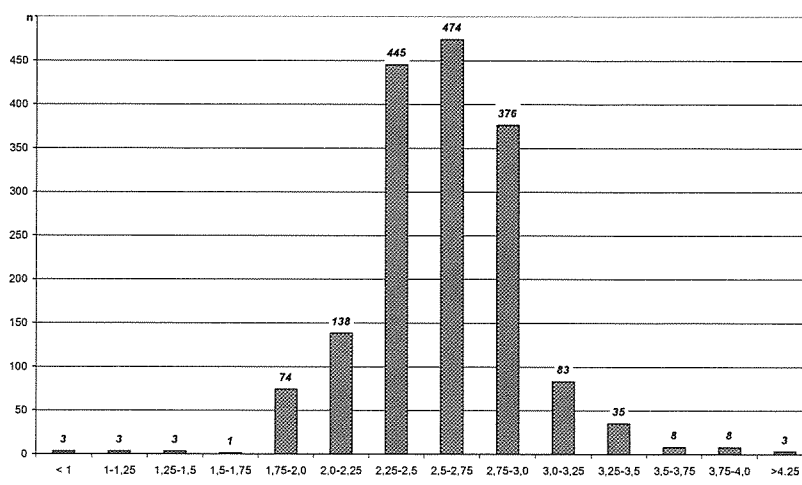


Рис. 4. Гістограма розподілу поздовжніх сил під час випробувань на співудар, отримана експериментально в процесі випробувань

Табл. 1. Полігон сил, отриманих в процесі випробувань цистерни на співудар

Інтервал сил співудару	Середина інтервалу	Частота	Накопичені пошкодження
1	2	3	4
< 1	0,5	3	3,0
1-1,25	1,13	3	4,81
1,25-1,5	1,38	3	10,72
1,5-1,75	1,63	1	6,97
1,75-2,0	1,88	74	914,61
2,0-2,25	2,13	138	2813,94
2,25-2,5	2,38	445	14158,41
2,5-2,75	2,63	474	22505,86
2,75-3,0	2,88	376	25688,53
3,0-3,25	3,13	83	7915,5
3,25-3,5	3,38	35	4541,12
3,5-3,75	3,63	8	1381,41
3,75-4,0	3,88	8	1803,75
>4.25	4,25	3	978,76
Всього			82727,39

Час напрацювання вагона цистерни на ударні поздовжні навантаження склав:

$$T_{\text{зал}} = \frac{P_{\text{заг}}}{P_{\text{розр}}} = \frac{82727}{12929} = 6,4 \text{ роки.}$$

Таким чином, виконані розрахунки показують, що існує можливість гарантованого продовження строку служби вагона цистерни на 6 років.

Висновки.

Наведена методика розрахункових досліджень з продовження строку експлуатації залізничного рухомого складу дозволить:

- здійснювати диференційну оцінку його залишкового ресурсу з використанням результатів ресурсних випробувань та замірів фактичних геометричних параметрів несних елементів;

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

– отримати прогнозу граничну оцінку залишкового ресурсу групи рухомого складу, виходячи з фактичного ресурсу вагона-аналога та аналітичної залежності корозійного зносу несних елементів кожного рухомого складу із цієї групи, що піддається технічному діагностуванню.

Рекомендації.

В подальшому доцільно удосконалити процедуру продовження строку експлуатації залізничного рухомого складу шляхом внесення змін і доповнень в чинні програми та методики його оцінки залишкового ресурсу з урахування викладеного матеріалу, що в цілому дозволить підвищити безпеку перевезень на залізничному транспорті.

ЛІТЕРАТУРА

1. Порядок проведення комплексу діагностичних, ремонтних та реєстраційних операцій, спрямованих на продовження строку експлуатації вантажних вагонів (крім вантажних вагонів підприємств технологічного залізничного транспорту, що призначені для переміщення вантажів у виробничих цілях в межах території таких підприємств), установленого виробником, строків продовження експлуатації. Наказ Мінінфраструктури від 30.11.2021 р. № 647 [Чинний з 01.01.2022 р.] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1677-21#Text>
2. ЦДІ 0070 Методика технічного діагностування пасажирських вагонів, що виступили призначений термін, з метою його продовження. Введено на підставі наказу Укрзалізниці від 25.06.2008 № 304-Ц. 2008. Київ, Нескінчене джерело. 60 с.
3. ВНД 32.007.123-03-2002 Положення про організацію робіт щодо продовження призначеного терміну служби тягового рухомого складу Укрзалізниці (рам візків, головних рам кузовів і несучих кузовів). К., Міністерство транспорту України, 2002. 16 с. (Нормативний документ Мінтранса України).
4. М 4.1.00740 Технічне діагностування та оцінка залишкового ресурсу несучих конструкцій тепловозів з метою подовження їх терміну служби. Методика діагностування. Кременчук, ДП «УкрНДІВ», 2018. 47 с.
5. Методика технічного діагностування вагонів метрополітену, що виступили призначений термін, з метою його продовження. Кременчук, ДП «УкрНДІВ», 2011. 19 с.
6. Мямлін С.В., Рейдемейстер О.Г., Калашник В.О. Науково-технічне обґрунтування продовження терміну служби пасажирських вагонів після КВР. Вагонний парк. 2015. № 11-12 (104-105). С. 4 – 7.
7. Мямлін С.В., Рейдемейстер О.Г., Пуларія А.Л., Калашник В.О. Обґрунтування продовження терміну служби пасажирських вагонів із осередками корозії хребтової балки. Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. 2015. № 5 (59). С. 132 – 140. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/55337>
8. Радкевич М.М., Сапронова С.Ю., Ткаченко В.П. Дослідження залишкового ресурсу та встановлення граничного терміну експлуатації некупеїних пасажирських вагонів побудови КВЗ. Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології». 2020. Вип. 36. С. 54–62. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-36-6>
9. Радкевич М.М., Сапронова С.Ю., Ткаченко В.П. Дослідження залишкового ресурсу спеціальних вагонів. Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології». 2021. Вип. 37. С. 50–58. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-37-6>
10. Сапронова С.Ю., Буліч Д.І., Ткаченко В.П. Продовження терміну експлуатації вантажних вагонів. Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля. 2017. № 3(233). С. 179–182.
11. Єжов Ю.В., Павленко Ю.С., Войтенко О.І. Удосконалення діючої системи продовження терміну експлуатації пасажирських вагонів. Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». 2018. Вип. 17. С. 46–50.
12. Єжов Ю.В., Павленко Ю.С., Войтенко О.І., Полулях С.М. Дослідження технічного стану несучих металоконструкцій кузовів вагонів метрополітену моделей 81-717/714 та їх модифікацій. Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». 2018. Вип. 17. С. 22–28.
13. Єжов Ю.В., Павленко Ю.С. Алгоритм відбору зразка пасажирського вагона локомотивної тяги для контрольних випробувань. Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». 2018. Вип. 17. С. 62–70.

14. Мартинов І.Е., Труфанова А.В., Павленко Ю.С., Сергієнко М.О. Аналіз технічного стану пасажирських вагонів. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Транспортне машинобудування. Х.: НТУ «ХПІ». 2018. № 45 (1321). С. 41–46.
15. Мартинов І.Е., Труфанова А.В., Сергієнко М.О. До питань прогнозування залишкового ресурсу пасажирських вагонів. Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології». 2019. Вип. 34. С. 144–154. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-34-1-12>
16. Фомін О.В., Прокопенко П.М., Бурлуцький О.В., Фоміна А.М. Контрольні випробування вантажного вагона з метою оцінки залишкового ресурсу несучих конструкцій. Вчені записки ТНУ 21га. В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2019. Том 30 (69). Ч. 2. № 3. С. 177–182. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-2/31>
17. Фомін О.В., Прокопенко П.М., Швець А.О., Лахай О.І., Свідерський Р.В. Визначення залишкового ресурсу несучої здатності базової конструкції вагона-зерновоза з протермінованим строком служби. Вісник сертифікації залізничного транспорту. 2019. № 05 (57). С. 5–18.
18. Леонєв В.А., Кара С.В., Прокопенко П.М. Оцінка залишкового ресурсу несучих конструкцій тепловозів серії 2ТЕ10 та визначення можливості продовження терміну їх експлуатації. Залізничний транспорт України. 2019. № 4. С. 19–28. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2019-133-4-19-28>
19. Кара С.В., Петренко В.О., Прокопенко П.М., Гордієнко Т.М. Дослідження несучих конструкцій тепловозів серії ЧМЕЗ та визначення можливості продовження терміну їх експлуатації. Залізничний транспорт України. 2019. № 3. С. 9–13. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2019-131-2-09-13>
20. Гутер Р.С., Овчинский Б.В. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта (изд. 2-е перераб.). М.: Наука, 1970. 432 с.
21. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. М.: Высшая школа, 1988, 239 с.
22. Пасажирські вагони. Діагностування. Залишковий ресурс. Надійність / Водянніков Ю.Я., Сулим А.О., Хозя П.О., Столетов С.О., Мельник О.О., Лашкевич І.М. : монографія. Кременчук: ДП «УкрНДІВ», 2023. 95 с.
23. Степанов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний. Справочник. М.: Машиностроение, 1985. 232 с.
24. Нормы для расчета и проектирования 21rans и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М.: ГосНИИВ – ВНИИЖТ, 1983. 258 с.
25. ДСТУ 7774:2015. Вагони пасажирські магістральні локомотивної тяги. Загальнотехнічні норми для розрахування та проектування механічної частини вагонів. Введено на підставі наказу ДП «УкрНДІВ» від 01.04.2016 № 61. Київ, ДП «УкрНДІВ», 2017. 144 с.
26. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. М.: Машиностроение, 1977. 232 с.
27. РД 24.050.37.95. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества : М.: ГосНИИВ, 1995. 101 с.
28. Исследования, разработка и обоснование рекомендаций по увеличению назначенного полного срока службы вагонов цистерн моделей 15-1406 15-1404, 1408 эксплуатационного парка ПО «Ангарскнефтеоргсинтез (№ ГР 01910039382): отчет о НИР (этап 2) / ГП «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения»; рук. Лагута В. С., исп. Донченко А. В., Водянніков Ю. Я. Кременчук, 1992. 220 с.

O.M. Safronov

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,
33 I. Prykhodka St., Kremenчук, 39621, Ukraine
Tel.: (05366) 6-03-54, E-mail: safonov.am84@gmail.com
ORCID <http://orcid.org/0000-0002-5865-7751>

Yu.Ya. Vodiannikov

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,
33 I. Prykhodka St., Kremenчук, 39621, Ukraine
Tel.: +38 (05366) 6-20-43, E-mail: office@ukrndiv.com.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6111-7128>

A.O. Sulym

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,
33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine
Tel.: (05366) 6-03-54, E-mail: sulim1.ua@gmail.com
ORCID <http://orcid.org/0000-0001-8144-8971>

O.M. Bahrov

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,
33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine
Tel.: (05366) 6-11-80, E-mail: anbagrov@meta.ua
ORCID <http://orcid.org/0000-0002-8984-7595>

EVALUATION OF THE REMAINING LIFETIME OF RAILWAY VEHICLES

This article deals with the existing criteria for evaluation of the remaining lifetime of railway vehicles. The remaining lifetime of railway vehicles can be determined by the following criteria: by reaching the stress the yield point of the material, by the endurance limit, by the accumulated damage during impact loads. The first criterion is used for low corrosion resistance of the railway rolling stock material and is due to the influence of both atmospheric precipitation and aggressive environments. The second criterion is used to determine the durability of the structure and is characterized by the fatigue reserve factor. The third criterion is used to confirm the specified extension of the service life of railway rolling stock. Methodologies, as well as calculation dependencies when determining the residual resource of railway rolling stock for each of the considered evaluation criteria, were analyzed. An example of estimating the residual resource of a model 15-1404 tank car based on accumulated damage during 22transportnal impact loads is presented.

The material presented in this article will contribute to the improvement of the procedure for extending the service life of railway rolling stock by forming a comprehensive approach to the assessment of its residual resource, which in general will improve the safety of rail transport.

Key words: railway rolling stock, residual lifetime, fatigue resistance factor, corrosion, impact loads.

REFERENCES

1. *Poriadok provedennia kompleksu diahnostychnykh, remontnykh ta reiestratsiinykh operatsii, spriamovanykh na prodovzhennia 22ransp ekspluatatsii vantazhnykh vahoniv (krim vantazhnykh vahoniv pidpriemstv tekhnolohichnoho zaliznychnoho 22ransport, shcho pryznachenii dlia peremishchennia vantazhiv u vyrobnychykh tsiliakh v mezhakh terytorii takykh pidpriemstv), ustanovlenoho vyrobnykom, strokiv prodovzhennia ekspluatatsii. Nakaz Mininfrastruktury vid 30.11.2021 r. № 647 [The procedure for carrying out a complex of diagnostic, repair and registration operations aimed at extending the period of operation of freight cars (except for freight cars of technological railway transport enterprises, which are intended for the movement of goods for production purposes within the territory of such enterprises), established by the manufacturer, the period of extension of operation from November 30, 2021 No. 647]. [2022, January 1,]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1677-21#Text> [in Ukrainian]*
2. *Metodyka tekhnichnoho diahnostuvannia pasazhyrskykh vahoniv, shcho vysluzhyly pryznachenyi termin, z metoiu yoho prodovzhennia. Nakaz Ukrzaliznytsi № 304-Ts. [The procedure for technical diagnosis of passenger cars that have served the appointed term, with the aim of extending it. Order of Ukrzaliznytsia]. (2008, June 25). TsL 0070. Kyiv: Neskinchene dzerelo [in Ukrainian]*

3. Polozhennia pro orhanizatsiiu robot shchodo prodovzhennia pryznachenoho terminu sluzhby tiahovoho rukhomoho skladu Ukrzaliznytsi (ram vizkiv, holovnykh ram kuzoviv i nesuchykh kuzoviv). [Provisions on the organization of work regarding the extension of the designated service life of traction rolling stock of Ukrzaliznytsia (bogies, main body frames and load-bearing bodies). *VND 32.007.123-03-2002*. Kyiv: Ministerstvo transportu Ukrainy [in Ukrainian]
4. Tekhnichne diahnostuvannia ta otsinka zalyshkovoho resursu nesuchykh konstruktivnykh teplovoziv z metoiu prodovzhennia yikh terminu sluzhby. Metodyka diahnostuvannia. [Technical diagnosis and assessment of the residual resource of the load-bearing structures of diesel locomotives in order to extend their service life. *Methodology of diagnosis*]. (2018). *M 4.1.00740*. Kremenchuk: DP «UkrNDIV» [in Ukrainian]
5. *Metodyka tekhnichnoho diahnostuvannia vahoniv metropolitenu, shcho vysluzhyly pryznacheniyi termin, z metoiu yoho prodovzhennia* [Methodology of technical diagnostics of metro cars that have served the appointed term, with the aim of extending it]. (2011). Kremenchuk: SE «UkrNDIV» [in Ukrainian]
6. Miamlin, S.V., Reidemeister, O.H., & Kalashnyk, V.O. (2015). Naukovo-tekhnichne obhruntuvannia prodovzhennia terminu sluzhby pasazhyrskykh vahoniv pislia KVR [Scientific and technical justification for extending the service lifetime of passenger cars after the overhaul reconditioning]. *Vahonnyi park - Car park, 11-12 (104-105)*, 4-7 [in Ukrainian]
7. Miamlin, S.V., Reidemeister, O.H., Pulariia, A.L., & Kalashnyk, V.O. (2015). Obruntuvannia prodovzhennia terminu sluzhby pasazhyrskykh vahoniv iz oseredkamy korozii khrebtovoi balky [Justification of the extension of the service life of passenger cars with corrosion centers of the backbone beam]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transport - Science and progress of transport - Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport, 5 (59)*, 132 – 40 DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/55337> [in Ukrainian]
8. Radkevych, M.M., Saponova, S.Iu., & Tkachenko, V.P. (2020). Doslidzhennia zalyshkovoho resursu ta vstanovlennia hranychnoho terminu ekspluatatsii nekupeinykh pasazhyrskykh vahoniv pobudovy KVZ [Research of the residual lifetime and establishment of the maximum service life of non-compartment passenger cars built by KRCBW PJSC. *Collection of scientific papers DUIT. "Transport systems and technologies" series Zbirnyk naukovykh prats DUIT. Seriiia «Transportni systemy I tekhnologii»*, 36, 54–62. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-36-6> [in Ukrainian]
9. Radkevych, M.M., Saponova, S.Iu., & Tkachenko, V.P. (2021). Doslidzhennia zalyshkovoho resursu spetsialnykh vahoniv [Research of the residual resource of special wagons]. *Zbirnyk naukovykh prats DUIT. Seriiia «Transportni systemy i tekhnologii» - Collection of scientific papers DUIT. «Transport systems and technologies» series, 37, 50–58* [in Ukrainian]
10. Saponova, S.Iu., Bulich, D.I., & Tkachenko, V.P. (2017). Prodovzhennia terminu ekspluatatsii vantazhnykh vahoniv [Extension of the service lifetime of freight cars]. *Visnyk Shkhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni V. Dalia - Bulletin of the Eastern Ukrainian National University named after V. Dahl, 3(233)*, pp. 179–182 [in Ukrainian]
11. Yezhov, Yu.V., Pavlenko, Yu.S., & Voitenko, O.I. (2018). Udoshkonalennia diiuchoi systemy prodovzhennia terminu ekspluatatsii pasazhyrskykh vahoniv [Improvement of the current system of extending the service life of passenger cars]. *Collection of scientific works "Rail Rolling Stock" - Zbirnyk naukovykh prats «Reikovy rukhomiy sklad», 17, 46–50* [in Ukrainian]
12. Yezhov, Yu.V., Pavlenko, Yu.S., Voitenko, O.I., & Poluliakh, S.M. (2018). Doslidzhennia tekhnichnoho stanu nesuchykh metalokonstruktivnykh kuzoviv vahoniv metropolitenu modelei 81-717/714 ta yikh modyfikatsii. [Research of the technical condition of the load-bearing metal structures of the bodies of metro cars of models 81-717/714 and their modifications]. *Zbirnyk naukovykh prats «Reikovy rukhomiy sklad» - Collection of scientific works "Railbound Rolling Stock", 17, 22–28* [in Ukrainian]
13. Yezhov, Yu.V., & Pavlenko, Yu.S. (2018). Alhorytm vidboru zrazka pasazhyrskoho vahona lokomotyvnoi tiahly dlia kontrolnykh vyprobuvan. [Algorithm for selecting a sample of a locomotive traction passenger car for routine tests]. *Collection of scientific works "Railbound Rolling Stock" - Zbirnyk naukovykh prats «Reikovy rukhomiy sklad», 17, 62–70* [in Ukrainian]
14. Martynov, I.E., Trufanova, A.V., Pavlenko, Yu.S., & Serhiienko, M.O. (2018). Analiz tekhnichnoho stanu pasazhyrskykh vahoniv. [Analysis of the technical condition of passenger cars]. *Zbirnyk naukovykh prats. Seriiia: Novi rishennia v suchasnykh tekhnologiiakh. Transportne mashynobuduvannia - Bulletin of the National Technical University "KhPI". Collection of scientific works. Series: New solutions in modern technologies. Kh.: NTU «KhPI» Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Transport engineering. Kharkiv: NTU «KhPI», 45 (1321), 41–46* [in Ukrainian]
15. Martynov, I.E., Trufanova, A.V., & Serhiienko, M.O. (2019). Do pytan prohnozuvannia zalyshkovoho resursu ram pasazhyrskykh vahoniv [Concerning the prediction of the residual lifetime of passenger cars frames]. *Zbirnyk naukovykh prats DUIT. Seriiia Transportni systemy i tekhnologii - Collection of*

scientific papers DUIT. "Transport systems and technologies" series, 34, 144–154. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-34-1-12> [in Ukrainian]

16. Fomin, O.V., Prokopenko, P.M., Burlutskyi, O.V., & Fomina, A.M. (2019). Kontrolni vyprovuvannia vantazhnogo vahona z metoiu otsinky zalyshkovoho resursu nesuchykh konstrukttsii [Routine tests of a freight car for the purpose of assessing the residual lifetime of load-bearing structures]. *Vcheni zapysky TNU im. V.I. Vernadskoho. Seriya: tekhnichni nauky - Scientific notes of TNU named after V.I. Vernadskyi. Series: technical sciences*. (Vols. 30 (69)), Part 2, No. 3, pp. 177–182 DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-2/31> [in Ukrainian]

17. Fomin, O.V., Prokopenko, P.M., Shvets, A.O., Lakhai, O.I., & Sviderskyi, R.V. (2019). Vyznachennia zalyshkovoho resursu nesuchoi zdatsnosti bazovoi konstrukttsii vahona-zernovoza z proterminovanyim strokom sluzhby [Determination of the residual resource of the load-bearing capacity of the basic structure of the grain wagon with an extended service lifetime]. *Visnyk sertyfikatsii zaliznychnoho transportu - Bulletin of railway transport certification, 05 (57)*, 5–18 [in Ukrainian]

18. Leonets V.A., Kara S.V., & Prokopenko P.M. (2019). Otsinka zalyshkovoho resursu nesuchykh konstrukttsii teplovoziv serii 2TE10 ta vyznachennia mozhyvosti prodovzhennia terminu yikh ekspluatatsii. [Assessment of the residual lifetime of the load-bearing structures of the 2TE10 series diesel locomotives and determination of the possibility of extending their service life]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy - Railway transport of Ukraine, 4*, 19–28 DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2019-133-4-19-28> [in Ukrainian]

19. Kara, S.V., Petrenko, V.O., Prokopenko, P.M., & Hordiienko, T.M. (2019). Doslidzhennia nesuchykh konstrukttsii teplovoziv serii ChME3 ta vyznachennia mozhyvosti prodovzhennia terminu yikh ekspluatatsii [Study of the load-bearing structures of the ChME3 series diesel locomotives and determination of the possibility of extending their service life]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy - Railway transport of Ukraine, 3*, 9–13 DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2019-131-2-09-13> [in Ukrainian]

20. Guter R.S., & Ovchinskij B.V. (1970). *Elementy chislennogo analiza I matematicheskoy obrabotki rezul'tatov opyta [Elements of numerical analysis and mathematical processing of experimental results]* (2nd ed., rev.). Moscow: Nauka [in Russian]

21. Lvovskij E.N. (1988). *Statisticheskie metody postroeniya empiricheskikh formul [Statistical methods for constructing empirical formulas]*. Moscow: Vysshaya shkola [in Russian]

22. Vodiannikov, Yu.Ia., Sulym, A.O., Khozia, P.O., Stoliyetov, S.O., Melnyk, O.O., & Lashkevych, I.M. (2023). Pasazhyrski vahony. Diahnostuvannia. Zalyshkovyi resurs. Nadiinist. [Passenger cars. Diagnosis. Residual lifetime. Reliability]. *Monograph*. Kremenchuk: DP «UkrNDIV» [in Ukrainian]

23. Stepanov, M.N. (1985). *Statisticheskie metody obrabotki rezul'tatov mekhanicheskikh ispytanij. Spravochnik. [Statistical methods for processing the results of mechanical tests. Directory]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian]

24. *Normy dlya rascheta I proektirovaniya novykh I moderniziruemyyh vagonov zheleznyh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamohodnyh) [Norms for the calculation and design of new and modernized cars of railways of the Ministry of Railways of the 1520 mm gauge (non-self-propelled)]*. (1983). Moscow: GosNIIV – VNIIZHT [in Russian]

25. Vahony pasazhyrski mahistralni lokomotyvnoi tiah. Zahalnotekhnichni normy dlia rozrakhuvannia ta proektuvannia mekhanichnoi chastyny vahoniv [Main line passenger cars of locomotive traction. General technical standards for calculating and designing the mechanical part of wagons from April 1, 2016, No. 61].

DSTU 7774:2015. (2017). Kyiv: SE «UkrNDNC» [in Ukrainian]

26. Kogaev, V.P. (1977). *Raschety na prochnost' pri napryazheniyah, peremennyh vo vremeni [Strength calculations at stresses variable in time]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian]

27. Vagony gruzovye I passazhirskie. Metody ispytanij na prochnost' I hodovye kachestva [Freight and passenger cars. Strength and running test methods]. (1995). *RD 24.050.37.95*. Moscow: GosNIIV [in Russian]

28. Donchenko, A. V., Vodyannikov, Yu. Ya (1992). *Issledovaniya, razrabotka I obosnovanie rekomendacij po uvelicheniyu naznachennogo polnogo sroka sluzhby vagonov cistern modelej 15-1406 15-1404, 1408 ekspluatatsionnogo parka PO «Angar-sknefteorgsintez (№ GR 01910039382): otchet o NIR (etap 2) [Research, development and substantiation of recommendations for increasing the assigned full service life of tank cars of models 15-1406 15-1404, 1408 of the operational fleet of PO Angarsknefteorgsintez (GR No. 01910039382): research report (stage 2)]*. V. S. Laguta (Ed.). Kremenchuk: GP „UkrNDIV“ [in Russian].