

Ковтанець М.В., Сергієнко О.В., Марченко Д.М., Ноженко В.С., Ковтанець Т.М.

## ПРОВЕДЕННЯ ТЕОРЕТИКО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЩОДО ВПЛИВУ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА КОЕФІЦІЄНТ ЗЧЕПЛЕННЯ

У роботі проаналізовано фактори, що істотно впливають на значення коефіцієнта зчеплення. З аналізу літературних джерел встановлено, що основним показником, який визначає потенційні можливості контакту колеса з рейкою по зчепленню, зазвичай вважають фізичний коефіцієнт зчеплення. Проведено дослідження впливу вертикального та горизонтального динамічного навантаження на максимальний коефіцієнт зчеплення для трьох станів фрикційного контакту «колесо-рейка»: чистого сухого, змоченого водою, забрудненого мастильними матеріалами. Для експериментальної оцінки впливу динамічних сил в контакті «колесо-рейка» на реалізовану величину максимальної сили зчеплення було використано метод теорії планування експериментів, який дозволяє істотно скоротити кількість проведених дослідів і отримати математичну модель досліджуваного процесу та оцінити спільний та самостійний вплив кожного з факторів на процес зчеплення. Метод планування експериментів передбачає вибір факторів, їх рівнів та інтервалів варіювання, визначення відгуку системи, складання матриці планування та отримання рівнянь регресії. Отримані математичні моделі описують зчепні якості колеса та рейки за наявності зовнішніх динамічних збурень – коливань вертикального та горизонтального навантаження в контакті «колесо-рейка». Крім цього метою стендових випробувань була перевірка методики визначення тягових якостей локомотива з використанням для цього критерію, названого коефіцієнтом запасу по зчепленню. Порівнюючи два методи оцінки впливу динамічних навантажень на тягові якості контакту «колесо-рейка» за максимальними значеннями коефіцієнта зчеплення і за значеннями коефіцієнта запасу по зчепленню можна зробити висновок про схожість отриманих результатів, що може бути підтвердженням доцільності застосування розробленого критерію – коефіцієнта запасу по зчепленню – для порівняльної оцінки тягових якостей локомотивів та окремих колісних пар.

**Ключові слова:** локомотив, колісні пари, коефіцієнт зчеплення, динамічні навантаження, тягові якості.

### Актуальність дослідження.

Зчеплення має складну фізичну природу контактної молекулярно-механічної взаємодії коліс із рейками. Більше того, локомотив є складною динамічною нелінійною коливальною системою, схильною до обурливих впливів випадкового характеру, що ускладнює чисельне визначення сил, що зумовлюють зчеплення.

До факторів, які істотно впливають на величину коефіцієнта зчеплення, прийнято відносити такі [1, 2, 3]:

- наявність забруднення на головці рейок;
- площа контакту між колесом та рейкою;
- геометричні параметри рейкової колії (наявність кривих, підйомів, спусків);
- вплив зовнішнього середовища (температура, вологість повітря та інші).

Нарешті, розрахунок зчеплення є також техніко-економічною проблемою, яку вирішують з позицій суперечливих вимог: з одного боку, при підвищенні навантаження від колісної пари на рейки зростають вагові норми та провізна здатність доріг, що підвищує економічність та продуктивність тяги, а з іншого – зростають руйнування рейок, знос бандажів та рейок, що знижує ефективність тяги та може спричинити збої руху поїздів. Наприклад, відомо, що 98% випадків зламу рейок відбувається по контактним напругам. Ковзання коліс на 90% визначає знос і термін служби бандажів колісних пар. За статистичними спостереженнями у електровозів кожні 10 тис. км пробігу товщина бандажів зменшується від 0,5 до 1,5 мм. Все це в сукупності породжує невизначеність і ускладнює побудову розрахункової моделі сили тяги по зчепленню, яка була б достовірною за природою зчеплення, універсальною по обліку факторів, що діють по всій мережі доріг, і, нарешті такою, що задовольняє техніко-економічним вимогам.

### Постановка проблеми.

Основним показником, що визначає потенційні можливості контакту колеса з рейкою по зчепленню, зазвичай вважають фізичний коефіцієнт зчеплення, який дорівнює відношенню максимальної сили зчеплення, що розвивається одиночним колесом при рушанні з місця при постійному вертикальному навантаженні і відсутності будь-яких динамічних збурень, до цього навантаження.

Майже всі дані по фізичному коефіцієнту зчеплення отримані експериментально. У лабораторних умовах при терті сталі по сталі його значення доходять до 0,6-0,7 [3]. Однак на практиці фізичні коефіцієнти зчеплення, заміряні на залізницях, мають значний розкид і рідко перевищують значення 0,40-0,45, зареєстровані та нижчі значення аж до 0,06 [4, 5]. Основною причиною їх зниження є забруднення поверхонь катання рейок і коліс маслами, пилом у поєднанні з водою, залишками піску, опалим листям, продуктами зношування поверхонь тощо.

Зниження тягових можливостей контакту колеса з рейкою зі збільшенням швидкості кочення пояснюють двома основними причинами. По-перше, збільшенням інтенсивності динамічних процесів у системі колесо-рейка. По-друге, явищами, пов'язаними з тривалістю контактування та пластичністю матеріалів колеса та рейки. Щодо останньої причини, то можливості її усунення видаються вельми обмеженими, тоді як перша, пов'язана з динамічними характеристиками екіпажу, цілком піддається управлінню [1].

У зв'язку з цим **мета статті** – дослідження впливу вертикального та горизонтального динамічного навантаження на максимальний коефіцієнт зчеплення та представлення графічних залежностей для трьох станів контакту колеса та рейки.

#### Основна частина.

Дослідження проводилися у режимі реалізації сили тяги між колесом та рейкою. Проведенню випробувань передувала підготовка поверхонь контакту колеса і рейки для забезпечення трьох станів: чистого сухого (I), змоченого водою (II), забрудненого мастильними матеріалами (III). Послідовність проведення експерименту наступна [6, 7].

Маховик стенду розкручується електродвигуном, накопичуючи кінетичну енергію. Після вимкнення електродвигуна та відповідних перемикачів гідротрансформатора крутний момент від маховика передається колесу, яке реалізує його в контакт з рейкою. При цьому на рейки створюється гальмівне зусилля. У процесі випробувань вертикальна та горизонтальна складові зусиль від колеса на рейку створюються за допомогою пресвібратора та гідравлічної системи.

Діапазон змін значень коефіцієнта динаміки  $k_d$  та відносного поперечного ковзання  $\varepsilon_y$  у проведених дослідах визначено на підставі аналізу апріорної інформації з експлуатаційних характеристик локомотива та з урахуванням можливостей розробленої стенової установки. При цьому  $k_d$  змінювався від 0 до 0,4, а  $\varepsilon_y$  від 0 до 1%. Вертикальне динамічне навантаження та горизонтальна поперечна швидкість колеса по рейці змінювалися за гармонічним законом:

$$P_g = P_{st}(1 + k_d \sin wt); V_y = Aw \cos wt = 2A\pi f \cos 2\pi ft; \quad (1)$$

де  $P_{st}, k_d$  – амплітуда вертикального навантаження;

$A$  – амплітуда переміщень колеса щодо рейки;

$f$  – частота поперечних коливань.

Дослідні значення максимального коефіцієнта зчеплення визначаються за формулою:

$$\psi_{max} = \frac{F_{c.max} - F_{in}}{P_{st}}; \quad (2)$$

де  $F_{c.max}$  – максимальна сила зчеплення, виміряна в момент початку боксування тензодинамометром на магніторейковому гальмі;

$F_{in}$  – інерційна покривка на силу зчеплення, що визначається виразом  $F_{in} = m_r w_r$ ,

де  $m_r$  – маса рейки ( $m_r = 810$  кг);

$w_r$  – прискорення рейки в момент вимірювання сили зчеплення.

Для експериментальної оцінки впливу динамічних сил в контакт «колесо-рейка» на реалізовану величину максимальної сили зчеплення скористаємося методом теорії планування експериментів, який дозволяє істотно скоротити кількість проведених дослідів і отримати математичну модель досліджуваного процесу та оцінити спільний та самостійний вплив кожного з факторів на процес зчеплення. Метод планування експериментів передбачає вибір факторів, їх рівнів та інтервалів варіювання, визначення відгуку системи, складання матриці планування та отримання рівнянь регресії.

Згідно завдань цієї статті факторами, що варіюються, вважаємо коефіцієнт вертикальної динаміки і відносну швидкість поперечного ковзання колеса щодо рейки, що підтримуються на заданому рівні в ході експериментів.

Кожен фактор може приймати у досліді одне або кілька значень – рівнів. Кількість станів об'єкта досліджень, необхідне для реалізації всіх можливих поєднань рівнів факторів визначають за формулою [1, 8, 9]:

$$N = U^E; \quad (3)$$

де  $N$  – кількість станів;

$U$  – кількість рівнів;

$E$  – кількість факторів.

В якості відгуку при експериментах вибираємо максимальний коефіцієнт зчеплення  $\psi_{max}$ .

Розв'язання задачі, тобто встановлення залежності максимального коефіцієнта зчеплення  $\psi_{max}$  від досліджуваних факторів отримаємо у вигляді рівняння:

$$y = f(x_1, \dots, x_k), \quad (4)$$

де  $f$  – функція відгуку;

$x_1, x_k$  – фактори;

$$y = \psi_{\max} \cdot$$

В якості досліджуваних факторів розглядаємо коефіцієнт вертикальної динаміки та відносне ковзання.

Для побудови плану експерименту вибираємо вихідну точку (основний чи нульовий рівень), навколо якої визначаються дослідні точки, симетричні щодо нульового рівня. Результати дослід з вибраним набором факторів дозволяють побудувати модель, що використовується для визначення значень в інших точках факторного простору.

Представимо реальні та кодові значення досліджуваних факторів в табл. 1

Таблиця 1

**Реальні та кодові значення досліджуваних факторів**

Фактори	Кодові значення		Реальні значення	
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	k <sub>d</sub>	ε <sub>y</sub> , %
Інтервал варіювання	1	1	0,2	0,5
Основний рівень	0	0	0,2	0,5
Верхній рівень	1	1	0,4	1,0
Нижній рівень	-1	-1	0,0	0,0

Пошук математичної моделі почнемо з розгляду всіх можливих станів досліджуваної системи, що знаходиться під дією двох факторів, для цього реалізуємо план повного факторного експерименту (ПФЕ) типу 2. Побудуємо матрицю планування та результатів експерименту для різних станів контакту колеса з рейкою (табл.2).

Таблиця 2

**Матриця планування та результатів експерименту для різних станів контакту колеса з рейкою**

Матриця плану					Стан контакту					
№ досліджу	x <sub>0</sub>	план		x <sub>1</sub> , x <sub>2</sub>	I		II		III	
		x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>		ȳ <sub>i</sub>	s̄ <sub>i</sub> <sup>2</sup> (y)	ȳ <sub>i</sub>	s̄ <sub>i</sub> <sup>2</sup> (y)	ȳ <sub>i</sub>	s̄ <sub>i</sub> <sup>2</sup> (y)
1	1	1	1	1	0,296	0,0013	0,235	0,0019	0,089	0,00226
2	1	-1	1	-1	0,394	0,001	0,279	0,0016	0,106	0,00198
3	1	1	-1	-1	0,456	0,0012	0,313	0,0015	0,119	0,00213
4	1	-1	-1	2	0,55	0,009	0,388	0,00108	0,156	0,00176
Σ					1,696	0,0044	1,216	0,00554	0,47	1,0081

Дослідні значення максимального коефіцієнта зчеплення визначалися з осцилограми за формулою (2).

Перевірка значень максимального коефіцієнта зчеплення за критерієм Пірсона показала, що вибірка параметрів є випадковою величиною, взятої з генеральної сукупності з нормальним законом розподілу.

Середнє значення коефіцієнта зчеплення для всіх рівнів факторів визначалося для однакових швидкостей руху рейки за формулою:

$$y_i = \frac{y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in}}{n}; \tag{5}$$

де n – кількість дослідів на даному рівні факторів та швидкості руху (n = 80). Помилка відтворення дослідів дорівнює:

$$s_y = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \tag{6}$$

З метою виключення помилкових результатів підраховувалося відношення  $\frac{y_i - \bar{y}}{s_i}$ , яке порівнювалося з t – розподілом Стюдента за 5% рівнем значимості. Результати відкидалися, якщо відношення було більше табличного значення t – розподілу.

Перевірка однорідності дисперсій проводилася за критерієм Кохрена при 5%-ному рівні значущості  $G = \frac{\hat{S}^2 \max}{\sum_1^n \hat{S}_i^2(y)}$ . Отримані значення критерію для всіх трьох станів контакту  $G^I=0,409$ ;  $G^{II}=0,415$ ;  $G^{III}=0,308$  не

перевищують табличних, отже, гіпотеза про однорідність дисперсій не відкидається.

Дисперсія відтворення коефіцієнта зчеплення визначалася за формулою:

$$S^2\{y\} = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2(y)}{N} \quad (7)$$

$$S^2\{y\}_I = \frac{0,044}{4} = 0,0011; \quad S^2\{y\}_{II} = \frac{0,0054}{4} = 0,0013; \quad S^2\{y\}_{III} = \frac{0,0081}{4} = 0,002.$$

Виходячи з пропозиції, що коефіцієнт зчеплення лінійно залежить від досліджуваних факторів, опишемо процес взаємодії у вигляді лінійного рівняння регресії, яке дозволить оцінити силу впливу досліджуваних факторів на коефіцієнт зчеплення та з'ясувати ефект їхньої взаємодії:

$$y = b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2; \quad (8)$$

де  $y$  - досліджуваний відгук;  
 $b_0, b_1, b_2, b_{12}$  - коефіцієнти рівняння;  
 $x_1, x_2$  - фактори, що варіюються.

Коефіцієнти рівняння регресії визначимо за формулою:

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{y}_i x_{ij}, \quad (9)$$

де  $i = 1, 2; j = 0, 1, 2$  - номер фактору.

У результаті обчислень отримаємо залежність коефіцієнта зчеплення від досліджуваних факторів.

Математичні моделі досліджуваних процесів для трьох станів контакту колесо-рейка представлені в табл.3.

Таблиця 3

Математичні моделі досліджуваних процесів для трьох станів контакту колесо-рейка

Стан контакту «колесо-рейка»	Рівняння регресії
I	$y^I = 0,424 - 0,048x_1 - 0,079x_2 - 0,002x_1x_2$
II	$y^{II} = 0,304 - 0,0297x_1 - 0,0468x_2 - 0,0775x_1x_2$
III	$y^{III} = 0,118 - 0,0135x_1 - 0,02x_2 - 0,005x_1x_2$

Адекватність отриманих математичних моделей встановимо порівнюванням розрахункового та табличного значень критерію Фішера при 3% рівні значущості, для чого розрахуємо  $F = \frac{S_{ag}^2}{S^2\{y\}}$ ,

де  $S_{ag}^2 = \sum_{i=1}^N \Delta y_i^2 / f$  - дисперсія адекватності;

$f$  - число ступенів свободи.

Експериментальні значення критерію Фішера менші за табличні, що свідчить про адекватність отриманих рівнянь.

Значимість коефіцієнтів у рівняннях регресії перевірялася за  $t$ -критерієм Стьюдента для рівня значимості 0,05. Отримані довірчі інтервали порівнювалися з абсолютними величинами коефіцієнтів рівнянь регресії. Оскільки коефіцієнти виявилися більше довірчих інтервалів, всі вони значущі.

Аналізуючи отримані рівняння регресії, можна дійти невтішного висновку у тому, що зі збільшенням досліджуваних чинників максимальний коефіцієнт зчеплення зменшується. Крім того, фактор має більший вплив на максимальний коефіцієнт зчеплення, ніж фактор  $x_1$ , так як  $|0,079| > |0,048|$ ;  $|0,0468| > |0,0297|$ ;  $0,02 > 0,0135$ .

У рівняннях табл. 3 фактори входять у кодованому масштабі. Від кодованих значень до натуральних перейдемо, скориставшись формулами:

$$x_1 = \frac{k_d - 0,2}{0,2}; \quad x_2 = \frac{\varepsilon_y - 0,5}{0,5} \quad (10)$$

Підставляючи ці вирази у рівняння табл. 3 отримаємо:

$$\begin{aligned} \psi^I_{\max} &= 0,549 - 0,23k_d - 0,154\varepsilon_y - 0,02k_d\varepsilon_y \\ \psi^{II}_{\max} &= 0,388 - 0,188k_d - 0,109\varepsilon_y - 0,078k_d\varepsilon_y \\ \psi^{III}_{\max} &= 0,156 - 0,0925k_d - 0,05\varepsilon_y - 0,05k_d\varepsilon_y \end{aligned} \quad (11)$$

Отримані математичні моделі описують зчпні якості колеса та рейки за наявності зовнішніх динамічних збурень (коливань вертикального та горизонтального навантаження в контакті «колесо-рейка»).

На рис. 1 графічно представлені отримані залежності для трьох станів контакту колеса та рейки.

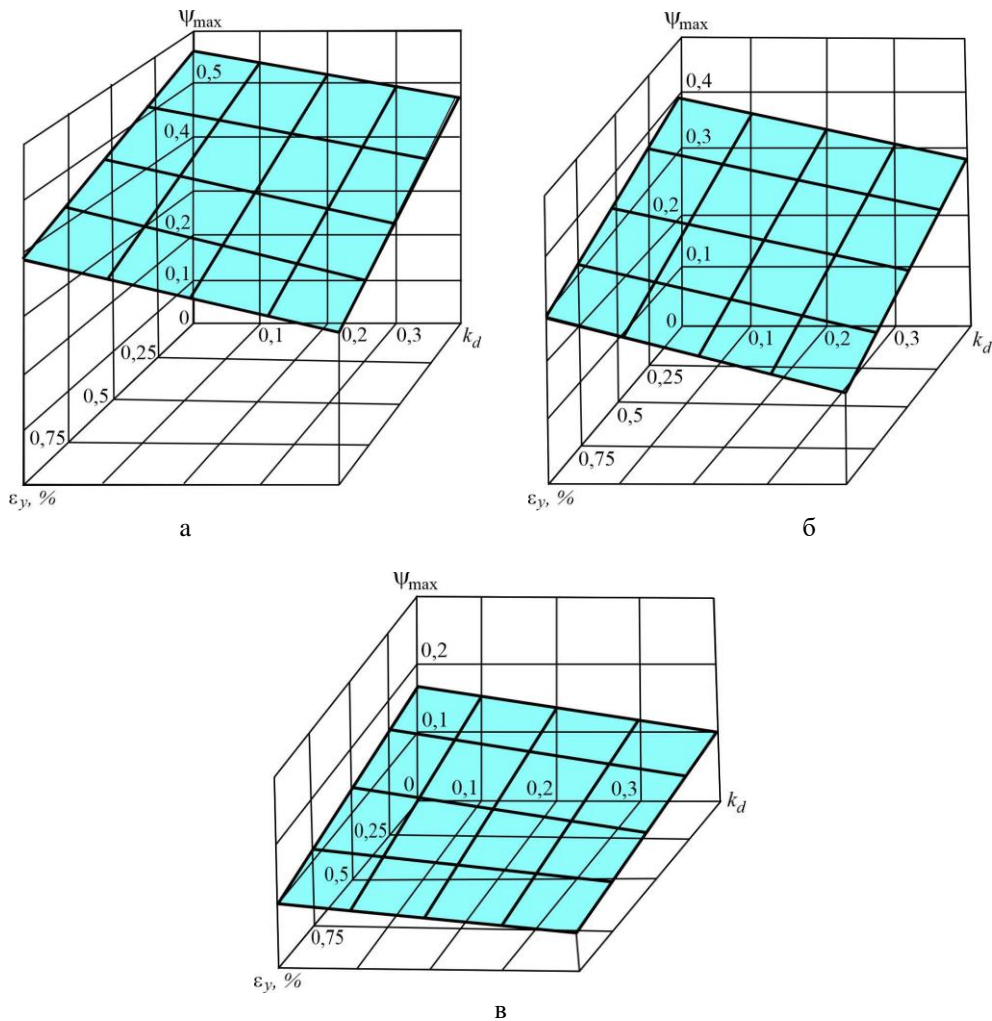


Рисунок 1 - Теоретичні (кореляційні) залежності максимального коефіцієнта зчеплення від коефіцієнта вертикального та горизонтального навантаження: а – чистої сухої рейки, б – змоченої водою рейки, в – забрудненої мастильними матеріалами рейки

Крім цього метою стендових випробувань була перевірка методики визначення тягових якостей локомотива з використанням для цього критерію, названого коефіцієнтом запасу по зчепленню  $\tau$ .

Для цього в процесі проведення випробувань щодо визначення впливу динамічних навантажень на максимальний коефіцієнт зчеплення визначався коефіцієнт запасу по зчепленню для коефіцієнта тяги  $k_0=0,7$ .

На рис. 2 представлені залежності коефіцієнта запасу по зчепленню від коефіцієнта вертикальної динаміки  $k_d$  та відносно горизонтального ковзання  $\varepsilon_y$ , побудовані для середніх значень  $\tau_{0,7}$ , отриманих у процесі дослідів. Аналіз отриманих результатів свідчить про значний вплив динамічних навантажень коефіцієнта запасу по зчепленню. Так збільшення коефіцієнта вертикальної динаміки від 0 до 0,4 зменшує  $\tau_{0,7}$  на 17%, а збільшення відносно поперечного ковзання від 0 до 1,0% зменшує  $\tau_{0,7}$  на 25%.

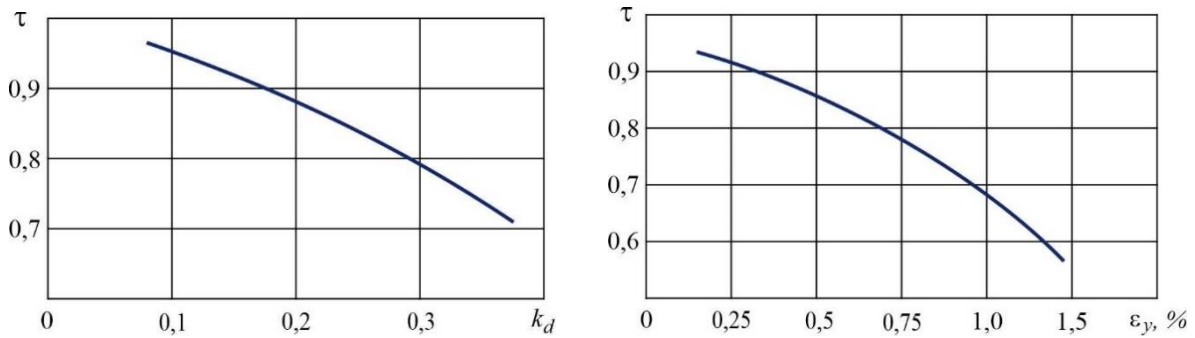


Рисунок 2 - Експериментальні залежності коефіцієнта запасу по зчепленню від коефіцієнта вертикальної динаміки  $k_d$  та відносно горизонтального ковзання  $\varepsilon_y$

### Висновки.

Порівнюючи два методи оцінки впливу динамічних навантажень на тягові якості контакту «колесо-рейка» за максимальними значеннями коефіцієнта зчеплення і за значеннями коефіцієнта запасу по зчепленню можна зробити висновок про схожість отриманих результатів. Так із збільшенням  $k_d$  і  $\varepsilon_y$  значення як максимального коефіцієнта зчеплення  $\psi_{\max}$  так і коефіцієнт запасу по зчепленню  $\tau_{0,7}$  зменшуються. При цьому, якщо зі зростанням  $k_d$  от 0 до 0,3  $\psi_{\max}$  зменшується на 12,7%, то  $\tau_{0,7}$  зменшується на 10%; зі зростанням  $\varepsilon_y$  від 0 до 1,0%  $\psi_{\max}$  зменшується на 28%, а  $\tau_{0,7}$  на 20%, тобто різниця в абсолютних величинах цих оцінок становить 2...8%, залишаючи незмінним їх характер.

Цей висновок може бути підтвердженням доцільності застосування розробленого критерію – коефіцієнта запасу по зчепленню – для порівняльної оцінки тягових якостей локомотивів та окремих колісних пар.

### Література

1. Горбунов Н.И. Энергетическое воздействие двухфазного потока на зону контакта движущего колеса с рельсом – метод управления сцепными характеристиками локомотива: Монография. / Н.И. Горбунов, М.В. Ковтанец, Т.Н. Ковтанец – Одесса: КУПРИЕНКО СВ, 2019. – 181 с.
2. Gorbunov M. Experimental study of the limit-maximum adhesion coefficient / M. Gorbunov, M. Kovtanets, T. Kovtanets / Proceedings of 24th International Scientific Conference. Transport Means 2020, September 30 - October 02, Kaunas, Lithuania. 2020. – P. 382-386.
3. Лужнов Ю.М. Сцепление колес с рельсами. Природа и закономерности / Ю.М. Лужнов. – М.: Интекст. 2003. – 144 с.
4. Костюкевич А.И. Экспериментальная проверка эффективности струйно-абразивного воздействия на рельсы для улучшения фрикционных свойств контакта «колесо-рельс» / А.И. Костюкевич, Н.И. Горбунов, М.В. Ковтанец // Вісник СЧУ ім. В. Даля. – 2013. – Ч.1, № 18 (207). – С. 33-37.
5. Gorbunov M. Reducing the wheel-rail system wear intensity with thermomechanical impact / M. Gorbunov, M. Kovtanets, G. Bureika, T. Kovtanets // Proceedings of the 23rd International Scientific Conference. Transport Means 2019, 02-04 October, Palanga, Lithuania. 2019. – P. 1260-1265.
6. Горбунов Н.И. Анализ и разработка путей повышения сцепных качеств локомотивов / Н.И. Горбунов, М.В. Ковтанец, Е.С. Ноженко, О.В. Просвірова // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту Міністерства освіти і науки України: Серія «Транспортні системи і технології». – Вип. 31. – К.: ДУИТ, 2018. – С. 59-74.
7. Патент України №82903 на корисну модель Стенд для дослідження зчеплення колеса з рейкою та випробування елементів буксового ресорного підвішування МПК (2006.01) G01M 1/04 / Горбунов М.І., Ковтанець М.В., Кравченко К.О., Кара С.В., Просвірова О.В., Горбунов М.М.; заявник і власник СЧУ ім. В.Даля. – u201214566; заявл. 19.11.2012; опубл. 27.08.2013, Бюл. № 16. – 3 с.
8. Горбунов Н.И. Теоретический анализ степени влияния параметров струйно-абразивного потока на коэффициент трения колеса с рельсом / Н.И. Горбунов, М.В. Ковтанец, Е.А. Кравченко, В.Д. Черников // Вісник СЧУ ім. В. Даля. – 2013. – № 4 (193). – С. 63-67.
9. Gorbunov M. Research to improve traction and dynamic quality of locomotives / M. Gorbunov, V. Pistek, M. Kovtanets, O. Nozhenko, S. Kara, P. Kučera // JVE International LTD. Vibroengineering Procedia. – 2017. – Vol. 13, ISSN 2345-0533. – P. 159-164.

### References

1. Horbunov N.Y. Enerhetycheskoe vozdeistviye dvukhfaznogo potoka na zonu kontakta dvyzhushcheho koleasa s relsom – metod upravleniya stsepnymy kharakterystykamy lokomotyva: Monohrafiya. / N.Y. Horbunov, M.V. Kovtanets, T.N. Kovtanets – Odessa: KUPRYENKO SV, 2019. – 181 s.

2. Gorbunov M. Experimental study of the limit-maximum adhesion coefficient / M. Gorbunov, M. Kovtanets, T. Kovtanets // Proceedings of 24th International Scientific Conference. Transport Means 2020, September 30 - October 02, Kaunas, Lithuania. 2020. – P. 382-386.
3. Luzhnov Yu.M. Stseplenye koles s relsamy. Pryroda y zakonornosty / Yu.M. Luzhnov. – M.: Yntekst. 2003. – 144 s.
4. Kostiukevych A.Y. Eksperymentalnaia proverka efektyvnosti struino-abrazyvnoho vozdeistvyia na relsy dlia uluchsheniia fryktsyonnykh svoistv kontakta «koleso-rels» / A.Y. Kostiukevych, N.Y. Horbunov, M.V. Kovtanets // Visnyk SNU im. V. Dalia. – 2013. – Ch.1, № 18 (207). – S. 33-37.
5. Gorbunov M. Reducing the wheel-rail system wear intensity with thermomechanical impact / M. Gorbunov, M. Kovtanets, G. Bureika, T. Kovtanets // Proceedings of the 23rd International Scientific Conference. Transport Means 2019, 02-04 October, Palanga, Lithuania. 2019. – P. 1260-1265.
6. Horbunov N.Y. Analiz y razrobotka putei povysheniia stsernykh kachestv lokomotyvov / N.Y. Horbunov, M.V. Kovtanets, E.S. Nozhenko, O.V. Prosvyrova // Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho ekonomiko-tekhnologichnoho universytetu transportu Ministerstva osvity i nauky Ukrainy: Serii «Transportni systemy i tekhnolohii». – Vyp. 31. – K.: DUIT, 2018. – S. 59-74.
7. Patent Ukrainy №82903 na korysnu model Stend dlia doslidzhennia zchepлення kolesa z reikoiu ta vyprobuvannia elementiv buksovoho resornoho pidvishuvannia MPK (2006.01) G01M 1/04 / Horbunov M.I., Kovtanets M.V., Kravchenko K.O., Kara S.V., Prosvirova O.V., Horbunov M.M.; zaiavnyk i vlasnyk SNU im. V.Dalia. – u201214566; zaiavl. 19.11.2012; opubl. 27.08.2013, Biul. № 16. – 3 s.
8. Horbunov N.Y. Teoretycheskyi analiz stepeny vlyiania parametrov struino-abrazyvnoho potoka na koefytsyent treniia kolesa s relsom / N.Y. Horbunov, M.V. Kovtanets, E.A. Kravchenko, V.D. Chernykov // Visnyk SNU im. V. Dalia. – 2013. – № 4 (193). – S. 63-67.
9. Gorbunov M. Research to improve traction and dynamic quality of locomotives / M. Gorbunov, V. Pistek, M. Kovtanets, O. Nozhenko, S. Kara, P. Kučera // JVE International LTD. Vibroengineering Procedia. – 2017. – Vol. 13, ISSN 2345-0533. – P. 159-164.

*The paper analyzes the factors that significantly affect the value of the adhesion coefficient. Investigations of the influence of vertical and horizontal dynamic loads on the maximum coefficient of adhesion for three states of frictional contact «wheel-rail» have been carried out. As a result of the experimental and theoretical studies, the dependences of the adhesion safety factor on the coefficient of vertical dynamics and relative to horizontal slip were obtained. The method of determining the traction qualities of a locomotive using the criterion of the coefficient of safety for adhesion has been verified.*

**Key words:** locomotive, wheel, rail, friction coefficient, dynamic load, traction qualities, slip.

**Ковтанець М.В.** Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, доцент кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин, к.т.н.

**Сергієнко О.В.** Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, доцент кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин, к.т.н.

**Марченко Д.М.** Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, перший проректор, д.т.н.

**Ноженко В.С.** Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського, проректор з навчальної роботи, к.т.н.

**Ковтанець Т.М.** Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, аспірант кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин.