

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

УДК 625.14.031

Д. М. КУРГАН^{1*}, О. В. ГУБАР², М. О. ГАВРИЛОВ³

^{1*}Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, ел. пошта kurhan.d@gmail.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

²Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, ел. пошта neris@ua.fm, ORCID 0000-0001-8683-5372

³Каф. «Проектування і будівництво доріг», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта maxgavrilla@gmail.com, ORCID 0000-0002-1321-170X

МЕТОДИКА ІНЖЕНЕРНОГО РОЗРАХУНКУ КОЕФІЦІЄНТА СТІЙКОСТІ ПРОТИ ВКОЧУВАННЯ КОЛЕСА НА РЕЙКУ

Мета. Одним із показників взаємодії колії й рухомого складу, недотримання якого може призвести до порушення безпеки руху, а саме до сходження, є умова забезпечення стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки. Метою цієї роботи є створення методики практичного інженерного розрахунку коефіцієнта стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки. Викладена методика буде мати вичерпну інформацію як із розрахункових формул, так і з довідкових матеріалів, для виключення необхідності залучення додаткових джерел та спеціального програмного забезпечення. **Методика.** Основною задачею реалізації поставленої мети є винесення на інженерний рівень розрахунку горизонтальних сил. Унаслідок складності процесу взаємодії колії та рухомого складу й необхідності врахування великої кількості факторів, що мають вплив на результат, як правило, для визначення горизонтальних сил застосовують складні динамічні моделі. Можливий розв'язок полягає в припущенні, що для конкретного типу рухомого складу горизонтальна сила може бути розрахована за лінійною залежністю від значення непогашеного прискорення. Для цього була використана аналітична методика розрахунку горизонтальних сил. **Результати.** Автори визначили відсутні коефіцієнти розрахунку горизонтальної сили залежно від непогашеного прискорення для деяких типів маневрових локомотивів та для вантажного вагона з урахуванням рівня його завантаження. **Наукова новизна.** У роботі набули подальшого розвитку науково-практичні підходи щодо аналізу взаємодії колії й рухомого складу в горизонтальній площині. **Практична значимість.** Запропонована покрокова методика розрахунку коефіцієнта стійкості дає можливість на інженерному рівні проводити практичний аналіз забезпечення запасу стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки, що необхідно під час розслідування причин сходження рухомого складу з рейок та для низки інших задач, пов'язаних із рухом у кривих ділянках колії.

Ключові слова: залізнична колія; крива; горизонтальна сила; бокова сила; коефіцієнт стійкості; вкочування колеса на рейку; непогашене прискорення; взаємодія колії й рухомого складу; безпека руху

Вступ

Одним із показників взаємодії колії й рухомого складу, недотримання якого може призвести до порушення безпеки руху, а саме до сходження, є умова забезпечення стійкості про-

ти вкочування гребеня колеса на головку рейки. Процес вкочування виникає внаслідок дії настільки значних горизонтальних сил, що, у супереч силам тертя й вертикального навантаження, вони підіймають колесо ребордою на рейку. Такі горизонтальні сили можуть виникнути

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

тільки під час руху в кривих ділянках колії [7, 20] і, як правило, за наявності відхилень від норм утримання рухомого складу або колії.

Основні положення методу розрахунку коефіцієнта стійкості проти вкочування гребеня колеса на рейки були закладені ще в роботах проф. Г. М. Шахунянца [16], проф. О. П. Єршкова [2], проф. М. А. Чернишова [15] та ін. Суттєвий розвиток дослідження за цим напрямом набули в роботах проф. Е. М. Сокола [12]. Сучасний вигляд розрахунків викладено в підручнику проф. Е. І. Даніленко [1]. Складність питання пояснює продовження його досліджень у наукових роботах і сьогодні, наприклад, у дисертаційній роботі на здобуття ступеня д. т. н. І. В. Клименко (частково положення дисертації наведені в роботі [4]) та інших роботах вітчизняних і закордонних учених. Так, у роботах [17, 18, 24] розглянуто вплив позовжніх сил на стійкість вантажних вагонів, у роботах [19, 25] – моделювання стійкості колісної пари, в роботах [5, 21] надані рекомендації щодо розрахунку горизонтальних сил, у роботах [13, 22, 23] проаналізовані динамічні показники вагона залежно від умов експлуатації.

Основу наявного методу розрахунку коефіцієнта стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки складає розрахункова схема сил взаємодії між колесом і рейкою в точці контакту, рис. 1.

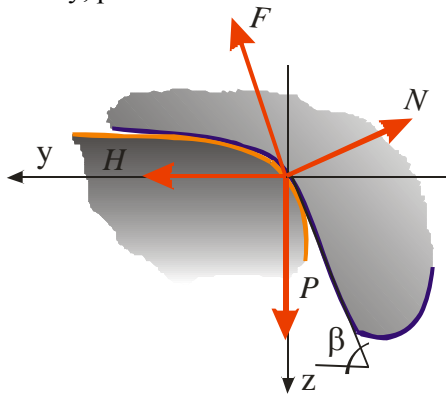


Рис. 1. Розрахункова схема сил взаємодії між колесом і рейкою в точці контакту

Fig. 1. Calculation scheme of the interaction forces between the wheel and the rail at the contact point

Взаємозв'язок між силами можна визначити через рівняння квазістатичної рівноваги їх проєкцій на вертикальну й горизонтальну осі:

$$\begin{cases} H - N \sin \beta + \mu N \cos \beta = 0 \\ P - N \cos \beta - \mu N \sin \beta = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

де P – вертикальне навантаження колеса на рейку; H – горизонтальна сила тиску від колеса на рейку; N – реакція рейки; μ – коефіцієнт тертя колеса по рейці; F – сила тертя, що протидіє зісковзуванню колеса, $F = \mu N$; β – кут нахилу гребеня колеса.

У «Методичних вказівках щодо порядку службового розслідування причин сходжень рухомого складу з рейок на залізницях України» ЦРБ–0036 зазначено, що «у всіх випадках для визначення причин сходження рухомого складу з рейок у кривій ділянці колії необхідно...» серед іншого «визначити коефіцієнт стійкості вкочування гребеня колеса на головку зовнішньої рейки» [8]. Для цього використовують наведену розрахункову формулу, яка враховує відношення вертикальних і горизонтальних сил, що діють від колеса на рейку. На жаль, відсутність у [8] пояснень щодо визначення цих сил унеможливило її безпосереднє застосування на інженерному рівні.

Мета

Основною метою цієї роботи є створення методики практичного інженерного розрахунку коефіцієнта стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки. Викладена методика буде мати вичерпну інформацію як із розрахункових формул, так і з довідкових матеріалів, для виключення необхідності залучення додаткових джерел та спеціального програмного забезпечення.

Методика

Основною задачею реалізації поставленої мети є винесення на інженерний рівень розрахунку горизонтальних сил. Унаслідок складності процесу взаємодії колії та рухомого складу й необхідності врахування великої кількості факторів, що мають вплив на результат, як правило, для визначення горизонтальних сил застосовують складні динамічні моделі. Можливий розв'язок полягає у використанні рекомендацій, наведених у роботах [1, 11]. У них доведено, що для конкретного типу рухомого складу горизонтальна сила може бути розрахо-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

вана за лінійною залежністю від значення непогашеного прискорення ($\alpha_{\text{нп}}$):

$$H = f(a, b, \alpha_{\text{нп}}). \quad (2)$$

Коефіцієнти a і b попередньо визначають апроксимацією результатів моделювання руху в кривій залежно від типу рухомого складу та умов експлуатації і подають як довідкові дані. Таблиці з такими коефіцієнтами наведені в ЦП–0117 [11] та, у більш розширеному вигляді, – у роботі [1].

Слід звернути увагу, що в роботі [11] сили визначають у кг, тому для подальшого використання сил у кН їх необхідно рахувати за формулою:

$$H = (a + b\alpha_{\text{нп}})0,001g, \quad (3)$$

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

Автори цієї роботи додатково визначили коефіцієнти для деяких типів рухомого складу, які відсутні у вказаних джерелах. Це стосується маневрових тепловозів і різних варіантів осьового навантаження для вантажних вагонів.

Для вантажних вагонів рівень завантаження впливає не тільки на вертикальні сили, а й на горизонтальні. Це пояснює необхідність визначення різних коефіцієнтів для залежності (2) відповідно до осьового навантаження.

Для цього була використана аналітична методика розрахунку горизонтальних сил [1, 6, 15]. Відповідно до неї варіюється положення центра обертання візка, яке задають як відстань від осі першої колісної пари (X). Кожному варіанту такого положення відповідають певні значення горизонтальних сил взаємодії колесо – рейка (направляюча (Y), бокова (H), а в разі необхідності й рамна, як показник взаємодії колісна пара – рейка) і відцентрової сили (F_c):

$$\{Y, H, F_c\} = f(X). \quad (4)$$

Результати таких розрахунків для різних рівнів завантаження вантажного вагона наприкладі пари сил направляюча – відцентрова показано на рис. 2. Для цих і подальших розрахунків коефіцієнт тертя колеса по рейці був узятий

$\mu = 0.25$. У легенді рисунка в дужках вказано відповідне значення осьового навантаження в т/вісь.

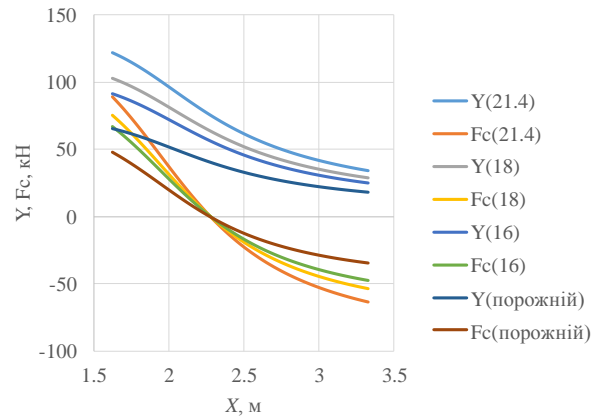


Рис. 2. Направляюча (Y) й відцентрова (F_c) сили залежно від відстані (X) центра обертання візка до першої осі для вантажного вагона

Fig. 2. Direction (Y) and centrifugal (F_c) forces depending on the distance (X) of the bogie rotation center to the first axis for the freight car

Ураховуючи, що відцентрова сила у свою чергу є функцією від непогашеного прискорення $F = f(\alpha_{\text{нп}})$, через зв'язок (4) можна отримати горизонтальні сили вже залежно від непогашеного прискорення. На рис. 3 показано розрахунки й подальшу апроксимацію таких залежностей для вантажного вагона.

Коефіцієнти визначено апроксимацією результатів для діапазону непогашеного прискорення від $-0,3$ до $0,7 \text{ м/с}^2$. Ураховуючи, що функція (2) зберігає майже лінійний вигляд у значно більших межах, застосування отриманих даних не обмежується вказаним діапазоном.

У деяких випадках слід брати до уваги, що зазначена методика оцінки стійкості колеса на рейці базується на співвідношеннях вертикальних і горизонтальних сил без урахування поздовжніх. У випадку порожніх або мала навантажених вагонів уже дія саме поздовжніх сил може бути причиною сходження [17, 18, 24].

Аналогічні розрахунки були виконані для деяких типів маневрових локомотивів. Результати наведені на рис. 4 і 5.

Отримані коефіцієнти для розрахунку горизонтальної сили в залежності від непогашеного прискорення наведені в табл. 1.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

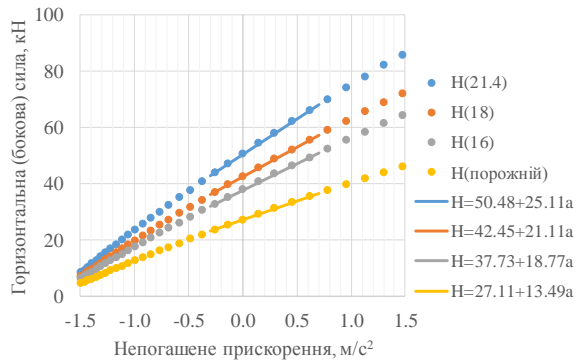


Рис. 3. Розрахунки та апроксимації горизонтальної сили для вантажного вагона

Fig. 3. Calculations and approximations of horizontal force for a freight car

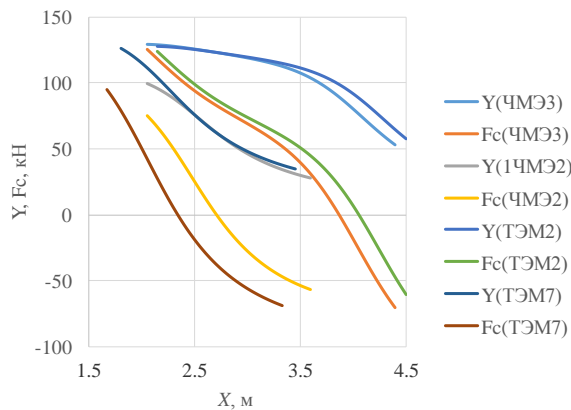


Рис. 4. Направляюча (Y) й відцентрова (F_c) сили залежно від відстані (X) центра обертання візка до першої осі для маневрових локомотивів

Fig. 4. Direction (Y) and centrifugal (F_c) forces depending on the distance (X) of the bogie rotation center to the first axis for the shunting locomotive

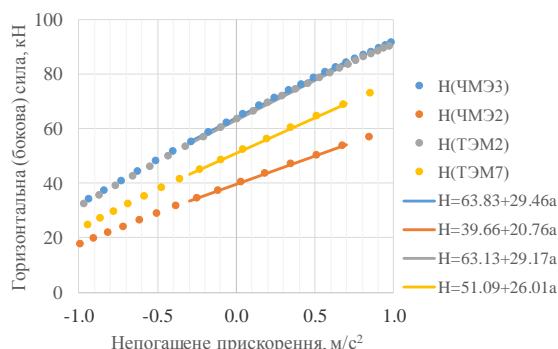


Рис. 5. Розрахунки та апроксимації горизонтальної сили для маневрових локомотивів

Fig. 5. Calculations and approximations of horizontal force for shunting locomotives

Результати

Унаслідок зазначеного запропонована методика інженерного розрахунку коефіцієнта стійкості проти вкочування колеса на рейки як послідовність, поділена на декілька кроків. Кожен крок включає необхідні пояснення, розрахункові формули з переліком числових значень змінних величин та відповідні посилання на чинні нормативні документи.

1. Визначити значення радіуса R (м) і підвищення зовнішньої рейки h (мм) за колієвимірною стрічкою або ручним вимірюванням. У разі ручного вимірювання методом стрілкою 20 м радіус визначають за формулою:

$$R = \frac{50000}{f_p}, \quad (5)$$

де f_p – стріла, мм.

Цей пункт відповідає ф. (11.3) ЦРБ–0036 [8], ф. (3) ЦП–0267 [14], ф. (3.1) ЦП–0236 [10], ф. (2.2) ЦП–0269 [3].

2. Розрахувати значення непогашеного прискорення $\alpha_{\text{нп}}$ (м/с²)

$$\alpha_{\text{нп}} = \frac{V^2}{3,6^2 R} - 0,00613h; \quad (6)$$

де V – швидкість руху, км/год.

Цей пункт відповідає ф. (11.8) ЦРБ–0036 [8], ф. (4.2) ЦП–0236 [10], ЦП–0269 [3].

3. Розрахувати значення горизонтальної (H) і вертикальної (P) сил (кН)

$$H = a + b\alpha_{\text{нп}}. \quad (7)$$

Значення вертикальної сили й коефіцієнтів a і b наведені в табл. 1.

Для інших типів рухомого складу їх значення можна взяти з джерел [1, 11].

Цей пункт відповідає ЦП–0117 [11].

4. Розрахувати коефіцієнт стійкості вкочування гребеня колеса на головку рейки:

$$\varepsilon = \frac{\text{tg}\beta - \mu}{1 + \mu \cdot \text{tg}\beta} \cdot \frac{P}{H}, \quad (8)$$

де β – кут нахилу бандажа колеса, які визначають за результатами натурних вимірювань. За їх відсутності можна взяти для локомотивів $\beta = 70^\circ$ ($\text{tg}70^\circ = 2,747$), для вагонів $\beta = 60^\circ$

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

($\text{tg}60^\circ = 1,732$). Коефіцієнт тертя колеса по рейці в більшості випадків беруть $\mu = 0,25$.

Цей пункт відповідає ф. (8.3) ЦРБ–0036 [8].

Формула (8) отримана з розв'язання системи рівнянь (1).

Таблиця 1

Вертикальна сила й коефіцієнти для визначення горизонтальної (бокової) сили

Table 1

Vertical force and coefficients for determining the horizontal (lateral) force

Тип рухомого складу	Вертикальне навантаження від колеса на рейку (P), кН	Коефіцієнти для визначення горизонтальної сили	
		a	b
Пасажирський вагон на візках КВЗ–ЦНІІ	71,25	30,55	15,99
Вантажний чотирьохвісний вагон на візках ЦНІІ–ХЗ–О	105,0 (21,4 т/вісь)	50,48	25,11
	88,3 (18 т/вісь)	42,45	21,11
	78,5 (16 т/вісь)	37,73	18,77
	56,4 (порожній)	27,11	13,49
ТЕМ2	100	63,13	29,17
ТЕМ7	112,5	51,09	26,01
ЧМЕ2	92,5	39,66	20,76
ЧМЕ3	102,5	63,83	29,46

5. *Перевірити умову, що коефіцієнт стійкості вкочування гребеня колеса на головку рейки більший за мінімальне значення. З урахуванням запасу стійкості, мінімально допустиме значення встановлюється більше 1 і, відповідно до [6] та ЦП–0235 [9], складає: для локомотивів – 1,4; для вантажних вагонів – 1,3; для пасажирських вагонів – 1,6.*

Практичний приклад. На основі наведеної методики розглянемо приклад визначення коефіцієнта стійкості проти вкочування колеса на рейки для вантажного вагона на візках ЦНІІ–ХЗ–О із середнім завантаженням 18 т/вісь, що рухається по заданій ділянці зі швидкістю 40 км/год.

1. На ділянці зроблено зйомку плану методом стріл та підвищення зовнішньої рейки. Результати зйомки наведено на рис. 6.

2. Непогашені прискорення в кожній точці кривої визначені за формулою (6) і наведені на рис. 7.

3. Відповідно до табл. 1 вертикальне навантаження від колеса на рейку складатиме 88,3 кН. За формулою (7) і табл. 1. розраховуємо значення горизонтальної сили. Результати розрахунків наведено на рис. 8.

4. За формулою (8) у кожній точці кривої визначаємо коефіцієнт стійкості вкочування гребеня колеса на головку рейки. Узято кут нахилу бандажа колеса $\beta = 60^\circ$, коефіцієнт тертя колеса по рейці $\mu = 0,25$. Результати розрахунків наведено на рис. 9.

5. Відповідно до рис. 9, найменше отримане значення коефіцієнта стійкості 1,932, що не менше мінімально допустимого значення, яке для вантажних вагонів складає 1,3 [6, 9].

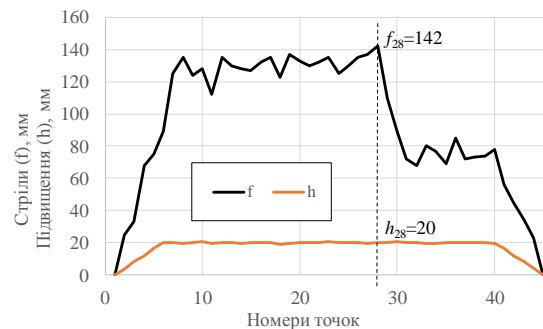


Рис. 6. Графік стріл та підвищень на ділянці

Fig. 6. Graph of versines and elevations at the site

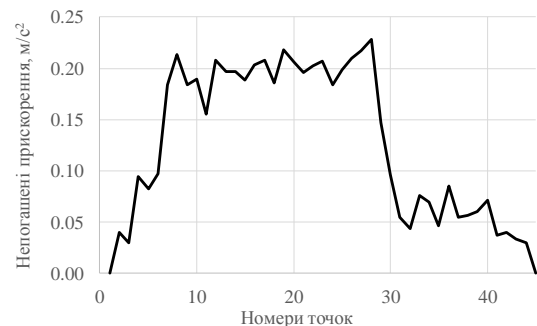


Рис. 7. Результати розрахунку непогашених прискорень

Fig. 7. The results of calculation of unbalanced accelerations

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

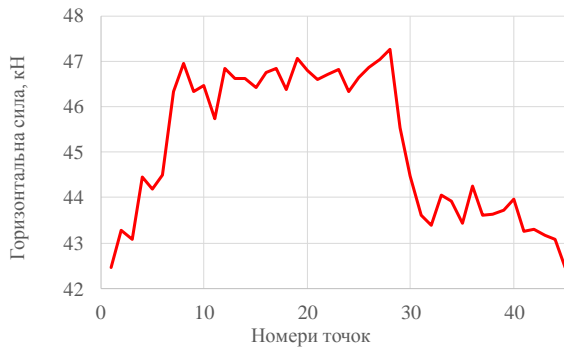


Рис. 8. Результати розрахунку горизонтальної сили

Fig. 8. The results of calculation of horizontal force

Таким чином, на всій розглянутій ділянці забезпечується запас стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки.

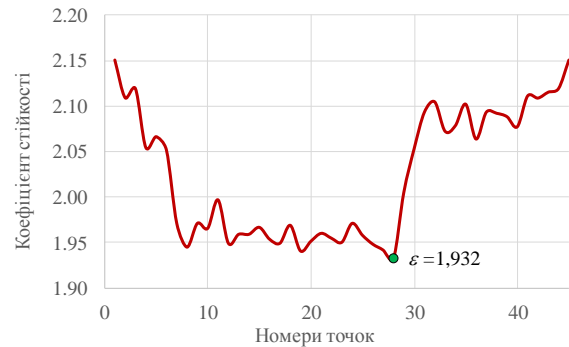


Рис. 9. Результати розрахунку коефіцієнта стійкості вкочування гребеня колеса на головку рейки

Fig. 9. The results of calculating the stability coefficient of wheel flange climbing on the rail head

Для точки з мінімальним значенням коефіцієнта стійкості (точка № 28 за рис. 6) розрахунки основних величин показані в табл. 2.

Таблиця 2

Числовий приклад розрахунку коефіцієнта стійкості

Table 2

Numerical example of calculating the stability coefficient

Величина	Посилання	Розрахунок
Стріла	Натурні виміри	142 мм
Підвищення		20 мм
Радіус	ф. (5)	$R = \frac{50000}{142} = 352 \text{ м}$
Непогашене прискорення	ф. (6)	$\alpha_{\text{нп}} = \frac{40^2}{3,6^2 \cdot 352} - 0,00613 \cdot 20 = 0,228 \text{ м/с}^2$
Горизонтальна сила	ф. (7), табл. 1	$H = 42,45 + 21,11 \cdot 0,228 = 47,263 \text{ кН}$
Вертикальна сила	табл. 1	$P = 88,3 \text{ кН}$
Коефіцієнт стійкості	ф. (8)	$\varepsilon = \frac{1,732 - 0,25}{1 + 0,25 \cdot 1,732} \cdot \frac{88,3}{47,263} = 0,932$

Наукова новизна та практична значимість

У роботі набули подальшого розвитку науково-практичні підходи щодо аналізу взаємодії колії й рухомого складу в горизонтальній площині.

Автори визначили відсутні коефіцієнти розрахунку горизонтальної сили залежно від непо-

гашеного прискорення для деяких типів маневрових локомотивів та для вантажного вагона з урахуванням рівня його завантаження.

Запропонована покрокова методика розрахунку коефіцієнта стійкості дає можливість на інженерному рівні проводити практичний аналіз забезпечення запасу стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки, що необхідно під час розслідування причин схо-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

дження рухомого складу з рейок та для низки інших задач, пов'язаних із рухом у кривих ділянках колії.

Висновки

Однією з причин сходження рухомого складу з рейок може бути незабезпечення запасу стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки. Розрахунковий аналіз цього показника вимагав застосування складних математичних інструментів, що унеможливило його виконання на інженерному рівні. Запропонована покрокова методика розв'язує це питання.

Мінімальне значення коефіцієнта стійкості,

установлене в нормативних документах, включає певний запас стійкості, пов'язаний, у тому числі, з деякими пропущеннями, що мають місце в методі розрахунків. Якщо в результаті аналізу отримане значення коефіцієнта більше за мінімально допустиме, то це дає обґрунтування для висновку щодо забезпечення надійності запасу стійкості проти вкочування гребеня колеса на рейку. Результат, за якого визначений коефіцієнт менший від нормативного, не надає можливості зробити остаточний висновок щодо причин сходження, але вказує на необхідність додаткового аналізу за цим показником із застосуванням більш спеціалізованих математичних інструментів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Даніленко Е. І. *Залізнична колія* : підруч. для вищ. навч. закл. Київ : Інпрес, 2010. Т. 2. 456 с.
2. Ершков О. П. *Расчеты поперечных горизонтальных сил в кривых* : сб. тр. ВНИИЖТа. Москва : Транспорт, 1966. № 301. 235 с.
3. *Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України* : ЦП-0269. [Чинний від 2012-03-01]. Київ, 2012. 456 с.
4. Коротенко М. Л., Клименко И. В., Панасенко В. Я. *Безопасность от схода колеса с рельсов и совершенствование конструкций подвижного состава* : монографія. Днепропетровск, 2013. 220 с.
5. Кузишин А. Я., Батіг А. В. Використання додаткового критерію оцінювання безпеки руху від сходу колеса з рейки в судовій залізнично-транспортній експертизі. *Теорія та практика судової експертизи і криміналістики*. 2018. № 18. С. 454–460. DOI: <https://doi.org/10.32353/khrife.2018.51>
6. Курган Д. М., Губар О. В. Оцінка безпеки руху за умови забезпечення стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2016. № 11. С. 65–72. DOI: <https://doi.org/10.15802/ecsrt2016/91516>
7. Курган М. Б., Байдак С. Ю., Лужицький С. Ю. Умови підвищення безпеки руху поїздів в кривих ділянках залізничної колії. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2014. № 8. С. 41–49. DOI: <https://doi.org/10.15802/ecsrt2014/57181>
8. *Методичні вказівки щодо порядку службового розслідування причин сходжень рухомого складу з рейок на залізницях України* : ЦРБ-0036. [Чинний від 2012-06-21]. Київ : НВП Поліграфсервіс, 2012. 251 с.
9. *Норми допустимих швидкостей руху рухомого складу по залізничних коліях державної адміністрації залізничного транспорту України шириною 1520 мм* : ЦП-0235. [Чинний від 2010-12-14]. Київ : НВП Поліграфсервіс, 2012. 72 с.
10. *Правила визначення підвищення зовнішньої рейки і встановлення допустимих швидкостей в кривих ділянках колії* : ЦП-0236. [Чинний від 2010-12-14]. Київ, 2011. 52 с.
11. *Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість* : ЦП-0117. [Чинний від 2004-12-13]. Київ : Транспорт України, 2004. 64 с.
12. Сокол Э. Н. *Железнодорожно-транспортное происшествие и его механизм (Судебная экспертиза. Элементы теории и практики)* : монографія. Львів : ПАІС, 2011. 376 с.
13. Татарінова В. А., Недужа Л. О. Теоретичні дослідження руху одиниці рухомого складу. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2018. № 16. С. 121–126. DOI: <https://doi.org/10.15802/ecsrt2018/172691>
14. *Технічні вказівки щодо оцінки стану рейкової колії за показниками колісвимірвальних вагонів та забезпечення безпеки руху поїздів при відступах від норм утримання рейкової колії* : ЦП-0267. [Чинний від 1996-01-17]. Київ, 2012. 25 с.
15. Чернышов М. А. *Практические методы расчета пути*. Москва : Транспорт, 1967. 236 с.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

16. Шахуняц Г. М. *Железнодорожный путь* : учебник для вузов ж.-д. трансп. Москва : Транспорт, 1987. 479 с.
17. Швець А. О. Динаміка піввагонів від дії поздовжніх сил. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 6 (84). С. 142–155. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/195821>
18. Швець А. О. Стійкість вантажних вагонів у разі дії стискних поздовжніх сил. *Наука та прогрес транспорту*. 2020. № 1 (85). С. 119–137. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/199485>
19. Agh C. Vasúti kerékpár futási instabilitása a pályadiagnosztika szemszögéből. *Sínek világa*. 2017. Vol. 6. P. 17–20.
20. Fischer S. Comparison of railway track transition curves. *Pollack Periodica*. 2009. Vol. 4. Iss 3. P. 99–110. DOI: <https://doi.org/10.1556/pollack.4.2009.3.9>
21. Kovalchuk V., Kuzyshyn A., Kostritsa S., Sobolevska Yu., Batig A., Dovganiuk S. Improving a methodology of theoretical determination of the frame and directing forces in modern diesel trains. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 6/7 (96). P. 19–25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.149838>
22. Rezvani M. A., Mazraeh A. Dynamics and stability analysis of a freight wagon subjective to the railway track and wheelset operational conditions. *European Journal of Mechanics - A/Solids*. 2017. Vol. 61. P. 22–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2016.08.011>
23. Shatunov O. V., Shvets A. O., Kirilchuk O. A., Shvets A. O. Research of wheel-rail wear due to non-symmetrical loading of a flat car. *Science and Transport Progress*. 2019. № 4 (82) P. 102–117. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/177457>
24. Shvets A., Zheliezov K., Akulov A., Zabolotnyi O., Chabaniuk Ye. Determination of the issue concerning the lift resistance factor of lightweight car. *Science and Transport Progress*. 2015. №. 6 (60). P. 134–148. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/57098>
25. Xu L., Zhai W., Chen Z. On use of characteristic wavelengths of track irregularities to predict track portions with deteriorated wheel/rail forces. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2018. Vol. 104. P. 264–278. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.10.038>

Д. Н. КУРГАН^{1*}, А. В. ГУБАРЬ², М. А. ГАВРИЛОВ³

^{1*}Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел +38 (056) 373 15 42, эл. почта kurhan.d@gmail.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

²Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел +38 (056) 373 15 42, эл. почта neris@ua.fm, ORCID 0000-0001-8683-5372

³Каф. «Проектирование и строительство дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, эл. почта maxgavrilla@gmail.com, ORCID 0000-0002-1321-170X

МЕТОДИКА ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА УСТОЙЧИВОСТИ ПРОТИВ ВКАТЫВАНИЯ КОЛЕСА НА РЕЛЬС

Цель. Одним из показателей взаимодействия пути и подвижного состава, несоблюдение которого может привести к нарушению безопасности движения, а именно к схождению, является условие обеспечения устойчивости против вкатывания гребня колеса на головку рельса. Целью данной работы является создание методики практического инженерного расчета коэффициента стойкости против вкатывания гребня колеса на головку рельса. Изложенная методика будет иметь полную информацию как из расчетных формул, так и из справочных материалов, для исключения необходимости привлечения дополнительных источников и специального программного обеспечения. **Методика.** Основной задачей реализации поставленной цели является вынесение на инженерный уровень расчета горизонтальных сил. Вследствие сложности процесса взаимодействия пути и подвижного состава и необходимости учета большого количества факторов, которые имеют влияние на результат, как правило, для определения горизонтальных сил применяются сложные динамические модели. Возможное решение заключается в предположении, что для конкретного типа подвижного состава горизонтальная сила может быть рассчитана по линейной зависимости от значения непогашенного ускорения. Для этого была использована аналитическая методика расчета горизонтальных сил. **Результаты.** Авто-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

ри определили отсутствующие коэффициенты для расчета горизонтальной силы в зависимости от непогашенного ускорения для некоторых типов маневровых локомотивов и для грузового вагона с учетом уровня его загрузки. **Научная новизна.** В работе приобрели дальнейшее развитие научно-практические подходы для анализа взаимодействия пути и подвижного состава в горизонтальной плоскости. **Практическая значимость.** Предложенная пошаговая методика расчета коэффициента устойчивости дает возможность на инженерном уровне выполнять практический анализ обеспечения запаса устойчивости против вкатывания гребня колеса на головку рельса, который необходим при расследовании причин сходження подвижного состава с рельсов и для ряда других задач, связанных с движением в кривых участках пути.

Ключевые слова: железнодорожный путь; кривая; горизонтальная сила; боковая сила; коэффициент устойчивости; вкатывание колеса на рельс; непогашенное ускорение; взаимодействие пути и подвижного состава; безопасность движения

D. M. KURHAN^{1*}, O. V. HUBAR², M. O. HAVRILOV³

^{1*}Dep. «Track and Track Facilities», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 42, e-mail kurhan.d@gmail.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

²Dep. «Track and Track Facilities», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 42, e-mail neris@ua.fm, ORCID 0000-0001-8683-5372

³Dep. «Roads Design and Construction», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail maxgavrilla@gmail.com, ORCID 0000-0002-1321-170X

METHODOLOGY FOR ENGINEERING CALCULATION OF STABILITY COEFFICIENT AGAINST WHEEL CLIMBING ON THE RAIL

Purpose. One of the indicators of the track and rolling stock interaction, non-observance of which can result in a traffic safety violation, namely to derailment, is a condition for ensuring stability against the wheel flange climbing onto the rail head. The aim of this work is to create a methodology for practical engineering calculation of the resistance coefficient against the wheel flange climbing onto the rail head. The described methodology will have complete information both from calculation formulas and from reference materials, to eliminate the need to attract additional sources and special software. **Methodology.** The main objective of the implementation of this purpose is to bring the calculation of horizontal forces to the engineering level. Due to the complexity of the interaction process between the track and the rolling stock and the need to take into account a large number of factors that have an effect on the result, as a rule, complex dynamic models are used to determine horizontal forces. A possible solution lies in the assumption that for a specific type of rolling stock, the horizontal force can be calculated by linear dependence on the value of the unbalanced acceleration. For this, an analytical technique for calculating horizontal forces was used. **Findings.** The authors determined the missing coefficients for calculating the horizontal force depending on the unbalanced acceleration for some types of shunting locomotives and for a freight car taking into account its load level. **Originality.** In the work, scientific and practical approaches for the interaction analysis of the track and rolling stock in the horizontal plane acquired further development. **Practical value.** The proposed step-by-step methodology for calculating the stability coefficient makes it possible at the engineering level to carry out a practical analysis of ensuring the safety margin against the wheel flange climbing onto the rail head, which is necessary when investigating the causes of rolling stock derailment and for a number of other tasks related to movement in curved track sections.

Keywords: railway track; curve; horizontal force; lateral force; stability coefficient; wheel climbing onto the rail; unbalanced acceleration; track and rolling stock interaction; traffic safety

REFERENCES

1. Danilenko, E. I. (2010). *Zaliznychna koliia: pidruchnyk dlia vyshchykh navchalnykh zakladiv.* (Vol. 2). Kyiv: Inpres. (in Ukrainian)
2. Ershkov, O. P. (1966). *Raschety poperechnykh ghorizontalnykh syl v kryvykh. Sbornik trudov VNIIZhT. Moscow: Transport, 301.* (in Russian)
3. *Instrukcija z ulashtuvannja ta utrymannja koliji zaliznycj Ukrainy, 456 TsP-0269* (2012). (in Ukrainian)

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

4. Korotenko, M. L., Klimentenko, I. V., & Panasenko, V. Ja. (2013). *Bezopasnostj ot skhoda koleasa s reljsov y sovershenstvovanye konstrukcyj podvyzhnogho sostava*. Dnepropetrovsk. (in Russian)
5. Kuzishyn, A. Y., & Batig, A. V. (2018). Use of additional assessment criterion for traffic safety against railway wheel derailment for forensic railway transport examination. *Theory and Practice of Forensic Science and Criminalistics*, 18, 454-461. DOI: <https://doi.org/10.32353/khrife.2018.51> (in Ukrainian)
6. Kurhan, D. M., & Gubar, O. V. (2016). Assessment of Safety While Ensuring Stability to Mounting of a Wheel Flange on a Rail. *Electromagnetic compatibility and safety on railway transport*, 11, 65-72. DOI: <https://doi.org/10.15802/ecsrt2016/91516> (in Ukrainian)
7. Kurhan, M. B., Bajdak, S. Ju., & Luzhycykij, S. Ju. (2014). Umovy pidvyshchennia bezpeky rukhu poizdiv v kryvykh diliankakh zaliznychnoi kolii. *Electromagnetic compatibility and safety on railway transport*, 8, 41-49. DOI: <https://doi.org/10.15802/ecsrt2014/57181> (in Ukrainian)
8. *Metodychni vkazivky shhodo porjadku sluzhbovogho rozsliduvannja prychnyn skhodzhenj rukhomogho skladu z rejok na zaliznycjakh Ukrajiny*, 251 TsRB-0036 (2012). (in Ukrainian)
9. *Normy dopustymykh shvydkostej rukhu rukhomogho skladu po zaliznychnykh kolijakh derzhavnoji administraciji zaliznychnogho transportu Ukrajiny shyrynoju 1520 mm*, 72 TsP-0235 (2012). (in Ukrainian)
10. *Pravyla vyznachennja pidvyshchennja zovnishnjoji rejky i vstanovlennja dopustymykh shvydkostej v kryvykh diljankakh koliji*, 52 TsP-0236 (2011). (in Ukrainian)
11. *Pravyla rozrakhunkiv zaliznychnoji koliji na micnistj i stijkistj*, 64 TsP-0117 (2004). (in Ukrainian)
12. Sokol, E. N. (2011). *Zheleznodorozhno-transportnoe proisshestvie i ego mekhanizm (Sudebnaya ekspertiza. Elementy teorii i praktiki)*: monografiya. Lviv: PAIS. (in Russian)
13. Tatarinova, V. A., & Neduzha, L. O. (2018). Theoretical Research of the Traction Vehicle Motion. *Electromagnetic compatibility and safety on railway transport*, 16, 121-126. DOI: <https://doi.org/10.15802/ecsrt2018/172691> (in Russian)
14. *Tekhnichni vkazivky shhodo ocinky stanu rejkovoji koliji za pokaznykamy kolijevymirjuvaljnykh va-ghoniv ta zabezpechennja bezpeky rukhu poizdiv pry vidstupakh vid norm utrymannja rejkovoji koliji*, 25 TsP-0267 (2012). (in Ukrainian)
15. Chernyshov, M. A. (1967). *Praktycheskye metody rascheta puty*. Moscow: Transport. (in Russian)
16. Shakhunyan, G. M. (1987). *Zheleznodorozhnyj putj: uchebnyk dlja vuzov*. Moscow: Transport. (in Russian)
17. Shvets, A. O. (2019). Gondola cars dynamics from the action of longitudinal forces. *Science and Transport Progress*, 6(84), 142-155. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/195821> (in Ukrainian)
18. Shvets, A. O. (2020). Stability of freight cars under the action of compressive longitudinal forces. *Science and Transport Progress*, 1(85), 119-137. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/199485> (in Ukrainian)
19. Ágh, C. (2017). Vasúti kerékpár futási instabilitása a pályadiagnosztika szemszögéből. *Sinek világa*, 6, 17-20. (in Hungarian)
20. Fischer, S. (2009). Comparison of railway track transition curves. *Pollack Periodica*, 4(3), 99-110. DOI: <https://doi.org/10.1556/pollack.4.2009.3.9> (in English)
21. Kovalchuk, V., Kuzyshyn, A., Kostritsa, S., Sobolevska, Yu., Batig, A., & Dovganiuk, S. (2018). Improving a methodology of theoretical determination of the frame and directing forces in modern diesel trains. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/7(96), 19-25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.149838> (in English)
22. Rezvani, M. A., & Mazraeh, A. (2017). Dynamics and stability analysis of a freight wagon subjective to the railway track and wheelset operational conditions. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 61, 22-34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2016.08.011> (in English)
23. Shatunov, O. V., Shvets, A. O., Kirilchuk, O. A., & Shvets, A. O. (2019). Research of wheel-rail wear due to non-symmetrical loading of a flat car. *Science and Transport Progress*, 4(82), 102-117. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/177457> (in English)
24. Shvets, A., Zheliezov, K., Akulov, A., Zabolotnyi, O., & Chabaniuk, Ye. (2015). Determination of the issue concerning the lift resistance factor of lightweight car. *Science and Transport Progress*, 6(60), 134-148. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/57098> (in English)
25. Xu, L., Zhai, W., & Chen, Z. (2018). On use of characteristic wavelengths of track irregularities to predict track portions with deteriorated wheel/rail forces. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 104, 264-278. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.10.038> (in English)

Надійшла до редколегії: 27.01.2020

Прийнята до друку: 29.05.2020