

## УДК 625.14.031

Д. М. КУРГАН – к.т.н., доцент, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, kurhan.d@gmail.com  
О. В. ГУБАР – к.т.н., доцент, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, gubarav@mail.ru

# ОЦІНКА БЕЗПЕКИ РУХУ ЗА УМОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ ПРОТИ ВКОЧУВАННЯ ГРЕБЕНЯ КОЛЕСА НА ГОЛОВКУ РЕЙКИ

## Вступ

Одним з показників взаємодії колії і рухомого складу, не виконання якого веде до порушення безпеки руху, а саме до сходу рухомого складу, є умова забезпечення стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки [1, 2].

При русі колеса по рейці наряду з вертикальними виникають й горизонтальні сили, які притискають колесо до рейки. Враховуючи геометричні обриси колеса і рейки, такий процес може привести до зміщення точки їх контакту на реборду колеса і, у найгіршому випадку, до перекочування колеса через рейку, рис. 1. Як правило значення вертикальної сили достатньо, щоб унеможливити такий процес. Але при деяких умовах експлуатації можливе суттєве збільшення горизонтальних сил, або суттєве зменшення вертикальних. В обох випадках потрібна відповідна оцінка безпеки руху.



Рис. 1. Кадр з фільму «Big Bigger Biggest Train», Windfall Films for National Geographic Channel, 2011

## Аналіз публікацій

Сьогодні у літературі можна зустріти два варіанта методики розрахунку коефіцієнту стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки. Розглянемо *перший варіант*, який описано у роботах [3, 4] та інших. Основу методики складає розрахункова схема сил взаємодії між колесом і рейкою у точці контакту, рис. 2.

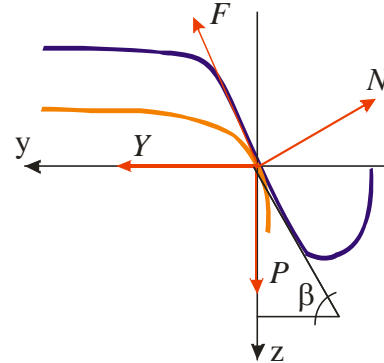


Рис. 2. Розрахункова схема сил взаємодії між колесом і рейкою у точці контакту [3]

Взаємозв'язок між силами можна визначити через рівняння статичної рівноваги їх проекцій на вертикальну і горизонтальну вісь

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

де  $P$  – вертикальне навантаження колеса на рейку;  $Y$  – горизонтальна сила тиску від колеса на рейку;  $N$  – реакція рейки;  $\mu$  – коефіцієнт тертя;  $F$  – сила тертя, що протидіє зісковзуванню колеса,  $F = \mu N$ ;  $\beta$  – кут нахилу гребня колеса.

Тоді умову рівноваги можна записати у вигляді

$$\frac{Y}{P} \leq \frac{\operatorname{tg} \beta - \mu}{1 + \mu \operatorname{tg} \beta}. \quad (2)$$

Для локомотивів з кутом нахилу гребня колеса  $\beta = 70^\circ$  і розрахунковим значення коефіцієнта тертя  $\mu = 0.25$  гранична значення відношення горизонтальної сили до вертикальної складає 1.48. З урахуванням запасу надійності остаточно приймається умова [3]

$$\frac{Y}{P} \leq 1.2. \quad (3)$$

*Другий варіант* методики викладений у таких роботах, як [5, 2] та інших. Різниця полягає у наступному: застосовується зворотне відношення сил – вертикальної до горизонтальної; характеристики тертя і обрису бандажа не поглинаються у допустиме значення коефіцієнта стійкості. Тоді вирішення системи рівнянь (1) приймає наступний вигляд

$$\frac{P}{Y} \cdot \frac{\operatorname{tg} \beta - \mu}{1 + \mu \operatorname{tg} \beta} \geq [k]. \quad (4)$$

Мінімальне допустиме значення коефіцієнту запасу стійкості проти сходу колісної пари з рейок  $[k]$  затверджено у галузевій інструкції ЦП-0235 [6]: 1.4 – для локомотивів, 1.3 – для вантажних вагонів, 1.6 – для пасажирських вагонів. Якщо фактичне значення коефіцієнту менше вказаних значень – це привід обмеження швидкості руху або переглядання встановлених умов експлуатації.

Таким чином умова забезпечення стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки записується як співвідношення сил, що перешкоджають підйому колеса до сил, що прагнуть підняти колесо [1]. До підйому колеса приводить дія горизонтальних сил, перешкоджає підйому вертикальна сила. Будь-які сили взаємодії колії і рухомого складу мають динамічний характер і є результатом складного поєднання дії декількох факторів. Регламентуючи значення таких сил (або їх співвідно-

шення) потрібно чітко визначати методику і умови їх обчислення або виміру.

Під горизонтальною силою може матися на увазі одна з трьох сил: направляюча сила – тиск від реборди направляючого колеса на рейку, або бічна сила – тиск від колеса в цілому на рейку, або рамна сила – тиск на рейку в цілому від колісної пари.

Як правило, рамна сила є результатом натурних вимірів за допомогою датчиків, встановлених на рухомому складі; бічна сила визначається через напруження, які виміряні датчиками, встановленими на рейці; направляюча сила – результат аналітичних розрахунків. Звісно всі прояви горизонтальних сил мають загальновідомі аналітичні співвідношення.

Для вирішення задачі забезпечення стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки у роботі [1] застосовується саме бічна сила, у роботі [3] – рекомендується розглядати найгірший випадок.

В якості вертикальної сили, як правило, приймається статичне навантаження від колеса на рейку [1, 3]. Відомо, що дійсні значення вертикальної сили можуть бути як більше, так і менше. Наприклад, для більшості задач визначення напружено-деформованого стану колії, де найгіршим вважається максимальний рівень навантаження, в якості розрахункової приймається значення сили збільшене на рівень динамічних додатків із встановленим рівнем вірогідності [1, 5, 7]. Для стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки, навпаки, найбільш небезпечним є випадок зменшення вертикальної сили. Наприклад, у роботі [8] було показано, що для сучасних пасажирських поїздів динамічні відхилення від середнього значення вертикальної сили зростають не тільки у бік збільшення, а й у бік зменшення і можуть досягати рівня навіть меншого за статичну вагу.

## Мета

У даній статті будуть розглянуті теоретичні передумови та результати експериме-

нтальних досліджень щодо питань оцінки безпеки руху за умовами забезпечення стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки. За результатами будуть надані рекомендації щодо аналітичних розрахунків відповідного коефіцієнту запасу стійкості для сучасних вагонів та локомотивів.

### Методика

Наведені вище два варіанта методики розрахунку коефіцієнта стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки є тотожні і не суперечать один одному. Але близькі показники допустимих значень при зворотних формулах іноді приводять до плутанини щодо оцінки результатів досліджень отриманих в тій чи іншій роботі. Враховуючи, що методика з виразом (4), крім інших джерел, закріплена у діючій інструкції ЦРБ-0036 [2], автори даної статті вважають доречним дотримуватись саме такого підходу.

Характеристики коефіцієнту тертя і кута нахилу бандажа колеса, що мають місце у формулі (4), наведені у табл. 1 на основі даних [1] і [3].

Таблиця 1

**Розрахункові характеристики для коефіцієнту стійкості проти вкочування гребеня колеса на рейку**

Тип рухомого складу	Чисельні характеристики		
	$\beta$ , град.	$\mu$	$\frac{\operatorname{tg} \beta - \mu}{1 + \mu \operatorname{tg} \beta}$
Локомотив	70	0.2	1.644
		0.25	1.481
Вагон	60	0.2	1.138
		0.25	1.034

Таким чином для практичних розрахунків стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки при звичайних умовах експлуатації можна рекомендувати наступні вирази:

- для локомотивів

$$\frac{1.644P}{Y} \geq 1.4; \quad (5)$$

- для вантажних вагонів

$$\frac{1.138P}{Y} \geq 1.3; \quad (6)$$

- для пасажирських вагонів

$$\frac{1.138P}{Y} \geq 1.6. \quad (7)$$

У роботі використано комплексний метод досліджень, який включає аналітичну і експериментальну частини. Для аналітичних досліджень застосовано метод математичного моделювання. Обробку експериментальних даних проведено із застосуванням методів математичної статистики для визначення горизонтальних та вертикальних сил, що діють на колію. Для цього за допомогою вимірвальних приладів, активним елементом яких є тензорезистори, вимірювали напруження у рейках та їх деформації за прийнятою у Колієвипробувальній ГНДЛ методикою [9].

На наступному етапі дослідження був проведений аналіз сходів, що мали місце на залізницях України [10]. Було зібрано матеріали розслідувань сходів рухомого складу з шести залізниць: Донецької, Львівської, Одеської, Південної, Південно-Західної та Придніпровської залізниці. Разом 78 сходів, з матеріалу розслідування яких було вибрано дані стосовно радіусу та підвищення зовнішньої рейки ділянки колії, на якій мав місце схід, встановленої швидкості на дільниці руху та швидкості рухомого складу у момент сходу, типу рухомого складу, що зійшов, та причини сходу. Відібрані дані були також згруповані по залізницях.

Основними причинами сходів найчастіше вважається порушення норм по крутизні відводів підвищення рейок у кривих, велика різниця стріл вигину у суміжних точках, невірне встановлення підвищення зовнішньої рейки у кривих. У багатьох випадках сходів у колії зафіксовано відхилення од-

ночасно за кількома параметрами. Найчастіше сходи відбувалися шляхом перекошування гребеня колеса через головку рейки.

Проаналізовані дані показують, що основна частина сходів має місце на станціях у кривих з радіусом менше 350 м при виконанні маневрових робіт. У більшості випадків сходили з рейок локомотиви з тривісними візками.

В існуючих схемах вписування вважається, що при набіганні колісної пари на рейку горизонтальна направляюча сила діє по вісі колісної пари (перпендикулярно поздовжній вісі). Але аналіз результатів теоретичних та експериментальних досліджень виконаних В. Ф. Яковлевим, Е. П. Дудкіним [11] показує, що при набіганні колісної пари на рейку під деяким кутом горизонтальна направляюча сила у контакті колеса і рейки діє не по осі колісної пари, а по нормалі до площадки контакту. Цю силу називають радіально-поперечним зусиллям  $Y_{PP}$ , яке може бути розкладено на направляюче зусилля  $Y_H$ , що діє вздовж вісі колісної пари і визначає поворот візка, і поздовжнє зусилля  $Y_{II}$ , що заважає повороту візка і викликає угон упорних ниток і опір руху екіпажу у кривих ділянках.

Вертикальні сили, що передаються від колісних пар на рейки, можливо визначити згідно «Правил розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість» [5]. При русі відбувається зменшення або збільшення вертикальних навантажень від коливань кузова на ресорах та інших факторів. Так, при русі колісної пари рухомого складу по колії відбувається розвантаження однієї і довантаження другої рейки, а величину цього розвантаження можливо визначити згідно рекомендацій Г. М. Шахунянца [12].

Прийнята розрахункова схема розташування візка у кривій і прикладені до нього сили приведені на рис. 3. Вона дозволила виконати теоретичний аналіз впливу нерівномірного завантаження як колісних пар, так і окремих коліс у парі.

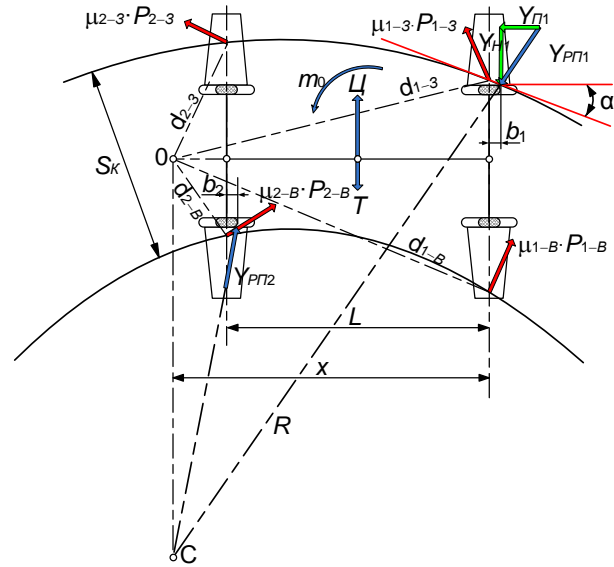


Рис. 3. Схема розташування візка у кривій

На рис. 3 показані такі геометричні розміри і діючі сили:  $L$  – довжина жорсткої бази візка;  $x$  – відстань від першої вісі до полюса обертання;  $R$  – радіус кривої;  $C$  – центр кривої;  $O$  – полюс обертання;  $S_K$  – ширина колії у кривій;  $b_1$  – відстань від вісі першої колісної пари до точки торкання гребеня колеса з рейкою (забіг);  $b_2$  – відстань від вісі другої колісної пари до точки торкання гребеня колеса з рейкою;  $d_{i-j}$  – радіуси-вектори точок ковзання бандажів коліс по рейці (відстань від центру повороту до точок ковзання);  $\mu_{i-j}$  – коефіцієнт тертя між колесом і рейкою;  $\alpha$  – кут набігання колеса на рейку;  $\mathcal{C}$  і  $T$  – відцентрова і доцентрова сили, що діють у центрі мас;  $P_{i-j}$  – вертикальні сили, від  $i$ -ої колісної пари ( $j = 3$  – зовнішньої,  $j = \nu$  – внутрішньої) що передаються на рейки;  $Y_{PP}$  – радіально-поперечне зусилля;  $Y_H$  – направляюче зусилля, що діє вздовж вісі колісної пари і визначає поворот візка;  $Y_{II}$  – поздовжнє зусилля, що заважає повороту візка і викликає угон упорних ниток і опір руху екіпажу у кривих ділянках.

Загальна схема розрахунків зображена на рис. 4.

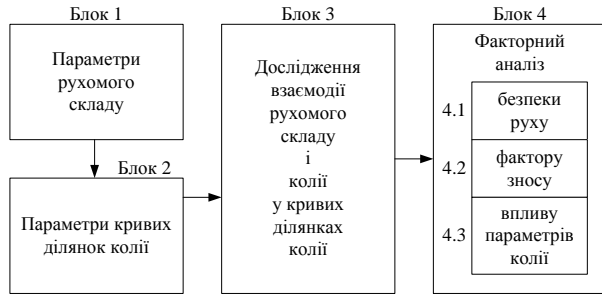


Рис. 4. Блок-схема вирішення і аналізу результатів задачі взаємодії рухомого складу і колії

Для чотиривісного вагону на візках моделі 18.100 визначено значення полюсних відстаней у залежності від радіуса кривої ділянки і величини непогашеного прискорення. Визначення полюсних відстаней навантажених вантажних вагонів виконували за результатами теоретичних досліджень за допомогою описаної вище моделі при русі вагона у кривих різних радіусів. Для розрахунків було вибрано криві радіусом від 150 до 350 м.

Порівняння результатів розрахунків полюсної відстані для вантажного напіввагона з жорсткою базою довжиною 1.85 м, отриманих по моделі та отриманих О. П. Єршковим [13] у залежності від непогашеного прискорення та радіусу кривих ділянок колії, відображено у табл. 2.

Таблиця 2

**Результати розрахунків величини полюсної відстані для вантажного напіввагону**

Радіус кругової кривої, $R$ , м	Розрахункові значення полюсної відстані, $x$ , м			
	за методикою, що пропонується при $\alpha_{нп}$ , м/с <sup>2</sup>		за методикою, розробленою О. П. Єршковим при $\alpha_{нп}$ , м/с <sup>2</sup>	
	-0.3	0.0	-0.3	0.0
150	2.406	2.382	2.501	2.330
200	2.427	2.401		
250	2.451	2.421		
300	2.470	2.437		
350	2.492	2.455		
650	2.600	2.532		

Порівняння результатів, наведених у табл. 1, дозволяють говорити про те, що запропонована модель розрахунків більш детально враховує параметри взаємодії рухомого складу і колії, насамперед у залежності від радіусу. Інтервал значень полюсної відстані, розрахований за допомогою методики, що пропонується, складає  $x = 2.38...2.60$  м, а значення, отримане О. П. Єршковим, було розраховано для кривої радіусом  $R = 650$  м, а потім розповсюджено на інші радіуси кривих і у залежності від непогашеного прискорення  $\alpha_{нп}$  полюсна відстань  $x$  складає 2.50 м, 2.33 м та 2.23 м при значеннях  $\alpha_{нп} = -0.3$ ;  $\alpha_{нп} = 0.0$  та  $\alpha_{нп} = +0.3$  м/с<sup>2</sup> відповідно.

Оцінка стійкості проти вкочування гребеня колеса на рейку виконується по значенню коефіцієнта стійкості – формула (6).

Оскільки найбільш несприятливим, за умови загрози, вкочування набігаючого колеса на головку рейки буде варіант, в якому коефіцієнт запасу стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки буде меншим, тобто, варіант з меншим значенням завантаження набігаючої вісі. Тому подальший розрахунок для визначення коефіцієнту стійкості проти вкочування ведеться для цього варіанту.

Величини горизонтальних і вертикальних сил у залежності від  $x$  полюсних відстаней і непогашених прискорень наведені у табл. 3.

У всіх випадках коефіцієнт запасу стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки більше 1.3, тобто, забезпечується безпека руху поїздів.

Колієвипробувальною ГНДЛ Дніпропетровського національного університету було проведено експериментальне дослідження впливу тепловоза М62 на колію у кривій ділянці радіусом 192 м [14].

З матеріалів експериментальних досліджень було вибрано дані стосовно напружень у кромках підшви рейок, горизонтального впливу на колію, віджиму головки рейки, вертикальний вплив на колію. Про-

ведено аналіз експериментальних досліджень впливу тепловоза М62 на колію і порівняння теоретичних досліджень і результатів експерименту. Аналіз показав, що на дослідній ділянці спостерігається залежність величин бокових сил і горизонтальних віджимів головки рейки від швидкості дослідного состава. По зовнішній нитці бокові сили, передані на колію, з ростом швидкості збільшуються, а по внутрішній нитці – зменшуються. Теж саме відбувається з величинами горизонтальних віджимів головки рейки у кривій ділянці колії.

На напруження у підшві впливають у першу чергу вертикальні і горизонтальні поперечні (бокові) сили, що передаються від коліс тепловоза на рейки. Дані свідчать про закономірне зростання навантаження на зовнішню рейкову нитку при збільшенні швидкості по направляючій вісі від 77 до 105 кН за середніми і від 82 до 141 кН за максимальними значеннями. В той же час мінімальні вертикальні сили становили 65...77 кН при статичному навантаженні 90...95 кН.

Таблиця 3

**Визначення стійкості проти  
 вкочування гребеня колеса на рейку  
 для вантажного напіввагону на візках  
 моделі 18.100**

$R, \text{ м}$	$\alpha_{\text{нп}}, \text{ м/с}^2$	$x, \text{ м}$	$Y, \text{ кН}$	$P, \text{ кН}$	$k$
150	-0.3	2.406	55.87	108.98	2.22
	0	2.382	56.07	114.04	2.31
	0.3	2.360	56.26	119.10	2.41
200	-0.3	2.430	52.81	108.98	2.35
	0	2.401	52.99	114.04	2.45
	0.3	2.375	53.17	119.10	2.55
250	-0.3	2.451	49.97	108.98	2.48
	0	2.421	50.15	114.04	2.59
	0.3	2.392	50.32	119.10	2.69
300	-0.3	2.470	47.19	108.98	2.63
	0	2.437	47.38	114.04	2.74
	0.3	2.405	47.56	119.10	2.85
350	-0.3	2.492	44.73	108.98	2.77
	0	2.455	44.93	114.04	2.89
	0.3	2.420	45.14	119.10	3.00

Вимірювання під поїздами, що рухаються за графіком, також свідчать про широкий діапазон зміни вертикальних навантажень. Так, середні значення вертикальних сил від направляючих осей змінюються від 45 до 76 кН, а найменші – від 16 до 72 кН. Тривожним є той факт, що у багатьох випадках вертикальні навантаження становлять 16...35 кН. Це означає, що на рейки діє тільки вага колісної пари і тягового двигуна і опір вкочуванню гребеня колеса на рейку при наявності горизонтальної поперечної сили значно знижується.

Горизонтальні поперечні навантаження на рейки оцінюються за величиною бокових сил. Бокові сили за середніми значеннями дорівнюють 79...81 кН, а за максимальними – 106...110 кН під направляючими осями тепловозів дослідного поїзда. Найбільше значення бокової сили було зафіксовано 110.7 кН для направляючих осей дослідного поїзда і 126 кН для поїздів, що рухаються згідно графіка. Рамні сили у цих випадках становлять 86.9 кН і 102.2 кН відповідно, що менше допустимого значення і загрози зрушення колії немає.

Стосовно вертикальних сил, що передаються від колеса тепловоза на рейку, слід відзначити дуже широкий діапазон їх зміни. Так, під дослідним поїздом по зовнішній рейковій нитці максимальні сили, що діють від колеса на рейку, становлять 141...154 кН, при осьовому навантаженні – 190 кН, а мінімальні – 77...84 кН. Під поїздами, що рухаються за графіком, зафіксовано мінімальні навантаження від колеса на рейку у діапазоні 16...33 кН, що відповідає вазі колісної пари і тягового двигуна.

Порушення умови (7) може мати місце не тільки при збільшенні горизонтальної сили, а і при зменшенні вертикальної, що властиво «легким» пасажирським вагонам. Як приклад розглянемо рух пасажирського вагону на візках КВЗ-ЦНИИ у кривій радіусом 1000 м, який має розрахункове статичне навантаження від колеса на рейку 71.25 кН [1, 5]. Значення горизонтальної (бокової) сили за розрахунками буде у межах 29.4...44.2 кН для непогашеного прис-

корення  $0 \dots 0.7 \text{ м/с}^2$  відповідно, і продовжить зростати при подальшому збільшенні непогашеного прискорення. Результати розрахунків показані на рис. 5.

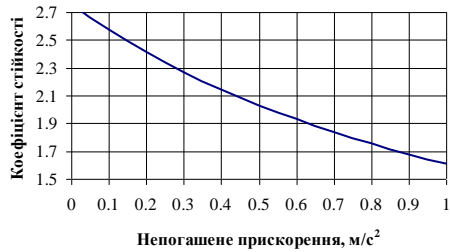


Рис. 5. Залежність коефіцієнта стійкості проти вкочування гребеня колеса на рейку для пасажирського вагону у кривій ділянці з радіусом 1000 м

При значенні непогашеного прискорення  $1.0 \text{ м/с}^2$ , що може мати місце в окремих випадках, значення коефіцієнта стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки наближається до допустимої межі 1.6.

### Висновки

1. Для розрахунків коефіцієнту стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки існує дві тотожні методики. Рекомендовано використовувати відношення вертикальної сили до горизонтальної з урахуванням коефіцієнту тертя і куту нахилу гребеня колеса, яке повинне бути не менше встановленого значення.

2. За розрахунками по моделі розподілу вертикальних сил, що передаються від коліс рухомого складу на колію, встановлено, що максимальна різниця у завантаженні колісних пар у візку вантажного напіввагону може досягати 63.9 кН, що складає 28.0 % у порівнянні із паспортним статичним навантаженням від колісної пари на рейку 228.0 кН. При величині допустимого непогашеного поперечного прискорення для поїздів з вантажними вагонами ( $[\alpha_{\text{нп}}] = \pm 0.3 \text{ м/с}^2$ ) відбувається додаткове розвантаження одного і довантаження іншого колеса у колісній парі на величину до 5.06 кН, що складає 4.44% відносно статичного навантаження. При цьому різниця

між максимальною і мінімальною вертикальною силою, що передається від колеса на рейку у візку, може досягати величини у 42.0 кН, що складає 36.9 % у порівнянні з статичним навантаженням від колеса на рейку 114.0 кН, що обумовлено як величиною непогашеного прискорення, так і величиною полюсної відстані при вписуванні візка.

3. Обчислення силового вписування для масового виду рухомого складу, якими є вагони з двовісними візками із жорсткою базою 1.85 м, показують, що полюсні відстані у двовісних візків відрізняються від величини жорсткої бази у бік більших значень до 2.49 м (при довантаженні набігаючої колісної пари) у круговій кривій з радіусом кривої 350 м.

4. Найменші значення коефіцієнта стійкості проти вкочування колеса на головку рейки у кривих з радіусами кривих менше 350 м отримано при менших значеннях завантаження набігаючого колеса вертикальною силою 108.98 кН і допустимій величині непогашеного прискорення  $[\alpha_{\text{нп}}] = -0.3 \text{ м/с}^2$  в залежності від радіуса кривої ділянки: при  $R = 350 \text{ м} - k = 2.44$ ; при  $R = 300 \text{ м} - k = 2.31$ ; при  $R = 250 \text{ м} - k = 2.18$ ; при  $R = 200 \text{ м} - k = 2.06$ . Зі збільшенням величини непогашеного прискорення до  $[\alpha_{\text{нп}}] = +0.3 \text{ м/с}^2$  значення коефіцієнта  $k$  у залежності від радіуса кривої ділянки – збільшуються: при  $R = 350 \text{ м} - k = 2.64$ ; при  $R = 300 \text{ м} - k = 2.50$ ; при  $R = 250 \text{ м} - k = 2.37$ ; при  $R = 200 \text{ м} - k = 2.24$ .

Стійкість колеса вантажного вагону гарантується при значеннях коефіцієнта  $k \geq 1.3$ ; при умові задовільного стану колії і екіпажу

5. При русі пасажирських вагонів з двовісними візками з непогашеним прискоренням  $1.0 \text{ м/с}^2$  і більше коефіцієнт стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки наближається до мінімально допустимого значення, що повинне враховуватися при вирішенні задач збільшення швидкостей руху у кривих ділянках колії.

### Бібліографічний список

1. Даніленко, Е. І. Залізнична колія : підруч. для вищ. навч. закл. [Текст] / Е. І. Даніленко. – Київ : Інпрес, 2010. – Т. 2. – 456 с.
2. Методичні вказівки щодо порядку службового розслідування причин сходжень рухомого складу з рейок на залізницях України ЦРБ-0036 [Текст] / затв. наказом Укрзалізниці від 21.06.2012 № 194-ЦЗ. – К. : НВП Поліграфсервіс, 2012. – 251 с.
3. Камаев, А. А. Взаимодействие локомотива и пути в кривых участках пути [Текст] / А. А. Камаев, Г. С. Михальченко. – Тула: – 1977. – 68 с.
4. Тепловоз 2М62 – М.: Транспорт, 1977, – 280 с.
5. Даніленко, Е. І. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість. ЦП-0117 [Текст] / Е. І. Даніленко, В. В. Рибкін. – Київ : Транспорт України, 2004. – 64 с.
6. Норми допустимих швидкостей руху рухомого складу по залізничних коліях державної адміністрації залізничного транспорту України шириною 1520 мм ЦП-0235 [Текст] / В. В. Рибкін, А. М. Орловський, В. В. Циганенко, В. Є. Савлук – Київ, ТОВ «НВП Поліграфсервіс», 2012. – 72 с.
7. Fisher Sz, Eller B, Kada Z, Németh A.: Railway construction, Universitas-Győr Nonprofit Kft., Győr, 334 p, 2015.
8. Kurhan D. Determination of Load for Quasi-static Calculations of Railway Track Stress-strain State //Acta Technica Jaurinensis. – 2016. – Т. 9. – №. 1. – С. 83-96.
9. Використання цифрової вимірювальної техніки для експериментальних досліджень взаємодії колії і рухомого складу [Текст] / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган, О. М. Патласов, В. Є. Савлук // Вісник ДНУЗТу № 37. Д. 2011. С. 124-128.
10. Аналіз матеріалів розслідування сходів рухомого складу в кривих ділянках колії радіусом менше 350 м. [Текст] / В. В. Рибкін, В. В. Циганенко, О. В. Губар, Н. В. Халіпова// Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. тр-ту ім. акад. В. Лазаряна, – 2008. – Вип. 24. – С. 94–99.
11. Яковлев, В. Ф. Расчет вписывания экипажей в кривых малых радиусов с учетом угла набегания [Текст] / В. Ф. Яковлев, Е. П. Дудкин // Исследование расчетных характеристик и динамики железнодорожного пути: межвуз. сб. научн. тр. – Днепропетровск. ДИИТ, 1985, 121 с.
12. Шахуняц, Г. М. Железнодорожный путь: Учебник для вузов ж.-д. трансп. – 3-е изд., перераб. и доп [Текст] / Г. М. Шахуняц – М.: Транспорт, 1987. – 479 с.
13. Ершков, О. П. Расчеты поперечных горизонтальных сил в кривых [Текст] / О. П. Ершков // Тр. ВНИИЖТ. – М.: 1966. – Вып. 301. – 235 с.
14. Циганенко, В. В. Аналіз причин сходів рухомого складу в кривих ділянках колії радіусом до 350 м і розробка конструкцій з метою їх запобігання [Текст] / В. В. Циганенко, О. В. Губар – Д.: ДНУЗТ, 2007, – 128 с.

**Ключові слова:** коефіцієнт стійкості, вкочування гребеня колеса на рейку, горизонтальна сила, силове вписування, непогашене прискорення.

**Ключевые слова:** коэффициент устойчивости, всползание реборды колеса на рельс, горизонтальная сила, силовое вписывание, непогашенное ускорение.

**Keywords:** coefficient of stability, mounting of a wheel flange on a rail, horizontal force, power guiding, horizontal acceleration.

**Рецензенти:**  
д.ф.-м.н. В. І. Гаврилюк,  
д.т.н., проф. П. П. Петренко.

Надійшла до редколегії 23.06.2016.  
Прийнята до друку 01.07.2016.