

*Володимир Твердомед
Едуард Даніленко*

**РОЗРАХУНОК ПОПЕРЕЧНИХ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ СИЛ,
ДІЮЧИХ НА КОЛІЮ В КРИВИХ ВІД РУХОМОГО СКЛАДУ,
ГРАФО-АНАЛІТИЧНИМ МЕТОДОМ**

Проведені деякі доповнення і уточнення в методику професора О.П. Єршкова, в тому числі відносно змінної величини коефіцієнта тертя при різних схемах вписування екіпажів. На основі запропонованої методики виконані теоретичні розрахунки, побудовані графіки-паспорти та виведені наближені формули визначення поперечних горизонтальних сил.

Проведены некоторые дополнения и уточнения в методику профессора О.П. Ершкова, в том числе относительно изменения величины коэффициента трения при разных схемах вписывания экипажей. На основании предложенной методики выполнены теоретические расчеты, построены графики-паспорта и выведены приближенные формулы определения поперечных горизонтальных сил.

Conducted some additions and refinements of the method of professor O.P. Yershkova, including relatively variable friction coefficient under various schemes incorporating crews. Based on the research results the method performed theoretical calculations based graphics-passports and derived approximate formula for the determination of transverse horizontal forces.

Ключові слова: крива ділянка колії, візок, горизонтальні поперечні сили, коефіцієнт тертя ковзання, горизонтальні непогашені сили.

Дослідження руху залізничного екіпажу в кривих ділянках колії є однією із складних проблем взаємодії колії та рухомого складу. Ці складнощі пов'язані з великою кількістю факторів, які впливають на характер руху екіпажу по кривій, що приводить до необхідності вирішення системи рівнянь з великою кількістю невідомих. Складною задачею є визначення реальної схеми вписування екіпажа в криву і залежно від цього положення усіх коліс в кривій при різних режимах руху; складною є необхідність розгляду різних конструкцій екіпажної частини рухомого складу, в тому числі зчленованими і незчленованими візками; залежність сил та моментів тертя від положення центру повороту візка; зміна коефіцієнтів тертя ковзання в контакті колеса і рейки при різних схемах уписування та ін.

Перші теоретичні дослідження щодо вписування екіпажів рухомого складу в криві були проведені російськими вченими під час підготовки і виконання першої редакції розрахунків колії на міцність. Наприкінці XIX – початку XX ст. професори А.А. Холодецький та К.Ю. Цеглинський сформулювали основні положення теорії вписування екіпажів в криві, яка дозволила знаходити сили поперечного тиску коліс на рейки. Подальший розвиток теорії вписування рухомого складу в криві отримано в роботах професорів К.П. Королева, А.А. Соломянського, В.В. Медея, О.П. Ершкова та ін. у середині XX ст.

© *Твердомед В. М., Даніленко Е. І., 2012*

Найбільш повну та точну оцінку горизонтальних поперечних сил в кривих ділянках колії розроблено в методиці д.т.н., проф. О.П. Ершкова в фундаментальних дослідженнях [1]. Цей метод розроблений на підставі аналізу результатів теоретичних та експериментальних досліджень взаємодії на колію різних типів рухомого екіпажу. Метод дозволяє проводити оцінку величини та характеру зміни горизонтальних поперечних сил в кривих ділянках колії при русі різноманітних та складних в конструктивному відношенні типів рухомого екіпажу. При його застосуванні встановлюється швидкість руху поїздів, перевіряється поперечна стійкість колії, визначаються напруження, що виникають в підшві рейки, відтискання головки рейки, сили тиску рейки на проміжні рейкові скріплення. Заключні результати теоретичних досліджень О.П. Ершкова представлені у вигляді побудови графіків-паспортів для різних типів рухомого складу, по яких виражають залежність горизонтальних поперечних сил, що діють на колію (направляючих, рамних і бокових) від непогашеного відцентрового прискорення a_{nn} , величина якого, у свою чергу, залежить від трьох найважливіших характеристик: радіуса кривої R , підвищення зонішньої рейки h і швидкості руху екіпажу V .

Професором О.П. Ершовим складені наближені формули (при постійному коефіцієнті тертя $\mu = const$), які наведені в таблиці 1, для визначення поперечних сил, що діють на колію від коліс рухомого складу у вигляді:

$$Y = Y_0 + b \cdot a_{nn}, \quad (1)$$

де Y_0 – величина поперечної сили (напрямної, бокової, рамної) при $a_{nn} = 0$;

b – кут нахилу графікової лінії $Y = f(a_{nn})$.

Таблиця 1. Формули для визначення поперечних сил

Тип екіпажа	Сили, кг (приблизно)		
	Напрямна Y_{1-n}	Бокова ² $Y_{1-n} = Y_{1-n} -$ $- H_{1-n}$	Рамна $Y_{1-n} = Y_{1-n} -$ $- H_{1-n} - H_{1-g}$
Двовісний вагон	4780+1600a	2800+1500a	900+1700a
Двовісна цистерна	5810+1900a	3350+1800a	1060+200a
Чотиривісний вагон на візках ЦНП-ХЗ-О	8200+ +2500	5400+2500a	3150+2600a
Шестивісний вагон без розбігу середньої осі	10120+2900a	6700+2800a	4800+3100a
Шестивісний вагон з розбігом середньої осі УВЗ-9 ^м	7430+3500a	4500+3000a	2200+3500a
Пасажирський вагон ЦМВ	5490+1950a	3400+1750a	1600+1950a
Пасажирський вагон на візках КВЗ-ЦНП	5540+1700a	3650+1450a	2100+1700a
Електровоз ВЛ80:			
без зчленування візків ³	8150+2500a	5100+2250a	2500+2500a
із зчленуванням візків ³ $R=1000$ м	6250+2100a	3400+2000a	7500+2200a
Електровоз ВЛ60 (з розбігом середньої осі) $R=1000$ м	7900+2800a	4800+2600a	2200+2800a
Тепловоз ТЕП60 (з розбігом середньої осі) $R=1000$ м	6800+3500a	4250+3500a	1700+3500a
Тепловоз ТЕ7 (без розбігів осей)	10500+3500a	5200+3500a	1700+3500a
Електропоїзд ЕР22	8700+2400a	5800+2200a	3500+2400a
Електропоїзд ЕР1	6700+2100a	4300+1900a	2350+2000a

¹Всі формули отримані з розрахунків при коефіцієнті тертя коліс по рейках $f=0,25$.

²Бокові сили визначені з урахування переважання рамних сил.

³Формули для локомотива із зчленованими візками можуть бути застосовані в кривих радіусом 1000 м (від 750 до 1250 м); для незчленованих візків формули не залежать від радіуса.

*У розрахунках був прийнятий момент відповідно до положення візків відносно кузова.

Графіки-паспорти побудовані професором О.П. Ершковым в 60-70-х роках минулого століття для тих типів рухомого складу, які в ті роки експлуатувалися.

На теперішній час українськими вченими внесені деякі доповнення і уточнення в методику проф. О.П. Єршкова, в тому числі щодо змінної величини коефіцієнта тертя при різних схемах вписування екіпажів. Крім того з'явилась необхідність визначення поперечних сил від нових типів рухомого складу [2].

У методі, який ми пропонуємо, при розрахунках поперечних горизонтальних сил за основу був прийнятий аналітичний метод О.П. Єршкова. Розроблена методика відрізняється від означеного методу проф. О.П. Єршкова в тому, що при розрахунках поперечних горизонтальних сил для нових та старих екіпажів, значення коефіцієнта тертя приймалось не рівне постійній величині $\mu \neq const$, а визначалось залежно від відносного проковзування коліс по рейці u/v . При цьому відносно проковзування розрізняється при різних умовах вписування і залежить від радіуса кривої і кута набігання коліс на рейку ($R \neq const, \alpha \neq const$). Де R – радіус кривої; α – кут набігання колеса на рейку, який визначається відношенням x/R ; x – відстань від напрямної першої осі до центра повороту візка.

Розрахункова схема вписування екіпажу в криву наведена на рис. 1.

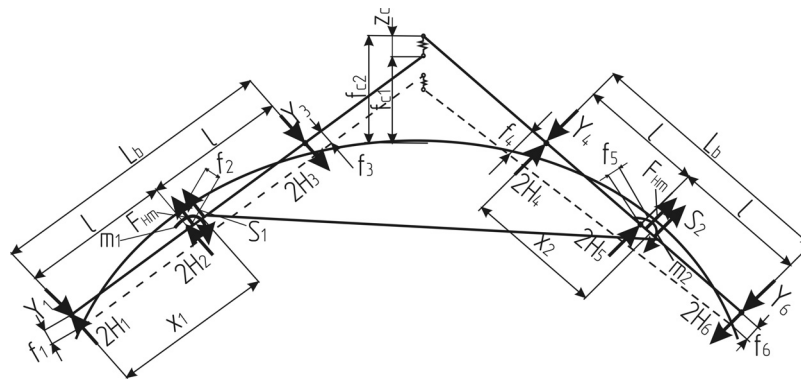


Рис. 1. Розрахункова схема вписування екіпажу в криву із зчленованими візками

Y_i – напрямні сили, H_i – поперечні складові сил тертя, l – відстані між осями колісних пар у візку, f_i – відстані точок гребенів коліс від зовнішньої рейкової нитки, L_b – довжина жорсткої бази візка, m_i – діючі моменти між кузовом та візком, S_i – діючі сили між кузовом та візком, f_{ci} величини стріл між рейковою ниткою та рамою візка у місці зчленування

Рівняння рівноваги сил в поперечній горизонтальній площині під час руху екіпажа по кривій згідно з методикою д.т.н. проф. О.П. Єршкова та розрахунковою схемою вписування (рис. 1) має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} F_{нк} &= f(x_1, x_2, K, f_1, Y_3) \\ F_{нк} &= f(x_1, x_2, K, f_4, Y_6) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

При відсутності зчленування візків система рівнянь (2) має два невідомих x_1, x_2 чи Y_3, Y_6 . Для екіпажів зі зчленованими візками порядок розрахунку повинен забезпечувати при даній установці екіпажа швидке знаходження величини внутрішньої сили K в зчленуванні або переміщення кінців рами в зчленуванні z_c . Для цього складається система необхідних функцій:

$$\left. \begin{aligned} F_{нк} &= f(x_1, x_2, K, f_4, Y_3), \\ F_{нк} &= f(x_1, x_2, K, f_4, Y_6), \\ F_{нк} &= f(x_1, x_2, K, Y_4, Y_6), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$K = f(x_1, x_2, f_4), \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} f_4 &= f(x_1, x_2, f_1), \\ f_3 &= f(x_1, f_1), \\ f_6 &= f(x_2, f_4). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

На рис. 2 наведено приклад побудови графік-паспорта для локомотива ДС-3. Із аналізу побудованого графік-паспорта видно, що для екіпажів, які не мають зчленованих візків, графіки залежності поперечних сил від непогашених поперечних прискорень являють собою пряму лінію чи слабо вигнуту криву опуклістю вверх, в сторону збільшення поперечних сил (рис. 2). Проведені розрахунки підтверджують справедливості залежностей (1).

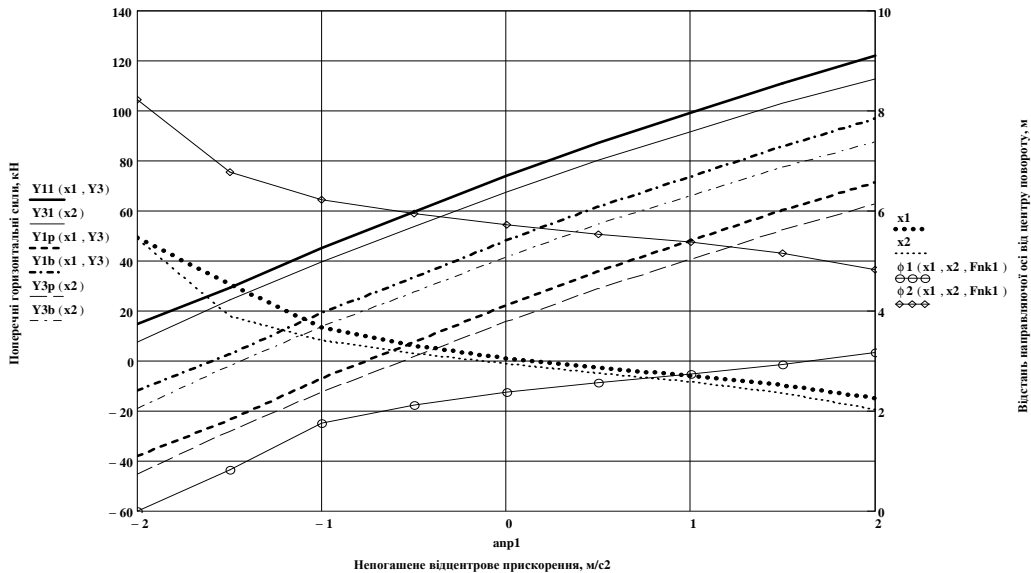


Рис. 2. Графік-паспорт локомотива ДС-3 для кривої радіусом 300 м

x_1 – відстань від напрямної першої осі візка до центра повороту першого візка;
 x_2 – відстань від напрямної першої осі візка до центра повороту другого візка;
 ϕ_1 – кут повороту першого візка; ϕ_2 – кут повороту другого візка; Y_{11} – напрямна сила першого візка; Y_{31} – напрямна сила другого візка; Y_{1p} – рамна сила першого візка; Y_{1b} – бокова сила першого візка; Y_{3p} – рамна сила другого візка; Y_{3b} – бокова сила другого візка

Для екіпажів із зчленованими візками дана залежність залишається справедливою в межах одного етапу вписування. Тому для точного визначення діючої поперечної сили необхідно користуватися графік-паспортами наведеними у [3].

Виконані розрахунки підтвердили в цілому запропоновану О.П. Ершковим [1] методику розрахунків вписування екіпажів в криві ділянки колії для екіпажів із складною системою зв'язку кузова та візків.

На основі прийнятої методики [1] проведені перевіірочні розрахунки для побудови графік-паспортів для екіпажів, які є типовими для вітчизняних залізниць і вже тривалий

час експлуатуються: вантажного вагона на 4-х вісних візках ЦНІІ-ХЗ, пасажирського вагона на візках КВЗ- ЦНІІ, локомотивів ЧС 2, ЧС 4, ВЛ 80, ТЕП 60.

Також за використанням нової запропонованої методики виконані розрахунки і побудовані графік-паспорти для нових екіпажів: пасажирського вагона на візках моделі 68-7012, локомотивів сучасного виробництва ДС-3 та ЧС 8. Розрахунки виконані для кривих радіусів 300 м, 600 м, 1000 м. Нижче в табл. 2 наведені результати даних рохрахунків.

Таблиця 2. Формули для визначення поперечних сил залежно від непогашеного поперечного прискорення

Екіпаж	Напрям. сила Y_1 , кН	Бокова сила Y_6 , кН	Рамна сила Y_p , кН
1	2	3	4
Візок ЦНІІІ-ХЗ, R=300 м	$83,44+13,73 \cdot a_{\text{нп}}$	$59,34+13,97 \cdot a_{\text{нп}}$	$35,23+14,2 \cdot a_{\text{нп}}$
Візок ЦНІІІ-ХЗ, R=600 м	$74,45+13,28 \cdot a_{\text{нп}}$	$53,32+13,51 \cdot a_{\text{нп}}$	$32,2+13,74 \cdot a_{\text{нп}}$
Візок ЦНІІІ-ХЗ, R=1000 м	$64,74+13,14 \cdot a_{\text{нп}}$	$46,69+13,37 \cdot a_{\text{нп}}$	$28,64+13,31 \cdot a_{\text{нп}}$
Візок КВЗ- ЦНІІІ, R=300 м	$53,85+20,45 \cdot a_{\text{нп}}$	$37,16+18,69 \cdot a_{\text{нп}}$	$20,54+20,91 \cdot a_{\text{нп}}$
Візок КВЗ- ЦНІІІ, R=600 м	$47,86+20,77 \cdot a_{\text{нп}}$	$32,05+17,01 \cdot a_{\text{нп}}$	$18,65+20,23 \cdot a_{\text{нп}}$
Візок КВЗ- ЦНІІІ, R=1000 м	$41,89+20,53 \cdot a_{\text{нп}}$	$29,41+21,05 \cdot a_{\text{нп}}$	$16,92+21,39 \cdot a_{\text{нп}}$
Візок моделі 68-7013, R=300 м	$44,33+27,72 \cdot a_{\text{нп}}$	$25,25+23,98 \cdot a_{\text{нп}}$	$11,17+28,24 \cdot a_{\text{нп}}$
Візок моделі 68-7013, R=600 м	$39,31+19,35 \cdot a_{\text{нп}}$	$27,1+19,49 \cdot a_{\text{нп}}$	$10,88+19,64 \cdot a_{\text{нп}}$
Візок моделі 68-7013, R=1000 м	$35,03+16,52 \cdot a_{\text{нп}}$	$24,74+16,65 \cdot a_{\text{нп}}$	$9,46+16,77 \cdot a_{\text{нп}}$
ВЛ 80 без зчленування, R=300 м	$79,87+25,43 \cdot a_{\text{нп}}$	$52,77+25,6 \cdot a_{\text{нп}}$	$25,67+25,78 \cdot a_{\text{нп}}$
ВЛ 80 без зчленування, R=600 м	$71,17+25,27 \cdot a_{\text{нп}}$	$47,42+25,45 \cdot a_{\text{нп}}$	$23,68+25,62 \cdot a_{\text{нп}}$
ВЛ 80 без зчленування, R=1000 м	$64,05+25,05 \cdot a_{\text{нп}}$	$42,64+25,32 \cdot a_{\text{нп}}$	$21,24+25,42 \cdot a_{\text{нп}}$
ВЛ 80 із зчленованими візками, R=300 м	По графік- паспорту	По графік- паспорту	По графік- паспорту
ВЛ 80 із зчленованими візками, R=600 м	По графік- паспорту	По графік- паспорту	По графік- паспорту
ВЛ 80 із зчленованими візками, R=1000 м	По графік- паспорту	По графік- паспорту	По графік- паспорту
ЧС 2 при відсутності зчленування візків, R=300 м	$85,37+29,4 \cdot a_{\text{нп}}$	$60,31+29,46 \cdot a_{\text{нп}}$	$35,25+29,51 \cdot a_{\text{нп}}$
ЧС 2 при відсутності зчленування візків, R=600 м	$78,18+25,76 \cdot a_{\text{нп}}$	$56,22+25,81 \cdot a_{\text{нп}}$	$34,27+25,85 \cdot a_{\text{нп}}$

1	2	3	4
ЧС 2 при відсутності зчленування візків, R=1000 м	$54,93+41,08 \cdot a_{\text{нп}}$	$36,61+41,16 \cdot a_{\text{нп}}$	$18,29+41,24 \cdot a_{\text{нп}}$
ЧС 4 при відсутності зчленування візків, R=300 м	$65,93+36,63 \cdot a_{\text{нп}}$	$40,87+35,69 \cdot a_{\text{нп}}$	$15,81+36,74 \cdot a_{\text{нп}}$
ЧС 4 при відсутності зчленування візків, R=600 м	$63,43+31,1 \cdot a_{\text{нп}}$	$41,45+31,18 \cdot a_{\text{нп}}$	$19,47+31,26 \cdot a_{\text{нп}}$
ЧС 4 при відсутності зчленування візків, R=1000 м	$55,87+34,5 \cdot a_{\text{нп}}$	$37,1+34,59 \cdot a_{\text{нп}}$	$18,34+34,2 \cdot a_{\text{нп}}$
ЧС 8, ЧС 7; R=300 м	По графік-паспорту	По графік-паспорту	По графік-паспорту
ЧС 8, ЧС 7; R=600 м	По графік-паспорту	По графік-паспорту	По графік-паспорту
ЧС 8, ЧС 7; R=1000 м	По графік-паспорту	По графік-паспорту	По графік-паспорту
ДС 3; R=300 м	$74,12+25,26 \cdot a_{\text{нп}}$	$43,25+25,49 \cdot a_{\text{нп}}$	$22,38+25,72 \cdot a_{\text{нп}}$
ДС 3; R=600 м	$65,28+25,06 \cdot a_{\text{нп}}$	$42,61+25,3 \cdot a_{\text{нп}}$	$19,94+25,53 \cdot a_{\text{нп}}$
ДС 3; R=1000 м	$55,85+24,9 \cdot a_{\text{нп}}$	$36,49+25,12 \cdot a_{\text{нп}}$	$17,13+25,43 \cdot a_{\text{нп}}$

Висновки

1. Розроблено і запроєктовано удосконалену методику визначення горизонтальних поперечних сил, що діють на колію від коліс рухомого складу. Нова методика дозволяє проводити облік впливу на поперечні сили параметрів та характеристик конструкції рухомого складу, стану екіпажу та колії без врахування сил інерції, які виникають за рахунок коливання підресорених та непідресорених частин екіпажа.

2. Розроблений метод вписування дозволяє в широкому діапазоні швидкостей, радіусів кривих і підвищення зовнішньої рейки визначати вплив на рівень поперечних сил: змінної величини коефіцієнта тертя колеса по рейці при різних схемах вписування, демпфіруючого моменту, зчленування візків (вплив попереднього натискання та жорсткості пружин в зчленуванні), поворотальних пристроїв в опорах кузова з різними характеристиками жорсткості, розбігів в осях.

3. Побудова графік-паспортів дозволяє отримати поперечні сили від швидкості руху, радіуса кривої та підвищення зовнішньої рейки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Построение графиков удельных характеристик и графиков-паспортов вписывания железнодорожных экипажей в кривые (теоретические основы): [сбор. науч. труд. ЦНИИ МПС]. – 1963. – Вып. 268. – С. 64–125.
2. Даніленко Е. І. Залізнична колія / Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомим складом / : [монографія] (у 2-х томах). – К.: Інпрес, 2010. – С. 984.
3. Твердомед В. М. Вплив поперечних та поздовжніх горизонтальних сил на роботу безпідкладкової та підкладкової конструкції рейкової колії: [дис. кандидата технічних наук: 05.22.06] / Твердомед Володимир Миколайович. – К., 2010. – 241 с.