

## УДК 625.1.033.34:629.4.016.54

Д. М. КУРГАН<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (0560 373 15 42, ел. пошта kurgan@brailsys.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

## ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ВІД КОЛЕСА НА РЕЙКУ ДЛЯ ШВИДКІСНИХ ПОЇЗДІВ

**Мета.** На основі теоретичних передумов та експериментальних досліджень у роботі передбачається обґрунтування вибору факторів, що є визначальними для формування динамічного навантаження на колію від сучасного рухомого складу в умовах швидкісного та високошвидкісного руху. У результаті буде надана методика визначення вертикальної розрахункової сили, що діє від колеса на рейку. **Методика.** Сучасна тенденція розвитку транспортних мереж передбачає впровадження на залізницях України саме швидкісного, а в перспективі – й високошвидкісного руху пасажирських поїздів. Принципові конструкційні зміни у таких поїздах та суттєве зростання швидкості руху призводять до необхідності перегляду методик розрахунку дії рухомого складу на залізничну колію, співвідношення середньоквадратичних відхилень різних динамічних сил, оцінки впливу різних факторів для різних швидкостей руху. В роботі також досліджено зміну динамічного навантаження за результатами експериментальних вимірювань. **Результати.** Отримано залежності середньої та розрахункової сил від швидкості руху для сучасних пасажирських поїздів. Із використанням факторного дисперсійного аналізу отримані чисельні характеристики впливу різних факторів на значення вертикальної сили дії колеса на рейку та встановлені ступені цього впливу на його формування. Ґрунтуючись на результатах експериментальних та теоретичних досліджень, показана необхідність перегляду методики визначення розрахункової сили для практичних розрахунків колії на міцність в умовах руху пасажирських поїздів із високими швидкостями. **Наукова новизна.** На основі теоретичних досліджень та проведеного аналізу статистичних даних експериментальних вимірювань встановлено, що основним фактором збудження динамічної складової вертикальної сили для сучасних пасажирських поїздів є коливання системи «колесо-рейка» або так зване «проходження колесом динамічної рейкової нерівності». **Практична значимість.** Існуючі методики розрахунку динамічної складової вертикальних сил потребують оперування таким показником, як приведена маса колії. Отримані в дослідженні результати показують, що такий параметр є штучним та може застосовуватися тільки для низьких швидкостей руху на рівні статичних схем розрахунку.

**Ключові слова:** розрахунок колії на міцність; верхня будова колії; швидкісний рух; напруження в колії; динамічна сила; динамічна нерівність

### Вступ

Розрахунки колії на міцність виконують для вирішення таких задач, як визначення напружень і деформацій в елементах залізничної колії від впливу рухомого складу, обґрунтування конструкції та оцінка потужності колії щодо встановлених умов експлуатації, розрахунки допустимих швидкостей руху за умовами міцності колії, встановлення температурного режиму експлуатації безстикової колії тощо. Їх методика має довгу історію, яку можна відслідкувати, починаючи ще з ХІХ сторіччя. В розвиток цього напрямку свій вклад внесли багато відомих вітчизняних та закордонних вчених. Сучасним діючим документом є галузева ін-

струкція – «Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість» ЦП-0117 [5].

Одне з основних питань, що вирішується практичними розрахунками колії на міцність, – це визначення максимально імовірних напружень в елементах колії, що є показником її міцності. Тому зрозуміло, що основна увага приділялася «важким» вантажним одиницям рухомого складу, переважно локомотивам для вантажних поїздів. Але їх швидкість руху, як правило, не перевищує 80–90 км/год. Навіть з урахуванням пасажирського руху використання методики розрахунку згідно з ЦП-0117 [5] обмежено швидкістю 160 км/год.

Сучасна тенденція розвитку транспортних мереж передбачає впровадження на залізницях України саме швидкісного та високошвидкіс-

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

ного руху пасажирських поїздів [6, 16]. Принципові конструкційні зміни у таких потягах та суттєве зростання швидкості руху приводить до необхідності перегляду методик розрахунку їх дії на залізничну колію [15, 14].

Під час конструювання високошвидкісного рухомого складу знайшли застосування дві концепції тягового привода: локомотивна (зосереджена тяга) – з тяговими двигунами, встановленими на електровозах, які у високошвидкісних поїздах, як правило, розміщуються по одному в головній і хвостовій частинах поїзда (виключення становлять, наприклад, високошвидкісні поїзди Х2000 (Швеція) і ICE2 (Німеччина), що мають по одному електровозу, або поїзд АРТ-Р (Великобританія), у якому два електровози розташовуються посередині состава), і моторвагонна (розподілена тяга) – з відносно рівномірним розміщенням тягових засобів уздовж поїзда.

На високошвидкісних лініях використовуються рухомий склад з різними конструкціями опирання кузовів на візки: зчленована, коли два суміжних вагони опираються на один візок, і незалежна, при якій кожний з вагонів підтримується двома індивідуальними візками. Суперництво конструкторів, що дотримуються однієї із двох концепцій, триває. Так, наприклад, міжнародний концерн Alstom випускає поїзди сімейства TGV тільки зі зчленованими вагонами, у той же час проміжні одноосьові візки використовуються в поїздах зі зчленованими вагонами Talgo [17].

Вважається, що зменшення жорсткості ресорного підвішування за інших рівних умов сприятливо позначається на плавності руху залізничних екіпажів. Тому існуючі тенденції, спрямовані на поліпшення плавності ходу, у першу чергу характеризуються зниженням жорсткості ресорного підвішування й відповідним збільшенням статичного прогину. Застосування гідравлічних приладів з комп'ютерним керуванням взагалі не вкладається в тотожний перехід до показників пружинно-механічних систем, закладених в існуючих розрахункових методиках.

### Мета

На основі теоретичних передумов та експериментальних досліджень обґрунтувати вибір

факторів, що є визначальними для формування динамічного навантаження на колію від сучасного рухомого складу для умов швидкісного та високошвидкісного руху. В результаті надати методичу визначення вертикальної розрахункової сили, що діє від колеса на рейку.

### Методика

Основним напрямком адаптації розрахунків колії на міцність для високих швидкостей руху треба вважати адекватність врахування динаміки процесу. Що стосується прогину рейки, то приймається, що він відбувається миттєво, а за обрис вигину рейки під впливом динамічного навантаження приймається лінія вигину від статичного навантаження, чисельно рівного значенню динамічної сили в даний момент часу (гіпотеза Н. П. Петрова). Межі застосування такого припущення було розглянуто в роботі [8]. Динамічне навантаження враховується через відповідне визначення розрахункової сили, за яку приймається максимальна вірогідна сила з імовірністю неперевищення 0,994, що складається із статичного навантаження та комплексу динамічних добавок

$$P_{\text{розр}} = \bar{P} + 2,5S, \quad (1)$$

де  $\bar{P}$  – середнє значення сили, що діє від колеса на рейку;  $S$  – середньоквадратичне відхилення сили, що діє від колеса на рейку.

В практичних розрахунках колії на міцність [4, 5] показники сили, що діють від колеса на рейку, визначаються за формулами:

$$\left. \begin{aligned} \bar{P} &= P_{\text{ст}} + \bar{P}_{\text{р}}; \\ S &= \sqrt{S_{\text{р}}^2 + S_{\text{рн}}^2 + 0,05S_{\text{інк}}^2 + 0,95S_{\text{онк}}^2}; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де  $P_{\text{ст}}$  – вага екіпажа, віднесена до одного колеса (статичне навантаження);  $\bar{P}_{\text{р}}$  – середнє значення сили від коливань надресорної ваги екіпажа;  $S_{\text{р}}$  – середньоквадратичне відхилення сили від коливань надресорної ваги екіпажа;  $S_{\text{рн}}$  – середньоквадратичне відхилення сили від перекочування колеса по рейці з нерівністю;  $S_{\text{інк}}$  – середньоквадратичне відхилення сили від наявності на колесі ізолюваної нерівності;  $S_{\text{онк}}$  – середньоквадратичне відхилення сили

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

від наявності на колесі безперервної нерівності.

Максимальне значення сили від коливань надресорної ваги екіпажа (кузова) можна визначити деякими засобами: через максимальний прогин ресор, через статичний прогин ресор або через коефіцієнт вертикальної динаміки

$$P_{p(\max)} = k_d (P_{ст} - q_k), \quad (3)$$

де  $k_d$  – коефіцієнт вертикальної динаміки;  $q_k$  – вага необресореної частини екіпажа, віднесена до одного колеса, кН.

Середнє значення сили від коливань надресорної ваги екіпажа приймається як 75 % від її максимального значення, а середньоквадратичне відхилення – 8 %.

$$\left. \begin{aligned} \bar{P}_p &= 0,75 P_{p(\max)} \\ S_p &= 0,08 P_{p(\max)} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Середньоквадратичне відхилення сили від перекочування колеса по рейці з нерівністю визначається за формулою

$$S_{pn} = 1,81 \cdot 10^{-7} \alpha_1 \beta \epsilon \gamma l \sqrt{\frac{U q_k}{k} \bar{P} V}, \quad (5)$$

де  $\alpha_1$  – коефіцієнт, що залежить від типу шпал (враховує вагу верхньої будови колії, що бере участь у взаємодії з колесом);  $\beta$  – коефіцієнт, що враховує тип рейок (залежить від моменту інерції рейки);  $\epsilon$  – коефіцієнт, що залежить від типу шпал;  $\gamma$  – коефіцієнт, що залежить від виду баласту;  $l$  – відстань між осями шпал, см;  $U$  – модуль пружності підрейкової основи, МПа;  $k$  – коефіцієнт відносної жорсткості, см<sup>1</sup>;  $V$  – швидкість руху, км/год.

Середньоквадратичне відхилення сили від наявності на колесі ізольованої нерівності визначається за формулою

$$S_{инк} = 0,05 \alpha_0 \xi e_0 \frac{U}{k}, \quad (6)$$

де  $\alpha_0$  – коефіцієнт, що залежить від типу шпал;  $\xi$  – безрозмірний прогин (відношення додаткового прогину рейки, що виникає внаслідок наявності на колесі ізольованої нерівності, до глибини цієї нерівності);  $e_0$  – глибина ізольованої нерівності на колесі, см.

Середньоквадратичне відхилення сили від наявності на колесі безперервної нерівності визначається за формулою

$$S_{бнк} = \frac{1,63 \cdot 10^{-2} \alpha_0 U \sqrt{q_k} V^2}{d^2 \sqrt{kU - 32k^2 q_k}}, \quad (7)$$

де  $d$  – діаметр колеса, см.

Як видно з наведених формул, динамічні складові сили, що діє від колеса на рейку, мають складні залежності від багатьох параметрів. Виконані дослідження показали, що для більшості різновидів сучасних одиниць швидкісного та високошвидкісного рухомого складу характерна залежність внеску кожної динамічної добавки у загальне значення сили. Визначальними вихідними даними можна вважати швидкість руху і модуль пружності підрейкової основи. На рис. 1 наведено приклад зміни значень середньоквадратичних відхилень чотирьох динамічних сил, що входять до практичних розрахунків на міцність, залежно від швидкості руху для модуля пружності підрейкової основи 50 МПа.

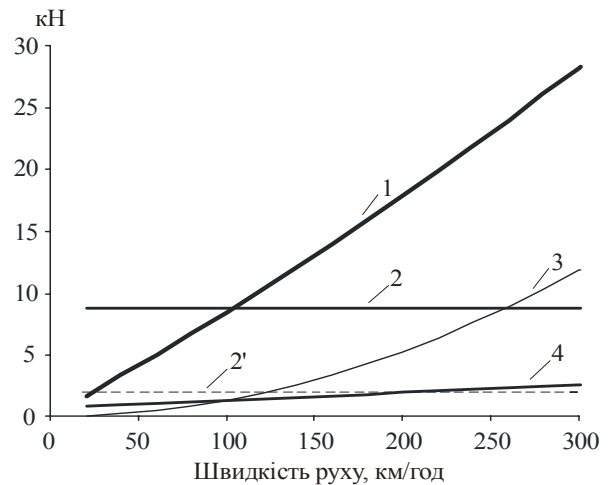


Рис. 1. Зміна середньоквадратичних відхилень динамічних сил від швидкості руху:

1 –  $S_{pn}$ ; 2 –  $S_{инк}$ ; 2' –  $S_{инк}$  з урахуванням припущення про 5 % таких коліс; 3 –  $S_{бнк}$ ; 4 –  $S_p$

Fig. 1. Change in the standard deviation of the dynamic forces on the velocity of motion:

1 –  $S_{pn}$ ; 2 –  $S_{инк}$ ; 2' –  $S_{инк}$  take into account about 5 % of such wheels; 3 –  $S_{бнк}$ ; 4 –  $S_p$

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

З виконаного аналізу, приклад якого можна дослідити на рис. 1, видно, що співвідношення середньоквадратичних відхилень різних динамічних сил, а відповідно й вплив різних факторів, для різних швидкостей руху не однаковий. Так можна відокремити зону з швидкостями руху до 80–100 км/год (особливо важливо для вантажних поїздів і детально досліджено в діючих розрахунках колії на міцність) та зон зі швидкістю руху 120–250 км/год і більше 250 км/год.

На рис. 2 наведена залежність складових розрахункової сили (загального середньоквадратичного відхилення і середнього значення сили від коливань надресорної ваги екіпажа) залежно від швидкості руху. З рисунка видно, що при швидкостях руху до 40–60 км/год середнє значення сили від коливань надресорної ваги екіпажа не поступає за рівнем двом з половиною середньоквадратичним відхиленням, а, відповідно, має суттєвий вплив на остаточне значення розрахункової сили. Зі збільшенням швидкості руху цей вплив швидко зменшується.

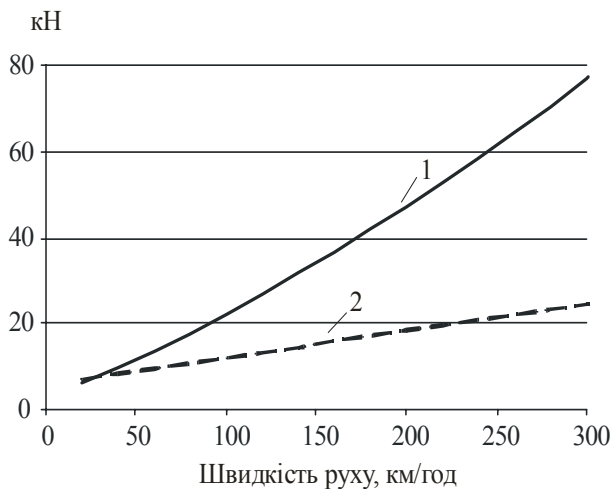


Рис. 2. Зміна складових розрахункової сили залежно від швидкості руху:

$$1 - 2,5S; 2 - \bar{P}_p$$

Fig. 2. The changing of computational power depending on speed:

$$1 - 2,5S; 2 - \bar{P}_p$$

Також можна дослідити зміну динамічного навантаження за результатами експериментальних вимірювань. На рис. 3–6 наведено залежності середньої і розрахункової сил від швид-

кості руху для пасажирських поїздів Talgo і Skoda. Експериментальні вимірювання виконувались Колієвипробувальною галузевою науково-дослідною лабораторією ДНУЗТу. Значення вертикальної сили, що діє від колеса на рейку, визначалися за результатами вимірювань напружень в рейках. Експериментальні випробування відбувалися на прямих ділянках колії без відхилень в утриманні більше ніж другий ступінь [12], верхня будова колії обох дослідних ділянок складалася з безстикової плити рейок Р65, залізобетонних шпал, щебеневого баласту та відповідала вимогам конструкції колії I категорії [10]. Поїзд Talgo складався з локомотива KZ4A та зчленованих пасажирських вагонів з суміжним обпиранням на одновісні візки. Поїзд Skoda складався з моторних та причіпних вагонів з окремим обпиранням на двовісні візки.

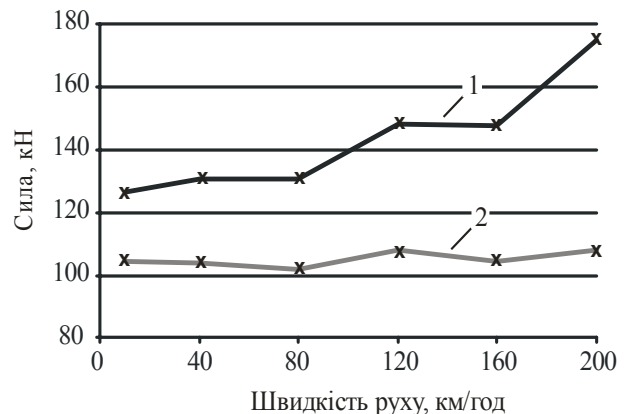


Рис. 3. Залежність середньої і розрахункової вертикальної сили від швидкості руху для локомотива KZ4A поїзда Talgo ( $P_{ст} = 105,5$  кН):

1 – середнє значення сили; 2 – розрахункове значення сили

Fig. 3. The dependence of the average and calculated vertical force on the speed for the locomotive KZ4A, train Talgo ( $P_{ст} = 105,5$  kN):

1 – average force; 2 – calculated value of the force

Наведені значення середньої і розрахункової (1) сил визначалися за результатами статистичної обробки даних.

За наявністю достатньої кількості вимірювань для експериментального поїзда Talgo було виконано факторні дисперсійні аналізи [3, 11] для отримання чисельних характеристик впливу різних факторів на значення вертикальної сили дії колеса на рейку.

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

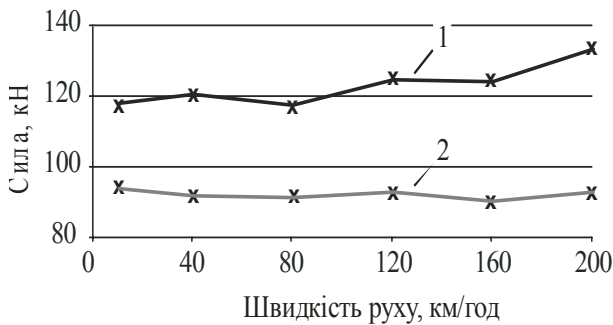


Рис. 4. Залежність середньої і розрахункової вертикальної сили від швидкості руху для пасажирського вагона поїзда Talgo ( $P_{ст} = 85$  кН):  
1 – середнє значення сили; 2 – розрахункове значення сили

Fig. 4. The dependence of the average and the calculated vertical force on speed for passenger train Talgo ( $P_{ст} = 85$  кН):

1 – the average force; 2 – calculated value of force

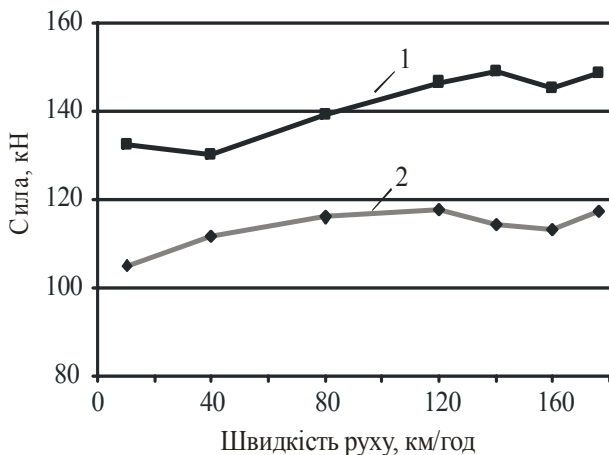


Рис. 5. Залежність середньої і розрахункової вертикальної сили від швидкості руху для моторного вагона поїзда Skoda ( $P_{ст} = 99$  кН):  
1 – середнє значення сили; 2 – розрахункове значення сили

Fig. 5. The dependence of the average and calculated vertical force on the velocity of motion for the engine car, train Skoda ( $P_{ст} = 99$  кН):

1 – the average force; 2 – the calculated value of force

Так було проаналізовано вплив номера осі (розглянуто 8 осей пасажирських вагонів з приблизно однаковим навантаженням), що характеризує вплив коливань кузова і нерівностей на колесах.

Також було проаналізовано вплив місця перерізу рейки (розглянуто 8 перерізів на обох

нитках з різними відстанями на ділянці з загальною довжиною 42 метри без наявності суттєвих відхилень в утриманні), що характеризує вплив руху колеса по динамічних нерівностях колії, які виникають в результаті коливань рейки.

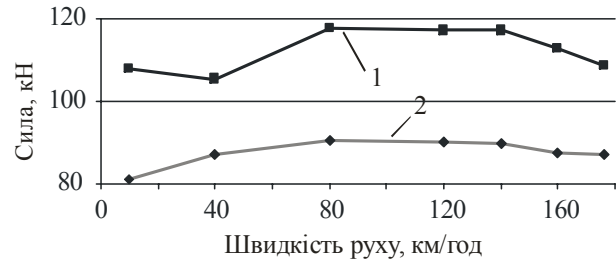


Рис. 6. Залежність середньої і розрахункової вертикальної сили від швидкості руху для причипного вагона поїзда Skoda ( $P_{ст} = 84$  кН):  
1 – середнє значення сили; 2 – розрахункове значення сили

Fig. 6. The dependence of the average and the calculated vertical force on the speed of movement of a towed wagon, train Skoda ( $P_{ст} = 84$  кН):

1 – the average force; 2 – the calculated value of force

Загальна кількість вимірювань в матриці спостережень коливалась для різних рівнів швидкості руху, наприклад, для швидкості руху 200 км/год склала 560 значень. Отримані результати підпорядковуються нормальному закону розподілення. На рис. 7 наведено приклади законів розподілення, отриманих за експеримент-гальними даними, для швидкостей руху 80 і 200 км/год з кроком дискретизації 12,5 кН.

Для швидкості руху 200 км/год було отримано ступінь впливу (за коефіцієнтом Фішера) номера осі вагона на рівні 1,696; ступінь впливу номера перерізу рейки – 122,4 при рівні критичного значення коефіцієнта Фішера 2,02. Для інших значень швидкості руху співвідношення наведених показників принципово не змінюється. Наприклад, при швидкості руху 80 км/год отримано коефіцієнти Фішера 0,296 і 120,1 для номера осі і перерізу рейки відповідно.

Таким чином можна зробити висновок, що коливання кузова в сучасних пасажирських вагонах якісно гасяться і не приводять до суттєвого збільшення вертикальної сили тиску колеса на рейку. Основним фактором збурення динамічної сили можна вважати проходження колесом динамічної нерівності колії, яка утво-

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

рюється навіть за відсутності суттєвих геометричних нерівностей внаслідок коливань рейки на пружній підрейковій основі.

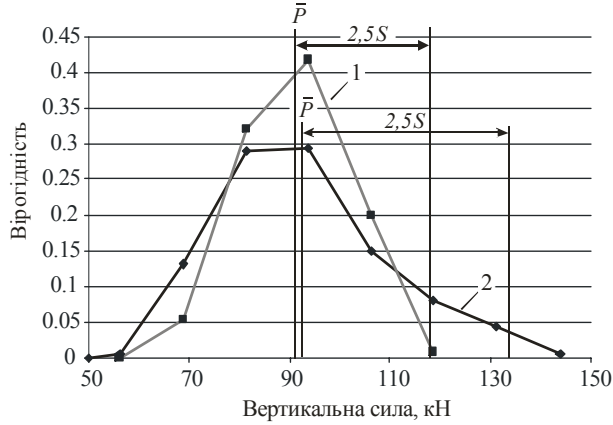


Рис. 7. Закон розподілення вертикальної сили від колеса на рейку за експериментальними вимірюваннями для пасажирського вагона поїзда Talgo:  
1 – швидкість руху 80 км/год; 2 – швидкість руху 200 км/год

Fig. 7. The distribution law of the vertical force of the wheel on the rail by experimental measurements for passenger train Talgo:  
1 – speed of 80 km/h; 2 – speed of 200 km/h

Тому доцільно переглянути методику визначення саме динамічної сили від проходження колеса по рейковій нерівності. В первинному вигляді формулу (5) можна подати так

$$S_{\text{рн}} = 0,707\alpha_0 \frac{\pi^2}{\sqrt{2g}} \sqrt{\frac{Uq_k V i}{k}}, \quad (8)$$

де 0,707 – коефіцієнт переходу від максимального значення сили до її середньоквадратичного відхилення, що відповідає тригонометричній функції, яка закладається для опису гармонічних коливань;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $i$  – динамічний ухил рейкової нерівності;  $\alpha_0$  – коефіцієнт, який увійшов у формулу згодом, визначається відношенням маси колеса і маси колії, приведених до точки їх контакту.

Формула (8) є результатом обробки даних рішення диференційного рівняння коливань механічної пари «колесо-рейка», первинно отримана для підрейкової основи з дерев'яними шпалами [2, 4, 13]. Для залізобетонних шпал було запропоновано іншу формулу [1, 13]

$$S_{\text{рн}} = \frac{9,1 \cdot 10^{-3} \bar{P} V \sqrt{q_k}}{\sqrt[8]{EIU^3}}, \quad (9)$$

де  $E$  – модуль пружності рейкової сталі;  $I$  – момент інерції рейки.

Однак в сучасних практичних розрахунках колії на міцність [5] використовується формула (5), отримана з формули (8) з відповідними коефіцієнтами, які враховують насамперед зміну параметрів динамічної нерівності при застосуванні залізобетонних шпал, викликану збільшенням жорсткості підрейкової основи та зміною приведеної маси колії

$$\left. \begin{aligned} i &= A\alpha_1\beta\epsilon\gamma l\bar{P} \\ A &= \frac{1,788 \cdot 10^{-4} \sqrt{2g}}{\pi^2 \alpha_0} \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

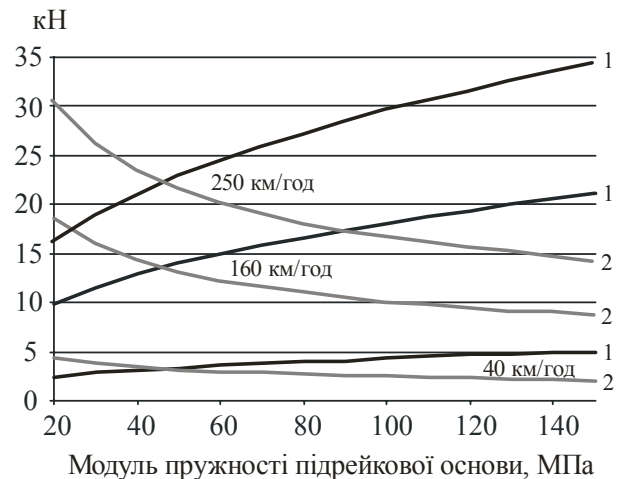


Рис. 8. Залежність середньоквадратичного відхилення сили від проходження колеса по рейковій нерівності відносно модуля пружності підрейкової основи:

1 – за формулою (5); 2 – за формулою (9)

Fig. 8. The dependence of the standard deviation forces from passing wheels on rail inequality relatively elastic modulus of under rail bases:

1 – according to the formula (5);  
2 – according to the formula (9)

На рис. 8 наведено приклад залежностей середньоквадратичного відхилення сили від проходження по рейковій нерівності від модуля пружності підрейкової основи, розрахованих за формулами (5) і (9), для декількох рівнів швидкостей руху: 40, 160 і 250 км/год. При низьких швидкостях руху розбіжність в розрахунках незначна. Для модуля пружності підрейкової осно-

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

ви біля 50 МПа результати збігаються. Суттєве збільшення модуля пружності призводить до розходження результатів, яке стає особливо відчутним при високих швидкостях руху. Причому за формулою (5) збільшення модуля пружності збільшує силу: більш жорстка колія – більш важка (особливо у порівнянні дерево – залізобетон), а значить – більша приведена маса колії. За формулою (9) збільшення модуля пружності зменшує силу: більш жорстка колія тієї самої конструкції (літній залізобетон – зимовий залізобетон) має меншу довжину і глибину прогину, а значить – менша приведена маса колії.

В цьому дослідженні не передбачається вирішувати задачу визначення приведеної маси колії. Навпаки, наведені міркування показують, що такий параметр є штучним і може застосовуватися тільки для низьких швидкостей руху на рівні статичних схем розрахунку [7].

### Результати

Проаналізовано результати статистичної обробки даних експериментальних досліджень руху сучасних пасажирських поїздів із швидкостями руху до 200 км/год щодо рівня динамічної вертикальної сили дії колеса на рейку. Встановлено ступені впливу різних факторів на формування значення цієї сили. Отримано як експериментальне, так і теоретичне обґрунтування необхідності перегляду методики визначення розрахункової сили для практичних розрахунків колії на міцність в умовах руху пасажирських поїздів з високими швидкостями. Напевно, такий перегляд повинен полягати не тільки в корегуванні існуючих методів, а й у формуванні нових підходів на основі сучасних математичних моделей або відповідних статистичних даних. Наприклад, один із закордонних варіантів вирішення поставленої задачі [9] передбачає визначення розрахункової сили, як суми статичного навантаження і динамічної добавки, яка визначається залежно від стану колії і швидкості руху

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{розр}} &= P_{\text{ст}} + sP_{\text{ст}} \\ s &= n\varphi \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

де  $n$  – коефіцієнт, що враховує стан колії:  $n=0,1$  – відмінний стан,  $n=0,2$  – гарний стан,  $n=0,3$  – поганий стан;  $\varphi$  – коефіцієнт, який залежить від швидкості руху:

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi &= 1, V \leq 60 \text{ км/год}; \\ \varphi &= 1 + 0,5 \frac{V-60}{190}, 60 < V \leq 300 \text{ (пас. поїзд)}; \\ \varphi &= 1 + 0,5 \frac{V-60}{80}, 60 < V \leq 140 \text{ (вант. поїзд)}. \end{aligned} \right. \quad (12)$$

Такий підхід приховує вплив детальних характеристик колії та рухомого складу на формування динамічної сили, але дає змогу отримувати адекватні чисельні значення для відповідних розрахунків міцності залізничної колії.

### Наукова новизна та практична значимість

Наведені результати надають подальший розвиток науковій задачі щодо створення сучасних методів розрахунків напружено-деформованого стану залізничної колії для високих швидкостей руху. На основі теоретичних досліджень і виконаного аналізу статистичних даних експериментальних вимірювань встановлені фактори збудження динамічної складової вертикальної сили для сучасних пасажирських поїздів. Отримані рекомендації удосконалюють існуючі розрахунки колії на міцність, вирішуючи практичну задачу їх застосування для швидкостей руху більше 160 км/год.

### Висновки

Значення розрахункової вертикальної сили, що діє від колеса на рейку, залежить від багатьох факторів. При практичних розрахунках колії на міцність цей показник формується з декількох складових, вплив яких на різних швидкостях руху не однаковий. За аналізом результатів аналітичних розрахунків встановлено, що за впливовістю різних динамічних складових можна відокремити такі швидкісні зони: до 80–100 км/год, 120–250 км/год, більше 250 км/год.

Як теоретичні дослідження, так і аналіз статистичних даних експериментальних вимірювань показують, що основним фактором збудження динамічної складової вертикальної сили для сучасних пасажирських поїздів, що рухаються з швидкістю 120 км/год і більше, є коливання системи «колесо-рейка» або так зване проходження колесом динамічної рейко-

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

вої нерівності. Існуючі методи розрахунку таких сил потребують оперувати таким показником, як приведена маса колії. Наведені дослідження показують, що такий параметр є штучним і може застосовуватися тільки для низьких швидкостей руху на рівні статичних схем розрахунку.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вериго, М. Ф. Основные положения методики расчета сил, действующих на железобетонные шпалы / М. Ф. Вериго // Тр. ВНИИЖТа. – Москва, 1963. – Вып. 257. – С. 5–39.
2. Взаимодействие пути и подвижного состава / Е. М. Бромберг, М. Ф. Вериго, В. Н. Данилов, М. А. Фришман. – Москва : Трансжелдориздат, 1956. – 280 с.
3. Гурский, Е. И. Теория вероятностей с элементами математической статистики / Е. И. Гурский. – Москва : Высш. шк., 1971. – 328 с.
4. Даніленко, Е. І. Залізнична колія. Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомим складом : підруч. для вищ. навч. закл. : у 2 т. / Е. І. Даніленко. – Київ : Інпрес, 2010. – Т. 2. – 456 с.
5. Даніленко, Е. І. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість : ЦП-0117 / Е. І. Даніленко, В. В. Рибкін. – Київ : Транспорт України, 2004. – 64 с.
6. Крашенінін, О. С. Напряжки удосконалення системи утримання моторвагонного рухомого складу / О. С. Крашенінін, В. А. Гогаєв // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2014. – № 4 (52). – С. 119–126. doi: 10.15802/stp2014/27360.
7. Курган, Д. Модель напряженно-деформированного состояния железнодорожного пути на основе волновой теории распространения напряжений / Д. Курган, И. Бондаренко // Problemy Kolejnictwa. – 2013. – Vol. 159. – P. 99–111.
8. Курган, Д. М. Особливості сприйняття навантаження елементами залізничної колії при високих швидкостях руху / Д. М. Курган // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2015. – № 2 (56). – С. 136–145. doi: 10.15802/stp2015/42172.
9. Лихтбергер, Б. Железнодорожный путь : справочник / Б. Лихтбергер. – Гамбург : DVV Media Group GmbH, 2010. – 434 с.
10. Положення про проведення планово-запобіжних ремонтно-колійних робіт на залізницях України : ЦП-0287 / А. Бабенко, Г. Линник, К. Мойсеєнко [та ін.]. – Київ : Дедалта, 2014. – 45 с.
11. Рибкін, В. В. Надійність залізничної колії : навч. посіб. / В. В. Рибкін, І. О. Бондаренко, Д. М. Курган. – Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2013. – 154 с.
12. Технічні вказівки щодо оцінки стану рейкової колії за показниками колієвимірювальних вагонів та забезпечення безпеки руху поїздів при відступах від норм утримання рейкової колії : ЦП-0267 / О. М. Патласов, В. В. Рибкін, Ю. В. Палейчук, С. О. Соломаха, П. В. Панченко. – Київ : Поліграфсервіс, 2012. – 46 с.
13. Чернышов, М. А. Практические методы расчета пути / М. А. Чернышов. – Москва : Транспорт, 1967. – 236 с.
14. André, José Maria C.S. A railway steering system guided by a reference ahead of the train / José Maria C.S. André // Vehicle System Dynamics. – 2013. – Vol. 51. – Iss. 3. – P. 481–496. doi: 10.1080/00423114.2012.757333.
15. Roanes-Lozano, E. The Geometry of Railway Geometric Overthrow Revisited Using Computer Algebra Methods / E. Roanes-Lozano // Mathematics in Computer Science. – 2013. – Vol. 7. – Iss. 4. – P. 473–485. doi: 10.1007/s11786-013-0164-7.
16. Stukalina, O. Problems of rail connections between Ukraine and its neighboring countries / O. Stukalina, A. Dzhaleva-Chonkova // Mechanics Transport Communications. – 2012. – Vol. 10. – Iss. 3/2. – P. 3.4–3.8.
17. Talgo 250 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.talgo.com/pdf/t250\\_250H\\_en.pdf](http://www.talgo.com/pdf/t250_250H_en.pdf). – Назва з екрана. – Перевірено : 8. 04.2015.



Д. Н. КУРГАН<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 42, эл. почта kurgan@brailsys.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ОТ КОЛЕСА НА РЕЛЬС ДЛЯ СКОРОСТНЫХ ПОЕЗДОВ

**Цель.** На основе теоретических предпосылок и экспериментальных исследований в работе предусматривается обоснование выбора факторов, которые являются определяющими для формирования динамической нагрузки на путь от современного подвижного состава в условиях скоростного и высокоскоростного движения. В результате будет получена методика определения вертикальной расчетной силы, которая действует от колеса на рельс. **Методика.** Современная тенденция развития транспортных сетей предусматривает внедрение на железных дорогах Украины скоростного, а в перспективе – и высокоскоростного движения пассажирских поездов. Принципиальные конструкторские изменения в таких поездах и существенное увеличение скорости движения приводят к необходимости пересмотра методик расчета воздействия подвижного состава на железнодорожный путь, соотношения среднеквадратических отклонений различных динамических сил, оценки воздействия различных факторов для разных скоростей движения. В работе также исследовано изменение динамической нагрузки по результатам экспериментальных измерений. **Результаты.** Получены зависимости средней и расчетной сил от скорости движения для современных пассажирских поездов. С использованием факторного дисперсионного анализа получены численные характеристики влияния разных факторов на значение вертикальной силы действия колеса на рельс и установлены степени этого влияния на его формирование. Опираясь на результаты экспериментальных и теоретических исследований, обоснована необходимость пересмотра методики определения расчетной силы для практических расчетов пути на прочность в условиях движения пассажирских поездов с высокими скоростями. **Научная новизна.** На основе теоретических исследований и проведенного анализа статистических данных экспериментальных измерений установлено, что основным фактором возбуждения динамической составляющей вертикальной силы для современных пассажирских поездов являются колебания системы «колесо–рельс» или так называемое «прохождение колесом динамической неровности пути». **Практическая значимость.** Существующие методики расчета динамической составляющей вертикальных сил нуждаются в таком показателе, как приведенная масса пути. Полученные в исследовании результаты показывают, что такой параметр является искусственным и может использоваться только для низких скоростей движения на уровне статичных схем расчета.

*Ключевые слова:* расчет пути на прочность; верхнее строение пути; скоростное движение; напряжение в рельсе; динамическая сила; динамическая неровность

D. M. KURHAN<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Track and Track Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 42, e-mail kurgan@brailsys.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

## DETERMINATION OF DYNAMIC LOADS FROM THE WHEEL ON THE RAIL FOR HIGH-SPEED TRAINS

**Purpose.** On the basis of theoretical assumptions and experimental studies the paper provides the choice of the factors for the formation of dynamic load on the track of modern rolling stock in the conditions of high-speed. This results in a calculation method of determining a vertical force which acts on the wheels on the rails. **Methodology.** The current trend of development of transport networks is the introduction to Ukrainian railways speed, and in the future – high-speed, passenger trains. Fundamental structural changes in these trains, and a significant increase in speed results in a need to revise the calculation methods of action of rolling stock on the railway track, the ratio of the standard deviations of various dynamic forces, assess the impact of different factors for different speeds. In the work investigated the change in the dynamic load on the results of experimental measurements. **Findings.** The de-

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

pendences of the average and the calculated forces on the speed of modern passenger trains were obtained. Using factor analysis of variance obtained numerical characteristics of the influence of different factors on the value of the vertical force acts on the wheel rail and the degrees of influence of various factors on its deformation were determined. Based on the results of experimental and theoretical research, the necessity of revising the methodology for determining the estimated power for practical calculations the way to strength in terms of passenger trains at high speeds was grounded. **Originality.** On the basis of theoretical research and analysis of statistical data of experimental measurements it was found that the main factor driving the dynamic vertical force component for modern passenger trains are the vibrations of the «wheel-rail» system or so-called «dynamic wheel passing the rough ways». **Practical value.** Existing methods of calculating the dynamic component of the vertical forces need such indicators as the reduced mass of the way. The obtained results in the study indicate that a parameter is artificial and can only be used for low speeds at the level of static calculation schemes.

*Keywords:* railways calculation for strength; permanent way; high-speed train; tension in a rail; dynamic force; dynamic irregularity

## REFERENCES

1. Verigo M.F. Osnovnyye polozheniya metodiki rascheta sil, deystvuyushchikh na zhelezobetonnyye shpaly [Basic methods of calculating the forces acting on concrete sleepers]. *Trudy Vserossiyskogo nauchno issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Proc. of All-Russian Scientific Research Institute of Railway Transport]. Moscow, 1963, vol. 257, pp. 5-39.
2. Bromberg Ye.M., Verigo M.F., Danilov V.N., Frishman M.A. *Vzaimodeystviye puti i podvizhnogo sostava* [The interaction between the track and rolling stock]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1956. 280 p.
3. Gurskiy Ye.I. *Teoriya veroyatnostey s elementami matematicheskoy statistiki* [Probability theory with elements of mathematical statistics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1971. 328 p.
4. Danilenko E.I. *Zaliznychna koliia. Ulashtuvannia, proektuvannia i rozrakhunky, vzaemodiia z rukhomym skladom* [Railway track. Arrangement, design and calculations, interaction with rolling stock]. Kyiv, Inpres Publ., 2010, vol. 2. 456 p.
5. Danilenko E.I., Rybkin V.V. *Pravyly rozrakhunkiv zaliznychnoi kolii na mitsnist i stiihist. TsP-0117* [The terms of payment of railway track for strength and stability. TsP-0117]. Kyiv, Transport Ukrainy Publ., 2004. 64 p.
6. Krasheinin O.S., Hohaiev V.A. Napriamky udoskonalennia systemy utrymannia motorvahonnoho rukhomoho skladu [Improvement directions of maintenance system of multiple unit]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2014, no. 4 (52), pp. 119-126. doi: 10.15802/stp2014/27360.
7. Kurgan D., Bondarenko I. Model napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zheleznodorozhnogo puti na osnove volnovoy teorii rasprostraneniya napryazheniy [Model the stress-strain state of railway track based on the wave propagation of theory stresses]. *Problemy Kolejnictva*, 2013, vol. 159, pp. 99-111.
8. Kurhan D.M. Osoblyvosti spryiniattia navantazhennia elementamy zaliznychnoi kolii pry vysokyykh shvydkostiakh rukhu [Features of perception of loading elements of the railway track at high speeds of the movement]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2015, no. 2 (56), pp. 136-145. doi: 10.15802/stp2015/42172.
9. Likhtberger B. *Zheleznodorozhnyy put* [Railway track]. Hamburg, DVV Media Group GmbH Publ., 2010. 434 p.
10. Babenko A., Lynnyk H., Moiseienko K. *Polozhennia pro provedennia planovo-zapobizhnykh remontno-koliinykh robit na zaliznytsiakh Ukrainy. TsP-0287* [Regulations on safety planning and track repair work on the railways of Ukraine. TsP-0287]. Kyiv, Devalta Publ., 2014. 45 p.
11. Rybkin V.V., Bondarenko I.O., Kurhan D.M. *Nadiinist zaliznychnoi kolii* [Reliability of railway track]. Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazarian Publ., 2013. 154 p.
12. Patlasov O.M., Rybkin V.V., Paleichuk Yu.V., Solomakha S.O., Panchenko P.V. *Tekhnichni vkazivky shchodo otsinky stanu reikovo kolii za pokaznykamy koliiyvymiriuvalnykh vahoniv ta zabezpechennia bezpeky rukhu poizdiv pry vidstupakh vid norm utrymannia reikovo kolii. TsP-0267* [Technical guidelines for the assessment of rail track by track measuring performance cars and to ensure traffic safety during the retreat from the norms of maintenance of a rail track. TsP-0267]. Kyiv, Polihrafservis Publ., 2012. 25 p.

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

13. Chernyshov M.A. *Prakticheskiye metody rascheta puti* [Practical methods for calculating the track]. Moscow, Transport Publ., 1967. 236 p.
14. André José Maria C.S. A railway steering system guided by a reference ahead of the train. *Vehicle System Dynamics*, 2013, vol. 51, issue 3, pp. 481-496. doi: 10.1080/00423114.2012.757333.
15. Roanes-Lozano E. The Geometry of Railway Geometric Overthrow Revisited Using Computer Algebra Methods. *Mathematics in Computer Science*, 2013, vol. 7, issue 4, pp. 473-485. doi: 10.1007/s11786-013-0164-7.
16. Stukalina O., Dzhaleva-Chonkova A. Problems of rail connections between Ukraine and its neighboring countries. *Mechanics Transport Communications*, 2012, vol. 10, issue 3/2, pp. 3.4-3.8.
17. Talgo 250. Available at: [http://www.talgo.com/pdf/t250\\_250H\\_en.pdf](http://www.talgo.com/pdf/t250_250H_en.pdf) (Accessed 8 April 2015).

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. Д. Петренком (Україна); к.т.н., доц. В. П. Гнатенком (Україна)

Надійшла до редколегії 15.03.2015

Прийнята до друку 29.05.2015