

УДК 625.143.036:625.15

СТІЙКІСТЬ БЕЗСТИКОВОЇ КОЛІЇ ТА ПОКАЗНИКИ ЇЇ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ ПІД ВПЛИВОМ ТЕМПЕРАТУРНИХ СИЛ

Канд. техн. наук Д. О. Потапов, асп. В. В. Тертичний

STABILITY OF CONTINUOUS WELDED RAIL TRACK AND INDICATORS OF ITS FUNCTIONAL SAFETY UNDER THE INFLUENCE OF THERMAL FORCES

PhD (Tech.) D. Potapov, postgraduate student V. Tertychnyi

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.215.2026.358902>



Анотація. У статті виконано теоретичне дослідження стійкості безстикової колії та показників її функціональної безпеки за дії температурних сил. Розглянуто вплив поздовжніх температурних зусиль на поперечну стійкість рейкошпальної решітки з урахуванням параметрів, що характеризують стан шпал, баластної призми та якості її ущільнення. Запропоновано використовувати нормальний закон розподілу показників функціональної безпеки колії для визначення ймовірності температурного викиду.

Ключові слова: безстикова колія, стійкість колії, температурні сили, баласт, безпека руху.

Abstract. This paper presents a theoretical study of the stability of continuous welded rail track and the indicators of its functional safety under the action of thermal forces. The research focuses on the influence of longitudinal thermal compressive forces on the lateral stability of the rail-sleeper grid, taking into account the parameters that characterize the condition of sleepers, the ballast bed, and the quality of ballast compaction. These parameters are introduced into the theoretical framework in the form of generalized coefficients, which makes it possible to consider the actual operational condition of the track elements without relying on field measurements. A generalized analytical approach is proposed to describe the interaction between thermal forces, track structural parameters, and lateral resistance provided by the ballast bed. Based on the developed theoretical relationships, the variation of the lateral stability margin of continuous welded rail track under different thermal loading scenarios is evaluated. Particular attention is paid to the role of ballast condition and compaction quality in reducing or increasing the resistance to lateral track displacement.

The study establishes functional relationships between thermal force levels, structural and operational parameters of the track, and functional safety indicators that define the limiting conditions of safe track operation. The obtained results provide a theoretical basis for improving methods of stability assessment of continuous welded rail track and can be used to support engineering decision-making under variable thermal conditions and different levels of track maintenance quality.

Keywords: continuous welded rail, track stability, thermal forces, ballast bed, functional safety.

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

© Потапов Д. О., Тертичний В. В., 2026.

Вступ. Безстикова колія є основною конструкцією верхньої будови колії на магістральних залізницях, що забезпечує підвищення плавності руху поїздів, зменшення динамічних впливів і зниження витрат для утримання колійного господарства. Водночас з експлуатацією безстикової колії виникають значні поздовжні температурні сили, зумовлені змінами температури рейок, які істотно впливають на її напружено-деформований стан.

За дії стискальних температурних сил у поєднанні з вертикальними та поперечними навантаженнями від рухомого складу зростає ризик втрати стійкості колії, зокрема поперечний зсув або викривлення в плані. Такі деформації безпосередньо впливають на рівень функціональної безпеки залізничної інфраструктури та можуть призводити до обмежень швидкості руху або виникнення аварійних ситуацій.

У сучасних умовах інтенсифікації руху поїздів, збільшення осьових навантажень і коливань температурного режиму актуальним є комплексне оцінювання стійкості безстикової колії з урахуванням температурних сил і визначення показників її функціональної безпеки. Особливого значення набуває встановлення взаємозв'язку між температурно-силовими факторами, опором баластної призми поперечному зсуву та граничними умовами безпечної експлуатації колії.

У зв'язку з цим дослідження, спрямовані на оцінювання стійкості безстикової колії та визначення показників її функціональної безпеки за дії температурних сил, є актуальними та мають важливе практичне значення для забезпечення надійної і безпечної роботи залізничного транспорту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У вітчизняній і зарубіжній науково-технічній літературі значну увагу приділено дослідженню роботи безстикової колії під впливом температурних і експлуатаційних навантажень. У працях українських науковців розглянуто

закономірності виникнення поздовжніх температурних напружень у рейках і їхній вплив на експлуатаційну надійність і стійкість колії. Зокрема, у роботах [1, 2] проаналізовано характер розподілу температурних сил у безстиковій колії та показано їхній суттєвий вплив на напружено-деформований стан верхньої будови колії.

У дослідженнях зарубіжних авторів увагу зосереджено на механізмах втрати стійкості безстикової колії за умов підвищених температур і дії стискальних зусиль. У роботі [3] встановлено, що температурні сили є одним із визначальних факторів, які зумовлюють ризик викривлення колії в плані, особливо за наявності ослабленого опору баластної призми. Аналогічні висновки отримано у фундаментальній праці [8], де наведено узагальнені положення щодо забезпечення стійкості безстикової колії в умовах змінного температурного режиму.

Окрему групу досліджень становлять роботи, присвячені впливу поїзного навантаження на поперечну стійкість безстикової колії. У працях [4, 5] запропоновано аналітичні та чисельні моделі взаємодії рейкошпальної решітки з баластною призмою за одночасної дії вертикальних, поперечних і поздовжніх сил. Автори показують, що поїзне навантаження за наявності температурних стискальних зусиль істотно знижує запас поперечної стійкості колії та може бути ініціюючим фактором її зсуву.

Питання оцінювання стійкості безстикової колії тісно пов'язані з проблематикою функціональної безпеки залізничної інфраструктури. У роботі [6] розглянуто підходи для оцінювання безпеки експлуатації інфраструктурних об'єктів на основі аналізу ризиків і граничних станів. Подальший розвиток цих підходів наведено в дослідженні [7], де запропоновано концепції гарантування безпеки безстикової колії за екстремальних температурних умов з урахуванням сукупної дії силових факторів.

Разом із тим аналіз літературних джерел [1–8] свідчить, що більшість існуючих досліджень зосереджені на окремих аспектах роботи безстикової колії – або вплив температурних сил, або дія поїзного навантаження. Недостатньо опрацьованими залишаються питання комплексного оцінювання стійкості безстикової колії та визначення показників її функціональної безпеки з урахуванням зміни фактичного стану підрейкової основи, що зумовлює актуальність подальших досліджень у цьому напрямі.

Визначення мети та завдання досліджень. Теоретичне оцінювання стійкості безстикової колії та показників її функціональної безпеки за дії температурних сил з урахуванням параметрів, що характеризують стан шпал, баластної призми та якість її ущільнення.

Для досягнення поставленої мети необхідно отримати математичний апарат, який дасть змогу визначати необхідну силу опору можливим переміщенням шпал у баласті з урахуванням фактичного стану підрейкової основи, а також оцінювати рівень функціональної безпеки, виходячи з імовірнісного характеру зміни її основних параметрів у процесі експлуатації.

Основна частина дослідження.

Поперечний зсув рейкошпальної решітки під поїздом є прямою загрозою безпеки руху поїздів. У разі несприятливих поєднань вертикальних і горизонтальних поперечних сил, що діють на колію, можливе виникнення зсуву колії, особливо у випадках перезволоженого або забрудненого баласту [9, 10].

Опір баласту зсуву шпал поперек колії є одним із вирішальних факторів, який протидіє деформаціям рейкошпальної решітки в горизонтальній площині. Особливо інтенсивно процес розладу протікає після закінчення ремонтних робіт за недостатнього ступеня ущільнення, а також із його забрудненням.

Дослідження показали, що ймовірність одночасного поєднання максимальних значень поперечних сил із максимальною або мінімальною величиною вертикальних навантажень близька до нуля. Найбільш несприятливим випадком буде вплив напрямлюючої осі першого візка на зовнішню рейкову нитку в кривій. Тому горизонтальні поперечні (бічні) сили Y_6 (рис. 1) приймають максимально ймовірними, а вертикальні навантаження – на рівні середніх [11].

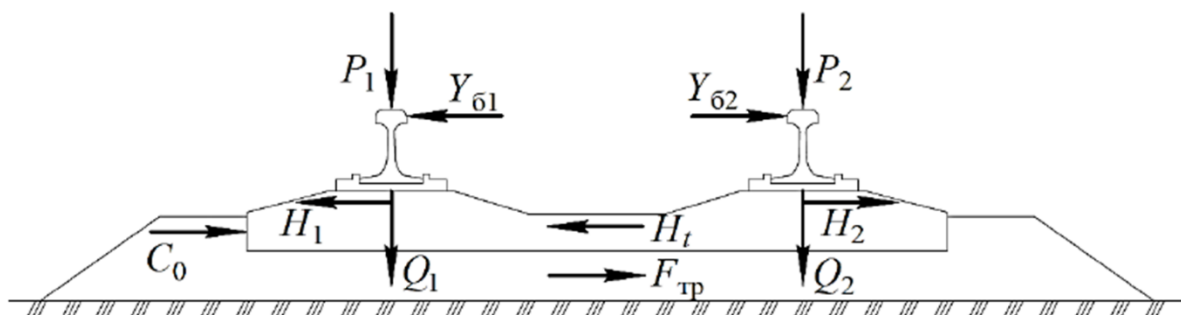


Рис. 1. Розрахункова схема для визначення поперечної стійкості колії

Для забезпечення поперечної стійкості колії необхідно, щоб сили опору колії поперечному зсуву були більше від суми бокових сил, що передаються від рухомого складу на рейки.

Зрозуміло, що якщо жодна зі шпал не зрушиться з місця в баласті під дією поперечних сил, то стійкість рейкової колії в поперечному напрямку забезпечена. У випадку якщо одна з підрейкових опор

опинилася в найбільш несприятливому положенні та почне зміщуватися поперек колії, то вже сусідні шпали будуть залучені в опір зрушенню. Тому достатньо, щоб для окремо взятої шпали були виконані умови граничної рівноваги.

Вертикальне навантаження рейок на шпалу

$$Q_1 = Q_2 = \bar{Q}. \quad (1)$$

Середнє значення вертикального динамічного навантаження, що передається від рейки на шпалу, у відповідності з

вказівками практичного розрахунку колії на міцність визначають як

$$\bar{Q} = \frac{k_e \cdot l_{ш}}{2} \cdot \bar{P}, \quad (2)$$

де k_e – коефіцієнт відносної жорсткості підрейкової основи та рейки у вертикальній площині;

$l_{ш}$ – відстань між осями шпал;

\bar{P} – середнє значення вертикального навантаження від колеса на рейку.

Сила опору, що утримує шпалу від поперечного зсуву,

$$T_{упр} = C_0 + F_{тертя} = C_0 + 2 \cdot \bar{Q} \cdot f_{шп} = C_0 + 2P \frac{k_e \cdot l_{ш}}{2} f_{шп}, \quad (3)$$

де C_0 – початковий опір переміщенню шпали за відсутності вертикального навантаження;

$F_{тертя}$ – сила тертя шпали по баласту за наявності вертикального навантаження;

$f_{шп}$ – коефіцієнт тертя шпали по баласту.

За наявності бокових сил Y_1 і Y_2 величину поперечної зсувної сили H_1 , що діє від зовнішньої рейки, можна визначити як

$$H_1 = Y_1 \cdot \frac{k_e \cdot l_{ш}}{2}, \quad (4)$$

де k_e – коефіцієнт відносної жорсткості підрейкової основи та рейки в горизонтальній площині.

Іншу поперечну силу H_2 , яка теж діє на шпалу від другої рейки в цьому перерізі колії та перешкоджає зсуву, визначають як

$$H_2 = -Y_2 \cdot \frac{k_e \cdot l_{ш}}{2} = -\bar{P} \cdot \frac{k_e \cdot l_{ш}}{2} \cdot f_{рейки}, \quad (5)$$

де $f_{рейки}$ – коефіцієнт тертя ковзання колеса по рейці.

У кривих ділянках колії внаслідок наявності стискальних температурних сил N_t виникають горизонтальні складові H_t , які спрямовані назовні кривої (рис. 2).

На кожній елементарній ділянці кривої довжиною dx цю горизонтальну складову можна визначити як

$$H_t = N_t \sin \frac{d\varphi}{2}, \quad (6)$$

де N_t – величина поздовжньої температурної сили;

φ – центральний кут кривої.

Відповідно до рис. 3, у кривих ділянках колії для забезпечення стійкості додатковий опір для однієї шпали має дорівнювати

$$H_t = N_t \sin \frac{l_{ш}}{2R} \approx \frac{N_t \cdot l_{ш}}{2R}, \quad (7)$$

де R – радіус кривої.

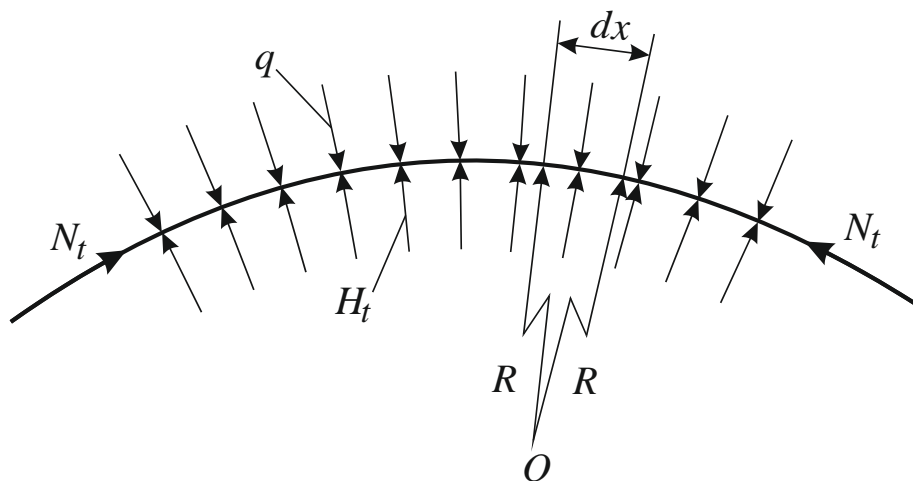


Рис. 2. Поперечні сили в кривій ділянці, що виникають під дією поздовжньої стискальної температурної сили

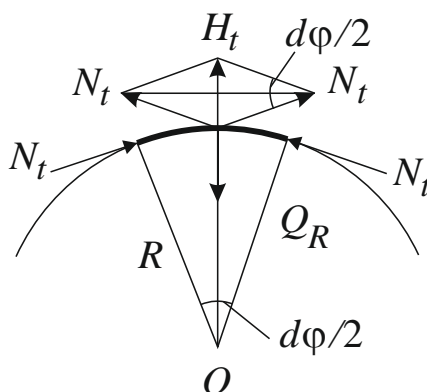


Рис. 3. Схема для визначення радіальних складових температурної сили

Для визначення необхідного опору можливим переміщенням розглянемо випадок граничної рівноваги, тобто

$T_{умр} = T_{зсув}$. Відповідно до вищенаведених виразів, можна записати

$$C_0 + 2\bar{P} \frac{k_e \cdot l_{ш}}{2} f_{рейки} = (Y_p - \bar{P} f_m) \cdot \frac{k_2 \cdot l_{ш}}{2} + H_t. \quad (8)$$

Із рухом у кривій для направляючої осі рухомої одиниці величину рамної сили визначають як

$$Y_p = Y_0 - \bar{P} f_{рейки}. \quad (9)$$

Отже, після перетворень можна знайти підсумковий вираз для визначення опору можливому зсуву для однієї шпали $R_{ум}$:

$$R_{ум} = \left(2\bar{P} \frac{k_e}{k_2} f_{ум} + \frac{2(C_0 - H_t)}{l_{ш} k_2} \right). \quad (10)$$

Отриманий вираз відповідає стану, коли умови стійкості рейкошпальної решітки в горизонтальній площині виконуються. Зрозуміло, що в процесі експлуатації спостерігають зміну базових параметрів колії, що призводить до зміни несучої здатності рейкошпальної решітки в поперечному напрямку. Тому з урахуванням фактичного стану баластної призми, зокрема відповідність її розмірів експлуатаційним умовам, величину фактичного опору можливому зсуву поперек колії для однієї шпали $R_{ун. факт}$ пропонувано визначати як [9, 10]

$$R_{ун. факт} = R_{ун} \cdot \gamma_{ун} . \quad (11)$$

Також для врахування стану баластної призми пропонувано ввести такі показники:

$\gamma_{ун}$ – середнє значення частки сил опору поперечному зсуву шпал відносно базового значення;

$\sigma_{\gamma_{ун}}$ – середньоквадратичні відхилення частки сил опору поперечному зсуву шпал відносно базового значення;

$V_{ун}$ – коефіцієнт варіації частки сил опору поперечному зсуву шпал відносно

базового значення ($V_{ун} = \frac{\sigma_{\gamma_{ун}}}{\gamma_{ун}}$).

Для реальних ділянок колії, де експлуатована безстикова конструкція колії, пропонувано такий порядок обчислення параметрів:

- для кожної шпали вимірюють ширину плеча баластної призми, відсоток наповненості баластом шпального ящика (як середнє між наповненістю правого та лівого ящиків), наявність зазорів між шпалами та баластом, наявність «вихлюпів» і шпал, які втратили контакт із баластним шаром по своїй нижній частині;

- кожної шпали розраховують фактичну частку сил опору поперечному зсуву $\gamma_{ун}$:

$$\gamma_{ун} = \gamma_{нл} k_{нл} + \gamma_{ящ} k_{ящ} + \gamma_{зс} k_{зчепл} , \quad (12)$$

де $\gamma_{нл}$, $\gamma_{ящ}$, $\gamma_{зс}$ – частки сил опору поперечному зсуву, які залежать відповідно від величини плеча баластної призми ($\gamma_{нл} = 0,1$), наповненості шпального ящика ($\gamma_{ящ} = 0,2$), сил тертя із зсувом шпали по баласту ($\gamma_{зс} = 0,7$);

$k_{нл}$, $k_{ящ}$, $k_{зчепл}$ – коефіцієнти впливу, які залежать від величини плеча баластної призми, наповненості шпального ящика, наявності шпал, які втратили контакт із баластним шаром, або «вихлюпів» $k_{зчепл} = 0,4...0,6$.

Значення $k_{нл}$ для загального випадку визначають як відношення фактичної величини плеча баластної призми до її нормативного значення. Наприклад, за нормативного значення 0,45 м

$$k_{нл} = \frac{h_{нл. факт.}}{0,45} . \quad (13)$$

Коефіцієнт впливу $k_{ящ}$ можна визначити за таким виразом:

$$k_{ящ} = \frac{V_{ящ}}{100} , \quad (14)$$

де $V_{ящ}$ – відсоток наповненості шпального ящика, %.

Після обчислення для кожної шпали значення $\gamma_{ун}$ можна вже обчислювати для розрахункової ділянки $\gamma_{ун}$, $\sigma_{\gamma_{ун}}$, $V_{ун}$.

Із пропусканням тоннажу в баластному шарі неминуче накопичуються залишкові деформації у вигляді вертикальних і горизонтальних нерівностей, що призводить до зростання сил взаємодії, зокрема бокових сил. Водночас опір шпал потенціальному зсуву поперек колії буде зменшуватись із забрудненням баласту,

особливо із сильним зволоженням. Тому в деякий момент часу величина бокової сили може перевищити значення опору зсуву шпали $R_{ун}$, що призведе до відмови [12].

За нормального розподілу бокових сил Y_p та опору шпали зсуву $R_{ун}$ колія буде знаходитись у працездатному стані, поки буде виконана умова

$$R_{ун} - Y_p = \Delta > 0. \quad (15)$$

Середнє значення випадкової величини Δ у цьому випадку буде дорівнювати різниці середніх значень випадкових величин $R_{ун}$ та Y_p , тобто

$$\bar{\Delta} = \bar{R}_{ун} - \bar{Y}_p. \quad (16)$$

Середньоквадратичне відхилення σ_{Δ} у цьому випадку

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\sigma_{R_{ун}}^2 + \sigma_{Y_p}^2} \quad (17)$$

де $\sigma_{R_{ун}}$ і σ_{Y_p} – середньоквадратичні відхилення випадкових величин $R_{ун}$ і Y_p .

За цих умов випадкова величина Δ_i має нормальний розподіл, тому ймовірність працездатного стану колії за напрацювання тоннажу t_i можна оцінити за таким виразом:

$$P_t = F_0 \left(\frac{\bar{\Delta}_i}{\sigma_{\Delta_i}} \right), \quad (18)$$

де $F_0 \left(\frac{\bar{\Delta}_i}{\sigma_{\Delta_i}} \right)$ – інтегральна функція нормального розподілу.

Виходячи з особливостей температурної роботи безстикової колії процес деформування плітей у поперечному напрямку з їх нагріванням можна

охарактеризувати двома умовними станами [8-10]:

- перший стан – поперечні переміщення рейкошпальної решітки (із впливом на неї поздовжніх стискальних сил), які не призводять до появи залишкових деформацій;

- другий стан – різке зростання як швидкості, так і величини поперечних переміщень рейкошпальної решітки, тобто безпосередньо температурний викид колії.

Поздовжні стискальні сили, що відповідають вищенаведеним двом станам, пов'язані між собою таким співвідношенням:

$$\frac{N_t^{крит}}{[N]} = k_{cm}, \quad (19)$$

де $N_t^{крит}$ – критична температурна поздовжня сила, за якої виникає викид колії;

$[N]$ – допустима поздовжня сила, яка відповідає першому стану;

k_{cm} – коефіцієнт запасу поперечної стійкості безстикової колії, який закладено в чинному нормативному документі [11].

Умова стійкості

$$N_t^к - N_t^{факт} \geq 0, \quad (20)$$

де $N_t^к$ – критична температурна поздовжня сила, як випадкова величина, що допускають у відповідному розрахунковому перерізі колії;

$N_t^{факт}$ – фактична температурна поздовжня сила, як випадкова величина, що виникає в пліті.

Значення імовірності виконання вимоги (12) являє собою ймовірність безпечної роботи за умови забезпечення його стійкості, а обернена величина відповідно – імовірність появи температурного викиду колії, яку можна визначити як

$$R_{\text{відмови}} = \int_{-\infty}^{+\infty} \Omega_{N_t^{\text{кріп}}} (T) P_{N_t^{\text{факт}}} (T) dT, \quad (21)$$

де $\Omega_{N_t^{\text{кріп}}} (T)$ – розподіл щільності імовірності критичної поздовжньої сили, що допускають;

$P_{N_t^{\text{факт}}} (T)$ – значення імовірності фактичної температурної сили;
 T – температура пліті.

Допустиме підвищення температури рейкової пліті відносно температури її закріплення Δt_{cm} і фактичне підвищення температури рейкової пліті відносно температури її закріплення Δt можна розглядати теж як випадкові величини, що розподілені по довжині пліті. Тому вираз (21) можна записати як

$$R_{\text{відмови}} = \int_{-\infty}^{\Delta t} \Omega_{|\Delta t_{cm}|, k_{cm}} (T) P_{\Delta t} (T) dT. \quad (22)$$

З урахуванням того, що втрату стійкості переважно спостерігають на ділянці колії довжиною 5 – 15 м [13, 14], то в цьому випадку, виходячи з поздовжньої жорсткості рейки та рейкових скріплень

можна прийняти значення величини $N_t = const$ і відповідно $P_{\Delta t} (T) = 1$, тому остаточно отримаємо

$$R_{\text{відмови}} = \int_{-\infty}^{\Delta t} \Omega_{|\Delta t_{cm}|, k_{cm}} (T) dT. \quad (23)$$

Зробивши припущення про нормальний закон розподілу значень показників функціональної безпеки безстиквої колії із втратою стійкості (рис. 4), імовірність цієї події можна визначити як

$$R_{\text{відмови}} = \frac{1}{2} - \Phi \left(\frac{k_{cm} [\Delta t_{cm}] - \Delta t}{\langle \Delta t_{cm} \rangle} \right), \quad (24)$$

де $[\Delta t_{cm}]$ – середнє значення допустимого підвищення температури рейкової пліті відносно температури її закріплення;

$\langle \Delta t_{cm} \rangle$ – середньоквадратичне відхилення допустимого підвищення температури рейкової пліті відносно температури її закріплення;

Φ – інтеграл імовірності кривої нормального розподілу $\Phi(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\eta} e^{-\frac{x^2}{2}} dx$.

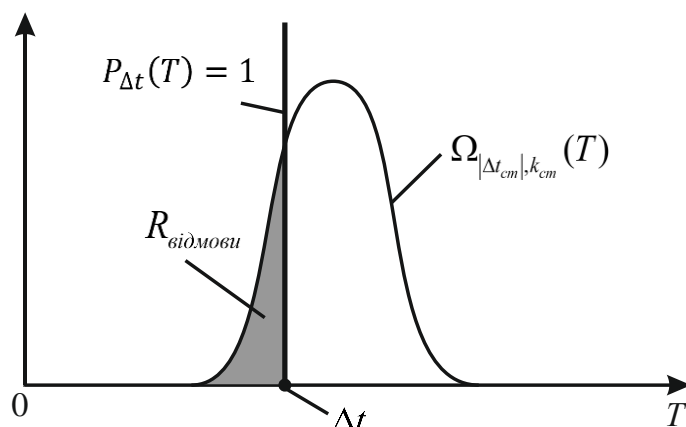


Рис. 4. Графіки функцій $\Omega_{|\Delta t_{cm}|, k_{cm}} (T)$ і $P_{\Delta t} (T) = 1$

На підставі виразу (24) і рис. 4 можна стверджувати, що для визначення імовірності викиду колії необхідно знати функції розподілу щільності імовірності допустимого підвищення температури рейкової пліті відносно температури її закріплення $[\Delta t_{cm}]$, а також значення Δt .

Як основний метод для визначення цих параметрів у подальших дослідженнях буде використано метод прямих експериментів, сутність якого полягає в тому, що на експериментальних ділянках колії будуть нагрівати пліті до відповідної температури Δt із одночасним фіксуванням поперечних переміщень шпал. Подальша статистична обробка допоможе визначити всі необхідні параметри залежно від цілого ряду факторів. Наприклад, як фактори впливу плановано розглянути різні способи ущільнення баластного шару в процесі відновлювальних робіт (машини важкого

типу, електрошпалопідбійки), ступінь заповнення баластних ящиків, порушення розмірів плеча баластної призми.

Висновки. Сформовано математичний апарат для визначення необхідної сили опору можливим переміщенням шпал у баласті, який ураховує фактичний стан підрейкової основи. Як параметри, які впливають на несучу здатність рейкошпальної решітки в горизонтальній площині, в отримані залежності включені величина плеча баластної призми, відсоток наповненості баластом шпального ящика, наявність зазорів між шпалами і баластом і шпал, які втратили контакт із баластним шаром по своїй нижній частині.

Втрату стійкості безстикової колії розглянуто як випадковий процес. Імовірність цієї події пропонувано визначати, використовуючи нормальний закон розподілу значень показників функціональної безпеки.

Список використаних джерел

1. Кравченко О. М., Петренко В. Л. (2018). Температурні напруження в безстиковій колії та їх вплив на експлуатаційну надійність. Вісник Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, № 4(76). С. 45–53.
2. Іванов С. П., Кузьменко А. О., Бондаренко І. В. (2019). Оцінювання стійкості безстикової колії за дії поздовжніх температурних сил. Залізничний транспорт України, № 2. С. 12–18.
3. Schmidt R., Fischer S., Dietrich M. (2020). Thermal forces and stability of continuous welded rail track. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, No. 234(6). Pp. 640–651.
4. Lee J., Park C. (2019). Lateral resistance of ballasted track under combined thermal and train loads. Engineering Structures, No. 199. Pp. 109612.
5. Zhang Y., Liu X., Sun Q. (2021). Numerical analysis of track buckling considering temperature variation and train-induced loads. Construction and Building Materials, No. 273. P. 121728.
6. Петров Д. В., Новак О. П. (2022). Функціональна безпека залізничної інфраструктури: підходи до оцінювання та управління ризиками. Наука та прогрес транспорту, № 1 (95). С. 33–41.
7. Müller A., Esveld C., Schach R. (2023). Safety concepts for continuous welded rail under extreme temperature conditions. Railway Engineering Science, No. 31(2). Pp. 89–102.
8. Esveld C. (2001). Modern Railway Track. 2nd ed. Delft : MRT-Productions, 654 p.
9. Даніленко Е. І. (2010). Залізнична колія. Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомим складом : підруч. для вищ. навч. закл.: у 2 т. Київ: Інпрес, Т. 2. 456 с.

10. Даніленко Е. І. (2020). Проектування і розрахунки конструкцій залізничної колії: підруч. для вищ. навч. закл.: у 2 т. Київ: Хай-Тек Прес, Т. 2. 551 с.
11. Даніленко Е. І., Рибкін В. В. (2006). Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість. Київ: Транспорт України, 167 с.
12. Шраменко В. П., Скорик О. О., Штомпель А. М. (2011). Математична модель накопичення залишкових деформацій колії у плані при напруженні тоннажу. Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп., № 122. С. 261-265.
13. Albinović S., Hebib-Albinović M. (2012). Continuously welded rail (CWR) track buckling and safety concepts. Road and Rail Infrastructure II, 2nd International Conference on Road and Rail Infrastructures. May 2012. Pp. 649–655.
14. Enshaecian A., Rizzo P. (2021). Stability of continuous welded rails: A state-of-the-art review of structural modeling and nondestructive evaluation. Proc Inst Mech Eng F J Rail Rapid Transit, No. 235(10). Pp. 1291–1311.

References

1. Kravchenko, O. M., Petrenko, V. L. (2018). Temperaturni napruzheniya v bezstykoviy koliiyi ta yikh vplyv na ekspluatatsiyu nadiynist' [Temperature stresses in jointless track and their impact on operational reliability]. Bulletin of the Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, No. 4(76). Pp. 45–53. [in Ukrainian].
2. Ivanov, S. P., Kuzmenko, A. O., Bondarenko, I. V. (2019). Otsynuvannya stiykosti bezstykovoyi koliiyi za diyi pozdovzhnikh temperaturnykh syl [Assessment of the stability of non-jointed track under the action of longitudinal temperature forces]. Railway Transport of Ukraine, No. 2. Pp. 12–18. [in Ukrainian].
3. Schmidt, R., Fischer, S., Dietrich, M. (2020). Thermal forces and stability of continuous welded rail track. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, No. 234(6). Pp. 640–651.
4. Lee, J., Park, C. (2019). Lateral resistance of ballasted track under combined thermal and train loads. Engineering Structures, No. 199. Pp. 109612.
5. Zhang, Y., Liu, X., Sun, Q. (2021). Numerical analysis of track buckling considering temperature variation and train-induced loads. Construction and Building Materials, No. 273. P. 121728.
6. Petrov, D. V., Novak, O. P. (2022). Funktsional'na bezpeka zaliznychnoyi infrastruktury: pidkhody do otsynuvannya ta upravlinnya ryzykamy [Functional safety of railway infrastructure: approaches to risk assessment and management. Science and progress of transport]. No. 1 (95). Pp. 33–41. [in Ukrainian].
7. Müller, A., Esveld, C., Schach, R. (2023). Safety concepts for continuous welded rail under extreme temperature conditions. Railway Engineering Science, No. 31(2). Pp. 89–102.
8. Esveld, C. (2001). Modern Railway Track. 2nd ed. Delft : MRT-Productions, 654 p.
9. Danilenko, E. I. (2010). Zaliznychna koliiya. Ulashtuvannya, proektuvannya i rozrakhunky, vzayemodiya z rukhomym skladom [Railway track. Arrangement, design and calculations, interaction with rolling stock]: textbook for higher education institutions: in 2 volumes. Kyiv: Inpress, Vol. 2. 456 p. [in Ukrainian].
10. Danilenko, E. I. (2020). Proektuvannya i rozrakhunky konstruktsiy zaliznychnoyi koliiyi [Design and calculations of railway track structures]: a textbook for higher education: in 2 volumes. Kyiv: Hi-Tech Press, Vol. 2. 551 p. [in Ukrainian].

11. Danilenko, E. I., Rybkin, V. V. (2006). *Pravyla rozrakhunkiv zaliznychnoyi koliyi na mitsnist' i stiykist'* [Rules for calculating railway tracks for strength and stability]. Kyiv: Transport of Ukraine, 167 p. [in Ukrainian].

12. Shramenko, V. P., Skoryk, O. O., Shtompel, A. M. (2011). *Matematychna model' nakopychennya zalyshkovykh deformatsiy koliyi u plani pry napratsyuvanni tonnazhu* [Mathematical model of accumulation of residual deformations of the track in the plan during tonnage development]. Collection of scientific works of the Ukrainian State Academy of Railway Transport, No. 122. Pp. 261-265. [in Ukrainian].

13. Albinović, S., Hebib-Albinović, M. (2012). Continuously welded rail (CWR) track buckling and safety concepts. Road and Rail Infrastructure II, 2nd International Conference on Road and Rail Infrastructures. May 2012. Pp. 649–655.

Enshaeian, A., Rizzo, P. (2021). Stability of continuous welded rails: A state-of-the-art review of structural modeling and nondestructive evaluation. *Proc Inst Mech Eng F J Rail Rapid Transit*, No. 235(10). Pp. 1291–1311.

Потапов Дмитро Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-7279-4271.

Тел.: +38 (057)730-10-60. E-mail: ppx_xiit@kart.edu.ua.

Тертичний Віталій Вікторович, аспірант кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (057)730-10-60. ORCID iD 0009-0002-9025-6546. E-mail: ppx_xiit@kart.edu.ua.

Dmytro Potapov PhD (Tech). Associate Professor, department of railway track and transport facilities, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-7279-4271. Tel.: +38 (057)730-10-60.

E-mail: ppx_xiit@kart.edu.ua.

Vitalii Tertychnyi, postgraduate student of railway track and transport facilities department, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD 0009-0002-9025-6546. Tel.: +38 (057) 730-10-60. E-mail: ppx_xiit@kart.edu.ua.

Дата надходження статті 10.02.2026 р.

Дата прийняття статті до друку 12.03.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті 4.05.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY.