

## УДК 625.14

Д. М. КУРГАН – к.т.н., доцент, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, kurgan@brailsys.com

Н. М. ЛАПШЕВА – магістр, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, zunoveva@yandex.ua

# АДАПТАЦІЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МЕТОДУ ОЦІНКИ БЕЗПЕКИ УТРИМАННЯ БЕЗСТИКОВОЇ КОЛІЇ ЗА ПОКАЗНИКОМ СТИСКАЮЧОЇ СИЛИ ДЛЯ ІНЖЕНЕРНИХ РОЗРАХУНКІВ

*Статтю представив д. фіз.- мат. н., проф. В. І. Гаврилюк*

### Вступ

Безстикова колія – прогресивна конструкція, у техніко-економічному відношенні вигідна для залізничного транспорту. Однак вона вимагає не тільки підвищеної культури утримання, безперервного вдосконалювання, але й ретельного контролю. Тому саме контролю утримання та забезпеченню безпеки експлуатації на ділянках безстикової колії приділяється особлива увага.

Одним з напрямків підвищення безпеки експлуатації безстикової колії є визначення напружено-деформованого стану рейкових плітей, що дає змогу попереджати й запобігати відмовам безстикової колії. Як відомо, саме значні поздовжні зусилля є причиною, що обмежують температурний режим утримання безстикової колії і можуть привести до викиду.

### Аналіз публікацій

На сьогодні існує кілька методів оцінки напружено-деформованого стану рейкових плітей, як починаючи з візуального огляду, так і з застосуванням сучасних вимірювальних пристроїв [1].

За багаторічний термін розвитку та удосконалення теорії температурного напруженого стану безстикової колії було створено декілька принципово різних методів розрахунку величин поздовжніх критичних

сил у рейках. Назвемо найбільш поширені з них.

*Метод диференціальних рівнянь.* Полягає в розв'язанні диференціального рівняння викривлення рейко-шпальної решітки під дією поздовжніх температурних сил. Найбільш повну реалізацію метод набув у роботах А. Я. Когана [2], які були продовжені у дослідженнях А. В. Лебедева [3].

*Метод імітаційного моделювання.* На підставі рівняння обрисів осі пружної вигнутої балки М. Ф. Веріго була розроблена модель стійкості безстикової колії, у якій були застосовані елементи врахування динаміки розвитку процесу втрати стійкості від дії поздовжніх і вертикальних сил [4].

*Метод кінцевих елементів.* На сьогоднішній день метод кінцевих елементів широко застосовується в різних фізико-математичних задачах. В основному це моделювання напруженого стану конструкцій та пружних середовищ. У тому числі все частіше з'являються роботи щодо використання методу кінцевих елементів для розв'язання задач стійкості безстикової колії. Це, наприклад, модель безстикової колії Безрукова – Ісаєнко [5], Сулова – Покацького [6] та низька інших розробок.

*Енергетичний метод розрахунку.* За умову рівноваги прирівнювання до нуля суми елементарних робіт (узагальнених сил) або знаходиться екстремум потенцій-

ної енергії системи. Результатом є значення критичної стискаючої сили. Широке застосування метод набув у результаті робіт С. П. Першина [7]. В подальшому енергетичний метод було розвинено в роботах В. І. Новаковича [8].

Всі вказані методи визначення стійкості безстикової колії проти викиду базуються на складних фізико-математичних моделях, виконання розрахунків за якими потребує застосування громіздкого математичного апарату і унеможлиблює їх застосування у такому вигляді на рівні інженерних розрахунків. Тому, як правило, галузеві інструкції щодо питань утримання безстикової колії [9] містять результати досліджень у вигляді конкретних чисельних рекомендацій стосовно температурних режимів безстикової колії для певних варіантів конструкції і умов експлуатації, а не самі методики. Це може обмежувати інженера в прийнятті обґрунтованого рішення, особливо в умовах від'ємності вихідних параметрів від стандартних.

### Мета

Тому метою даною статті є представлення методики розрахунку критичної стискаючої сили, яка може привести до порушення безпеки утримання безстикової колії через її викид, на рівні інженерного розрахунку.

де  $E$  – модуль пружності рейкової сталі;  
 $I$  – момент інерції рейко-шпальної решітки відносно горизонтальної вісі;  
 $c$  – модуль деформації (аналог сили, що прикладена до одиниці довжини балки та визиває зміщення на одиницю);  
 $\Delta f$  – стріла від додаткового прогину, що виникає при появленні стискаючих сил;

### Методика

Подальші дослідження будуть базуватися на енергетичному методу визначення стійкості безстикової колії. При певній величині стискання потенційна енергія, яка накопичується в рейках стає настільки великою, що рейко-шпальна решітка в заданому положенні стає нестійкою. Наслідком цього може бути викид колії в сторону або доверху, який супроводжується звільненням «залишкової» потенційної енергії. За рахунок цієї енергії відбувається різкий вигин рейок, при якому долається вага рейко-шпальної решітки, опір баласту і інші фактори, завдяки чому енергія стискання зменшується. Її запас в рейках остаточно деформованої колії відповідає новому стану стійкої рівноваги між факторами протидії викривленню та стискаючій силі, яка має значно меншу величину. Таким чином, розрахунок стійкості зводиться до визначення умов рівноваги стиснутої подовжніми силами рейко-шпальної решітки і величини останніх.

Проф. С. П. Першином [7, 10] була запропонована методика, яка встановлює зв'язок між стискаючою силою і її проявом у вигляді прогину ділянки рейки певної довжини на певну стрілу вигину. В остаточному вигляді повна формула для визначення сили, яка приводить до вигину ділянки рейки довжиною  $l$  на стрілу вигину  $\Delta f$ , має вигляд

$$P = \frac{48,446 \frac{EI\Delta f}{l^2} + 0,078 l^2 \xi_1 c \Delta f^n + \frac{2m_0}{a} \xi_2 l \left( \frac{\Delta f}{l} \right)^k}{\Delta f + f_0 + 0,078 \frac{l^2}{R}}, \quad (1)$$

$l$  – довжина хорди викривлення, якою замінюють довжину викривленої частини пліті;  
 $\xi_1, \xi_2$  – емпіричні коефіцієнти, що залежать від значень  $n$  і  $k$ ;  
 $n$  – коефіцієнт, що виражає відношення повної довжини деформованої ділянки до довжини скривленої частини;

$k$  – коефіцієнт, що враховує форму пружної балки;  
 $a$  – відстань між осями шпал;  
 $m_0$  – реактивний момент, який визначається в залежності від затягування клеми;  
 $f_0$  – стріла початкового викривлення, що характеризує стан колії;  
 $R$  – радіус кривої.

Унеможливилося безпосереднє застосування формули (1) те, що залишається невідомим, при яких саме значеннях довжини і стріли прогину згин рейки буде незворотним, тобто приведе до втрати стійкості. Для знаходження саме критичної сили потрібні варіантні розрахунки для всіх можливих значень  $l$  і  $\Delta f$ . В більшості випадків довжина хорди викривлення може коливатися в межах 300...1600 см, стріла прогину – в межах 0,05...2,0 см. На початку процесу вигину, звичайно, для більшого викривлення потрібна більша стискаюча сила. Для постійної довжини ділянки згину, критична сила буде відповідати межі, за якою подальше викривлення буде потребувати меншу силу, чим попереднє. Менша з сил, які відповідають такій межі для можливих значень довжини викривлення, і буде критична сила, що може привести до втрати стійкості безстикової пліти. Наглядно процес визначення критичної сили показано на рис. 1 у вигляді залежностей стискаючої сили від стріли прогину рейки для різних довжин ділянки прогину для кривої з радіусом 600 м та початковою нерівністю 3 ‰.

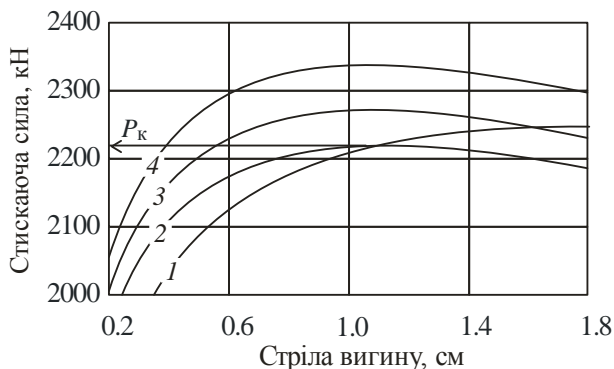


Рис. 1. Залежність стискаючої сили від стріли прогину рейки для різних довжин ділянки прогину:  
 1 – 800 см; 2 – 900 см; 3 – 1000 см; 4 – 1100 см

Для практичних розрахунків проф. С. П. Першиним була запропонована формула, отримана апроксимацією результатів багатоваріантних розрахунків

$$P_k = \frac{A k_1 k_2 k_3}{K_c i^\alpha}, \quad (2)$$

де  $A$  і  $\alpha$  – параметри, які залежать від типу рейки та плану лінії;

$k_1$  – коефіцієнт, що залежить від опору шпал зсуву поперек колії: при опорі 6,0 кН  $k_1=1,17$ ; при опорі 4,5 кН  $k_1=1,0$ ; при опорі 2,25 кН  $k_1=0,71$ ;

$k_2$  – коефіцієнт, що залежить від епюри шпал: при епюрі 1600 шт/км  $k_2=0,91$ , при 1840 шт/км  $k_2=1,0$ ; при 2000 шт/км  $k_2=1,07$ ;

$k_3$  – коефіцієнт, що залежить від зусилля затяжки клемних болтів. При  $i=2\text{‰}$  приймається рівним  $k_3=0,9$ ; 1,0; 1,07 відповідно при затягуванні клемних болтів скріплень моментом 100, 200, 300 Нм. За тих же значень моментів і при  $i=3\text{‰}$  відповідно  $k_3=0,95$ ; 1,0; 1,03;

$i$  – середній ухил початкової нерівності, який приймається  $i=2\text{‰}$  для прямих ділянок колії і  $i=2,5\text{‰}$ ...3 ‰ для кривих.

$K_c$  – коефіцієнт запасу на стійкість, у практичних розрахунках приймається 1,5.

При появі нових конструкцій колії або інших умов експлуатації виникає необхідність в корегуванні параметрів, що увійшли у формулу (2). Наприклад, такі багатоваріантні розрахунки за формулою (1) виконувалися при введенні в експлуатацію на залізницях України рейок типу UIC60 [11, 12].

Значення параметрів  $A$  і  $\alpha$  для практичних розрахунків за формулою (2) наведено у табл. 1.

Таким чином більшість параметрів, що впливають на значення критичної сили, увійшли у формулу (2) у вигляді коефіцієнтів, що створює певні межі застосування цієї формули і потребує інтерполяції для проміжних значень вихідних даних.

За результатами варіантних розрахунків, що були виконані в рамках науково-дослідної роботи [11], було проведено аналіз, які саме значення приймають довжина і стріла ділянки вигину у залежності від різного співвідношення вихідних даних.

Приклад вибірки результатів аналізу наведена у табл. 2, яка містить значення параметрів  $l$  і  $\Delta f$ , при яких спостерігається наявність критичної сили, для різних варіантів вихідних даних.

Таблиця 1

Параметри  $A$  і  $\alpha$  для визначення критичної сили

Тип рейок	Параметр	Радіус кривої, м				
		400	600	800	1000	$\infty$
P65	$A$	2 480	3 150	3 610	3 830	5 830
	$\alpha$	0,232	0,335	0,385	0,410	0,585
UIC60	$A$	2 451	3 091	3 525	3 763	5 637
	$\alpha$	0,252	0,344	0,392	0,422	0,589
P50	$A$	2 380	2 950	3 320	3 600	5 170
	$\alpha$	0,300	0,365	0,410	0,450	0,600

Таблиця 2

Довжина і стріла прогину ділянки згину при досягненні критичної сили в залежності від параметрів колії

Радіус кривої, м	Ухил початкової нерівності, ‰		
	2,0	2,5	3,0
	Прогин / довжина хорди, см		
400	$\frac{1,0}{1000}$	$\frac{1,25}{1000}$	$\frac{1,5}{1000}$
600	$\frac{0,75}{800}$	$\frac{1,0}{700}$	$\frac{1,0}{700}$
800	$\frac{0,75}{800}$	$\frac{0,75}{800}$	$\frac{1,0}{800}$
1000	$\frac{0,5}{800}$	$\frac{0,75}{800}$	$\frac{1,0}{800}$

Виконаний аналіз показав, для більшості варіантів співвідношення вихідних даних можна прийняти, що дія критичної сили спостерігається при довжині ділянки вигину у 800 см на викривлення колії на 1 см. Приймавши ці параметри у якості констант, повну формулу (1) можна спростити до можливості застосування у інженерних розрахунках

$$P_{\kappa} = \frac{1}{K_c} \frac{373800 + 159I + \frac{286,5m_0}{a}}{100 + 40i + \frac{49920}{R}}. \quad (3)$$

Таким чином за формулою (3) можна отримати значення критичної сили для рейок різного типу ( $I$  – момент інерції рейки), різних типів скріплень ( $m_0$  – реактивний момент від затягування клеми), епюри шпал ( $a$  – відстань між осями шпал), радіу-

су ( $R$ ) та середнього уклону початкової нерівності ( $i$ ).

Для оцінки можливості використання запропонованої скороченої формули (3) були виконані відповідні варіантні розрахунки критичної сили. Результати розрахунків та порівняння з повною методикою (1) та з апроксимацією (2) показано на рис. 2.

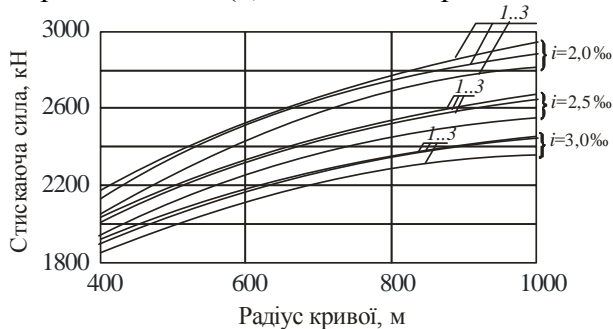


Рис. 2. Порівняння результатів розрахунку критичної сили за різними виразами:  
1 – за формулою (1); 2 – за формулою (2); 3 – за формулою (3)

Для можливості зіставлення розрахунки за формулами (2) і (3) виконувалися без урахування коефіцієнту запасу на стійкість. Для формули (3) значення реактивного моменту прийнято  $m_0 = 24000$  кг/см, яке для формули (2) відповідає параметру  $k_3 = 1,0$ ; відстань між осями шпал для формули (2) прийнято  $a = 54,3$  см, яке для формули (2) відповідає параметру  $k_2 = 1,0$  (епюра шпал 1840 шт/км). Аналіз зіставлення (див. рис. 2) показує що запропонований вираз (формула (3)) дає гарне співпадання з базовою формулою (1), причому наявна розбіжність спрямована у бік заниження критичної сили, що не спричиняє погіршення ситуації з точки зору безпеки утримання колії.

### Висновки

Визначення параметрів напруженого стану безстыккової колії для запобігання можливості викиду є складною науковою задачею, про що свідчить наявність декількох методів, які базуються на принципово різних фізико-математичних моделях.

Запропонована методика визначення критичної стискаючої сили, що може привести до викиду колії, у вигляді аналітичного виразу дає змогу виконувати розрахунки на інженерному рівні. Змінні вихідні дані, що залежать від параметрів ділянки, входять до методики в явному вигляді і не потребують застосування таблиць, графіків або інтерполяції. Отримані результати не суперечать розрахункам, виконаним за розгорнутою інтерпретацією енергетичного методу.

### Бібліографічний список

1. Рибкін, В. В. Порівняльний аналіз методів контролю за поздовжніми напруженнями в рейкових плітях безстыккової колії [Текст] / В. В. Рибкін, М. А. Арбузов // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2007. – № 17. – С. 107-109.
2. Коган, А. Я. Нелинейная устойчивость бесстыкового пути в прямых участках при наихудшей форме начальной ненапряженной неровности [Текст] / А. Я. Коган, В. А. Грищенко // Вестник ВНИИЖТ. – 1992. – №3. – С. 40-45.
3. Коган, А. Я. Устойчивость бесстыкового пути при различных конструкциях скреплений и условиях их эксплуатации [Текст] / А. Я. Коган, А. В. Лебедев // Вестник ВНИИЖТ. – 2007. – №2. – С. 3-9.
4. Вериго, М. Ф. Новые методы в установлении норм устройства и содержания бесстыкового пути [Текст] / М. Ф. Вериго // ВНИИЖТ. – М.: Интекст. – 2000. – 184 с.
5. Безруков, М. В. Совершенствование конструкции и технологии текущего содержания бесстыкового пути [Текст] / М. В. Безруков, Л. И. Задорожный, Э. П. Исаенко, А. Н. Русин. – Н. Новгород: изд. НГМА. – 1999. – 112 с.

6. Покацкий, В. А. Моделирование устойчивости бесстыкового пути. [Текст] / В. А. Покацкий, О. А. Суслов // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – Труды Третьей Международной научной конференции творческой молодежи 15-17 апреля 2003 г. – Хабаровск: ДВГУПС. – 2003 г. – С. 19-21.
7. Першин, С. П. Метод расчета устойчивости бесстыкового пути [Текст] / С. П. Першин // Тр. МИИТ. Вып. 147: Путь и путевое хозяйство. М. – 1962. – С. 28-97.
8. Новакович, В. И. Бесстыковой путь со сверхдлинными рельсовыми плетями [Текст] / В. И. Новакович // Ростов-на-Дону. – 2001. – 92 с.
9. Технічні вказівки по улаштуванню, укладанню, ремонту і утриманню безстыкової колії на залізницях України. ЦП-0266 [Текст]: Затв.: Наказ Укрзалізниці № 033-Ц від 01.02.2012 р. / Мін-во інфраструктури України. – К., 2012. – 147 с.
10. Альбрехт, В. Г. Бесстыковой путь и длинные рельсы [Текст] / В. Г. Альбрехт, В. Н. Лященко, С. П. Першин, В. Я. Шульга. – М.: Транспорт. – 1963. – 214 с.
11. Рибкін, В. В. Дослідження та розрахунки технічних параметрів щодо укладання безстыкової колії з рейками типу UIC60 та перспективними конструкціями проміжних скріплень [Текст] / В. В. Рибкін, Д. М. Курган, О. М. Патласов, І. О. Бондаренко // Звіт про науково-дослідну роботу. УДК 625.143.002.7:625.142.4 № держреєстрації 0108U003893. – 2008. – 63 с.
12. Курган, Д. М. Дослідження щодо умов укладання безстыкової колії з рейками типу UIC60 [Текст] / Д. М. Курган, О. М. Патласов, І. О. Бондаренко // 69 Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». Дніпропетровськ. – 2009. – С. 160-161.

**Ключові слова:** безстыкова колія, стійкість колії, викид колії, енергетичний метод, температурна сила, вигин рейки, початкова нерівність.

**Ключевые слова:** бесстыковой путь, устойчивость пути, выброс пути, энергетический метод, температурная сила, прогиб рельса, начальная неровность.

**Keywords:** continuous welded rail, track stability, distortion of the track, energy method, temperature power, bending of rail, the initial roughness.

Надійшла до редколегії 29.10.2013