

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ БЕЗСТИКОВОЇ КОЛІЇ У КРИВИХ РАДІУСОМ МЕНШЕ 350 м

Виконано теоретичні дослідження по розробці моделі роботи безстикової колії у горизонтальній площині під дією поздовжніх температурних напружень та проведено моделювання процесу викиду безстикової колії у поперечному напрямку. Проведено експериментальні дослідження по визначенню параметрів опору залізобетонної шпали поперечному зсуву. На основі розробленої моделі сформульовано практичний висновок про ефективність підвищення стійкості безстикової колії у кривих із радіусом менше 350 м шляхом застосування шпального анкера.

Ключові слова: температурний викид безстикової колії, стійкість безстикової колії, шпальний анкер

Выполнены теоретические исследования по разработке модели работы бесстыкового пути в горизонтальной плоскости под действием продольных температурных напряжений и проведено моделирование процесса выброса бесстыкового пути в поперечном направлении. Проведены экспериментальные исследования по определению параметров сопротивления железобетонной шпалы поперечному сдвигу. На основе разработанной модели сделано практический вывод об эффективности повышения устойчивости бесстыкового пути в кривых с радиусом меньше 350 м путем применения шпального анкера.

Ключевые слова: температурный выброс бесстыкового пути, стойкость бесстыкового пути, шпальный анкер

The method of continuous welded rail (CWR) track calculation is developed in the paper. The method allows carrying out calculations of buckling CWR in curves with radius less than 350 m.

Keywords: temperature deflection of jointless track, resistance of jointless track, sleeper anchor

На даний час гостро стоїть проблема впровадження безстикової колії на залізобетонних шпалах у кривих радіусом менше 350 м. Така проблема вимагає розробки якісно нових підходів та методик оцінки стійкості такої колії, а також оцінки ефективності пристроїв для підвищення стійкості колії проти викиду та встановлення необхідних умов її експлуатації. В основі існуючих методик розрахунку колії на стійкість лежить визначення критичної поздовжньої сили у рейках безстикової колії, грунтуючись на якій, в подальшому формулюються висновки про необхідні умови експлуатації та утримання колії. Існує декілька теоретичних підходів до визначення критичної поздовжньої сили, серед яких основними є енергетичні методи та методи моделювання колії як системи із пружних та пластичних елементів із різним ступенем деталізації.

Для практичного визначення критичної поздовжньої сили у вітчизняній колійній науці використовуються загальноприйняті напівемпіричні методики авторів Є. М. Бромберга, проф. С. П. Першина [1], в основі яких лежать теоретичні енергетичні принципи та масові натурні випробування. Однак, такі методики мають обмежене використання для випадку малих радіу-

сів та різної зсувної здатності шпал. Так, методика Є. М. Бромберга враховує різне значення радіусів без врахування поперечної стійкості, а методика проф. С. П. Першина не дає можливості врахувати криві з радіусами менше 400 м. Окрім того, спільним недоліком усіх методів, в основі яких лежать енергетичні принципи, є те, що вони враховують лише два стани – стан нормальної роботи і стан викиду, який настає при перевищенні критичної сили. В дійсності ж у кривих малих радіусів втрата стійкості відбувається не так раптово, як у прямих. При збільшенні температурних сил відбуваються рівномірні поперечні деформації по всій кривій, що призводить до видовження пліти та швидко послаблення поздовжньої сили. Таке явище у зарубіжній літературі називається «ефектом дихання» кривої [2, 3]. Для розв'язання таких задач стійкості колії зарубіжними вченими використовуються моделі нелінійної роботи колії у поздовжньому та поперечному напрямках, в основі яких лежить метод кінцевих елементів. Такі методики покладені в основу багатьох програмних продуктів [4], що дозволяють виконати практичні інженерні розрахунки стійкості безстикової колії, серед яких поширеним є

CWERRI, розроблений Європейським Залізничним Дослідним Інститутом (ERRI).

Кафедрою Колії та колійного господарства ДШТУ розроблено математичну та комп'ютерну модель нелінійної роботи безстикової колії у горизонтальній площині. Розроблена модель представлена балкою Ейлера на окремих опорах з білінійною пружністю, яка відображає пружну та пластичну роботу окремої шпали на зсув, починаючи з деякого значення зсувної сили. У моделі ітераційним шляхом враховано пониження поздовжніх сил у пліті при її деформації, однак не враховується нерівномірний поздовжній зсув пліті. Дана модель дозволяє, крім врахування впливу окремих шпал, відтворити перехідний процес від стійкого стану до викиду, що важливо для кривих малих радіусів. Така модель була використана для обґрунтування ефективності збільшення стійкості без-

стикової колії проти викиду за допомогою анкерування.

1. Кінцвоелементна модель деформацій колії у горизонтальній площині

Для розв'язку задачі знаходження поперечних деформацій балки під дією поперечних сил, що викликані поздовжніми температурними силами, використовується одновимірний метод кінцевих елементів. В його основі лежить розчленування усієї балки на окремі однотипні елементи, що мають однакову кількість фізичних параметрів та параметрів взаємодії один з одним. У даному випадку модель колії представляється у вигляді нерозрізної балки на окремих опорах, яка умовно розбивається на ряд елементарних балок, що з'єднані між собою жорсткими вузлами над опорами (рис. 1).

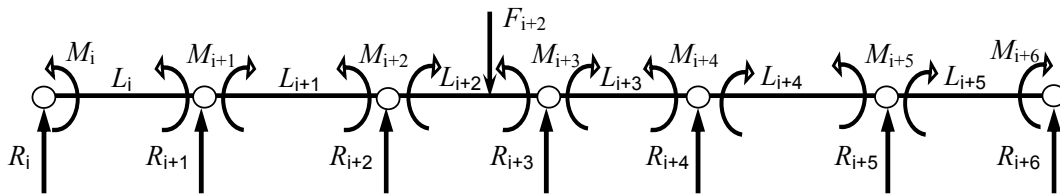


Рис. 1. Розрахункова схема балки на окремих опорах

Елементарна балка цієї моделі працює під дією зовнішньої сили F_i , реакцій опор R_i та згинальних та поперечних зусиль M_i , Q_i , що компенсують дію прилягаючих ділянок.

Зв'язок між окремими параметрами взаємодії одного кінцевого елемента знаходиться з умов рівноваги окремого елемента:

$$R_i = \frac{F_i(L_i - xf_i)}{L_i} + \frac{M_{i+1} - M_i}{L_i} - Q_i; \quad (1)$$

$$R_{i+1} = \frac{F_i xf_i}{L_i} + \frac{M_i - M_{i+1}}{L_i} - Q_{i+1}, \quad (2)$$

де i – номер міжшпального прогону рейки;

R_i , R_{i+1} – реакції опор для i -го прогону, які нелінійно залежать від величини зсувного переміщення опори y_i ;

Q_i , Q_{i+1} – поперечні сили біля опор i -го прогону;

M_i , M_{i+1} – моменти сил в опорах i -го прогону;

F_i , xf_i – зовнішня сила дії на рейку та її координата в i -му прогоні;

L_i – довжина балки i -го прогону.

Зв'язок між прогинами та кутами прогину балки кінцевого елемента визначається через рівняння пружної лінії балки для i -го прогону.

Для розв'язання задачі поперечних переміщень балки із N окремих елементів під дією зовнішніх сил, повинна забезпечуватися умова рівності прогинів та кутів повороту по краях кожного з елементів. Цій умові відповідає система нелінійних рівнянь:

$$\begin{cases} z_i(L_i) = z_{i+1}(0), & i = 1..N; \\ kz_i(L_i) = kz_{i+1}(0), & i = 1..N. \end{cases} \quad (3)$$

Розв'язок системи (3) полягає у знаходженні згинальних та поперечних зусиль M_i , Q_i з урахуванням нелінійного зсуву опор. Для розв'язку системи (3) недостатньо приведених рівнянь, потрібні також додаткові, якими є граничні умови. Ними можуть бути або параметри переміщень по краях балки, або силові параметри. Вибираються такі граничні умови, які відповідають вільним краям ділянки, на яких відсутні зусилля:

$$\begin{cases} M(1) = 0, & Q(1) = 0, \\ M(N+1) = 0, & Q(N+1) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

2. Модель пружно-пластичної роботи шпали на зсув

При збільшенні зсувного навантаження на окрему шпалу, починаючи з певного його значення, починаються значні незворотні переміщення. Тому в якості моделі роботи шпали на зсув під дією зсувного навантаження від рейок вибрано білінійний закон, що показує пружну та пластичну стадію роботи шпали при її зсуві (рис. 2).

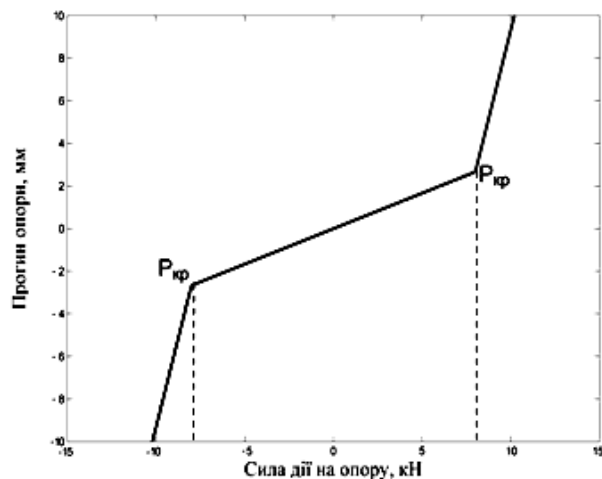


Рис. 2. Графік пружного та пластичного зсуву шпали

Даному закону відповідають наступні параметри білінійної моделі реакції окремої опори $R_i = f(z_i, P_{кр}, U_{п}, U_{пл})$:

1) сила, при якій починається перехід від пружного стану в пластичний, або сила, при якій відбуваються незворотні зсувні деформації $P_{кр}$;

2) горизонтальна жорсткість у зоні пружної деформації $U_{п}$;

3) горизонтальна жорсткість у зоні пластичної деформації $U_{пл}$.

Для отримання конкретних значень параметрів моделі були виконані експериментальні дослідження зсувної роботи залізобетонної шпали. Також було виконано дослідження зсувної роботи залізобетонної шпали при використанні пристрою для збільшення її стійкості (анкер АНК-3), який був розроблений кафедрою «Колія та колійне господарство» ДПТУ. Вимірювання виконувалися на спеціально розробленому стенді Колієвипробувальній лабораторії ДПТУ з використанням гідравлічного зсуваючого пристрою. Результати вимірювань, а також їх апроксимація для шпали з анкером показані на рис. 3.

3. Моделювання взаємної поперечно-поздовжньої роботи балки під дією температурних сил

Задача моделювання взаємної поперечно-поздовжньої роботи балки під дією температурних сил зводиться до взаємопов'язаного розв'язку двох задач:

1. задачі знаходження нелінійного прогину балки під дією поперечної розподіленої вздовж її осі сили, яка пропорційна кривизні осі балки та поздовжній силі у балці;

2. задачі знаходження величини поздовжньої сили у балці, що залежить не тільки від температури, а й від видовження всієї балки внаслідок поперечної деформації.

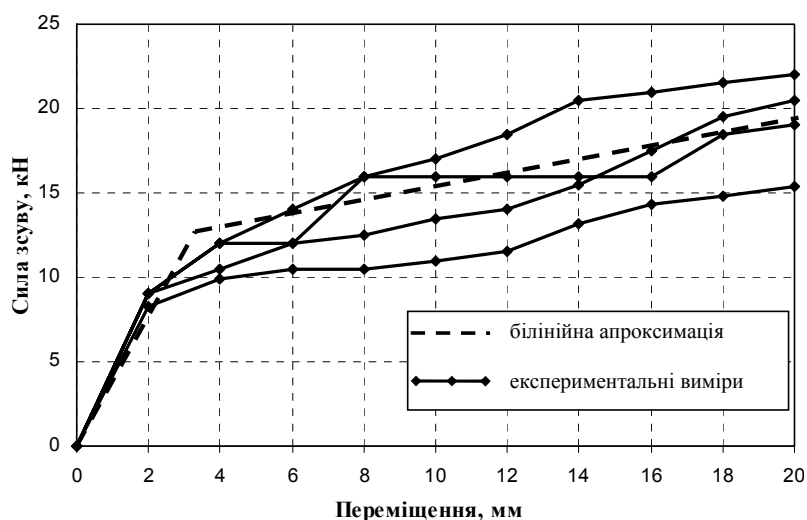


Рис. 3. Графік «сила-переміщення» шпали з анкером

У задачі знаходження прогину поперечна розподілена вздовж осі балки сила визначається по залежності:

$$F(x) = \frac{\partial^2 z(x)}{\partial x^2} N(T, dL), \quad (5)$$

де $\frac{\partial^2 z(x)}{\partial x^2}$ – кривизна осі балки з врахуванням

прогину та початкової геометричної нерівності;

$N(T, dL)$ – поздовжня сила у балці, що залежить від температури T та видовження всієї балки dL внаслідок поперечної деформації.

Традиційно нелінійні задачі пружності вирішуються застосуванням ітераційних методів до лінійних моделей. У даному випадку використовується спосіб, що базується на застосуванні оптимізаційних методів рішення систем нелінійних рівнянь (3, 4). Такий підхід дозволяє уникнути знаходження проміжного лінійного значення пружності опор, що необхідне у методі початкових деформацій [5] та явним чином задавати рівняння зв'язку сили реакції опори від прогину. Сучасні методи вирішення задач багатовимірної оптимізації [6] дають можливість з відносно невеликими затратами часу розв'язати практичні задачі моделювання поперечного викиду колії на ділянках із довжиною, що відповідає існуючій довжині.

У задачі знаходження поздовжньої сили у балці $N(T, dL)$ використовуються загальновідомі залежності:

$$N(T, dL) = EA\alpha\Delta T - EAdL(z)/L, \quad (6)$$

де E – модуль пружності рейкової сталі;

A – площа поперечного перерізу;

α – коефіцієнт температурного розширення;

$dL(z)$ – загальне видовження балки внаслідок поперечного прогину;

L – повна довжина балки.

Для спрощення розв'язку задачі прийнято припущення про те, що у будь-якій точці вздовж осі балки поздовжня сила залишається однаковою, тобто нехтується поздовжніми силами тертя рейки відносно шпал та вузлів скріплення. Залежності (3–6) показують, що розв'язати задачу знаходження прогинів неможливо без відомої поздовжньої сили, і навпаки. Тому сумісне рішення зводиться до багатократного розв'язку нелінійної задачі прогину балки, на кожному кроці якого коригується поздовжня сила в залежності від видовження балки. Критерієм точності розв'язку або наближення

служить величина відносного значення корекції поздовжньої сили та приймається рівною 0,1 %.

4. Результати моделювання викиду безстиквої колії у крутих кривих

На основі створеної математичної моделі було розроблено програмне забезпечення, що дозволяє моделювати процес викиду безстиквої колії у поперечному напрямку, враховуючи план колії, початкову геометричну нерівність, вплив окремих шпал, їх епюру і характеристики їх зсуву та інші. Результатом моделювання є величина поперечного зміщення рейко-шпальної решітки, зусилля та напруження у рейках при заданому значенні поздовжньої сили. Практичним результатом є знаходження поздовжньої критичної сили, при якій починається інтенсивне збільшення деформацій.

Моделювання викиду безстиквої колії виконується для ділянки, яка має 100 шпал та з початковою горизонтальною нерівністю синусоїдальної форми довжиною 8 м і величиною 0,005 м, що знаходиться посередині кривої із радіусом 200 м із застосуванням анкера АНК-3. При цьому враховано прилягаючі до кривої прямі ділянки довжиною 4 м, а поздовжня сила становить 3000 кН. Краї ділянки вважаються нерухомими. На рис. 4 показано результати моделювання.

Із рисунків видно, що посередині ділянки, де знаходиться геометрична нерівність, виникають великі зсувні деформації і вони швидко наростають, а на краях вони становлять приблизно 2,5 мм і залишаються приблизно незмінними.

Для визначення критичної поздовжньої сили у безстиквій колії по розробленій моделі виконуються розрахунки при різних значеннях поздовжньої сили для радіусів 200, 300 та 400 м із застосуванням анкера АНК-3 та без нього. Оцінка викиду колії виконується по максимальному значенню переміщення посередині ділянки, графіки якого в залежності від поздовжньої сили показано на рис. 5.

Усі графіки показують області стійкої роботи колії та втрати стійкості, що характеризується швидким накопиченням деформацій зсуву. Графіки для колії з анкером показують збільшення критичної поздовжньої сили порівняно із звичайною колією на залізобетонних шпалах та доводять ефективність використання такого способу підвищення стійкості при впровадженні безстиквої колії у кривих малого радіуса. Впровадження анкера дозволяє понизити нижню межу використання безстиквої колії до радіусу 200 м.

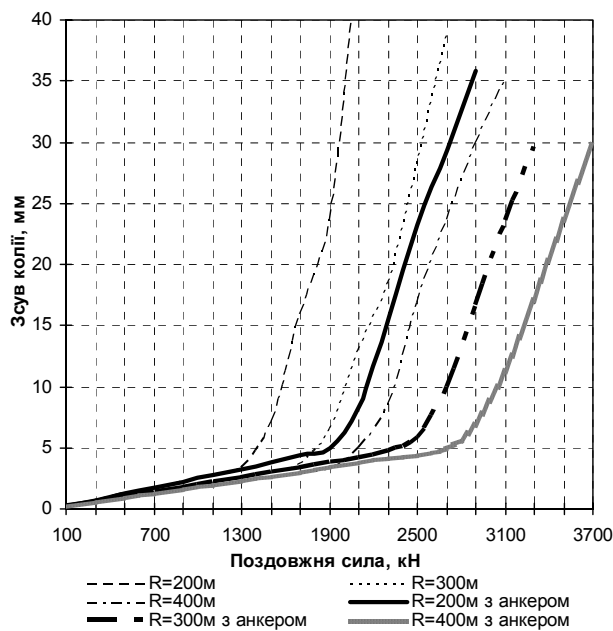


Рис. 5. Графіки залежності поперечного зсуву від поздовжньої сили

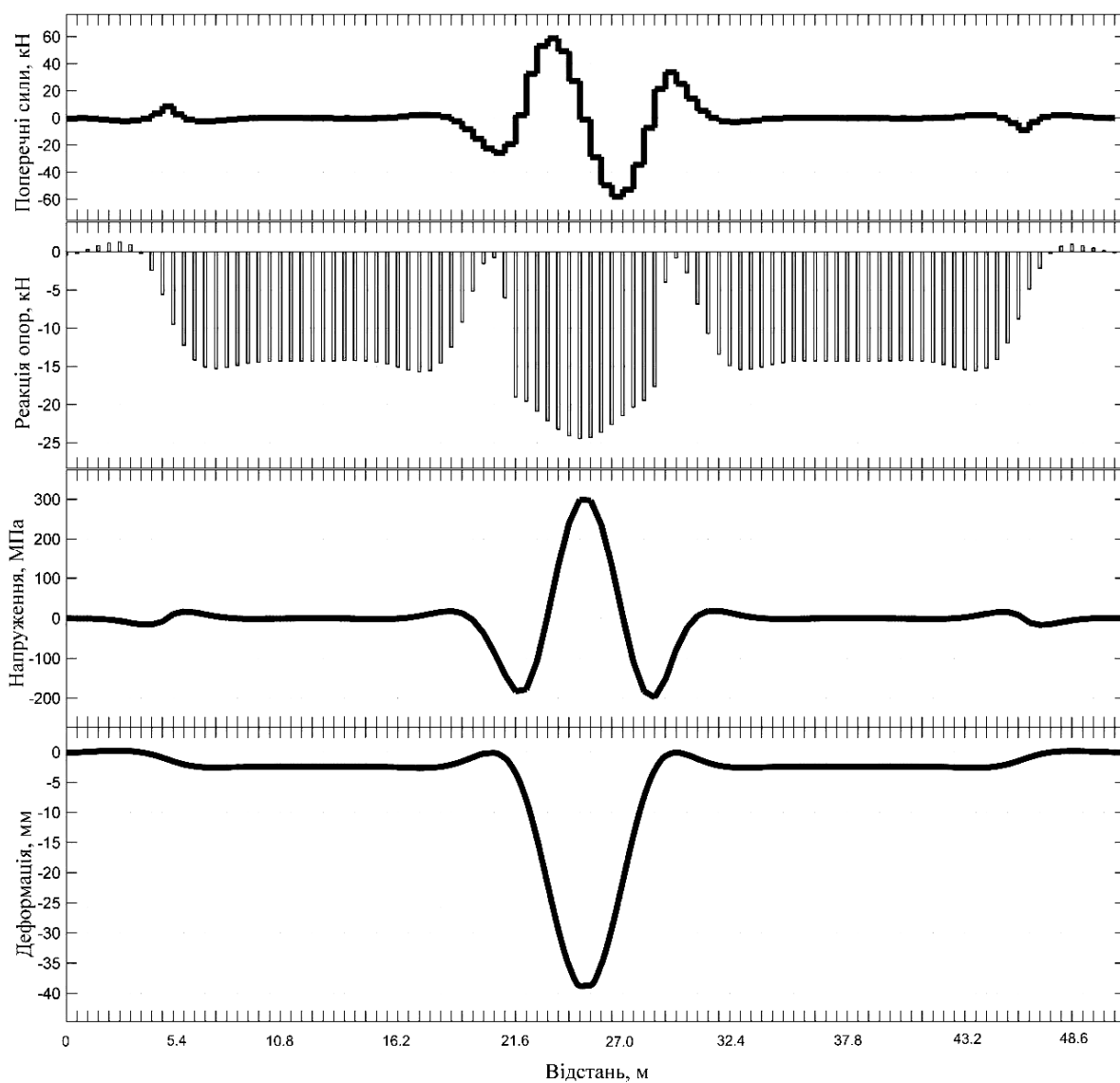


Рис. 4. Результати моделювання викиду безстикової колії

5. Порівняння результатів розрахунку поздовжньої критичної сили за розробленою моделлю та традиційними методиками

Результати розрахунку критичної сили при радіусах 200 м, 300 м та 400 м порівнюються з розрахунками за традиційними методиками Є. М. Бромберга та проф. С. П. Першина. Результати розрахунків критичної поздовжньої сили показано у вигляді табл. 1 для шпал з анкером та без нього. Порожні клітинки у табл. 1 для анкера виникають, оскільки існуючі практичні методики не враховують сили зсуву шпали, а методика проф. С. П. Першина не застосовна при радіусах менше 400 м. Згідно розрахунків критична сила за моделлю та стандартними методами при радіусі 400 м досить добре узгоджується.

Таблиця 1

Критична сила для різних методів та радіусів

Метод/ Радіус, м	Модель		Метод проф. Першина	Метод Бромберга
	Без анкера	З анке- ром		
400	2000	2700	1997	1995
300	1600	2500	-	1541
200	1200	1900	-	630

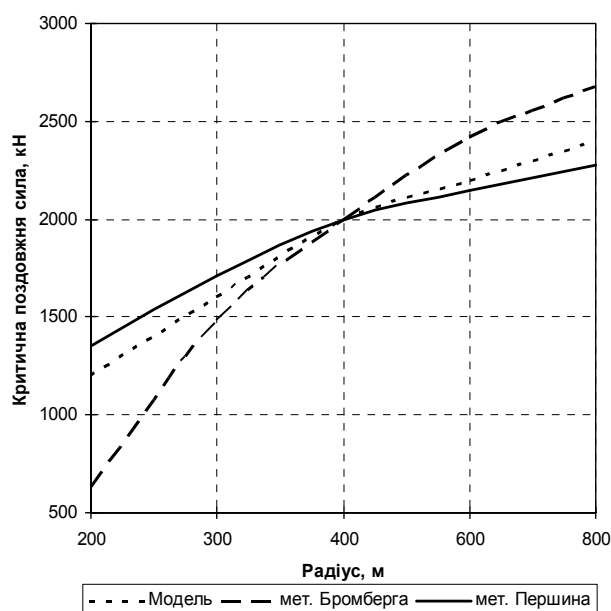


Рис. 6. Графіки залежності критичної сили від радіусу при різних методах розрахунку

Порівняння результатів розрахунку критичної поздовжньої сили для залізобетонної шпали без анкера при різних значеннях радіусу показано на рис. 6. При цьому значення критичної сили за методом проф. С. П. Першина при радіусах менше 400 м екстраполюються.

Порівняння графіків залежності критичної сили від радіусу показує, що результат розрахунку за розробленою моделлю досить добре узгоджується із методикою розрахунку поздовжньої критичної сили за методом проф. С. П. Першина в діапазоні радіусів 200...800 м. Порівняння із результатами методу Є. М. Бромберга показують, що при радіусі 500 м і більше результати розрахунку критичної сили значно завищені, а при радіусі 300 м і менше є значно заниженими відносно розрахунків за моделлю та за методом проф. С. П. Першина.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Шахуняц, Г. М. Железнодорожный путь [Текст] / Г. М. Шахуняц. – М.: Транспорт, 1987. – 535 с. – С. 253-254.
2. Lichtberger, B. Handbuch Gleis: Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit [Text] / B. Lichtberger. – Hamburg: Tetzlaff Verlag, 2003. – 562 s. – S. 68.
3. Lothar Fendrich Handbuch Eisenbahninfrastruktur [Text]. – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. – 990 s. – S. 297-299, 304-306.
4. Esveld, C. Modern railway track [Text]. – 2nd ed. – MRT-Production, 2001. – 653 p. – P. 176-181.
5. Zienkiewicz, O. C. The finite elements method in engineering science [Text] / O. C. Zienkiewicz. – McGraw-Hill, London, 1971. – P. 396-399.
6. Мэтьюз, Дж. Г. Численные методы. Использование MATLAB [Текст]. – 3-е изд. / Дж. Г. Мэтьюз, К. Д. Финк : [пер. с англ.]. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2001. – 720 с. – С. 440-445.

Надійшла до редколегії 01.11.2010.

Прийнята до друку 03.11.2010.