

**Твердомед Володимир Миколайович^{1*}, Саяпіна Інна Олександрівна²,
Азарков Олександр Володимирович³, Бойко Володимир Дмитрович⁴**

¹Декан факультету інфраструктури і рухомого складу залізниць, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0695-1304>

²Доцент кафедри «Телекомунікаційні технології та автоматика», Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1541-1681>

³Доцент кафедри «Теоретична та прикладна механіка», Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8250-6280>

⁴Доцент кафедри «Залізнична колія та колійне господарство», Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. <https://orcid.org/0000-0002-9192-8394>

* Автор, відповідальний за листування: tverdomed@gsuite.duit.edu.ua

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ УЛАШТУВАННЯ БЕЗСТИКОВОЇ КОЛІЇ В КРИВИХ ДІЛЯНКАХ РАДІУСА МЕНШЕ 350 МЕТРІВ

Традиційна конструкція верхньої будови колії на магістральних залізницях України в кривих ділянках радіуса менше 350 м – це ланкова конструкція колії з дерев'яними шпалами. Така конструкція колії не раціональна при діючих експлуатаційних умовах. Застосування більш прогресивної безстикової конструкції колії в кривих радіуса менше 350 м обмежене в першу чергу з умови забезпечення поперечної стійкості рейко-шпальної решітки. Для можливості розширення застосування безстикової конструкції колії в кривих ділянках радіуса менше 350 м, необхідно знати величини поперечних сил взаємодії конструкцій верхньої будови колії з рухомих екіпажем. Знаючи сили взаємодії, можна оцінити на яку величину буде забезпечуватися поперечна стійкість рейко-шпальної решітки та прийняти конструктивні рішення по її збільшенню.

У роботі наведена методика визначення поперечних горизонтальних сил взаємодії колії і рухомого екіпажу в кривих радіуса менше 350 м з урахуванням квазістатичних стискаючих сил в поїзді. Причини виникнення цих сил пов'язані з наявністю ексцентриситету закріплення хвостовика автозчеплення в горизонтальній та вертикальній площині. За наведеною методикою проведені теоретичні розрахунки горизонтальних поперечних сил взаємодії та визначені коефіцієнти стійкості рейко-шпальної решітки в кривих ділянках.

Зроблені основні висновки щодо можливості експлуатації безстикової конструкції колії в кривих ділянках радіуса 350 м і менше.

Ключові слова: залізнична колія, безстикова конструкція колії, криві малого радіуса, поперечна стійкість, горизонтальні поперечні сили.

Вступ. Основна конструкція залізничної колії на залізницях України – безстикова колія температурно-напруженого типу без сезонної розрядки температурних напружень. На рис. 1 наведено застосування безстикової та ланкової конструкцій колії на залізницях України.

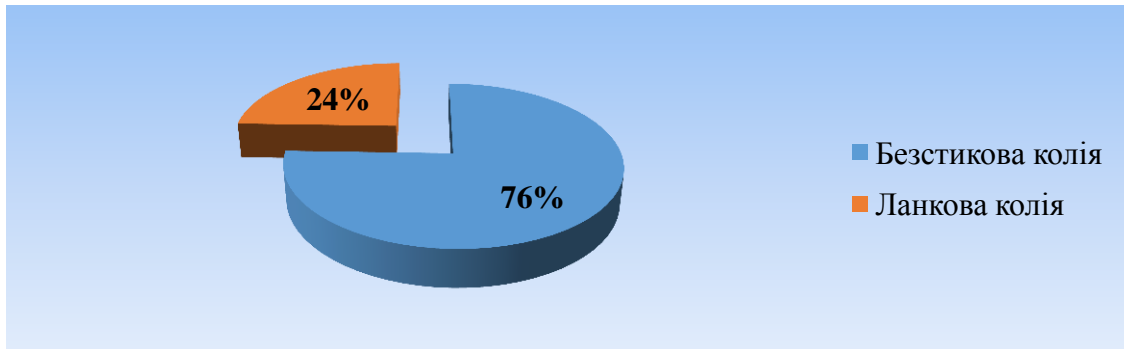


Рис. 1. Конструкція залізничної колії

Як видно з рис.1, ланкова конструкція залізничної колії на даний час експлуатується на четвертій частині розгорнутої довжини головних колій і складає 6479,3 км. Це переважно місця залізничної колії, де безстикова конструкція не може застосовуватися з конструктивних обмежень. До одних з таких місць відносяться ділянки колії, де радіус кривої становить менше 350 м. На рис. 2 наведено протяжність кривих ділянок на головних коліях.

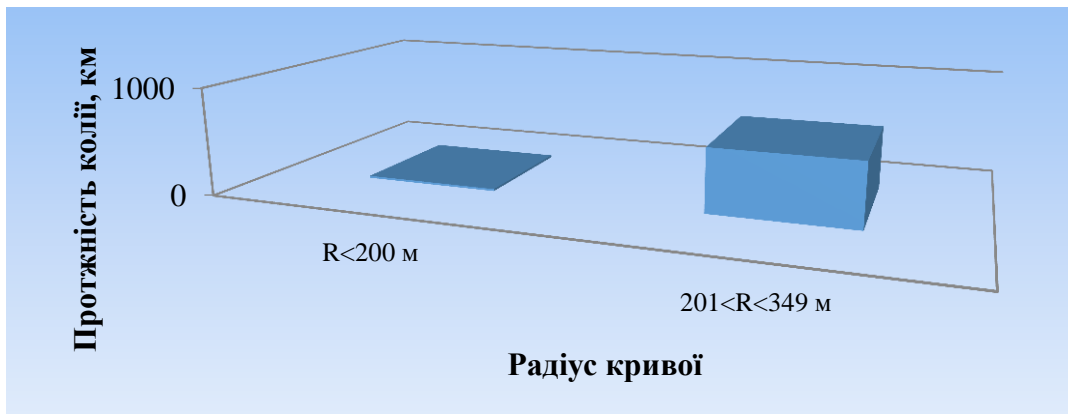


Рис. 2. Протяжність кривих ділянок на головних коліях залізниць України

Як видно, криві ділянки колії радіуса 200-349 м мають протяжність 593 км, що становить близько 2 % від загальної довжини головних колій. Але саме в цих ділянках спостерігається підвищений знос рейок, гребнів колісних пар та інтенсивне накопичення залишкових деформацій колії. До 25 % рейок, які мають дефекти контактної-втомного походження на поверхні кочення, в тому числі боковий знос головок рейок, знаходяться саме в таких кривих. Дерев'яні шпали, що застосовуються на таких ділянках, мають значно менший строк служби. Більшість кривих радіусів менше 350 м знаходяться в гірських районах, де взаємодія колії і рухомого складу ускладнюється наявністю значних поздовжніх сил, викликаних ухилами залізничних ліній.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Для збільшення ресурсу роботи рейок та інших конструктивних елементів в таких ділянках колії, необхідно зменшити сили взаємодії залізничної колії та рухомого екіпажу. Враховуючи, що в кривих радіуса менше 350 м застосовується ланкова колія на дерев'яних шпалах, то перехід на безстикову конструкцію колії із залізобетонними шпалами дозволить суттєво зменшити сили взаємодії між рейковими нитками та гребнями колісних пар,

подовжити ресурс роботи конструктивних елементів верхньої будови колії, зменшити опір руху поїзда та витрати на ремонт рухомого складу і рейкової колії [1].

Дослідження можливості збільшення ресурсу роботи залізничної колії в кривих ділянках за рахунок параметрів рейкової колії досліджувались в роботах [2-5].

Улаштування безстикової колії в кривих радіуса менше 350 м неможливе без удосконалення конструкції верхньої будови колії, що застосовуються в кривих більших радіусів. Потреба в застосування іншої конструкції залізничної колії викликана збільшенням дії силових факторів, які впливають на поперечну, поздовжню стійкість та міцність залізничної колії.

Для проектування нових конструкцій елементів верхньої будови колії чи удосконалення існуючих необхідно знати величини сил, які будуть діяти на конструкцію колії в кривій ділянці та чи буде забезпечена поперечна стійкість рейко-шпальної решітки.

Мета та завдання дослідження. Метою даної роботи є проведення теоретичних досліджень поперечної стійкості безстикової колії в кривих ділянках радіуса від 200 м до 300 м. Для досягнення зазначеної мети поставлені такі завдання:

проведення досліджень експлуатації кривих ділянок колії з радіусом $R < 350$ м;

визначення сумарних горизонтальних сил з урахуванням квазістатичної поздовжньої сили, що діє при гальмуванні поїзда, та конструктивних особливостей зчпних приладів;

визначення умови забезпечення поперечної стійкості колії в кривих ділянках $R < 350$ м.

Матеріали та методи дослідження. Поперечна стійкість колії залежить від конструкції верхньої будови колії, її стану, величини співвідношення силової взаємодії у вертикальній та горизонтальній площині та опору рейко-шпальної решітки поперечному зсуву. Опір зсуву решітки залежить від характеристик та стану поверхонь підрейкових опор, ступеня ущільненості і роду баласту, конструкції підрейкових опор, характеру передачі навантаження на опори. Суттєвий вплив на формування сумарного опору поперечного зсуву рейко-шпальної решітки має бокова жорсткість повороту рейки у вузлі рейкового скріплення.

При визначенні опору рейко-шпальної решітки під впливом на колію поїзного колісного навантаження слід враховувати як початковий опір шпал поперечним зміщенням W_0 , так і сили тертя шпал по баласту під впливом вертикального осьового навантаження $2P$. Граничний опір переміщенню групи шпал в баласті $W_{ш}$, що знаходяться під впливом горизонтальної рамної сили Y_p і вертикального осьового навантаження, можна визначити за формулою [6]:

$$W_{ш} = W_0 + f_{ш} 2P_{ос}, \quad (1)$$

де $2P_{ос}$ – значення осьового вертикального навантаження, яке слід брати рівним статичному навантаженню (збільшення опору за рахунок сил тертя від динамічних добавок від вертикальних сил можна не враховувати для запасу стійкості рейко-шпальної решітки);

$f_{ш}$ – коефіцієнт тертя шпал по баласту, що залежить від стану поверхонь, які труться, матеріалу баласту, його щільності, вологості, засміченості. Приймається для колії зі щебневим баластом $f_{ш}=0,3-0,5$, для колії з піщано-гравійним баластом $f_{ш}=0,3-0,45$;

W_0 – початковий опір групи шпал, що переміщуються, без врахування вертикального навантаження. Розрахунки і експериментальні дослідження показують, що в звичайних умовах при дії бокових сил від колісного навантаження в роботі активно беруть участь тільки 6-7 суміжних шпал, які знаходяться під цим навантаженням. На основі рекомендацій Бюро експериментальних досліджень Міжнародного союзу залізниць (МСЗ) можна приймати $W_0=10$ кН для колії з дерев'яними шпалами і $W_0=15$ кН для колії з залізобетонними шпалами.

Згідно з [6], умова забезпечення стійкості рейко-шпальної решітки буде виконуватись в тому випадку, коли максимальна горизонтальна рамна сила, Y_p^{\max} , що передається від колісної пари на рейки, не буде перевищувати граничного опору рейко-шпальної решітки поперечному зсуву $W_{ш}$, тобто повинна виконуватись нерівність:

$$Y_p^{\max} < W_{ш} \cdot [\varepsilon], \quad (2)$$

де $[\varepsilon]$ – коефіцієнт, що передбачає можливе зниження поперечного опору зсуву рейко-шпальної решітки безпосередньо після ремонту колії. Звичайно приймають $[\varepsilon]=0,85$ з урахуванням того, що після ремонту опір зрушенню зменшується до величини, що складає 70-80% від початкового і він відновлюється тільки після пропуску 1,0-1,5 млн. т вантажу бруто.

Силова взаємодія екіпажу і колії в горизонтальній площині при русі в кривих ділянках колії залежить від схеми вписування екіпажу в криву. При динамічному вписуванні слід розрізняти три принципово різні схеми вписування екіпажів в кривій: вільне, перекисне і хордове, що дають різноманітні схеми силової взаємодії. Величини горизонтальних поперечних сил, що діють на колію, можна визначити з розгляду кожної конкретної схеми вписування, при цьому значення їх в усіх випадках залежить від положення центру повороту екіпажу і відстані від нього до осі, що розглядається, а також від величини вертикального осьового навантаження та коефіцієнта тертя коліс по рейці. Всі перераховані фактори, які впливають на характеристику силової взаємодії колії та рухомого екіпажу, враховуються при визначенні бокових сил.

Для ілюстрації практичних розрахунків розглянемо приблизну схему перекосного вписування екіпажу в криву на рис. 3 і схему розподілення сил на колісній парі на рис. 4.

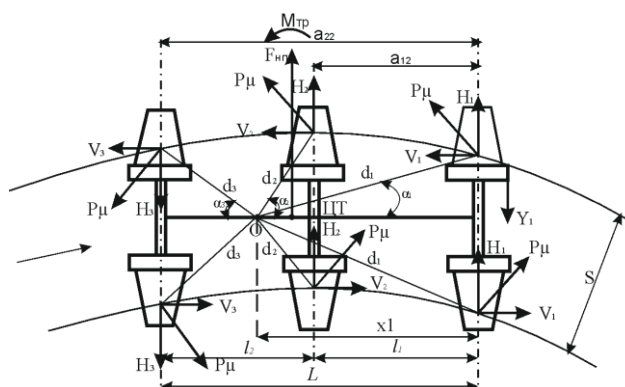


Рис. 3. Схема перекосного вписування 3-вісного візка в криву

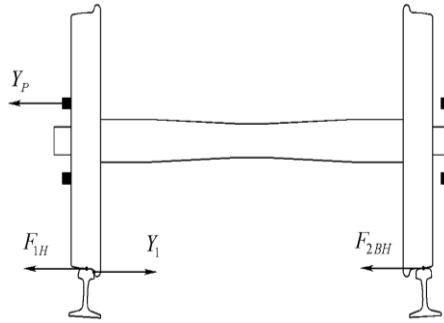


Рис. 4. Схема розподілення сил на колісній парі під час руху в кривій

У [8] наведені наближені формули для визначення поперечних сил, що передаються на зовнішню рейку через зовнішнє колесо передньої по ходу осі для різноманітних екіпажів. Для більш точного визначення значення силової бокової взаємодії колії та екіпажів при русі поїздів необхідно користуватися графік-паспортами.

Наведені формули [8] для визначення значень горизонтальних сил не враховують дію коливання надресорної та піддресорної частини екіпажу під час руху. Для визначення максимальних динамічних сил з урахуванням інерційної дії коливання частин рухомого екіпажу слід використовувати коефіцієнти бокової динаміки, які можна визначити за наведеними формулами [8].

Поряд з перерахованими поперечними горизонтальними силами взаємодії колії та рухомого екіпажу виникають додаткові поперечні сили, які не були враховані у формулах наведених у [10].

Додаткові поперечні сили виникають при русі поїзда за рахунок розтягувань та стискань поїзда на прямих та кривих ділянках. Причини виникнення цих сил пов'язані з наявністю ексцентриситету закріплення хвостовика автозчеплення в горизонтальній та вертикальній площині. Значення ексцентриситету обумовлене відхиленням від нормального (проектного) положення хвостовика автозчеплення при виготовленні екіпажу на заводі, завантаженням вагону, зносом коліс, стисканням поїзда.

При квазістатичному стисканні поїзда його ланки L та $2a$ під час руху намагаються перекоситися. Утримують їх в основному положенні поперечні зв'язки, роль яких відіграють візки з ресорами та колісними парами. Із збільшенням квазістатичного стискання поїзда, перекося збільшуються, викликаючи збільшення бокової та вертикальної групової дії коліс візка на колію. Ці додаткові поперечні сили прикладені до візка та утворюють в горизонтальному напрямі додаткові бокові взаємодії коліс візка на колію. При цьому колеса суміжних візків діють на різні рейкові нитки, намагаючись розтиснути колію чи зсунути її суміжними візками в різні сторони.

В кривих ділянках колії горизонтальна складова H_R групової бокової дії коліс на колію при розтягуванні поїзда квазістатичною силою F залежить від цієї сили, радіуса кривої, довжини екіпажу між осями зчеплення автозчеплень та згідно [11] визначається формулою:

$$H_R = F_{\text{поз}} \cdot \sin \frac{90^\circ(L + 2a)}{\pi \cdot R}, \quad (3)$$

- де $F_{\text{поз}}$ – квазістатична розтягуюча сила в поїзді;
- L – відстань між хвостами автозчеплень рухомої одиниці;
- a – довжина автозчеплення.

Сила H_R направлена в середину кривої при розтягуючих силах F . Із формули (3) слідує, що в прямих при $R = \infty$, $H_R = 0$. В кривих ділянках колії буде тим більша додаткова групова бокова взаємодія коліс візка на колію, обумовлена квазістатичною розтягуючою силою в поїзді, чим менший радіус кривої R та чим більша відстань між хвостовиками автозчеплення.

При квазістатичному стисканні рухомого поїзда силою F на прямих ділянках колії виникає групова бокова дія коліс візка на колію H_e , обумовлена ексцентриситетом e закріплення хвостовиків автозчеплень, та групової бокової взаємодії на колію H_δ , обумовлене горизонтальним поперечним переміщенням δ кузова в зоні візка із-за перекосів по схемі «ялинка». Зазначена сили за формулою:

$$H_{\delta e} = \frac{F_{смuc} \cdot L \cdot (\delta \cdot L + e \cdot l)}{a \cdot l^2} \quad (4)$$

Відмітимо, що сили H_e і H_δ направлені в сторону зовнішньої рейки кривої, що важливо при розрахунках стійкості колії в кривих.

У формулі 4 позначено:

l – довжина кузова між центрами повороту (шворнями) візків;

e – ексцентриситет кріплення автозчеплення;

δ – поперечне переміщення кузова в зоні візка із-за перекосу по схемі «ялинка»;

$F_{смuc}$ – квазістатична стискаюча сила в поїзді. Максимально можлива квазістатична стискаюча сила в автозчепленні, що з'єднує локомотив з поїздом, при русі по прямій площадці дорівнює силі зчеплення локомотивних коліс з рейками та визначається за формулою:

$$F_{сч.о} = n \cdot P_{ол} \cdot f_{сч}, \quad (5)$$

де n – кількість осей в локомотиві;

$P_{ол}$ – вертикальне навантаження від колісної пари локомотива на рейки;

$f_{сч}$ – коефіцієнт зчеплення коліс колісної пари з рейками при гальмуванні 0,22-0,25.

При русі поїзда по ухилу та в кривій, максимальна квазістатична сила стискання в автозчепленні, що з'єднує локомотив з поїздом, визначається за формулою:

$$F_{сч.о} = n \cdot P_{ол} \cdot f_{сч} \pm \Delta F_i + \Delta F_R, \quad (6)$$

де ΔF_i – додаткова гравітаційна складова поздовжньої квазістатичної сили в автозчепленні для екіпажів, що їдуть по ухилу i ;

ΔF_R – додаткова складова поздовжньої квазістатичної сили в автозчепленні екіпажу, що їде по кривій.

Поздовжня квазістатична сила в автозчепленні для екіпажів, що рухаються по ухилу i розраховується за формулою:

$$\Delta F_i = Q_n \cdot \varpi_i + Q_l \cdot \varpi_i, \quad (7)$$

де Q_l – маса локомотива;

Q_n – вага поїзда;

ϖ_i – питомий опір руху по кривій, що розраховується за формулою:

$$\varpi_i = i \cdot g, \quad (8)$$

де i – ухил колії;

g – прискорення сили тяжіння.

Поздовжня квазістатична сила в автозчепленні екіпажа, що рухається по кривій, розраховується за формулою:

$$\Delta F_R = Q_l \cdot \varpi_r + Q_n \cdot \varpi_r, \quad (9)$$

де ϖ_r – питомий опір руху від кривизни визначається за формулою:

якщо довжина поїзда дорівнює або менша за довжину кривої

$$\varpi_r = 3,5 \frac{\alpha^0}{S_{кр}} + 1,5 \cdot a \quad (10)$$

чи

$$\varpi_r = \frac{200}{R} + 1,5 \cdot a; \quad (11)$$

при довжині поїзда більшій за довжину кривої

$$\varpi_r = \left(\frac{200}{R} + 1,5 \cdot a \right) \cdot \frac{S_{кр}}{l_n} \quad (12)$$

чи

$$\varpi_r = \left(3,5 \cdot \frac{\alpha^0}{S_{кр}} + 1,5 \cdot a \right) \cdot \frac{S_{кр}}{l_n}; \quad (13)$$

де R – радіус кривої,

$S_{кр}$ – довжина кривої,

α^0 – кут повороту кривої в радіанах,

a – діюча величина непогашеного відцентрового прискорення в кривій.

Найгірші умови при розрахунках поперечної стійкості рейко-шпальної решітки будуть виникати при різкому гальмуванні поїзда в кривій ділянці колії, оскільки з'являється додаткова групова бокова дія коліс екіпажу на колію від стискаючої поздовжньої квазістатичної сили. Ця сила буде діяти за межами локомотива у поїзді і направлена в зовнішню сторону кривої. Значення додаткової бокової групової сили, розрахованої за формулою (4) вантажного та пасажирського поїзда, приводиться в табл. 1. Поперечна стійкості рейко-шпальної решітки проти бокового зсуву в горизонтальній площині за межами локомотиву в поїзді буде визначатися формулою:

$$Y_{\delta}^{\max} + H_{\delta e} < W_{\theta} \cdot [\varepsilon]. \quad (14)$$

Поперечну стійкість рейко-шпальної решітки можна оцінити коефіцієнтом стійкості за формулою:

$$K_{cm}^{p-w} = \frac{W_{\theta} \cdot [\varepsilon]}{Y_{\delta}^{\max} + H_{\delta e}}, \quad (15)$$

де $K_{ст}^{p-u}$ – коефіцієнт стійкості рейко-шпальної решітки повинен бути більше одиниці.

Таблиця 1. Додаткові бокові сили, що виникають за рахунок дії поздовжньої стискаючої квазістатичної сили

Поїзд \ Сила	R=200 м	R=250 м	R=300 м
	Нде, кН	Нде, кН	Нде, кН
Локомотив ВЛ80, вантажні вагони на візках ЦНП-Х3, вага поїзда 4500 т	29,73	27,56	26,82
Локомотив ВЛ80, вантажні вагони на візках ЦНП-Х3, маса поїзда 2500 т	27,14	25,5	24,12
Локомотив ЧС-8, вантажні вагони на візках КВ3-ЦНП, маса поїзда 1600 т	23,73	20,35	18,47

За наведеною методикою були проведені розрахунки поперечної стійкості в горизонтальній площині рейко-шпальної решітки проти поперечного зсуву в кривій ділянці колії радіусів: 200 м, 250 м, 300 м. В розрахунках приймалась підкладкова конструкція колії з типовими скріпленнями СКД65-Б. Результати розрахунку коефіцієнтів стійкості наводяться у табл. 2. При визначенні рамних сил приймалася величина непогашеного прискорення для вантажного поїзда $0,3 \text{ м/с}^2$, для пасажирського $0,7 \text{ м/с}^2$.

Таблиця 2. Значення коефіцієнтів поперечної стійкості рейко-шпальної решітки

Екіпаж \ Радіус кривої, м	R=200 м	R=250 м	R=300 м
	Електровоз ВЛ 80 без зчленування візків	1,5	1,83
Вантажний вагон на 4-х вісних візках моделі ЦНП-Х3 (без врахування поперечної сили від гальмування)	1,3	1,5	1,89
Вантажний вагон на 4-х вісних візках моделі ЦНП-Х3 (з врахування поперечної сили від гальмування)	1,02	1,17	1,3

Висновки

1. Із наведеного технічного стану залізничної колії, розміщеної в кривих радіусів 350 м і менше, видно що є гостра необхідність застосування більш надійних конструкцій верхньої будови колії, особливо на вантажонапружених ділянках із затяжними підйомами, розташованими в гірських районах.

2. Підвищити надійність залізничної колії в кривих малого радіусу можна шляхом заміни дерев'яних шпал на залізобетонні з одночасним улаштуванням безстикової конструкції колії температурно-напруженого типу.

3. Улаштування безстикової конструкції колії температурно-напруженого типу в кривих радіуса 350 і менше можливе із збільшенням опору поздовжньому переміщенню рейко-шпальної решітки в баластовому шарі.

4. На основі проведених теоретичних розрахунків поперечної стійкості конструкції колії на залізобетонних шпалах з типовими скріпленнями СКД65-Б можна зробити наступні висновки:

4.1. В кривих ділянках колії із зменшенням радіусу кривої зменшується поперечна стійкість рейко-шпальної решітки. При русі вантажного вагону на візках моделі ЦНП-ХЗ по колії з рейковим скріпленням СКД65-Б при епюрі укладання шпал 1840 шт/км в кривій радіуса 200 м поперечна стійкість рейко-шпальної решітки зменшується на 10 % порівняно з кривою радіуса 300 м.

4.2. Додаткова дія поперечної горизонтальної сили, яка виникає при різкому гальмуванні поїзда, зменшує поперечну стійкість колії в цілому на 30%.

ЛІТЕРАТУРА

1. Duan YF, Ni QB, Zhu Y., Gao BQ (2012) Моніторинг стану здоров'я та профілактика захворювань кривих доріжок. У: Ni YQ., Ye XW. (ред.) Матеріали 1-го міжнародного семінару з питань швидкісних та міжміських залізниць. Конспект лекцій з електротехніки, том 148. Спрингер, Берлін, Гейдельберг. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27963-8_37
2. Даренский А.Н., Тулей Ю.Л., Потапов Д.А. Численные исследования влияния параметров рельсовой колеи на боковой износ рельсов в кривых // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2016. № 6 (121). С. 36–42.
3. Alexander Darenskiy, Dmitry Potapov, Yuseph Tuley, Natalia Bugaets, Alina Malishevskaya. Revisiting the reasons for contact fatigue defects in rails // Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering MATEC Web of Conf. Vol. 116, 03001, 2017.
4. Włodzimierz Bednarek. Longitudinal displacements of railway jointless track due to local temperature difference on its length. Transportation overview, 2020, № 2, P. 11-27. DOI: 10.35117/A_ENG_20_02_02.
5. Dominik Pokropski. Influence of the ballast resistance on the stability of continuous welded rail. Safety Engineering of Anthropogenic Objects, 2020, № 4, P.1-13.
6. Проектування та розрахунки конструкцій залізничної колії Підручник для вищих навчальних закладів в 2-х томах: / за ред. Е.І. Даніленка. Т.1 К.: «Хай-Тек Прес», 2019. 344 с.
7. Проектування та розрахунки конструкцій залізничної колії Підручник для вищих навчальних закладів в 2-х томах: / за ред. Е.І. Даніленка. Т.2 К.: «Хай-Тек Прес», 2019. 344 с.
8. Даніленко Е.І. Залізнична колія /Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомим складом/Підручник для вищих навчальних закладів Київ, Інпрес,2010. Том 1 528 с.
9. Даніленко Е.І. Залізнична колія /Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомим складом/Підручник для вищих навчальних закладів Київ, Інпрес,2010. Том 2 456 с.
10. Твердомед В.М., Возненко А.Д., Бойко В.Д. Розрахунок поперечних горизонтальних сил у кривих ділянках рейкової колії [Текст] / В.М. Твердомед, // Зб. наук. праць ДЕТУТ. Серія «Транспортні системи і технології». Київ, 2016. – Вип. 29. – С. 134-147.
11. Лысюк В.С. Надежность железнодорожного пути. М.: Транспорт, 2001. 287с.
12. Лысюк В.С. Прочность пути и его горизонтальная жесткость // Путь и путей. хоз-во. – 2004. - №5. – С. 12-16.
13. Твердомед В.М. Вплив конструктивного оформлення вузла рейкового скріплення на забезпечення поздовжньої стійкості безстикової колії / В.М. Твердомед, С.Л. Карпінський, О.О. Сорока // Зб. наук. праць УкрДУЗТ. Х.: УкрДАЗТ, 2017, Вип. 169, С. 47-54. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpudazt_2017_169_8
14. Rybkin V. V., Nastechik N. P., Marcul R.V. Stability issues of the continuous welded rail track on the concrete sleepers on the curves with radius $R \leq 300$ m. // Sciences in Cold and Arid Region. Beijing, 2013. Vol. 5, Iss. 654. P. 658. DOI: 10.3724/SP.J.1226.-2013.00654
15. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість / Е.І. Даніленко, В.В. Рибкін. – К.:Транспорт України, 2005. – 119 с.

REFERENCES

1. Duan YF, Ni QB, Zhu Y., Gao BQ (2012) Моніторинг стану здоров'я та профілактика захворювань кривих доріжок. У: Ni YQ., Ye XW. (ред.) Матеріали 1-го міжнародного семінару з питань швидкісних та міжміських залізниць. Конспект лекцій з електротехніки, том 148. Спрингер, Берлін, Гейдельберг. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27963-8_37
2. Darenskiy A.N., Tuley Yu.L., Potapov D.A. (2016). Chislennyye issledovaniya vliyaniya parametrov relsovoy kolei na bokovoy iznos relsov v krivykh [Numerical studies of the influence of the parameters of the rail track on the lateral wear of

the rails in the curves]. *Informatsiyno-keruyuchi sistemi na zallznicnomu transporti – Information and control systems for railway transport*, 6 (121), 36–42. [in Russian]

3. Alexander Darenkiy, Dmitry Potapov, Yuseph Tuley, Natalia Bugaets, Alina Malishevskaya (2017). Revisiting the reasons for contact fatigue defects in rails. *Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering MATEC Web of Conf.* Vol. 116, 03001.

4. Włodzimierz Bednarek (2020). Longitudinal displacements of railway jointless track due to local temperature difference on its length. *Transportation overview*, 2, 11-27. DOI: 10.35117/A_ENG_20_02_02.

5. Dominik Pokropski (2020). Influence of the ballast resistance on the stability of continuous welded rail. *Safety Engineering of Anthropogenic Objects*, 4, 1-13.

6. Danilenko E.I. (Eds) (2019). *Proektuvannya ta rozrahunki konstruksiy zaliznichnoyi koliiyi [Design and calculations of railway track structures]*. Kyiv: «High Tech Press», Vol. 1, 344 p. [in Ukrainian]

7. Danilenko E.I. (Eds) (2019). *Proektuvannya ta rozrahunki konstruksiy zaliznichnoyi koliiyi [Design and calculations of railway track structures]*. Kyiv: «High Tech Press», Vol. 2, 344 p. [in Ukrainian]

8. Danilenko E.I. (2010). *Zaliznichna koliiya. Ulashtuvannya, proektuvannya i rozrahunki, vzaemodiya z ruhomim skladom [Railway track. Arrangement, design and calculations, interaction with rolling stock]*. Kyiv: Inpress, Vol. 1 [in Ukrainian]

9. Danilenko E.I. (2010). *Zaliznichna koliiya. Ulashtuvannya, proektuvannya i rozrahunki, vzaemodiya z ruhomim skladom [Railway track. Arrangement, design and calculations, interaction with rolling stock]*. Kyiv: Inpress, Vol. 2 [in Ukrainian]

10. Tverdomed V.M., Voznenko A.D., Boyko V.D. (2016). *Rozrahunok poperechnih gorizontálnih sil u krivih dilyankah reykovoyi koliiyi [Calculation of transverse horizontal forces in curved sections of rail track]*. *Zbirnyk. naukovih. prats DETUT. Seriya «Transportni sistemi i tehnologiyi» – Collection of scientific works DETUT. Transport Systems and Technologies series*, 29. 134-147. [in Ukrainian]

11. Lysyuk V.S. (2001). *Nadezhnost zheleznodorozhnogo puti [Railway track reliability]*. Moscow:Transport, 287 p.

12. Lysyuk V.S. (2004). *Prochnost puti i ego gorizontalnaya zhestkost [The strength of the track and its horizontal stiffness. household]*. *Put i putevoe hozyaystvo – Track and track facilities*. 5. 12-16. [in Russian]

13. V.M. Tverdomed, S.L. Karpinskiy, O.O. Soroka (2017). *Vpliv konstruktivnogo oformlennya vuzla reykovogo skriplennya na zabezpechennya pozdovzhnoyi stiykosti bezstikovoyi koliiyi [Influence of constructive design of rail fastening unit on providing longitudinal stability of seamless track]*. *Zbirnyk. naukovih. prats UkrDUZT – Collection of scientific works UkrDUZT*, 169. 47-54. [in Ukrainian]

14. Rybkin V. V., Nastechik N. P., Marcul R.V. (2013). Stability issues of the continuous welded rail track on the concrete sleepers on the curves with radius $R \leq 300$ m. *Sciences in Cold and Arid Region*, Vol. 5, Iss. 654. P. 658. DOI: 10.3724/SP.J.1226.-2013.00654

Tverdomed Volodymyr¹, Saiapina Inna², Aharkov Olsandr³, Boiko Volodymyr⁴

¹ Dean of Infrastructure and Rolling Stock of Railways Faculty, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine

² Associate professor, Telecommunication Technologies and Automation Department, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine

³ Associate professor, Theoretical And Applied Mechanics Department, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine

⁴ Associate professor, Railway Track And Track Facilities Department, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine

THEORETICAL RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF JOINTLESS TRACK ARRANGEMENT IN CURVED SECTIONS OF RADIUS LESS THAN 350 METERS

The traditional structure of the upper structure of the track on the main railways of Ukraine in curved sections with a radius of less than 350 m is a link structure of the track with wooden sleepers. This track design is not rational under current operating conditions. The use of a more advanced jointless track design in curves with a radius of less than 350 m is limited primarily by the condition of ensuring the transverse stability of the rail-sleeper lattice. To be able to expand the use of jointless track construction in curved sections with a radius of less than 350 m, it is necessary to know the values of the transverse forces of interaction of the structures of the upper track structure with the moving carriage. Knowing the forces of interaction, it is possible to estimate by what value the

transverse stability of the rail-sleeper lattice will be provided and to make constructive decisions on its increase.

The method of determination of transverse horizontal forces of interaction of track and moving carriage in curves of radius less than 350 m taking into account quasi-static compressive forces in a train is given. The reasons for these forces are related to the presence of eccentricity of the auto-clutch shank in the horizontal and vertical planes. Theoretical calculations of horizontal transverse forces of interaction are carried out according to the given technique and coefficients of stability of a rail-sleeper lattice in curved sites are defined.

The main conclusions concerning the possibility of operation of the jointless track structure in curved sections with a radius of 350 m and less are made.

Keywords: *railway track, jointless track construction, small radius curves, transverse stability, horizontal transverse forces.*