

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

ТУЛЕЙ ЮЗЕФ ЛЕОНІДОВИЧ



УДК 625.143.482

**РАЦІОНАЛІЗАЦІЯ НОРМ УЛАШТУВАННЯ РЕЙКОВОЇ
КОЛІЇ В КРИВИХ МАЛИХ РАДІУСІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ
РЕСУРСІВ РОБОТИ РЕЙОК**

Спеціальність 05.22.06 – залізнична колія

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі «Колія та колійне господарство» Українського державного університету залізничного транспорту Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Даренський Олександр Миколайович,
Український державний університет залізничного транспорту, завідувач кафедри колії та колійного господарства

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Курган Микола Борисович,
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, завідувач кафедри проектування і будівництва доріг;

кандидат технічних наук, доцент
Твердомед Володимир Миколайович,
Київський інститут залізничного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій,
декан факультету «Інфраструктура і рухомий склад залізниць»

Захист відбудеться «8» листопада 2018 року о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.02 при Українському державному університеті залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейербаха, 7.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейербаха, 7 та на сайті <http://kart.edu.ua>.

Автореферат розісланий «5» жовтня 2018 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.820.02,
к.т.н., доц.



О.В. Лобяк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Протяжність кривих ділянок колії з радіусами 450 м та менше не перевищує 8 % розгорнутої довжини головних та станційних колій магістральних залізниць України. В той же час до 40 % рейок, які мають дефекти контактно-втомного походження на поверхні кочення, в тому числі боковий знос головок рейок, знаходяться саме в таких кривих. Слід зазначити, що використання дорогих заходів по боротьбі з такими дефектами (наприклад, лубрикація та використання термозміцнених рейок) не завжди дають позитивний результат.

Тому визначення причин високої інтенсивності розвитку дефектів контактно-втомного походження, в тому числі бокового зносу головок рейок, та розробка заходів, які реально сповільнять такі процеси у кривих ділянках колії малих радіусів, є важливим і актуальним завданням, вирішення якого має підвищити терміни служби рейок, скоротити потребу в них та зменшити затрати праці при поточному утриманні й дати значний економічний ефект.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота узагальнює дослідження автора, які виконувались з 2008 по 2017 рік відповідно до плану науково-дослідних робіт Українського державного університету залізничного транспорту, розробленого відповідно до Транспортної стратегії України на період до 2020 року, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20 жовтня 2010 р. № 2174-Р в рамках тематичного плану Міністерства транспорту і зв'язку України, тема “Розробка теорії та методів оптимізації несучих конструкцій транспортних споруд” (номер державної реєстрації 0110U002127).

В 2013–2014 роках роботи виконувалися відповідно до держбюджетної науково-дослідної теми «Теоретичні та експериментальні дослідження впливу електрокорозійного і напружено-деформованого стику залізничних споруд і колій на їх надійність і безпеку руху» (номер державної реєстрації 0113U001031).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є вирішення науково-технічної завдання підвищення ресурсів роботи рейок в особливих умовах експлуатації залізничних колій у кривих ділянках із радіусами 450 м і менше за рахунок встановлення обґрунтованих норм улаштування, утримання та експлуатації рейкової колії в таких умовах. Для досягнення цієї мети були вирішені наступні задачі:

– виконати аналіз фактичних умов експлуатації колії в кривих малих радіусів та аналіз можливих напрямів вирішення проблеми, що розглядається;

– здійснити подальший розвиток комплексу математичних моделей просторової динамічної системи «екіпаж–колія» для можливості їх застосування в умовах магістральних залізниць за рахунок застосування математичної моделі коливань колії як балки на багатьох пружно-дисипативних опорах з нелінійними характеристиками;

– розробити математичні моделі просторових жорсткостей рейкових опор при використанні різних типів скріплень для дерев'яних шпал та залізобетонних шпал, які використовуються на залізницях України в кривих малих радіусів.

Провести експериментальні дослідження жорсткості пружних елементів таких рейкових опор;

- виконати теоретичні та експериментальні дослідження для встановлення просторових жорсткостей рейкових опор при застосуванні п'яти типів скріплень для дерев'яних шпал та чотирьох типів скріплень для залізобетонних шпал;

- дослідити чисельними методами процеси змін горизонтальних поперечних сил та сумарний фактор зносу рейок у кривих малих радіусів при різних конструкціях рейкових опор, встановити вплив характеристик улаштування колії на ці процеси;

- результати теоретичних досліджень перевірити результатами експериментальних робіт з визначення горизонтальних поперечних сил, що діють на колію під час руху дослідного потяга, що має точно визначені характеристики (осьові навантаження, швидкість руху та ін.);

- розробити і рекомендувати обґрунтовані допуски по утриманню рейкової колії у плані для зменшення горизонтальних поперечних сил дії рухомого складу, що дасть можливість зменшити боковий знос та інтенсивність виникнення інших дефектів контактної-втомного походження. Визначити допустимі швидкості руху поїздів за наявності несправностей плану колій.

Об'єкт дослідження – процеси бокового зносу та виникнення інших дефектів контактної-втомного походження у рейках в кривих малого радіуса.

Предмет дослідження – вплив горизонтальних поперечних сил на боковий знос та виникнення інших дефектів контактної-втомного походження в рейках.

Методи дослідження. В роботі використано комплексний підхід до вирішення поставлених задач, який базується на:

- аналітичних методах теоретичної та будівельної механіки з використанням просторових моделей для визначення горизонтальних поперечних сил дії на колію рухомого складу у кривих;

- методах експериментальних досліджень роботи, як колії в цілому, так і рейкових опор.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Набули подальшого розвитку моделі й методи розрахунків взаємодії рухомого складу і колії при застосуванні загальної розрахункової схеми колії у вигляді балок, що спираються на пружно-дисипативні опори з нелінійними характеристиками.

2. Отримала подальший розвиток математична модель коливань балки на багатьох пружно-дисипативних опорах, завдяки чому з'явилась можливість застосування просторової динамічної системи «екіпаж–колія» для визначення просторових сил взаємодії екіпажів та колії в умовах магістральних залізниць.

3. Розроблені математичні моделі просторових жорсткостей дев'яти типів рейкових опор при використанні всіх типів проміжних скріплень, які застосовуються на магістральних залізницях. Виконана прогнозна оцінка змін цих жорсткостей під час експлуатації колії.

4. Для умов магістральних залізниць України вперше встановлено рівень горизонтальних поперечних сил чисельними методами з використанням

математичних моделей, в основу яких покладено розрахункову схему колії як балки на пружно-дисипативних опорах. Визначено вплив на ці сили параметрів улаштування та експлуатації колії, а також режимів ведення поїздів.

5. Вперше обґрунтовано та запропоновано раціональні, за критерієм сумарного фактору бокового зносу рейок, норми утримання рейкової колії у плані та норми утримання рейкових стиків.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Ефективність адаптованої до умов магістральних залізниць математичної моделі динамічної системи «екіпаж–колія», яку доведено до програмного продукту, дозволяє безпосередньо використовувати її для розрахунків сил взаємодії рухомого складу і колії, в тому числі у складних умовах експлуатації у кривих малих радіусів.

2. Результати досліджень дисертаційної роботи дозволили встановити обґрунтовані норми утримання рейкової колії у плані та норми утримання рейкових стиків у кривих малих радіусів.

3. Застосування результатів досліджень дозволяє поліпшити технічний стан залізничних колій у кривих малих радіусів, забезпечувати безпеку руху поїздів та сприяти скороченню витрат на поточне утримання та ремонти колії.

4. Одержані в дисертації результати використовуються під час викладання дисциплін «Колійне господарство» та «Організація і планування колійного господарства в умовах обмежених ресурсів», в курсовому та дипломному проектуванні при підготовці фахівців за освітньою програмою “Залізничні споруди та колійне господарство” в Українському державному університеті залізничного транспорту.

5. Практичне впровадження результатів дисертаційної роботи підтверджено відповідними актами, наданими в додатках до дисертації.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій. Всі наукові положення, висновки і рекомендації, одержані в дисертаційній роботі, є обґрунтованими і достовірними. Вони отримані на основі використання методів і прийомів наукових досліджень, які базуються на принципах системності та включають:

– комплексний підхід до вирішення проблеми підвищення ресурсів роботи рейок у кривих ділянках колії малих радіусів;

– використання відомих аналітичних методів теоретичної й будівельної механіки;

– моделювання роботи рейкової колії з урахуванням дискретної підрейкової основи в умовах магістральних залізниць.

Достовірність результатів підтверджується задовільною збіжністю теоретичних і експериментальних даних досліджень, результати добре узгоджуються з даними інших дослідників, які були одержані в порівнянних умовах.

Особистий внесок здобувача. Адаптація математичної моделі визначення коефіцієнтів дисипації за результатами експериментальних робіт до умов магістральних залізниць; аналіз появи та розвитку дефектів контактної-втомного

походження у кривих малих радіусів магістральних залізниць; аналіз результатів чисельних досліджень, встановлення аналітичних залежностей впливу несправностей колії; математична обробка отриманих результатів; розрахунки стійкості безстикової колії, аналіз отриманих результатів; аналіз конструкцій рейкових скріплень для залізобетонних шпал вітчизняного та закордонного виробництва; теоретично обґрунтовано застосування розрахункової схеми колії як балки на пружно-дисипативних опорах для умов магістральних залізниць. Особистий внесок автора у спільні публікації відображений у переліку опублікованих робіт.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційних досліджень доповідались на 6 міжнародних науково-технічних конференціях:

– на 70, 71, 72 та 73-й міжнародних науково-технічних конференціях кафедр Українського державного університету залізничного транспорту та спеціалістів залізничного транспорту і підприємств “Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті” (м. Харків, 2008–2011 рр.);

– на Міжнародній науково-технічній конференції “Нові технології, обладнання, матеріали в будівництві і на транспорті”, присвяченій 80-річчю кафедри будівельних, колійних та вантажно-розвантажувальних машин (м. Харків, 26-28 листопада 2014 р.);

– на VI Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті” (м. Харків, 19-21 квітня 2017 р.).

Дисертаційна робота в повному обсязі доповідалась та обговорювалась на засіданні кафедри «Колія та колійне господарство» (м. Харків, 24 квітня 2018 р.) та міжкафедральному семінарі кафедр «Колія та колійне господарство», «Будівельні, колійні та вантажно-розвантажувальні машини», «Будівельні матеріали, конструкції та споруди», «Будівельна механіка та гідравліка» та «Вишукування та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою» Українського державного університету залізничного транспорту (25 травня 2018 р.)

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи опубліковано в 11 наукових працях, з яких 8 статей у фахових виданнях, рекомендованих МОН України, в тому числі 7 у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз, з яких 1 – в Scopus; 2 публікації апробаційного характеру, з яких 1 – в Scopus; 1 – додаткова публікація.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації українською та англійською мовами, вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Повний обсяг становить 200 сторінок друкованого тексту, включаючи 60 рисунків та 25 таблиць; список використаних джерел складається з 165 найменувань на 17 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і задачі дослідження, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами, розглянуто наукову новизну, актуальність і практичне значення одержаних результатів. Надано інформацію про апробацію та публікації одержаних результатів. Наведено інформацію про структуру й обсяг дисертації.

В першому розділі роботи сформульовано загальний підхід до вирішення проблеми підвищення ресурсів роботи рейок у кривих ділянках малого радіуса.

Починаючи із середини 80-х років ХХ сторіччя, у кривих ділянках колії з радіусом менше 450 м інтенсивність технічних відмов колії внаслідок бічного зносу рейок та інших дефектів контактної-втомного походження на поверхні кочення зросла більш ніж у 2 рази. Ці процеси тривають і в наш час на залізницях України, і кількість рейок із такими дефектами зростає. Це відбувається в умовах, коли на залізницях України нарощується використання дорогих заходів по боротьбі з такими дефектами, застосування стаціонарних і локомотивних лубрикаторів, укладання термозміцнених рейок.

Було зроблено висновок, що причинами таких явищ у кривих малих радіусів є особливості взаємодії колії й рухомого складу, насамперед вантажних вагонів. Такими особливостями слід вважати:

- надмірно великі горизонтальні динамічні поперечні сили, в тому числі ударного характеру;
- значно більші, ніж на інших ділянках колії, кути набігання коліс на рейки;
- великі градієнти кривизни колії в зонах горизонтальних нерівностей та у стиках.

Було зроблено висновок, що для визначення заходів для зменшення інтенсивності бічного зносу та інших дефектів слід встановити вплив норм і допусків утримання рейкової колії в таких умовах на динаміку взаємодії колії й рухомого складу.

Аналіз фактичних умов експлуатації колії у кривих малих радіусів на залізницях України показав, що загальна протяжність таких кривих становить 3514 км, 65 % з яких знаходяться на Львівській залізниці. 67,9 % загальної протяжності припадає на ділянки з вантажонапруженістю до 5 млн. ткм брутто/км за рік, 12,4 % – від 5 до 15 млн. ткм брутто/км за рік, 11,5 % – від 15 до 30 млн. ткм брутто/км за рік, решта – на ділянках із більшою вантажонапруженістю. На більшості ділянок (70,4 %) швидкість руху пасажирських поїздів становить 60–80 км/год, вантажних – 40–60 км/год.

В коліях кривих малих радіусів експлуатується ланкова та безстикова колія на дерев'яних та залізобетонних шпалах (таблиця 1).

90 % протяжності ланкової колії на дерев'яних шпалах у кривих малих радіусів експлуатується на Львівській залізниці.

Конструкції колії й типи шпал у кривих малих радіусів (км)

Залізниця	Довжина кривих з $R \leq 450$ м	Конструкція колії		Шпали	
		ланкова	безстикова	залізобетонні	дерев'яні
Донецька	178	114	64	126	52
Південна	157	102	55	149	8
Придніпровська	99	36	63	94	5
Одеська	320	226	94	255	65
Південно-Західна	480	243	237	440	40
Львівська	2280	1982	298	728	1552
Разом	3514	2703	811	1792	1722
%	100	77	23	51	49

Основним типом рейок у кривих є рейки Р65 – 79 %, колія з рейками Р50 складає 16 %, решта – Р43 (на Львівській залізниці).

При залізобетонних шпалах найпоширенішим є скріплення типу КБ – 36 % загальної протяжності кривих малих радіусів. Крім того, використовуються скріплення КПП-5, КПП-5К та СКД65-Б. При дерев'яних шпалах найпоширенішим є скріплення типу ДО – 46 %; також експлуатується скріплення типу СКД65-Д.

Для вибору математичних моделей досліджень взаємодії рухомого складу і колії, у кривих малих радіусів, виконано аналіз розвитку таких теорій. Визначено, що дослідженнями цього питання займалось багато вчених, серед яких істотних результатів досягли: А.М. Годицький-Цвірко, С.А. Степкін, Г.М. Шахунянц, Д.Г. Голованов, М.Л. Корольов, М.І. Кулагін, Н.К. Снітко, Е.М. Бромберг, А.А. Холодецький, М.Ф. Веріго, В.І. Ангелейко, Е.І. Даніленко, В.В. Рибкін.

В основу їх досліджень було покладено загальну розрахункову схему колії у вигляді балок на суцільній пружній основі; при цьому використовувались, як правило, плоскі розрахункові схеми екіпажа та колії для визначення вертикальних та горизонтальних сил взаємодії, результати розрахунків яких поєднувались із використанням принципу суперпозиції.

Однак ряд вчених (В.Ф. Яковлев, К.Д. Белих, І.І. Семенов, М.С. Нікеров, М.П. Смірнов) показали, що в умовах кривих малих радіусів принцип суперпозиції є неприпустимим. Такі висновки було підтверджено в дослідженнях О.М. Даренського, який запропонував моделі й методи розрахунків взаємодії рухомого складу і колії, в основу яких було покладено просторову розрахункову схему екіпажа, що рухається по колії, яка розглядалась у вигляді балки великої довжини, яка спирається на окремі опори, що мають нелінійні пружно-дисипативні характеристики. Ці математичні моделі було прийнято за основу в цій дисертаційній роботі.

В кінці розділу сформульовано мету і задачі досліджень дисертаційної роботи.

У другому розділі викладено теоретичні основи досліджень впливу рухомого складу на колію у кривих малих радіусів. За основу було прийнято

математичну модель просторової динамічної системи «екіпаж–колія», яка була розроблена проф. О.М. Даренським для умов промислового залізничного транспорту. В цій моделі не були враховані інерційні властивості колії, оскільки швидкості руху рухомого складу промислового транспорту не перевищують, як правило, 10–15 км/год. Для умов магістрального транспорту таке припущення є неприйнятним, тому в роботі у модель були внесені відповідні зміни.

Як базову було розглянуто схему чотиривісного екіпажа, оскільки значна частина вантажонапруженості (до 80 %) складається за рахунок перевезення вантажів чотиривісними вантажними вагонами різних типів.

Розглянуто кінетичні й силові зв'язки між елементами підсистеми «екіпаж». Враховано нелінійні сили сухого тертя у фрикційних погашувачах коливань, можливість “валяння” кузова на скользуни та виникаючі при цьому сили й моменти сил взаємодії між кузовом та візками. Враховано нелінійність зв'язків у тому випадку, коли моменти сил тертя на п'ятниках і скользунах виявляються більшими за суму моментів горизонтальних реакцій ресорних комплектів і моментів поздовжніх і поперечних сил взаємодії коліс екіпажа з рейками.

Рейки розглядаються як балки великої довжини, що спираються на окремі опори, які мають просторові пружно-дисипативні властивості.

Вертикальні силові й кінематичні зв'язки підсистем «екіпаж» і «колія» подані з урахуванням одностороннього зв'язку колеса і рейки, пружної й дисипативних реакцій колій.

Враховано можливість руху по колії коліс, що мають дисбаланс, нерівномірність прокату та повзуни і створюють ударні сили у стиках.

Для врахування інерційних властивостей колії було розглянуто коливання колії під дією рухомого складу. Рівняння коливання рейки під дією рухомого навантаження в загальному вигляді було прийнято як (1)

$$z(x) = z_0 A_{xx} + \frac{z_0'}{S} B_{xx} + \frac{F(t)}{S^3 EI} D_{S(x-c)}, \quad (1)$$

де z_0, z_0' – початкові параметри, відповідно вигин і кут повороту на початку координат;

A_{xx}, B_{xx}, D_{xx} – функції О.М. Крилова;

E – модуль пружності матеріалу балки;

I – момент інерції поперечного перерізу балки;

S – характеристичне число, яке визначається співвідношенням

$$S^4 = \frac{m \cdot \theta^2}{EI}, \quad (2)$$

де m – розподілена маса колії, яка приймає участь у процесі коливань;

θ – частота коливань.

Функції О.М. Крилова у рівнянні (1) являють собою вирази

$$\left. \begin{aligned} A_{sx} &= \frac{1}{2}(ch\ sx + \cos\ sx) \\ B_{sx} &= \frac{1}{2}(sh\ sx + \sin\ sx) \\ D_{sx} &= \frac{1}{2}(sh\ sx - \sin\ sx) \end{aligned} \right\} . \quad (3)$$

Далі було прийнято розрахункову схему колії у вигляді балки на пружно-дисипативних опорах, яку наведено на (рис. 1).

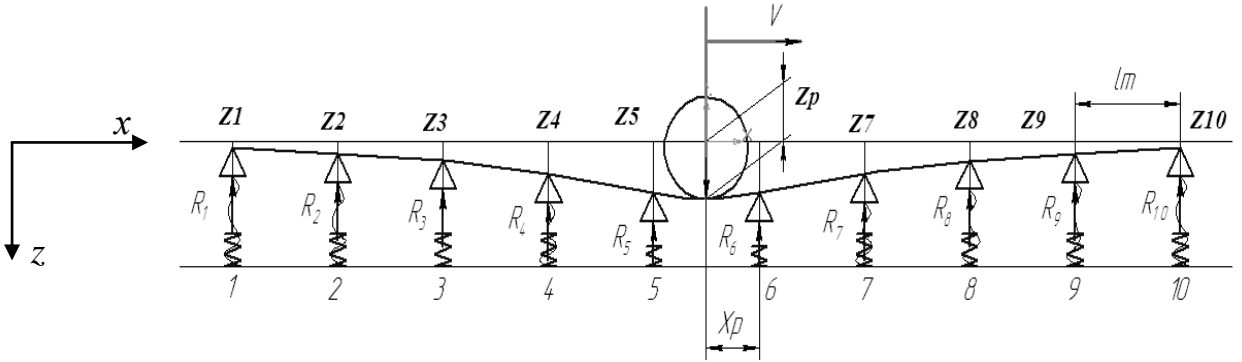


Рис. 1. Розрахункова схема рейкової нитки на пружних опорах під дією рухомого навантаження

Рівняння для прогинів рейкових опор у будь-який момент часу t було отримано у вигляді системи рівнянь (4).

$$\left. \begin{aligned} & z_1 s^3 EI + z_2 cDs(l_u - 2l_u) + z_3 cDs(l_u - 3l_u) + z_4 cDs(l_u - 4l_u) + z_5 cDs(l_u - 5l_u) + z_6 cDs(l_u - 6l_u) + \\ & + z_7 cDs(l_u - 7l_u) + z_8 cDs(l_u - 8l_u) + z_9 cDs(l_u - 9l_u) + z_{10} cDs(l_u - 10l_u) = P(t)Ds(l_u - x_p) \\ & z_1 cDs(2l_u - l_u) + z_2 s^3 EI + z_3 cDs(2l_u - 3l_u) + z_4 cDs(2l_u - 4l_u) + z_5 cDs(2l_u - 5l_u) + z_6 cDs(2l_u - 6l_u) + \\ & + z_7 cDs(2l_u - 7l_u) + z_8 cDs(2l_u - 8l_u) + z_9 cDs(2l_u - 9l_u) + z_{10} cDs(2l_u - 10l_u) = P(t)Ds(2l_u - x_p) \\ & z_1 cDs(3l_u - l_u) + z_2 cDs(3l_u - 2l_u) + z_3 s^3 EI + z_4 cDs(3l_u - 4l_u) + z_5 cDs(3l_u - 5l_u) + z_6 cDs(3l_u - 6l_u) + \\ & + z_7 cDs(3l_u - 7l_u) + z_8 cDs(3l_u - 8l_u) + z_9 cDs(3l_u - 9l_u) + z_{10} cDs(3l_u - 10l_u) = P(t)Ds(3l_u - x_p) \\ & z_1 cDs(4l_u - l_u) + z_2 cDs(4l_u - 2l_u) + z_3 cDs(4l_u - 3l_u) + z_4 s^3 EI + z_5 cDs(4l_u - 5l_u) + z_6 cDs(4l_u - 6l_u) + \\ & + z_7 cDs(4l_u - 7l_u) + z_8 cDs(4l_u - 8l_u) + z_9 cDs(4l_u - 9l_u) + z_{10} cDs(4l_u - 10l_u) = P(t)Ds(4l_u - x_p) \\ & z_1 cDs(5l_u - l_u) + z_2 cDs(5l_u - 2l_u) + z_3 cDs(5l_u - 3l_u) + z_4 cDs(5l_u - 4l_u) + z_5 s^3 EI + z_6 cDs(5l_u - 6l_u) + \\ & + z_7 cDs(5l_u - 7l_u) + z_8 cDs(5l_u - 8l_u) + z_9 cDs(5l_u - 9l_u) + z_{10} cDs(5l_u - 10l_u) = P(t)Ds(5l_u - x_p) \\ & z_1 cDs(6l_u - l_u) + z_2 cDs(6l_u - 2l_u) + z_3 cDs(6l_u - 3l_u) + z_4 cDs(6l_u - 4l_u) + z_5 cDs(6l_u - 5l_u) + z_6 s^3 EI + \\ & + z_7 cDs(6l_u - 7l_u) + z_8 cDs(6l_u - 8l_u) + z_9 cDs(6l_u - 9l_u) + z_{10} cDs(6l_u - 10l_u) = P(t)Ds(6l_u - x_p) \\ & z_1 cDs(7l_u - l_u) + z_2 cDs(7l_u - 2l_u) + z_3 cDs(7l_u - 3l_u) + z_4 cDs(7l_u - 4l_u) + z_5 cDs(7l_u - 5l_u) + \\ & + z_6 cDs(7l_u - 6l_u) + z_7 s^3 EI + z_8 cDs(7l_u - 8l_u) + z_9 cDs(7l_u - 9l_u) + z_{10} cDs(7l_u - 10l_u) = P(t)Ds(7l_u - x_p) \\ & z_1 cDs(8l_u - l_u) + z_2 cDs(8l_u - 2l_u) + z_3 cDs(8l_u - 3l_u) + z_4 cDs(8l_u - 4l_u) + z_5 cDs(8l_u - 5l_u) + \\ & + z_6 cDs(8l_u - 6l_u) + z_7 cDs(8l_u - 7l_u) + z_8 s^3 EI + z_9 cDs(8l_u - 9l_u) + z_{10} cDs(8l_u - 10l_u) = P(t)Ds(8l_u - x_p) \\ & z_1 cDs(9l_u - l_u) + z_2 cDs(9l_u - 2l_u) + z_3 cDs(9l_u - 3l_u) + z_4 cDs(9l_u - 4l_u) + z_5 cDs(9l_u - 5l_u) + \\ & + z_6 cDs(9l_u - 6l_u) + z_7 cDs(9l_u - 7l_u) + z_8 cDs(9l_u - 8l_u) + z_9 s^3 EI + z_{10} cDs(9l_u - 10l_u) = P(t)Ds(9l_u - x_p) \\ & z_1 cDs(10l_u - l_u) + z_2 cDs(10l_u - 2l_u) + z_3 cDs(10l_u - 3l_u) + z_4 cDs(10l_u - 4l_u) + z_5 cDs(10l_u - 5l_u) + \\ & + z_6 cDs(10l_u - 6l_u) + z_7 cDs(10l_u - 7l_u) + z_8 cDs(10l_u - 8l_u) + z_9 cDs(10l_u - 9l_u) + z_{10} s^3 EI = P(t)Ds(10l_u - x_p) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

В цих рівняннях відстань від найближчої опори до точки прикладання навантаження визначено як (5)

$$x_p = 5l_u + \left(1 - \left\{\frac{x_{ni}}{l_u}\right\}\right) \cdot l_u, \quad (5)$$

де $\left\{\frac{x_{ni}}{l_u}\right\}$ – дрібна частина співвідношення $\frac{x_{ni}}{l_u}$.

В матричній формі систему (4) можна записати у вигляді (6)

$$A \cdot Z = H, \quad (6)$$

де A – матриця пружних та інерційних характеристик колії;

Z – матриця-стовпець невідомих деформацій опор;

H – матриця-стовпець зовнішнього навантаження.

$$Z = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ z_5 \\ z_6 \\ z_7 \\ z_8 \\ z_9 \\ z_{10} \end{pmatrix} \cdot z_i \quad (7)$$

$$H = \begin{bmatrix} P(t)D_s(l_u - x_p) \\ P(t)D_s(2l_u - x_p) \\ P(t)D_s(3l_u - x_p) \\ P(t)D_s(4l_u - x_p) \\ P(t)D_s(5l_u - x_p) \\ P(t)D_s(6l_u - x_p) \\ P(t)D_s(7l_u - x_p) \\ P(t)D_s(8l_u - x_p) \\ P(t)D_s(9l_u - x_p) \\ P(t)D_s(10l_u - x_p) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Перепишемо матрицю (8) інакше – винесемо значення колісного навантаження

$$\tilde{H} = \begin{bmatrix} D_s(l_{uu} - x_p) \\ D_s(2l_{uu} - x_p) \\ D_s(3l_{uu} - x_p) \\ D_s(4l_{uu} - x_p) \\ D_s(5l_{uu} - x_p) \\ D_s(6l_{uu} - x_p) \\ D_s(7l_{uu} - x_p) \\ D_s(8l_{uu} - x_p) \\ D_s(9l_{uu} - x_p) \\ D_s(10l_{uu} - x_p) \end{bmatrix} \cdot P(t) \quad (9)$$

За формулою Крамера елементи матриці Z можна визначити як

$$Z = \frac{\tilde{\Delta}_j}{\Delta} \cdot P(t) \quad (10)$$

де Δ – визначник матриці A ;

$\tilde{\Delta}_j$ – визначник, який одержано з Δ викреслюванням j -го стовпця ($j = 1, \dots, 10$) і вписуванням на це місце стовпця вільних членів стовпця H .

Такі математичні моделі дозволяють розраховувати значення пружних осідань всіх опор і значення опорних реакцій.

Запропонована методика визначення сил взаємодії дозволила враховувати не тільки пружні й геометричні характеристики рейок, жорсткості опор, епюру шпал, а також масу колії, яка бере участь у її коливанні у будь-який момент часу t .

Наприкінці розділу, на основі отриманих математичних моделей, було визначено перелік жорсткостей рейкових опор.

У третьому розділі наведено результати досліджень просторових жорсткостей рейкових опор при застосуванні дерев'яних та залізобетонних шпал зі скріпленнями ДО, Д2, Д4, КППД-2, СКД65-Д, КБ, СКД65-Б, КПП-5 та КПП-5-К.

Жорсткості рейкових опор при просторових навантаженнях розглядались як системи послідовно з'єднаних жорсткостей проміжних скріплень та жорсткостей системи «шпала–баласт». У свою чергу просторові жорсткості рейкових скріплень розглянуто як системи послідовно та паралельно з'єднаних жорсткостей пружних елементів – прокладок та прикріплювачів. Отримано розрахункові рівняння, які дозволяють розраховувати просторові жорсткості скріплень залежно від рівня вертикального навантаження, що діє на цей вузол.

Визначено перелік залежностей змін жорсткостей пружних елементів, які необхідно було визначити експериментально.

Просторові жорсткості системи «шпала–баласт» при дерев'яних та залізобетонних шпалах були отримані на підставі даних експериментальних досліджень кафедри «Колія та колійне господарство» УкрДУЗТ, які було

проведено за участю автора в 2012–2014 роках на 16 ділянках колії Південної залізниці.

Емпіричні залежності змін коефіцієнтів постілі залізобетонних та дерев'яних шпал від величини пропущеного тоннажу було отримано у вигляді:

– для залізобетонних шпал

$$C_{\sigma} = 16,4 \cdot 10^4 + 0,305 \cdot 10^4 T^{0,724} , \quad (11)$$

де T – пропущений по ділянці тоннаж у мільйонах тонн;

– для дерев'яних шпал

$$C_{\sigma} = 6,5 \cdot 10^4 + 0,23 \cdot 10^4 T^{0,605} . \quad (12)$$

Встановлено, що в зимових умовах коефіцієнт постілі для залізобетонних шпал зростає у 1,8 разу, для дерев'яних – у 1,6 разу.

Емпіричні залежності змін горизонтальної поперечної жорсткості шпал, залежно від рівня вертикального навантаження на шпалу та пропущеного тоннажу, мають вигляд:

– для залізобетонних шпал

$$C_{y_{uu}} = K_z (0,73 \cdot 10^4 + 0,22 \cdot 10^4 \cdot P_z^{0,519}) \cdot (1 + 0,021 T^{0,695}) , \quad (13)$$

де K_z – коефіцієнт, що для літніх умов дорівнює 1, для зимових умов – 1,8;

P_z – вертикальне навантаження від двох рейок на шпалу, кН;

T – пропущений по ділянці тоннаж у мільйонах тонн;

– для дерев'яних шпал

$$C_{y_{uu}} = K_z (0,24 \cdot 10^4 + 0,18 \cdot 10^4 \cdot P_z^{0,348}) \cdot (1 + 0,019 T^{0,690}) . \quad (14)$$

Встановлено, що коефіцієнт постілі дерев'яних шпал під підкладкою проміжних скріплень змінюється під час експлуатації колії за емпіричною залежністю, яка має вигляд

$$C_{nod} = 9,996 \cdot 10^5 - 3,955 \cdot 10^5 t^{0,204} . \quad (15)$$

Експериментальні роботи, що були проведені в лабораторних умовах, дозволили встановити статичні й динамічні жорсткості прокладок зазначених вище проміжних скріплень. Результати наведені в табл. 2.

Жорсткості прокладок при стисканні

Тип скріплення	Призначення прокладки	Тип прокладки	Статична жорсткість та її середньоквадратичне відхилення, кН/м		Динамічна жорсткість та її середньоквадратичне відхилення, кН/м	
			$u_{ст}$	S	$u_{дин}$	S
1	2	3	4	5	6	7
КБ, СКД65-Д, Д-2, Д-4, КППД-2	Підрейкові	ЦП-143	$8,63 \cdot 10^4$	$0,33 \cdot 10^4$	$11,9 \cdot 10^4$	$0,53 \cdot 10^4$
		ЦП-260	$11,87 \cdot 10^4$	$0,62 \cdot 10^4$	$17,3 \cdot 10^4$	$0,81 \cdot 10^4$
КБ, СКД65-Б	Нашпальні	ЦП-153	$15,96 \cdot 10^4$	$0,77 \cdot 10^4$	$22,3 \cdot 10^4$	$0,96 \cdot 10^4$
		ЦП-163	$12,45 \cdot 10^4$	$0,67 \cdot 10^4$	$17,5 \cdot 10^4$	$0,72 \cdot 10^4$
КПП-5	Підрейкові	ПРП-2.І	$2,71 \cdot 10^4$	$0,29 \cdot 10^4$	$8,85 \cdot 10^4$	$0,31 \cdot 10^4$
		ПРП-2.ІІ	$3,82 \cdot 10^4$	$0,23 \cdot 10^4$	$12,5 \cdot 10^4$	$0,34 \cdot 10^4$

Під час експлуатації відбуваються зміни фізико-механічних характеристик полімерних матеріалів, у тому числі гуми і поліуретану. Для визначення кількісних характеристик змін динамічної жорсткості прокладок проміжних скріплень внаслідок старіння були проведені випробування прокладок, що були в експлуатації. Емпіричні залежності змін жорсткостей під час експлуатації наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Залежність змін жорсткостей прокладок при стисканні від терміну їх служби в колії (років)

Тип прокладки	Емпірична залежність $u_{пр}^{\delta_{ун}}(t) = f(t)$, кН/м	Середня помилка апроксимації, %
1	2	3
ЦП-143	$u_{пр}^{\delta_{ун}}(t) = u_{пр}^{\delta_{ун}} + 0,08 \cdot 10^4 t$	4,17
ЦП-260	$u_{пр}^{\delta_{ун}}(t) = u_{пр}^{\delta_{ун}} + 0,16 \cdot 10^4 t$	2,17
ЦП-153	$u_{пр}^{\delta_{ун}}(t) = u_{пр}^{\delta_{ун}} + 0,28 \cdot 10^4 t$	3,33
ЦП-163	$u_{пр}^{\delta_{ун}}(t) = u_{пр}^{\delta_{ун}} + 0,17 \cdot 10^4 t$	4,34
ПРП-2.І	$u_{пр}^{\delta_{ун}}(t) = u_{пр}^{\delta_{ун}} + 0,27 \cdot 10^4 t$	6,33

В табл. 4 наведено залежності змін жорсткостей прокладок при зсуві від величини їх стискання вертикальним навантаженням.

Дослідженнями в лабораторних умовах встановлено жорсткості прикріплювачів проміжних скріплень для дерев'яних та залізобетонних шпал (табл. 4).

Жорсткості прикріплювачів проміжних скріплень

Тип скріплення	Елемент	Жорсткість при стисненні, кН/м	Середньоквадратичне відхилення, кН/м
1	2	3	4
КБ, СКД65-Б, Д-2, СКД65-Д	Пружинна шайба	$0,25 \cdot 10^4$	$0,002 \cdot 10^4$
Д-4	Пружна пластинчаста клема	$1,23 \cdot 10^4$	$0,024 \cdot 10^4$
КППД-2	Пружна пружинна клема КП-2-І	$1,45 \cdot 10^4$	$0,032 \cdot 10^4$
КПП-5	Пружна клема КП-5.2	$0,138 \cdot 10^4$	$0,02 \cdot 10^4$

Проведені експериментальні дослідження дозволили встановити жорсткості рейкових опор при залізобетонних та дерев'яних шпалах. Дослідження показали, що ці жорсткості можуть змінюватись у широких межах.

Так, при залізобетонних шпалах вертикальна жорсткість опор може змінюватись від $3,3 \cdot 10^4$ кН/м до $8,2 \cdot 10^4$ кН/м, горизонтальна поперечна – від $0,96 \cdot 10^4$ кН/м до $2,41 \cdot 10^4$ кН/м, горизонтальна поздовжня – від $0,93 \cdot 10^4$ кН/м до $2,74 \cdot 10^4$ кН/м, жорсткість при крученні рейки – від 136 кНм/рад до 195 кНм/рад.

При дерев'яних шпалах діапазони змін вертикальної жорсткості складають $1,54$ – $2,75 \cdot 10^4$ кН/м, горизонтальної поперечної $0,39$ – $2,25 \cdot 10^4$ кН/м, горизонтальної поздовжньої $0,42$ – $2,54 \cdot 10^4$ кН/м, при крученні рейки – 182–495 кНм/рад.

На рисунках 2 та 3, як приклад, наведено графіки змін просторових жорсткостей найбільш поширених типів рейкових опор – дерев'яні шпали зі скріпленням ДО (рис. 2) і залізобетонні шпали зі скріпленням КБ (рис. 3).

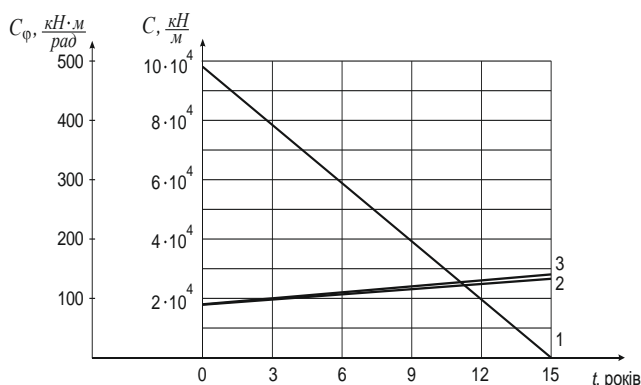


Рис. 2. Зміна просторових жорсткостей рейкових опор при скріпленнях типу ДО під час експлуатації

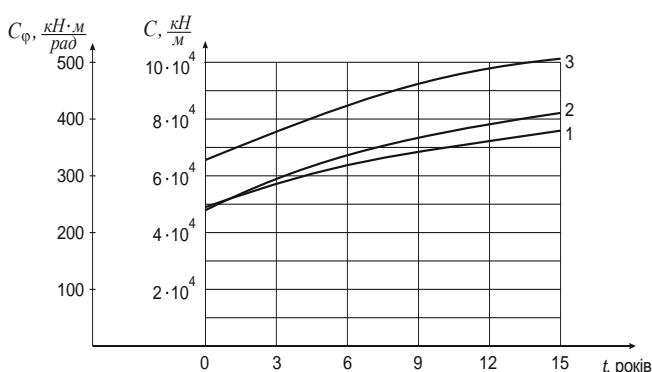


Рис. 3. Зміна просторових жорсткостей рейкових опор при скріпленнях типу КБ, підрейкових прокладках ЦП-260, нашпальних ЦП-153 під час експлуатації

Аналіз умов експлуатації колії показав, що головними чинниками, які впливають на зміни просторових жорсткостей рейкових опор, є терміни її експлуатації.

В четвертому розділі виконано чисельні дослідження впливу параметрів рейкової колії на боковий знос і пошкоджуваність рейок у кривих малих радіусів.

Для узагальнення урахування впливу параметрів рейкової колії в роботі був застосований параметр, який має назву «фактор бокового зносу»

$$\Phi = \frac{N \cdot f \cdot W}{G}, \quad (16)$$

де N – нормальний тиск у точці контакту гребеня колеса і рейки, Н;

f – коефіцієнт тертя ковзання;

W – відносне ковзання гребеня по рейці;

G – площа контакту гребеня і рейки.

Спочатку було досліджено вплив параметрів рейкової колії у кривих малих радіусів, які не мають несправностей плану. Було враховано вплив радіусів кривих, горизонтального поперечного непогашеного прискорення та ширини колії на динамічні процеси взаємодії екіпажа та колії при різних конструкціях підрейкової основи.

Встановлено, що максимальні значення горизонтальних поперечних сил, за відсутності несправностей плану, виникають не у кругових кривих, тобто на ділянці сталого руху екіпажа, а в перехідних кривих, де виникають ударні процеси між гребенями коліс і рейками (рис. 4).

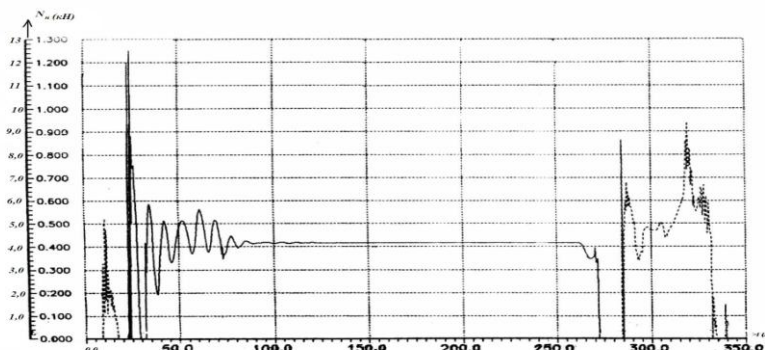


Рис. 4. Графік залежностей напрямних сил під час руху вантажного вагона по кривій радіусом 300 м зі швидкістю 17,7 м/с (колесо № 1)

При змінах радіусів від 650 до 200 м величина напрямних сил зростає в 1,81 разу при дерев'яних шпалах та в 1,71 разу при залізобетонних.

Застосування залізобетонних шпал у кривих радіусом 200–300 м без нерівностей у плані призводить до зростання напрямних сил 18–20 %, сумарного фактору зносу – на 30 %.

Аналіз впливу ширини колії у кривій радіусом 300 м показав, що зміна ширини колії з 1530 мм на 1540 мм привела до зменшення фактору зносу на 18 %.

Дослідження динаміки взаємодії рухомого складу і колії у кривих, які мають локальні стикові та плавні ізольовані нерівності колії у плані, дозволило встановити, що при зміні кутів у стиках від $0,25^{\circ}$ до 2° напрямні сили зростають в

6,87 разу, сумарний фактор зносу – в 2,37 разу. При залізобетонних шпалах сумарний фактор зносу збільшується ще на 38 %. Взаємодія гребеня колеса з головкою рейки носить ударний характер (рис. 5).

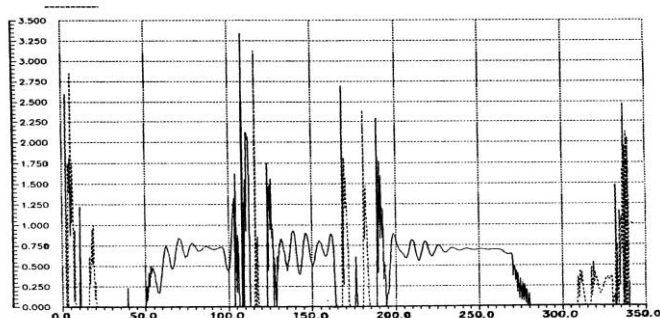


Рис. 5. Графік залежностей напрямних сил на першому за ходом руху колесі в зонах стикових нерівностей

Плавні нерівності колії збільшують сумарний фактор зносу в 8,74 разу і призводять до появи ударних сил, які можуть досягати 122 кН при дерев'яних шпалах і 135 кН при залізобетонних шпалах.

Дослідження впливу гальмівних процесів на динаміку взаємодії показали, що службове гальмування викликає зростання горизонтальних поперечних сил в 2,6 разу при дерев'яних шпалах та в 2,8 разу при залізобетонних. Сумарний фактор зносу зростає в 6,2 разу. Особливо

несприятливим є рекуперативне гальмування, яке викликає зростання сил взаємодії в 3,5–3,8 разу і збільшення сумарного фактору зносу в 9 разів, у порівнянні зі сталим рухом.

Також були виконані дослідження впливу конструкції підрейкової основи на динамічні процеси взаємодії рухомого складу та колії у кривих малих радіусів (табл. 5).

Таблиця 5

Вплив конструкцій підрейкової основи на величини екстремальних сил і сумарний фактор зносу у кривих без нерівностей

Радіус кривої, м	Шпали	Тип скріплення	Екстремальні значення сил у круговій кривій, кН		Сумарний фактор зносу, кН·рад
			напрямних	бокових	
300	дер.	ДО	7,6	17,6	0,252
		Д-2	6,9	16,3	0,236
		Д-4	6,5	15,3	0,219
		СКД65-Д	8,4	19,5	0,279
	з.б.	СКД65-Б	9,9	19,7	0,327
		КПП-5-К	9,6	19,0	0,295
400	дер.	ДО	7,0	17,83	0,128
		Д-2	6,3	14,7	0,106
		Д-4	5,7	13,2	0,095
		СКД65-Д	7,8	18,3	0,132
	з.б.	КБ	9,3	18,6	0,211
		КПП-5	9,1	18,3	0,198

Розрахунки показали, що укладання у кривих малих радіусів залізобетонних шпал зі скріпленням КБ або СКД65-Д викликає збільшення горизонтальних сил до 33 %, зростання сумарного фактору зносу до 71 %, в порівнянні з дерев'яними

шпалами, але застосування залізобетонних шпал дає можливість використання безстикової колії, що передбачає відсутність у таких кривих рейкових стиків і зменшення, таким чином, динамічних показників дії на колію. Застосування скріплень КПП-5 або КПП-5К знижує динамічні сили на 2–4 %, а сумарний фактор зносу – на 4–6 %, в порівнянні зі скріпленнями КБ або СКД65-Б. Було перевірено адекватність розроблених моделей і методів розрахунків шляхом порівняння даних розрахунків та результатів експериментальних робіт, які були виконані кафедрою “Колія та колійне господарство” УкрДУЗТ в 2010–2012 роках.

Експериментальні дослідження проводились під час руху спеціального рухомого складу, який складався з локомотива ТГМ-4 і двох платформ моделі 13-401, що були завантажені щебенем до вагової норми; швидкість руху поступово збільшувалась від 20 до 50 км/год.

Експериментальна ділянка була розташована у круговій кривій $R = 420$ м і з підвищенням зовнішньої рейки на 40 мм.

Горизонтальні поперечні сили, що діяли від рухомого складу на колію, визначались методом Шлупфа, що був удосконалений проф. Е.І. Даніленком.

Результати розрахунків і отриманих експериментальних значень сил наведено на рис. 6. Розбіжності між розрахунковими й експериментальними значеннями знаходились у межах 8,5 %.

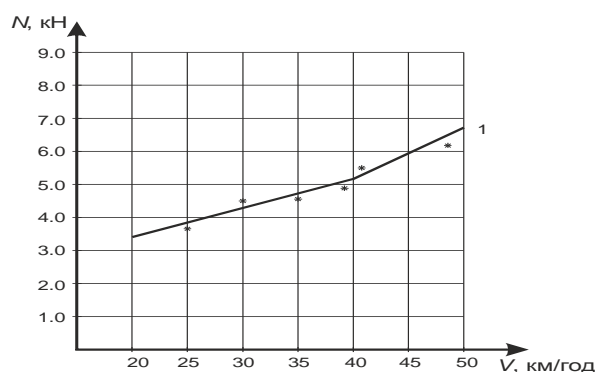


Рис. 6. Графіки залежностей зміни горизонтальних поперечних сил дії вагонів на колію:

1 – платформа 13-401; * – експериментальні значення

Було розроблено рекомендації стосовно практичного використання результатів досліджень, зокрема рекомендації щодо режимів ведення поїздів та рекомендації про застосування конструкції підрейкової основи в різних умовах експлуатації.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертації сформульовано і вирішено важливу науково-технічну проблему підвищення ресурсів роботи рейок в особливих умовах експлуатації залізничних колій у кривих із радіусами 450 м і менше за рахунок встановлення обґрунтованих норм улаштування й експлуатації колії. На підставі проведених досліджень зроблено наступні висновки:

1. Виконано аналіз фактичних умов експлуатації у кривих малих радіусів на залізницях України; встановлено, що більшість таких кривих знаходиться на ділянках із вантажонапруженістю до 15 млн. ткм бруто/км за рік за реалізованих швидкостей руху 60–80 км/год для пасажирських і до 40–60 км/год для вантажних поїздів. Основною конструкцією є ланкова колія на дерев'яних або залізобетонних шпалах. Зроблено припущення про те, що причиною різкого зростання інтенсивності технічних відмов колії у таких кривих стало зростання горизонтальних динамічних поперечних сил, яке було викликане зниженням вимог до утримання колії у кривих у плані.

2. На підставі аналізу розвитку теорії розрахунків взаємодії колії й рухомого складу зроблено висновки, що для умов кривих малих радіусів існуючі практичні методи розрахунків колії не дозволяють визначити реальні значення горизонтальних поперечних сил впливу рухомого складу на колію.

3. Розроблено наукові підходи до вирішення проблеми підвищення ресурсів роботи рейок в особливих умовах експлуатації у кривих малих радіусів, за рахунок визначення норм утримання колії у кривих малих радіусів на підставі досліджень горизонтальних поперечних сил із використанням математичної моделі просторової динамічної системи «екіпаж–колія».

4. Розроблену раніше математичну модель просторової динамічної системи «екіпаж–колія» було адаптовано до умов магістральних доріг, за рахунок використання математичної моделі коливальних балок на багатьох опорах із пружно-дисипативними характеристиками.

5. Набула подальшого розвитку концепція багатошарової підрейкової основи для визначення просторових жорсткостей рейкових опор на дерев'яних і залізобетонних шпалах для різних типів проміжних скріплень. На відміну від проведених раніше досліджень, встановлено вплив вертикальних навантажень на горизонтальні поперечні жорсткості й жорсткості при крученні рейкових опор. За збільшення осьових навантажень від 170 до 210 кН на вісь ці жорсткості зростають до 24 % додатково. У процесі експлуатації відбувається збільшення цих параметрів до 35 %.

6. Для умов експлуатації у кривих малих радіусів виконано чисельними методами дослідження впливу на колію чотиривісних вантажних вагонів. Використання математичної моделі схеми динамічної системи «екіпаж–колія» дозволило враховувати додаткові динамічні сили, викликані дискретністю підрейкової основи і нелінійністю характеристик рейкових опор. Визначено, що вплив цих чинників становить 13–19 % від рівня динамічних сил. Встановлено вплив на рівень горизонтальних поперечних сил і на сумарний чинник зносу рейок конструкції підрейкової основи, радіусів кривих, ширини колії, нерівностей колії у плані та режимів руху поїздів.

Встановлено, що величина ударних горизонтальних сил може перевищувати 150–180 кН.

7. Експериментальні роботи, які було проведено в польових умовах у кривій радіусом 420 м під час руху досліджуваного рухомого складу, який мав точно визначені характеристики (осьові навантаження і швидкості руху), показали

добру збіжність даних теоретичних розрахунків і результатів експериментів, розбіжність знаходиться в межах 8,5 %.

8. На підставі проведених досліджень розроблено практичні рекомендації щодо улаштування й особливостей експлуатації колії у кривих малих радіусів, які дозволять зменшити інтенсивність бокового зносу рейок до 40 % і знизити їх пошкоджуваність іншими видами дефектів.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Yuseph Tuley. Research into parameters of energy loss when trains influence the track with wooden sleepers / Yuseph Tuley, Natalia Bugaets, Alina Malishevskay // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2016. – №1(84). – С. 9-13. *Особистий внесок: адаптація математичної моделі визначення коефіцієнтів дисипації за результатами експериментальних робіт до умов магістральних залізниць.*

Статті у фахових виданнях та збірниках наукових праць, що включені до міжнародних наукометричних баз:

2. Тулей Ю.Л. Математичне моделювання та експериментальні дослідження роботи дерев'яних шпал під дією просторових навантажень / Ю.Л. Тулей // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2016. – № 4. – С. 3–9.
3. Даренский А.Н. Численные исследования влияния параметров рельсовой колеи на боковой износ рельсов в кривых / А.Н. Даренский, Ю.Л. Тулей, Д.А. Потапов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2016. – № 6 (121). – С. 36–42. *Особистий внесок: аналіз результатів чисельних досліджень, встановлення аналітичних залежностей впливу несправностей колії*
4. Даренський О.М. Жорсткість прикріплювачів проміжних скріплень дерев'яних шпал при дії горизонтальних поперечних сил / О.М. Даренський, Ю.Л. Тулей, Д.О. Потапов, А.С. Малішевська // Вісник ДНУЗТ. – 2016. – № 6 (66). – С. 96–101. *Особистий внесок: математична обробка отриманих результатів.*
5. Тулей Ю.Л. Аналіз формування жорсткостей проміжних скріплень типів Д-2, Д-4, КППД-2 та СКД65-Д / Ю.Л. Тулей // Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – 2016. – № 159. – С. 109–117.
6. Тулей Ю.Л. Аналіз просторової жорсткості скріплень ДО / Ю.Л. Тулей // Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – 2015. – № 157. – С. 82–85.
7. Плугин А.Н. Опыт эксплуатации железобетонных шпал с упругими скреплениями, разработанными в УкрГАЗТ / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, Ю.Л. Тулей, С.В. Мирошниченко, О.А. Калинин // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2014. – № 148. – С. 170–175.

Особистий внесок: аналіз конструкцій рейкових скріплень для залізобетонних шпал вітчизняного та закордонного виробництва.

8. Тулей Ю.Л. Определение поперечной стойкости бесстыкового пути с комбинированной рельсошпальной решеткой под действием температурных сил / Ю.Л. Тулей, В.П. Шраменко, А.Н. Штомпель // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2008. – № 91. – С. 170–175.

Особистий внесок: розрахунки стійкості безстыкової колії, аналіз отриманих результатів.

Публікації апробаційного характеру:

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

Особистий внесок: аналіз появи та розвитку дефектів контактано-втомного походження у кривих малих радіусів магістральних залізниць.

10. Тулей Ю.Л. Аналіз формування просторових жорсткостей рейкових опор при дерев'яних шпалах / Ю.Л. Тулей // Збірник наукових праць УкрДУЗТ: тези доповідей. – 2016. – № 160. – С. 90–91.

Додаткові публікації:

11. Даренський О.М. Аналіз розвитку теорій розрахунків залізничної колії / О.М. Даренський, Ю.Л. Тулей, Е.А. Беліков // Залізничний транспорт України. – 2016. – № 1–2. – С. 13–14.

Особистий внесок: теоретично обґрунтовано застосування розрахункової схеми колії як балки на пружно-дисипативних опорах для умов магістральних залізниць.

АНОТАЦІЯ

Тулей Ю.Л. Раціоналізація норм улаштування рейкової колії в кривих малих радіусів для підвищення ресурсів роботи рейок. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.06 – залізнична колія (27 – транспорт). – Український державний університет залізничного транспорту, Харків, 2018.

Дисертація присвячена науковому обґрунтуванню і практичному вирішенню проблеми підвищення ресурсів роботи рейок у кривих із радіусами 450 м і менше шляхом раціоналізації норм улаштування, утримання і експлуатації колії.

На основі даних про інтенсивність технічних відмов колії по боковому зносу зроблено висновок про те, що причинами цього явища є особливості взаємодії колії й рухомого складу в таких кривих.

Як теоретичну модель для розрахунків сил взаємодії колії й рухомого складу було прийнято існуючу математичну модель просторової динамічної системи «екіпаж–колія». В цій моделі колія розглядається як просторова конструкція, яка складається з балок-рейок, які спираються на велику кількість окремих опор-шпал

із нелінійними пружно-дисипативними характеристиками. В існуючу математичну модель було внесено зміни, які враховують інерційні характеристики колії.

Теоретичними й експериментальними дослідженнями в лабораторних умовах та в колії встановлено просторові жорсткості рейкових опор при використанні дерев'яних або залізобетонних шпал та 9 типів проміжних рейкових скріплень, які дозволені до використання у кривих малих радіусів. Зроблено прогнозну оцінку змін просторових жорсткостей рейкових опор під час експлуатації колії.

Виконано чисельні дослідження впливу конструктивних характеристик рейкової колії, норм улаштування й утримання, термінів експлуатації, режимів ведення поїзда на боковий знос і пошкоджуваність рейок дефектами у кривих малих радіусів.

Адекватність розроблених моделей і методів для вирішення поставлених задач підтверджено порівнянням результатів розрахунків з експериментальними даними.

Розроблено практичні рекомендації стосовно улаштування і особливостей експлуатації колії у кривих малих радіусів, які дозволять зменшити інтенсивність зносу і пошкоджуваність рейок дефектами до 40 %.

Ключові слова: ресурси роботи рейок, криві малих радіусів, підрейкова основа, пружно-дисипативні характеристики рейкових опор, взаємодія колії й рухомого складу.

АННОТАЦІЯ

Тулєй Ю.Л. Рационализация норм устройства рельсовой колеи в кривых малых радиусов для повышения ресурсов работы рельсов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.06 – железнодорожный путь (27 – транспорт). – Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, Харьков, 2018.

Диссертация посвящена научному обоснованию и практическому решению проблемы повышения ресурсов работы рельсов в кривых с радиусами 450 м и меньше путем рационализации норм устройства, содержания и эксплуатации пути.

Во **введении** представлена общая характеристика работы, приведены актуальность, связь с научными темами, сформулированы цель и задачи исследований, описаны практическая значимость и научная новизна.

В первом разделе работы сформулирован общий подход к решению проблемы повышения ресурсов работы рельсов в кривых участках малого радиуса. Был сделан вывод, что причинами интенсивности технических отказов пути вследствие бокового износа рельсов и других дефектов контактно-усталостного происхождения на поверхности катания в кривых малых радиусов являются особенности взаимодействия пути и подвижного состава, прежде всего грузовых вагонов. Для определения мер по уменьшению интенсивности бокового

износа и других дефектов нужно установить влияние норм и допусков содержания рельсовой колеи в таких условиях на динамику взаимодействия пути и подвижного состава.

Во втором разделе изложены теоретические основы исследований влияния подвижного состава на путь в кривых малых радиусов. За основу была принята математическая модель пространственной динамической системы «экипаж-путь», которая была разработана проф. А.Н. Даренским для условий промышленного железнодорожного транспорта. Рельсы рассматриваются как балки большой длины, которые опираются на отдельные опоры, что имеют пространственные упруго-диссипативные свойства. Учтена возможность движения по пути колес, которые имеют дисбаланс, неравномерность проката, ползуны и создают ударные силы в стыках. Для учета инерционных свойств пути были рассмотрены его колебания под действием подвижного состава. Предложенная методика определения сил взаимодействия позволила учитывать не только упругие и геометрические характеристики рельсов, жесткости опор, эпюру шпал, а также массу пути, которая принимает участие в ее колебании в любой момент времени. В конце раздела, на основе полученных математических моделей, был определен перечень жесткостей рельсовых опор.

В третьем разделе приведены результаты исследований пространственных жесткостей рельсовых опор при применении деревянных и железобетонных шпал со скреплениями ДО, Д2, Д4, КППД-2, СКД65-Д, КБ, СКД65-Б, КПП-5 и КПП-5-К. Жесткости рельсовых опор при пространственных нагрузках рассматривались как системы последовательно соединенных жесткостей промежуточных скреплений и жесткостей системы «шпала-балласт». В свою очередь пространственные жесткости рельсовых скреплений рассмотрены как системы последовательно и параллельно соединенных жесткостей упругих элементов-прокладок и крепежителей. Определен перечень зависимостей изменений жесткостей упругих элементов, которые необходимо было определить экспериментально. Для определения количественных характеристик изменений динамической жесткости прокладок промежуточных скреплений, вследствие старения, были проведены их испытания, которые были в эксплуатации. Анализ условий эксплуатации пути показал, что главными факторами, которые влияют на изменения пространственных жесткостей рельсовых опор, являются сроки его эксплуатации.

В четвертом разделе выполнены численные исследования влияния параметров рельсовой колеи на боковой износ и повреждаемость рельсов в кривых малых радиусов. Для обобщения учета влияния параметров рельсовой колеи в работе был применен параметр, который имеет название «фактор бокового износа». Было учтено влияние радиусов кривых, горизонтального поперечного непогашенного ускорения, ширины колеи, тормозных процессов, конструкции подрельсовой основы на динамические процессы взаимодействия экипажа и пути при разных конструкциях подрельсового основания. Была проверена адекватность разработанных моделей и методов расчетов путем сравнения данных расчетов и результатов экспериментальных работ. Были

разработаны рекомендации относительно практического использования результатов исследований, в частности рекомендации относительно режимов ведения поездов и рекомендации о применении конструкции подрельсового основания в разных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: ресурсы работы рельсов, кривые малых радиусов, подрельсовое основание, упруго-диссипативные характеристики рельсовых опор, взаимодействие пути и подвижного состава.

ABSTRACT

Tuley, Yu. L. Rationalization of the arrangement, maintenance norms for a rail track in small radius curves to increase the rail operational life. – On the rights of the manuscript.

The thesis for Candidate Degree in Engineering in Speciality 05.22.06 – Railway Track (27 – Transport). Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, 2018.

The thesis deals with scientific rationale and practical solution to the problem of higher operational life of rails laid in curves of a radius of 450m and less by rationalizing the track arrangement, maintenance and operation norms.

On the base of the data on the number of technical failures of the track due to side wear, it was concluded that the reasons were in the special nature of the vehicle/track interaction in curves.

The existing mathematical model of the spatial vehicle/track dynamic system was taken as a theoretical model for calculation of interaction forces between the track and the vehicle. This model considered the track as a spatial structure consisting of beams (rails) rested on many separate rail supports (sleepers) of non-linear elastic-dissipative characteristics. The altered mathematical model considered the track inertia properties.

The theoretical and experimental research, both in laboratories and in the field, made it possible to establish spatial rigidities of rail supports on wooden and reinforced-concrete sleepers and nine types of rail intermediate fastenings allowed only for small radius curves. The predictive estimate of changes in the spatial rigidities of rail supports in operation was conducted.

The numerical research into the influence of rail track structural characteristics, arrangement, maintenance and operational norms, operational terms, train operational modes for side wear, and rail damageability in small radius curves was conducted.

The adequacy of the models and methods to solve the problems was confirmed by comparing the calculation results with the experimental data.

The practical recommendations on the peculiarities of track arrangement and operation in small radius curves were developed; further they may help decrease the rail side wear up to 40 % and reduce damages through other defects.

Keywords: rail operational life, small radius curves, rail foundation, elastic-dissipative characteristics of rail supports, track/vehicle interaction.

ТУЛЕЙ ЮЗЕФ ЛЕОНІДОВИЧ

**РАЦІОНАЛІЗАЦІЯ НОРМ УЛАШТУВАННЯ РЕЙКОВОЇ
КОЛІЇ В КРИВИХ МАЛИХ РАДІУСІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ
РЕСУРСІВ РОБОТИ РЕЙОК**

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Підписано до друку 04.10.2018 р.
Формат 60x84 1/16. Папір для розмножувальних апаратів.
Друк офсетний. Умовн.-друк. арк. 0,9. Обл.-видав. арк. 1,0.
Замовлення № 349. Тираж 110.

Видавництво УкрДУЗТу, свідоцтво ДК № 6100 від 21.03.2018 р.
Друкарня УкрДУЗТу,
61050, Харків–50, пл. Фейербаха, 7