

Український державний університет залізничного транспорту  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ТУЛЕЙ ЮЗЕФ ЛЕОНІДОВИЧ**

УДК. 625.143.482

**ДИСЕРТАЦІЯ**

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

Спеціальність 05.22.06 – залізнична колія

27 – Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Ю.Л. Тулей\_\_\_\_\_

Науковий керівник Даренський Олександр Миколайович,  
доктор технічних наук, професор

Харків – 2018

## АНОТАЦІЯ

Тудей Ю.Л. Раціоналізація норм улаштування рейкової колії в кривих малих радіусів для підвищення ресурсів роботи рейок. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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

Представлена робота присвячена вирішенню науково-технічної проблеми підвищення ресурсів роботи рейок в особливих умовах експлуатації залізничних колій в кривих з радіусами 450 м і менше за рахунок встановлення обґрунтованих норм улаштування, утримання та експлуатації колії. Актуальність теми дисертаційної роботи зумовлена визначенням причин високої інтенсивності розвитку дефектів контактано-втомного походження, в тому числі бокового зносу головок рейок, та розробка заходів, які реально сповільняють такі процеси у кривих ділянках колії малих радіусів, а також дозволяють підвищити терміни служби рейок, скоротити потребу в них та зменшити затрати праці при поточному утриманні й дати значний економічний ефект.

**Зміст дисертації.** 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.

**В першому розділі** роботи сформульовано загальний підхід до вирішення проблеми підвищення ресурсів роботи рейок у кривих ділянках малого радіуса. На основі даних про інтенсивність технічних відмов колії по бічному зносу рейок та іншим дефектам на поверхні кочення, було зроблено висновок, що причинами цього є особливості взаємодії колії і рухомого складу, серед яких надмірно великі рівні горизонтальних динамічних сил, значно більші кути набігання коліс на рейки та великі градієнти кривизни колії в зонах горизонтальних нерівностей.

На основі аналізу конструкцій та фактичних умов експлуатації колії в кривих

малих радіусів встановлено, що найбільш вживаною конструкцією в таких кривих є ланкова колія на дерев'яних або залізобетонних шпалах. Майже 80 % колій в кривих експлуатується на ділянках з вантажонапруженістю до 15 млн. ткм бруто/км за рік при швидкостях руху пасажирських поїздів до 80 км/год і вантажних до 60 км/год.

Аналіз існуючих моделей і методів розрахунків сил взаємодії рухомого складу і колії, розрахунків напруженого стану елементів колії показав, що в більшості моделей використовуються плоскі розрахункові схеми в яких колія розглядаються як балка великої довжини на суцільній пружній основі. За необхідності результати розрахунків поєднуються з використанням принципу суперпозиції.

Але, за думкою ряду вчених, в особливих умовах експлуатації в кривих малих радіусів принцип суперпозиції неможливо використовувати, оскільки рівень вертикальних навантажень на підрейкові основи суттєво впливає на пружно-дисипативні характеристики цієї основи в горизонтальній площині. Це в свою чергу суттєво впливає на рівень горизонтальних сил.

**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». В цій моделі колія розглядається як просторова конструкція, яка складається з балок-рейок, що спираються на багато окремих рейкових опор-шпал з нелінійними пружно-дисипативними характеристиками. В існуючу математичну модель були внесені зміни, які враховують інерційні властивості колії. Розглянуто кінетичні й силові зв'язки між елементами підсистеми «екіпаж». Враховано нелінійні сили сухого тертя у фрикційних погашувачах коливань, можливість «валяння» кузова на сковзуни 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 сковзунах виявляються більшими за суму моментів горизонтальних реакцій ресорних комплектів і моментів поздовжніх і поперечних сил взаємодії коліс екіпажа з рейками.

Для врахування інерційних властивостей було складено розрахункові рівняння коливань рейки, як балки, яка має інерційні характеристики, на багатьох пруж-

них опорах під дією рухомого навантаження. Загальна розрахункова система рівнянь була вирішена у матричному вигляді за допомогою методу Крамера. На основі розроблених математичних моделей було визначено перелік просторових жорсткостей рейкових опор, які необхідні для розрахунків. 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 або залізобетонних шпал та дев'яти типів проміжних скріплень, які були розглянуті як системи з послідовно та паралельно з'єднаних жорсткостей пружних елементів скріплень та системи «шпала–баласт».

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

Дослідженнями в лабораторних умовах встановлено жорсткості пружних елементів проміжних скріплень-прокладок, пружних шайб або клем при статичному або динамічному навантаженні. Зроблена прогнозна оцінка змін цих параметрів під час експлуатації колії.

Експериментальні дослідження в колії дозволили встановити емпіричні залежності змін жорсткостей системи «шпала–баласт» для залізобетонних та дерев'яних шпал від термінів експлуатації колії. Встановлено вплив осьових навантажень на ці параметри.

Проведені дослідження дозволили встановити не тільки жорсткості рейкових опор, а також прогнозувати зміни під час експлуатації колії. Аналіз цих умов по-

казав, що головними чинниками, які впливають на зміни просторових жорсткостей рейкових опор, є терміни її експлуатації.

**В четвертому розділі** виконано чисельні дослідження впливу конструктивних характеристик рейкової колії, норм улаштування і утримання, термінів експлуатації, режимів ведення поїздів на боковий знос і пошкоджуваність рейок в кривих малих радіусів. Для узагальнення впливу силових і геометричних параметрів взаємодії рухомого складу і колії було використано параметр, який в сучасній літературі має назву «фактор бокового зносу».

Досліджено вплив радіусів кривих, горизонтального непогашеного прискорення, ширини колії, плавних ізольованих та стикових нерівностей, типів шпал, проміжних скріплень, режимів ведення поїздів.

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

Адекватність запропонованих моделей і методів для вирішення поставлених задач підтверджена порівнянням розрахункових результатів з експериментальними даними. Ці 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.

Розроблено практичні рекомендації про улаштування і особливості експлуатації колії в кривих малих радіусів, які дозволять зменшити інтенсивність бокового зносу рейок до 40 % і зменшити їх пошкоджуваність іншими видами дефектів.

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

## ABSTRACT

Tuley, Yu. L. Rationalization of the arrangement, maintenance norms for a rail track in small radius curves to increase the rail operational life. – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for the degree of a candidate in technical sciences (doctor of philosophy) in the specialty 05.22.06 “Railway track” (27 – Transport). – Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, 2018.

The work is devoted to solving the scientific and technical problem of increasing the resources of the work of rails in the special conditions of operation of railway tracks in curves with radii of 450 m or less due to the establishment of reasonable norms for the arrangement, maintenance and operation of the track. The urgency of the topic of the dissertation is determined by the definition of the causes of the high intensity of the defects of contact-fatigue origin, including the lateral wear of the rails, and the development of measures that will actually slow down such processes in curved sections of the small radius, as well as increase the service life of the rails, reduce the need in them, to reduce labor costs while maintaining maintenance and give a significant economic effect.

**The content of the dissertation.** The introduction substantiates the relevance of the topic, formulates the purpose and objectives of the study, shows the connection of work with scientific programs, plans and themes, reviews the scientific novelty, relevance and practical significance of the results.

**In the First Chapter** of the work the general approach to solving the problem of increasing the resources of work of rails in curves in small-radius areas is formulated. On the basis of the data on the intensity of the technical failure of the track on the side wear of the rails and other defects on the rolling surface, it was concluded that the reasons for this are the features of the interaction of the track and rolling stock, including excessively large levels of horizontal dynamic forces, much larger angles of wheel run on the rails and large gradients of curvature of the track in the zones of horizontal inequalities.

Based on the analysis of constructions and actual conditions of operation of the

track in the curves of small radii, it has been established that the most used construction in such curves is the lane track on wooden or reinforced sleepers. Almost 80 % of the tracks in the curves are operated on areas with a cargo intensity of up to 15 million tkm gross/km per year at speeds of passenger trains up to 80 km/h and freight up to 60 km/h.

An analysis of existing models and methods for calculating the forces of interaction between the rolling stock and the track, calculations of the stressed state of the elements of the track showed that in most models, flat calculation schemes are used in which the track is considered as a beam of large length on a solid elastic basis. If necessary, the results of calculations are combined with the use of the principle of superposition.

But, according to a number of scientists, in the special conditions of operation in the curves of small radii, the principle of superposition can not be used, since the level of vertical loads on the submarine bases substantially affects the elastic-dissipative characteristics of this basis in a horizontal plane. This in turn significantly affects the level of horizontal forces.

**In the Second Chapter** the theoretical bases of studies of the impact of rolling stock on the track in the curves of small radii are described. The basis was a mathematical model of the spatial dynamic system "crew-track". In this model, the track is considered as a spatial structure, which consists of beam rails, based on many separate rail sleepers with nonlinear elastic-dissipative characteristics. Changes have been made to the existing mathematical model that take into account the inertial properties of the track. The kinetic and power relations between elements of the "crew" subsystem are considered. The nonlinear forces of dry friction in the friction bearers of the oscillations, the possibility of "rolling" the body on the sliders and the forces and moments of the forces of interaction between the body and the carriages arising therewith are taken into account. The nonlinearity of bonds is taken into account when the moments of frictional forces on the heels and sliders are greater than the sum of the moments of the horizontal reactions of the spring kits and the moments of the longitudinal and transverse forces of the interaction of the wheels of the crew with the rails.

In order to take into account the inertial properties, the calculated equations of the fluctuations of the rails, such as beams, which have inertial characteristics, were compiled on many elastic supports under the action of a moving load. The general calculation system of the equations was solved in a matrix form using the Cramer method. On the basis of the developed mathematical models, a list of the spatial stiffness of the rail supports, which are necessary for the calculations, was determined. The proposed method for determining the interaction forces allowed to take into account not only the elastic and geometric characteristics of the rails, the rigidity of the supports, the jointing diagram, as well as the mass of the track, which participates in its oscillation at any time  $t$ .

At the end of the section, on the basis of the obtained mathematical models, a list of stiffnesses of rail bearings was determined.

**The Third Chapter** presents the results of investigations of the spatial stiffness of rail supports in the application of wooden or reinforced sleepers and nine types of intermediate fasteners, which were considered as systems of successively and parallel connected stiffnesses of elastic fasteners and the system of "sleeper-ballast".

A list of dependences of changes in the stiffnesses of elastic elements, which had to be determined experimentally, was determined. During operation, changes in the physical and mechanical characteristics of polymeric materials, including rubber and polyurethane, are taking place. To determine the quantitative characteristics of changes in the dynamic stiffness of the spacers of intermediate fasteners as a result of aging, tests of the gaskets in service were carried out.

Research in laboratory conditions has established stiffness of elastic elements of intermediate fasteners, gaskets, elastic washers or clamps at static or dynamic load. Projected estimation of changes of these parameters during the operation of the track is made.

Experimental studies in the track allowed to establish the empirical dependence of changes in the stiffnesses of the "railroad ballast" system for reinforced concrete and wooden sleepers from the duration of the operation of the track. The influence of axial loads on these parameters is established.

The conducted studies allowed to establish not only the stiffness of the rail sup-



ports, but also to predict changes during the operation of the track. Analysis of these conditions showed that the main factors that influence the changes in the spatial stiffness of the rail supports are the terms of its operation.

**In the Fourth Chapter**, numerical studies of the influence of the structural characteristics of the rail track, the rules of arrangement and maintenance, the terms of operation, the modes of trains for lateral wear and damaged rails in the curves of small radii have been completed. In order to generalize the influence of power and geometric parameters of the interaction of rolling stock and the track, the parameter used in modern literature is called "the factor of lateral wear".

The influence of curves radii, horizontal unpaired acceleration, track width, smooth insulated and joints inequalities, types of sleepers, intermediate fastenings, modes of trains is studied.

It was established that the maximum values of horizontal transverse forces, in the absence of malfunctions of the plan, arise not in circular curves, that is, in the area of steady crew movement, but in transient curves, where there are shock processes between the crests of wheels and rails. Studies were also carried out on the effect of the sub-frame construction on the dynamic processes of the interaction of the rolling stock and the track in the curves of small radii.

The adequacy of the proposed models and methods for solving the problems is confirmed by comparing the calculated results with the experimental data. These studies were conducted during the movement of a special rolling stock, which consisted of the locomotive TGM-4 and two platforms model 13-401, loaded with crushed stone to the weight norm; the speed of the movement gradually increased from 20 to 50 km/h. The experimental site was located in a circular curve  $R = 420$  m and with an increase in the outer rail of 40 mm.

Practical recommendations on the arrangement and features of the operation of the track in the curves of small radii are developed, which will reduce the intensity of lateral wear of rails to 40 % and reduce their damage by other types of defects.

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

**Список публікацій здобувача:**

1. Тулей Ю.Л. Визначення поперечної стійкості безстикової колії з комбінованою рейко-шпальною решіткою під дією температурних сил / Ю.Л. Тулей, В.П. Шраменко, А.М. Штомпель // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – Харків, 2008. – Вип. 91. – С. 8-14.
2. Пługін А.М. Досвід експлуатації залізобетонних шпал з пружними скріпленнями, розробленими в УкрДАЗТ / А.М. Пługін, А.А. Пługін, Ю.Л. Тулей, С.В. Мирошніченко, О.А. Калінін // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – Харків, 2014. – Вип. 148. – С. 92-103.
3. Тулей Ю.Л. Аналіз просторової жорсткості скріплень ДО / Ю.Л. Тулей // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – Харків, 2015. – Вип. 157. – С. 82-86.
4. Даренський О.М. Аналіз розвитку теорій розрахунків залізничної колії / О.М. Даренський, Ю.Л. Тулей, Е.А. Беліков // Залізничний транспорт України. – Київ, 2016. – Вип. 1-2. – С. 14-19.
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 Українського державного університету залізничного транспорту. – Харків, 2016. – Вип. 159. – С. 109-117.
6. 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 // Вістник ДНУЗТ. – Дніпропетровськ, 2016. – Вип. 6 (66). – С. 96-104.
7. Тулей Ю.Л. Аналіз формування просторових жорсткостей рейкових опор при дерев'яних шпалах / Ю.Л. Тулей // Збірник тез доповідей 78 міжнародної науково-технічної конференції – Харків: УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 160. – С. 90-91.
8. Yuseph Tuley. Research into parameters of energy loss when trains influence the track with wooden sleepers / Yuseph Tuley, Natalia Bugaets, Alina Malishevskaya //

Східно-Європейський журнал передових технологій, 2016. – № А6/1(84). – рр. 9-13.

9. 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: збірник наукових статей. – Харків, 2016. – Вип. 4. – С. 3-9.
10. 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: збірник наукових статей. – Харків, 2016. – Вип. 6 (121). – С. 36-42.
11. 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. – DYN-WIND 2017. MATEC Web of Conference. Volume 116, 03001 (2017).

## ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ВСТУП .....	15
РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСІВ РОБОТИ РЕЙОК В КРИВИХ МАЛОГО РАДІУСУ .....	20
Аналіз можливих напрямків рішення даної проблеми .....	20
Аналіз фактичних умов експлуатації колій в кривих малих радіусів на залізницях України .....	28
Аналіз розвитку теорій взаємодії колії та рухомого складу в кривих .....	31
Висновки за розділом 1, мета і завдання досліджень .....	37
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ СИЛ ВЗАЄМОДІЇ КОЛІЇ І РУХОМОГО СКЛАДУ В КРИВИХ .....	40
2.1. Вибір розрахункової схеми динамічної системи «екіпаж–колія». Загальні положення і допущення математичної моделі системи .....	40
Розрахункова схема підсистеми «екіпаж» і складання системи диференціальних рівнянь її руху .....	44
Силкові і кінематичні зв'язки в підсистемі «екіпаж».....	47
Вплив поздовжніх сил тяги на роботу підсистеми «екіпаж» .....	50
Вертикальні силкові і кінематичні зв'язки підсистем «екіпаж» і «колія».....	52
Умови контакту коліс і рейок в горизонтальній площині. Горизонтальні силкові і кінематичні зв'язки підсистем «екіпаж» і «колія».....	56
Розрахункові геометричні параметри рейкової колії.....	66
Приведена жорсткість колії в вертикальній і горизонтальній площинах. Приведений коефіцієнт дисипації колії.....	70
Висновки за розділом 2 .....	82
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЖОРСТКОСТЕЙ РЕЙКОВИХ ОПОР... ..	84
Формування просторових жорсткостей рейкових опор.....	84
Формування просторових жорсткостей проміжних рейкових скріплень... ..	87
Жорсткості скріплення типу ДО .....	87

	13
Жорсткості скріплень типів Д-2, Д-4, КППД-2 та СКД65-Д.....	91
Жорсткості скріплень типу КБ і СКД65-Б .....	101
Жорсткості скріплень КПП-5 і КПП-5-К.....	104
Експериментальне визначення жорсткостей елементів рейкових опор .....	106
Просторові жорсткості системи «шпала–баласт» .....	106
Вертикальна жорсткість .....	106
Горизонтальна поперечна жорсткість.....	112
Експериментальне визначення коефіцієнтів постілі підкладок проміжних скріплень для дерев'яних шпал (ДО, Д-2, Д-4, КППД-2, СКД65-Д)... ..	116
Експериментальне визначення жорсткості прокладок проміжних скріплень	119
Експериментальне визначення жорсткості прикріплювачів .....	127
Жорсткість прикріплювачів в скріпленнях для дерев'яних шпал.....	127
Жорсткості прикріплювачів в скріпленнях для залізобетонних шпал... ..	132
Зміни жорсткостей рейкових опор в процесі експлуатації колії.....	135
Висновки за розділом 3 .....	140
<b>РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ РЕЙКОВОЇ КОЛІЇ НА БОКОВИЙ ЗНОС І ПОШКОДЖУВАНІСТЬ РЕЙОК В КРИВИХ МАЛИХ РАДІУСІВ .....</b>	<b>142</b>
Загальні положення проведених чисельних досліджень .....	142
Розрахунки динаміки взаємодії колії і рухомого складу в кривій, яка не має нерівностей в плані.....	144
Вплив радіусу кривої на динамічні процеси зміни .....	144
Вплив зміни горизонтального поперечного непогашеного прискорення на динамічні процеси взаємодії екіпажа і колії .....	148
Вплив змін ширини колії на динамічні процеси взаємодії екіпажа і колії	150
Дослідження динамічних сил в кривих з урахуванням локальних стикових і плавних ізольованих нерівностей колії в плані.....	151

Вплив гальмівних процесів в поїзді на динаміку взаємодії колії і розрахункового вагону в кругових кривих .....	158
Вплив конструкції підрейкової основи на динамічні процеси взаємодії колії і розрахункового вагону в кругових кривих.....	160
Експериментальна перевірка адекватності розроблених моделей і методів розрахунків .....	163
Рекомендації по використанню результатів досліджень динамічних процесів взаємодії рухомого складу і колії в кривих малих радіусів .....	170
Висновки за розділом 4 .....	173
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	175
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	177
ДОДАТКИ.....	194

## ВСТУП

**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 проблеми 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 поставлені 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 контактно-втомного походження. Визначити допустимі швидкості руху поїздів за наявності несправностей плану колій.

**Об'єкт дослідження** – процеси бокового зносу та виникнення інших дефектів контактно-втомного походження в рейках в кривих малого радіусу.

**Предмет дослідження** – вплив горизонтальних поперечних сил на боковий знос та виникнення інших дефектів контактно-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 фактора 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 контактено-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.

**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; 1 публікація апробаційного характеру у матеріалах конференції, що індексуються в Scopus; 1 – тези доповідей на конференції; 1 – додаткова публікація.

**Структура дисертації.** Дисертація складається з анотації українською та англійською мовами, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Дисертація викладена на 200 сторінках друкованого тексту і містить 162 – сторінки основного тексту, 25 – таблиць, 60 – рисунків, 165 – найменувань літератури, 2 додатки на 3 сторінках.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Даніленко Е.І. Дослідження проміжних рейкових скріплень для залізобетонних шпал на витривалість при впливі циклічного навантаження [Текст] / Е.І. Даніленко // Збірник наукових праць КУЕТТ, серія “Транспортні системи і технології”. – К.: КУЕТТ: – 2005. – С. 26-38.
2. Технічні вказівки щодо оцінки стану рейкової колії за показниками колієвимірних вагонів та забезпечення безпеки руху поїздів при відступах від

норм утримання рейкової колії [Текст]. – К.: (ЦП-0267), 2012. – 46 с.

3. Тимошенко С.П. К вопросу о прочности рельсов // В кн. Прочность и колебания элементов конструкций. – М.: изд. “Наука”, 1975. – С. 322–358.
4. Годыцкий-Цвирко А.М. Взаимодействие пути и подвижного состава // Монография. – М.: Гострансиздат, 1931. – 215 с.
5. Ершков О.П. Динамическая оценка отступлений в содержании железнодорожного пути и дальнейшее ее совершенствование [Текст] / О.П. Ершков // Труды ВНИИЖТ. – М.: Транспорт, 1989. – С. 46.
6. Ершков О.П. Построение графиков удельных характеристик и графиков паспортов вписывания железнодорожных экипажей (теоретическая часть) [Текст] / О.П. Ершков // Труды ЦНИИ. – М.: Трансжелдориздат, 1963. – № 268. – 215 с.
7. Вериго М.Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава [Текст] / М.Ф. Вериго, В.Н. Данилов, Е.М. Бромберг, М.А. Фришман. – М.: Трансжелдориздат, 1956. – С. 280.
8. Холодецкий А.А. Исследование влияния внешних сил на верхнее строение железнодорожного пути [Текст] / А.А. Холодецкий // Инженер, 1896.– № 12. – С. 507–517, 1897. – № 1. –С. 8–22, № 2. – С. 66–76, № 3. – С. 124–131, № 4. – С. 183–193.
9. Холодецкий А.А. Об износе железнодорожных рельсов в зависимости от напряжений, появляющихся в них при действии подвижной нагрузки [Текст] / А.А. Холодецкий. // Инженер, 1888. – № 6. – С. 224–235.

10. Шахунянц Г.М. Железнодорожный путь [Текст]: монография / Г.М. Шахунянц. – М.: Транспорт, 1987. – 479 с.
11. Вериго М.Ф. Определение динамического модуля пути [Текст] / М.Ф. Вериго // Техника железных дорог. – 1949. – №12. – С. 23–24.
12. Яковлев В.Ф. Исследование контактных напряжений в элементах колеса и рельса при действии вертикальных и касательных сил [Текст] / В.Ф. Яковлев // Труды ЛИИЖТ. – № 187. – С. 3–89.
13. Яковлев В.Ф. О применимости теории Герца-Беляева к расчету контактных напряжений в боковых выкружках головки рельса и гребня колеса [Текст] / В.Ф. Яковлев // Труды ЛИИЖТ. – 1963. – № 210. – С. 121–123.
14. Яковлев В.Ф., Кудрявцев И.А. Влияние схемы приложения нагрузок на контактную выносливость рельсов [Текст] / В.Ф. Яковлев, И.А. Кудрявцев // Вестник ВНИИЖТ. – 1977. – № 1. – С. 33–36.
15. Правила розрахунків залізничної колії на міцність в стійкість [Текст] / Е.І. Даніленко, В.В. Рибкін. – К.: Транспорт України, 2006. – 168 с.
16. Даніленко Е.І. Забезпечення поперечної стійкості колії проти розпирання при сучасних конструкціях проміжних рейкових скріплень [Текст] / Е.І. Даніленко // Збірник наукових праць ДЕТУТ, серія “Техніка, технології” – 2008. – № 12. – С. 40–41.
17. Даніленко Е.І. Сучасні рейкові пружні скріплення і особливості вимог до вітчизняних скріплень на залізобетонних шпалах [Текст] / Е.І. Даніленко, М.Д. Костюк, О.М. Жученко // Залізничний транспорт України. – 2002. – № 6. – С. 3–12.
18. Даніленко Е.І. Вибір раціональних параметрів пружності для вітчизняних скріплень на залізобетонних шпалах [Текст] / Е.І. Даніленко, М.Д. Костюк, О.М. Жученко // Збірник наукових праць КУЕТТ, серія “Транспортні системи і технології”. – 2003. – № 1-2. – С. 4–17.
19. Даниленко Э.И. Неровности на крестовинах Р65 1/11 с непрерывной поверхностью катания и обоснование норм износа [Текст] / Э.И. Даниленко, В.И. Абросимов, А.Н. Трофимов, Г.В. Агафонов, Л.Н. Фролов // Межвузовс-

- кий сборник научных трудов. – Днепропетровск: ДИИТ, 1985. – № 6. – С. 63–75.
20. Даниленко Э.И. Расчетно-теоретический метод определения упруго-динамических параметров для обычной конструкции пути и многониточных путей // межвузовский сборник научных трудов. Исследования взаимодействия пути и подвижного состава. – Днепропетровск, 1997. – С. 32–41.
  21. Даниленко Э.И. Некоторые теоретические и практические вопросы, связанные с внедрением стрелочных переводов на железобетонных брусьях / межвузовский сборник научных трудов. Исследования взаимодействия пути и подвижного состава // Э.И. Даниленко, В.П. Гнатенко, В.И. Черник, Н.Н. Шавловский. – Днепропетровск, 1997. – С. 20–31.
  22. Даниленко Э.И. Стрелочные переводы железных дорог Украины (Технология производства, эксплуатации в пути, расчета и проектирования) [Текст] / Э.И. Даниленко, С.Д. Тараненко, А.П. Кутах. – К.: Киевский институт инженеров железнодорожного транспорта, 2001. – 296 с.
  23. Данович В.Д. Колебания рельса как балки бесконечной длины, лежащей на упругом основании, с учетом неупругих сопротивлений [Текст] / В.Д. Данович, В.Н. Поньрко // Труды ДИИТа. – 1984. – № 235/26. – С. 59–65.
  24. Львовский В.В. Математическая модель подрельсового основания для исследований взаимодействия пути и подвижного состава [Текст] / В.В. Львовский, М.А. Фришман // Труды ДИИТа. – 1977. – № 188/18. – С. 69–81.
  25. Львовский В.М. Колебания балки лежащей на двухслойном неравножестком основании, под действием сосредоточенных подвижных нагрузок [Текст] / В.М. Львовский, Н.П. Настечин // Труды ДИИТа. – 1977. – № 188/18. – С. 44–48.
  26. Шульман З.А. Исследование силового воздействия движущейся вертикальной нагрузки на путь [Текст] / З.А. Шульман // Труды ДИИТа. – 1980. – № 209/22. – С. 54–68.
  27. Липовский Р.С. Определение динамических параметров пути по эксперимен-

- тальным частотным характеристикам [Текст] / Р.С. Липовский, В.Д. Данович // Труды ДИИТа. – 1979. – № 207/21. – С.70–77.
28. Коган А.Я. Влияние конструкции и состояния пути на устойчивость колеса [Текст] / А.Я. Коган, Г.И. Матусовский // Вестник ВНИИЖТ. – 1982. – № 8. – С. 42–44.
29. Керр А. Новые уравнения для реакции пути на шпалах в поперечной плоскости [Текст] / А. Керр, А. Зарембски / Железные дороги мира. – 1987. – № 10. – С. 52–58.
30. Волошко Ю.Д. Расчет рельса как балки на дискретных упругих опорах со случайными характеристиками [Текст] / Ю.Д. Волошко // Труды ДИИТ. – 1977. – № 196/19. – С. 93–98.
31. Волошко Ю.Д. Рельсовый путь с блочными железобетонными опорами [Текст] / Ю.Д. Волошко, А.М. Микитенко. – М.: Транспорт, 1980. – 176 с.
32. Клинов С.И. Динамическая модель пути переменной жесткости и его расчет под действием вертикальных сил [Текст] / С.И. Клинов, Е.Н. Курбацкий, А.И. Бондаренко, Д.Д. Захаров // Вестник ВНИИЖТ. – 1988. – № 4. – С. 52–54.
33. Никеров Н.С. Исследование сил взаимодействия рельсовых нитей и подрельсовых шпальных оснований // Труды ЛИИЖТ. – Л.: Транспорт, 1977. – № 416. – С. 40–47.
34. Никеров Н.С. Метод расчеты пути на горизонтальные продольные силы / Н.С. Никеров, В.В. Гниломедов // Труды ЛИИЖТа. – Л.: ЛИИЖТ, 1977. – № 416. – С. 26–35.
35. Семёнов И.И. Исследование напряженно-деформированного состояния элементов верхнего строения пути на основе пространственной расчетной схемы / И.И. Семёнов, Н.С. Никеров // Труды ЛИИЖТ. – Л.: Транспорт, 1971. – № 28. – С. 43–61.
36. Никеров Н.С. Изгибные напряжения в рельсах и давления на шпалы при воздействии на путь миксерных чугуновозов // Межвузовский сборник научных трудов. – Л.: ЛИИЖТ, 1978. – С. 13–17.



37. Вериго М.Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава в кривых малого радиуса и борьба с боковым износом рельсов и гребней колёс [Текст] / М.Ф. Вериго. – М.: ПКТБ ЦП МПС. – 1997. – 207 с.
38. Шахунянц Г.М. Расчеты элементов верхнего строения пути на прочность [Текст]: учебник / Г.М. Шахунянц. – М.: МИИТ, 1939. – 154 с.
39. Степкин С.А. О местных напряжениях в рельсах при кручении [Текст] / С.А. Степкин // Сборник трудов ЛИИЖТ. – 1937. – № 127. – С. 47–69.
40. Ангелейко В.И. Вывод основных уравнений для расчета рельса в горизонтальной и вертикальной плоскостях [Текст]: монография / В.И. Ангелейко. – Х.: ХИИТ, 1958. – 38 с.
41. Ангелейко В.И. О предпосылках для разработки наставления по расчету верхнего строения пути [Текст] / В.И. Ангелейко // Техника железных дорог. – 1949. – № 6. – С. 12–24.
42. Ангелейко В.И. К вопросу о влиянии поперечных горизонтальных сил на напряжения в рельсе [Текст] / В.И. Ангелейко. – Х.: ХИИТ, 1953. – 131 с.
43. Ангелейко В.И. О влиянии поперечных горизонтальных сил на напряжения в рельсе [Текст] / В.И. Ангелейко // Труды ХИИТ. – Трансжелдориздат, 1956. – № 26. – С. 112–142.
44. Климов В.И. Статический расчет пути как балки на опорах с нелинейной жесткостью [Текст] / В.И. Климов, В.В. Рыбкин // Труды ДИИТ. – 1984. – № 235/26. – С. 3–8.
45. Яковлев В.Ф. Исследование сил взаимодействия колеса и рельса с учетом нелинейных односторонних связей и переменных масс [Текст] / В.Ф. Яковлев, И.И. Семенов // Труды ЛИИЖТ. – 1964. – № 238. – С. 46–95.
46. Клинов С.И. Динамическая модель пути переменной жесткости и его расчет под действием вертикальных сил [Текст] / С.И. Клинов, Е.Н. Курбацкий, А.И. Бондаренко, Д.Д. Захаров // Вестник ВНИИЖТ. – 1988. – № 4. – С. 52–54.
47. Васютинский А.Л. Наблюдения над упругими деформациями железнодорожного пути [Текст] / А.Л. Васютинский // Сборник института инженеров путей

сообщения С.-Петербург, 1899. – 130 с.

48. Першин С.П. Вертикальная жесткость пути и его надежность [Текст] / С.П. Першин // Путь и путевое хозяйство. – 1996. – № 8. – С. 8–10.
49. Белых К.Д. Вариационный метод расчета рельса как пространственной конструкции верхнего строения пути [Текст] / К.Д. Белых, П.П. Гонтаровский // Труды ДИИТ. – 1972. – № 138. – С. 129–138.
50. Белых К.Д. К вопросу расчета рельса по методу предельных состояний на базе пространственной расчетной схемы в условиях промтранспорта [Текст] / К.Д. Белых // Труды ДИИТ. – 1975. – № 167/16. – С. 113–119.
51. Белых К.Д. О нагрузках от колёс при расчете железнодорожного пути [Текст] / К.Д. Белых, М.К. Уманов, Г.Н. Малышко // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 1976. – № 5. – С. 78–79.
52. Белых К.Д. Теория расчета и исследование напряженно-деформированного состояния железнодорожного пути на металлургических заводах [Текст]: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / К.Д. Белых. – Л.: ЛИИЖТ. – 1979. – 41 с.
53. Даренський О.М. Теоретичні та експериментальні дослідження роботи залізничних колій промислового транспорту: монографія [Текст] / О.М. Даренський // Харків: УкрДАЗТ. – 2011. – 204 с.
54. Даренський О.М. Статические характеристики случайных вертикальных неровностей пути в условиях промышленного транспорта [Текст] / О.М. Даренський // ІКСЗТ. – 2007. – № 3. – С. 2–4.
55. Даренський О.М. Оценка влияния кривых на статистические характеристики горизонтальных неровностей пути в условиях промышленного транспорта [Текст] / О.М. Даренський // ІКСЗТ. – 2007. – № 4. – С. 2–4.
56. Ершков О.П. Расчет поперечных горизонтальных сил в кривых [Текст] / О.П. Ершков // Труды ВНИИЖТ. – М.: Транспорт, 1966. – № 301. – 235 с.
57. Коган А.Я. Вертикальные динамические силы, действующие на путь [Текст] / А.Я. Коган // Труды ЦИИТ МПС. – М.: Транспорт, 1969. – 206 с.
58. Петров Н.П. Постепенное развитие и современное состояние вопроса о на-

- пряжениях, вызываемых в рельсе вертикальными силами [Текст] / Н.П. Петров // Железнодорожное дело. – 1904. – № 5. – С. 43–51.
59. Петров Н.П. Напряжения в рельсах от изгибов в вертикальной плоскости и вероятность определения этих напряжений опытами [Текст] : монография / Н.П. Петров. – С-Петербург, 1906. – 107 с.
60. Петров Н.П. Напряжения в рельсах от вертикальных давлений катящихся колес. Влияние скорости и неправильного вида колес [Текст]: монография / Н.П. Петров. – С-Петербург, 1907. – 120 с.
61. Петров Н.П. Влияние поступательной скорости на напряжения в рельсе / Н.П. Петров // Записки РТО, кн. 2-я. – С. – Петербург, 1903. – 89 с.
62. Поперечные горизонтальные силы, действующие на путь в прямых участках [Текст]: под ред. А.Я. Когана. – Труды ВНИИЖТ. – М.: Транспорт, 1979. – № 619. – 88 с.
63. Вериго М.Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава [Текст] / М.Ф. Вериго, А.Я. Коган. – М.: Транспорт, 1986. – 599 с.
64. Яковлева Т.Г Железнодорожный путь [Текст]: учеб. для студентов вузов / под ред. Т.Г. Яковлева. – М.: Транспорт, 2001. – 407 с.
65. Лазарян В.А. Изгибные колебания кузова полувагона в вертикальной и горизонтальной плоскостях [Текст] / В.А. Лазарян, В.Ф. Ушаков // Труды ДИИТ. – 1967. – № 68. – С. 32–38.
66. Лазарян В.А. Влияние параметров пути и тележки на силы взаимодействия [Текст] / В.А. Лазарян и др. // Труды ДИИТ. – 1968. – № 68. – С. 22–28.
67. Лазарян В.А. Применение метода случайного поиска к определению рациональных значений параметров рессорного подвешивания. – В кн. Динамика и прочность высокоскоростного наземного транспорта [Текст] / В.А. Лазарян, М.Л. Коротенко, О.М. Ратникова. – К.: Наукова думка, 1976. – С. 97–103.
68. Buchly. Führung und haut des Lokomotiv rades in Gleise. “Schweizerische Bauzeitung”, 1953.
69. Медель В.Б. Влияние локомотивов [Текст] / В.Б. Медель // Труды МЭМИТа. – 1958. – № 55. – С. 24–29.

70. Кученко С.М. Об устойчивости движения локомотивов. В кн.: “Власивание локомотивов в кривых участках железнодорожного пути” [Текст] / С.М. Кученко. – М.: Машгаз, 1964. – С. 64–82.
71. Андриевский С.М. Боковой износ рельсов в кривых Труды ЦНИИ МПС [Текст] / С.М. Андриевский. – М.: Трансжелдориздат, 1961. – 231с.
72. Müller T. Dynamische Probleme der elektrischen Drehgestell – Lokomotive. “Schweizerische Bauzeitung”, 1972 Hefh, 45.
73. Borgeaud G. Zur Lauftechnik der elektrischen Drehgestell – Lokomotive. “Schweizerische Bauzeitung”, 1972 Heft 45.
74. Лазарян В.А. Аналитические исследования собственных колебаний современных локомотивов / В.А. Лазарян, М.Л. Коротенко. – Днепропетровск: Труды ДИИТ. – 1962. – № 35. – 324 с.
75. Лазарян В.А. Дифференциальное уравнение колебаний экипажа, движущегося по инерционному пути / Сборник. некоторые задачи механики скоростного транспорта [Текст] / В.А. Лазарян, И.А. Литин // Наукова думка. – 1970. – С. 61–73.
76. Тимошенко С.П. О динамических напряжениях в рельсах [Текст] / С.П. Тимошенко // Вестник инженера. – 1915. – № 4. – С. 22–32.
77. Соколов М.М. Динамическое нагружение вагонов [Текст]: М.М. Соколов, В.Д. Хусидов, В.Д. Минкин. – М.: Транспорт. – 1981. – 207 с.
78. Хусидов В.Д. Разработка математического и программного обеспечения расчетов движения четырёхосного и восьмиосного вагонов в кривых [Текст] / В.Д. Хусидов, Г.И. Петров. – М.: МИИТ, 1991. – 46 с.
79. Исследование динамики и прочности пассажирских вагонов [Текст] / С.И. Соколов, В.В. Новарро, Г.Ф. Левенсон и др. – М.: Машиностроение, 1976. – 223 с.
80. Даренський О.М. Оцінка впливу на колію поздовжніх сил, які виникають в поїзді в умовах промислового транспорту [Текст] / О.М. Даренський, Н.В. Бугаєць // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2006. – № 72. – С. 119–124.

81. Даренський О.М. Визначення сил опіру поперечному переміщенню залізобетонних шпал у баласті [Текст] / О.М. Даренський, В.Г. Вітольберг, А.М. Штомпель, Н.В. Бугаєць // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – 2008. – № 91. – С. 89–96.
82. Даренський О.М. Статистические характеристики силових неровностей прокольного профиля пути на участках обращения подвижного состава с осевыми загрузками до 30 т [Текст] / О.М. Даренський // ІКСЗТ. – 2008. – № 2. – С. 17–20.
83. Попов А.А. Сопротивление материалов [Текст]: монография / А.А. Попов. – М.: Машгиз, 1968. – 715 с.
84. Чихладзе Е.Д. Будівельна механіка [Текст]: підручник для студентів вищих навчальних закладів / Е.Д. Чихладзе. – Х.: УкрДАЗТ, 2002. – 305 с.
85. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст]. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
86. Кудрявцев Н.Н. Исследование динамики необрессоренных масс вагонов [Текст] / Н.Н. Кудрявцев. – М.: Труды ВНИИЖТ. – 1965. – № 287. – 168 с.
87. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов [Текст] : учебник для вузов, 9-е изд., перераб. – М.: Наука, 1996. – 512 с.
88. Исследование неровностей колесных пар пассажирских вагонов [Текст] // Труды ВНИИЖТ. – М.: ВНИИЖТ, 1979. – № 608. – 118 с.
89. Timoshenko S. Method of Analysis of Statical and Dynamical Stresses in Rail.- Proc of the 2-d International Conyress for Appl. Mechanics. Zürich, 1927, 12p.
90. Тимошенко С.П. Сопротивление материалов [Текст] / С.П. Тимошенко. – М.: Физматгиз, 1960. – Ч. 1. – 379 с.
91. Вагоны [Текст] / Л.А. Шадур, И.И. Челноков, Л.Н. Никольский и др. / под. ред. Л.А. Шадура, 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1980. – 440 с.
92. Вершинский С.В. Динамика вагона [Текст] 2-е изд., перераб. и доп. / В.Н. Данилов, И.И. Челноков. – М.: Транспорт, 1978. – 234 с.
93. Вершинский С.В. Выбор оптимального трения в рессорном подвешивании многоосных грузовых вагонов [Текст] / С.В. Вершинский, А.Д. Кочнов,

- В.Д. Хусидов // Труды МИИТ. – 1968. – № 283. – С. 4–16.
94. Гасители колебаний вагонов [Текст] / И.И. Челноков, Б.И. Вишняков, А.А. Эстлинг и др. – М.: Трансжелдориздат, 1963. – 176 с.
95. Грачева Л.О. Взаимодействие вагона и железнодорожного пути [Текст] / Л.О. Грачева // Труды ВНИИЖТ. – 1968. – № 6. – С. 9–11.
96. Галиев И.И. О движении колёсной пары по неравноупругому пути [Текст] / И.И. Галиев, В.А. Нехаев // Сборник ОмИИТа. – 1981. – С. 48–57.
97. Неймерк Ю.К. Динамика неголономных систем [Текст] / Ю.К. Неймерк, Н.А. Фуфаев. – М.: Наука, 1967. – 520 с.
98. Клованич С.Ф. Метод конечных элементов в нелинейных расчетах пространственных железобетонных конструкций [Текст] / С.Ф. Клованич, Д.И. Безушко. – ОНМУ, 2009. – 89 с.
99. Болотин В.В. Статистические методы в строительной механике [Текст] / В.В. Болотин. – М.: Издательство литературы по строительству, 1965. – 415с.
100. Благонядежин В.Л. Изгиб многопролетных квазирегулярных балок со статическими характеристиками “Строительная механика и расчет сооружений” [Текст] : учебник / В.Л. Благонядежин, В.Н. Москаленко. – 1969. – № 2. – С. 12–18.
101. Бусленко Н.П. Метод статических испытаний (Монте-Карло) [Текст] / Н.П. Бусленко, Ю.А. Шрейдер. – М.: ГИФМЛ, 1961. – 216 с.
102. A mathematical model of the rail track presented as a bur on elastic and dissipative supports under the influence of moving loads / A. Darenskiy, V. Vitolberg, D. Fast, A. Klymenko, Y. Leibuk // Matec Wed of Conference. – № 116, 00001 (207) – Trans bad – 2017, 03002.
103. Даренський О.М. Математична модель коливань залізничної колії як балки, що має інерційні характеристики [Текст] / О.М. Даренський // ІКСЗТ. – 2017. – № 2 (123). – С. 16–20.
104. Даренський О.М. Влияние осевых грузов на статистические характеристики геометрических неровностей плана и профиля пути промышленного транспорта [Текст] / О.М. Даренський // ІКСЗТ. – 2008. – № 3. – С. 43–47.

105. Даренський О.М. Влияние геометрических неровностей пути на величины изгибных напряжений в рельсах [Текст] / О.М. Даренський // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – 2008. – № 99. – С. 167–176.
106. Гордыцкий-Цвирко А.М. О динамических расчетах верхнего строения пути [Текст] / А.М. Гордыцкий-Цвирко // Журнал МПС. – 1905.– № 1. – С. 38.
107. Даніленко Е.І. Дослідження проміжних рейкових скріплень для залізобетонних шпал на витривалість при впливі циклічного навантаження [Текст] / Е.І. Даніленко // Збірник наукових праць КУЕТТ, серія “Транспортні системи і технології” К.: КУЕТТ: – 2005. – С. 26–38.
108. Даніленко Е.І. Сучасні рейкові пружні скріплення і особливості вимог до вітчизняних скріплень на залізобетонних шпалах [Текст] / Е.І. Даніленко, М.Д. Костюк, О.М. Жученко // Залізничний транспорт України. – 2002. – № 6. – С. 3–12.
109. Ершков О.П. Характеристики пространственной упругости рельсовой нити [Текст] / О.П. Ершков // Труды ВНИИЖТ. – М.: Трансжелдориздат, 1960. – № 192. – С. 59–101.
110. Effects of profile wear on wheel–rail contact conditions and dynamic interaction of vehicle and turnout [Electronic resource] / J. Xu, P. Wang, L. Wang, R. Chen // Advances in Mechanical Engineering. – 2016. – Vol. 8, №1. – P. 1-14. – Available at: <http://ade.sagepub.com/content/8/1/1687814015623696.full.pdf+html>. – Title from the screen. – Accessed: 14.03.2016.
111. Говоруха В.В. Теоретические и экспериментальные исследования работ железобетонных шпал типов С-56, С-62, С-64-2 и напряжений в подшпальном основании [Текст] / В.В. Говоруха // Труды ДИИТа. – 1967. – № 69. – С. 56–73.
112. Разработка и внедрение технологической документации на повторное использование материалов верхнего строения пути на предприятиях Минчермета СССР / Отчет о НИР.– Харьковский институт инженеров железнодорожного транспорта № ГПО 1870019011: Харьков. – 1988. – 70 с.
113. Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України(ЦП-0269)

- [Текст]. – К.: Укрзалізниця, 2012. – 456 с.
114. Даренський О.М. Наукові основи підвищення ресурсів промислового транспорту на основі прогнозування стану системи «екіпаж–рейкова колія» [Текст] : дис. О.М. Даренський док. техн. наук : захищена 17.11.12 : затв.10.01.13 / Даренський Олександр Миколайович. – Х., 2012 – 345 с. – Бібліогр.: с. 203 – 216. – 01520011827.
115. Современные конструкции верхнего строения железнодорожного пути [Текст]: под ред. В. Г. Альбрехта и А. Ф. Золотарского. – М.: Транспорт, 1975. – 280 с.
116. Новичков В. П. Рациональные способы усиления железнодорожного пути [Текст] / В.П. Новичков // Ж. д. трансп., 1956. – № 4. – С. 66–68.
117. Альбрехт В.Г. Угон железнодорожного пути и борьба с ним [Текст]: учебник / В.Г. Альбрехт, А.Я Коган. – М.: Транспорт, 1996. – 160 с.
118. Birnam F. Neure Messung an Gleisen mit verschiedenen Unterschwellung.- Eisenbahntechnische Rundschau,– juli, 1977, N. 7, s. 229–246.
119. Золотарский А.Ф. Железобетонные шпалы для рельсового пути [Текст] / А.Ф. Золотарский, Б.А. Евдокимов, Л.Г. Исаев, Л.Г. Крысанов и др.: под ред. А.Ф. Золотарского. – М.: Транспорт, 1980. – 270 с.
120. Работа шпалы и рельса под статической нагрузкой [Текст] // Труды МИС ЦПТДУ НКПС. – М.: Госжелдориздат, 1931. – Вып. 146. – 119 с.
121. Стецкевич И.Р. Об опытах над устойчивостью верхнего строения пути при проходе поездов [Текст] / И.Р. Стецкевич // Протоколы XII совещенного съезда инженеров службы пути русских железных дорог. – М.: 1894. – С. 65–72.
122. Рубан П.С. Методика работ по определению коэффициента постели шпал [Текст] / П.С. Рубан // Институт инженерных исследований НКПС. – М.: Транспечать, 1930. – Вып. 27. – 56 с.
123. Ершков О. П. Исследование жесткости железнодорожного пути и ее влияние на работу рельсов в кривых участках [Текст] / О.П. Ершков // Труды ЦНИИ МПС. – М.: Трансжелдориздат, 1964. – Вып. 264. – С. 39–48.



124. Цеглинский К.Ю. Железнодорожный путь в кривых [Текст]: монография / К.Ю. Цеглинский. – М.: 1903. – 155 с.
125. Яковлев В. Ф. Определение расчетных параметров пути в вертикальной и горизонтальной плоскостях с помощью вибромашины [Текст] / В.Ф. Яковлев, И.И. Семенов, В.И. Абросимов // Труды ЛИИЖТа, – Л.: ЛИИЖТ. – 1971. – Вып. 326. – С. 66–85.
126. Фришман М.А. Экспериментальные определения жесткостей и неупругих сопротивлений пути [Текст] / М.А. Фришман, Л.Я. Воробейчик, Р.С. Липовской // Вестник ЦНИИ МПС. – 1970. – № 8. – С. 31–35.
127. Содержание балластной призмы железнодорожного пути [Текст] / под ред. Е.С. Варызгина. – М.: Транспорт, 1978. – 141 с.
128. СНиП: 2.05.07.- 91\*: Строительные нормы и правила: Промышленный транспорт / ЦИТП Минстроя России 1996. – 86 с.
129. Система для вимірювання переміщень в елементі інженерних конструкцій і споруд під дією навантажень [Текст] / пат. № 70477 Україна: МПК G05D 5/00; E01B 35/00 / Даренський О.М., Астахов В.М., Бугаєць Н.В., Витольберг В.Г., Беліков Є.А.; Власник Українська державна академія залізничного транспорту. № у 201114788; заявл.13.12.2011; публ. 11.06.2012, Бюл.№11. – 5 с.
130. Даніленко Е.І. Залізнична колія. Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомим складом [Текст]: Підручник для вищих навчальних закладів (у 2-х томах). – К.: Київ, Інпрес, 2010. – Том 1. – 528 с.
131. Інструкція з укладання та утримання рейкової колії з рейками типу R65, VІС – 60 і пружним проміжним скріпленням типу КПП- 5 та високоміцними ізолюючими стиками (ЦП-0104) [Текст]. – К.: Укрзалізниця, 2003. – 52 с.
132. Положення про проведення планово-запобіжних ремонтно- колійних робіт на залізницях України (ЦП17 - 0113) [Текст]. – К: Транспорт, 2004. – 40 с.
133. Макарьян М. А. Сопротивление бесстыкового пути перемещениям [Текст] / М. А. Макарьян, Н. Б. Зверев // Бесстыковой путь: Труды ВНИИЖТ. – М.: Трансжелдориздат, 1962. – Вып. 244. – С. 19–45.
134. Шахунянц Г.М. Некоторые вопросы исследования работы резиновых про-

- кладок повышенной упругости для пути с железобетонными шпалами [Текст] / Г.М. Шахунянц, А.А. Демидов. – М.: Транспорт, 1971. – Вып. 354. – С. 24–32.
135. Купцов В. В. Методики определения жесткости резиновых прокладок- амортизаторов на сжатие [Текст] / В.В. Купцов // Труды ВНИИЖТ. – 1979. – Вып. 616. – С. 36–54.
136. Карпущенко Н.И. Расчет упругих элементов промежуточных рельсовых скреплений [Текст]: монография / Н.И. Карпущенко// Труды НИИЖТ. – 1972. – Вып. 135. – С. 41–48.
137. Ладыгин Ю. Н. Лабораторные испытания рельсовых скреплений [Текст] / Ю.Н. Ладыгин, Ю.М. Стойда // Путь и путевое хозяйство.– 2005. – № 12. – С. 8–12.
138. Григорьев Е. Т. Расчет и конструирование резиновых амортизаторов [Текст]: монография / Е.Т. Григорьев. – М.: Машгаз, 1960. – 206 с.
139. Демченко С.М. Посібник з устрою, монтажу та утриманню проміжних пружних скріплень типу КПП [Текст] / С.М. Демченко, В.А. Піскунов, О.В. Миєнко, В.О. Систренський. – Київ: “Швидкий рух”, 2006. – 72 с.
140. Шраменко В.П. Комп’ютерне моделювання явища втрати стійкості колії із застосуванням кінцево-елементної розрахункової схеми [Текст] / В.П. Шраменко, О.В. Лобяк, А.М. Штомпель // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2008. – Вип. 91. – С. 165–174.
141. Яковлев В.С. Влияние конструктивных особенностей пути на уровень сил взаимодействия с подвижным составом [Текст] / В.С. Яковлев, И.И. Семенов, Б.В. Игнатов, В.В. Гниломедов // Труды ЛИИЖТ. – 1969. – № 296. – С. 40–62.
142. Дырда В. И. Резиновые детали в машиностроении [Текст] / В.И. Дырда, Е.Ф. Чижик. – Днепропетровск: Полиграфист, 2000. – 584 с.
143. Дырда В. И. Расчет силовых резинотехнических изделий, используемых в горном машиностроении [Текст]: В.И. Дырда, А.В. Мазнецова, Т.Е. Твердохлеб. – М.: ЦНИИТ Энефтехим, 1991. – 64 с.
144. Иванова Л.И. Карпущенко Н.И. Экспериментальные исследования переме-

- щений элементов рельсошпальной решетки под поездной нагрузкой [Текст]: / Л.И. Иванова, Н.И. Карпущенко // Труды НИИЖТ. – 1971. – № 129. – С. 61–67.
145. Меньшикова В.И. Динамические продольные силы и перемещения рельсов железнодорожного пути [Текст] / В.И. Меньшинова // Труды ЦНИИ МПС. – 1972. – № 406. – С. 22–29.
146. Иволга Н.В., Климов В.И. Об инерционных свойствах пути при движении по нему постоянной силы [Текст] / Н.В. Иволча, В.И. Климов // Труды ДИИТа. – 1975. – № 167/16. – С. 73–81.
147. Шахунянец Г.М. Устройство железнодорожного пути [Текст]: монография / Г.М. Шахунянец. – М.: Трансжелдориздат, 1944. – 420 с.
148. Карпущенко Н.И. Надежность связей рельсов с основанием [Текст]: монография / Н.И. Карпущенко. – М.: Транспорт, 1986. – 150 с.
149. Карпущенко Н.И. Совершенствование рельсовых креплений [Текст] / Н.И. Карпущенко, Н.И. Антонов. – Новосибирск: Изд-во СГУСа, 2003. – 300 с.
150. Купцов В.В. Современные конструкции и параметры промежуточных рельсовых креплений для железобетонных шпал [Текст] / В.В. Купцов // Повышение надежности работы верхнего строения пути. – М.: 2000. – С. 100–129.
151. Говоруха В.В. Механика деформирования и разрушения упругих элементов промежуточных рельсовых креплений [Текст] / монография / В.В. Говоруха. – Днепропетровск: Лира-ЛТД, 2005. – 388 с.
152. Технічні вказівки щодо оцінки стану рейкової колії за показниками колієвимірвальних вагонів та забезпечення безпеки руху поїздів при відступах від норм утримання рейкової колії (ЦП - 0267) [Текст]. – К.: 2012. – 46 с.
153. Технические указания по расшифровке записей путеизмерительных вагонов, оценке отступлений от норм содержания рельсовой колеи железнодорожного пути, мерам по обеспечению безопасности движения поездов при их обнаружении. [Текст]. – М.: Транспорт, 1982. – 23 с.
154. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути. МПС СССР

- [Текст]. – М.: Транспорт, 1972. – 224 с.
155. Тулей Ю.Л. Визначення поперечної стійкості безстикової колії з комбінованою рейко-шпальною решіткою під дією температурних сил / Ю.Л. Тулей, В.П. Шраменко, А.М. Штомпель // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – Харків, 2008. – Вип. 91. – С. 8-14.
156. Пługін А.М. Досвід експлуатації залізобетонних шпал з пружними скріпленнями, розробленими в УкрДАЗТ / А.М. Пługін, А.А. Пługін, Ю.Л. Тулей, С.В. Мирошниченко, О.А. Калінін // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – Харків, 2014. – Вип. 148. – С. 92-103.
157. Тулей Ю.Л. Аналіз просторової жорсткості скріплень ДО / Ю.Л. Тулей // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – Харків, 2015. – Вип. 157. – С. 82-86.
158. Даренський О.М. Аналіз розвитку теорій розрахунків залізничної колії / О.М. Даренський, Ю.Л. Тулей, Е.А. Беліков // Залізничний транспорт України. – Київ, 2016. – Вип. 1-2. – С. 14-19.
159. Тулей Ю.Л. Аналіз формування жорсткостей проміжних скріплень типів Д-2, Д-4, КППД-2 та СКД65-Д / Ю.Л. Тулей // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – Харків, 2016. – Вип. 159. – С. 109-117.
160. 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 // Вістник ДНУЗТ. – Дніпропетровськ, 2016. – Вип. 6 (66). – С. 96-104.
161. Тулей Ю.Л. Аналіз формування просторових жорсткостей рейкових опор при дерев'яних шпалах / Ю.Л. Тулей // Збірник тез доповідей 78 міжнародної науково-технічної конференції – Харків: УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 160. – С. 90-91.
162. Yuseph Tuley. Research into parameters of energy loss when trains influence the

track with wooden sleepers / Yuseph Tuley, Natalia Bugaets, Alina Malishevskaya

// Східно-Європейський журнал передових технологій, 2016. – № А6/1(84). – pp. 9-13.

163. 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: збірник наукових статей. – Харків, 2016. – Вип. 4. – С. 3-9.
164. 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: збірник наукових статей. – Харків, 2016. – Вип. 6 (121). – С. 36-42.
165. 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. – DYN-WIND 2017. MATEC Web of Conference. Volume 116, 03001 (2017).