

УДК 625.143:656.027 (477)

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПРОМІЖНОГО РЕЙКОВОГО СКРІПЛЕННЯ ТИПУ КПП-5 НА ПЕРСПЕКТИВНИХ ДІЛЯНКАХ ЗАЛІЗНИЦЬ УКРАЇНИ, ДЕ ПЛАНУЄТЬСЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ШВИДКІСНОГО РУХУ

Кандидати техн. наук Д. О. Потапов, В. Г. Вітольберг, В. Д. Бойко, В. В. Новіков

THEORETICAL STUDIES OF THE POSSIBILITY OF OPERATING AN INTERMEDIATE RAIL FASTENING OF THE KPP-5 TYPE ON PROMISING SECTIONS OF UKRAINIAN RAILWAYS, WHERE IT IS PLANNED TO INTRODUCE HIGH-SPEED TRAFFIC

PhD (Tech.) D. Potapov, PhD (Tech.) V. Vitolberg, PhD (Tech.) V. Boyko,
PhD (Tech.) V. Novikov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256640>

Анотація. У статті наведено результати багатоваріантних розрахунків напружень, які виникають в елементах залізничної колії під дією сучасних типів швидкісного рухомого складу. Встановлено, що з точки зору міцності проміжні рейкові скріплення типу КПП-5 українського виробництва можуть експлуатуватись у прямих ділянках зі швидкостями більше 160 км/год з термічно обробленими рейками типу Р65 на залізобетонних шпалах з епюрою укладання 1840 шт/км із щебенеvim баластом товщиною 40 см. Аналітичне порівняння рівня напружень, що виникають в елементах залізничної колії в прямих із проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5 українського виробництва та системою прикріплення рейок W30 виробництва компанії «Vossloh», показало приблизно той самий рівень напруженого стану в елементах залізничної колії.

Ключові слова: швидкісний рух, проміжні рейкові скріплення, розрахунки залізничної колії на міцність.

Abstract. *The introduction of high-speed traffic in the railways of Ukraine is one of the priority areas of development of the domestic railway industry. Foreign experience in the operation of high-speed and high-speed lines has a positive impact on the overall economic performance of these countries by increasing the mobility of means of production and human resources. In addition, increasing speeds requires the introduction of new types of rolling stock and railway structures with unconditional provision of the required level of safety. This is possible only through a comprehensive approach to these issues, both through experimental tests and theoretical calculations. This study theoretically assessed the possibility of operating intermediate rail fasteners type KPP-5 Ukrainian production in areas where in the medium term, it is planned to increase speeds, i.e. to reach a level of more than 160 km/h. To achieve this goal, multivariate calculations were performed to determine the stress state that penetrates the elements of the railway track under the action of rolling stock. Four types of high-speed locomotives and electric trains, which have been operated on the railway lines of the European Union for a long time, were selected as units of account in the study. For all types of rolling stock (locomotives and high-speed electric trains) for which calculations were performed, the obtained values of stresses acting in the elements of the railway track do not exceed the allowable. That is, in terms of strength, intermediate rail fasteners type KPP-5 Ukrainian production can be operated in straight sections at speeds over 160 km / h with heat-treated rails type R65 on reinforced concrete sleepers with laying diagram 1840 pcs / km with gravel ballast 40 cm thick. Analytical comparison of the level of stresses arising in the railway track elements in lines with intermediate rail fastening type KPP-5 made in Ukraine and the W30 rail fastening system manufactured by Vossloh showed approximately the same level of stress in the railway track elements. However, it should be noted that the above conclusions are only theoretical in nature and for the final determination of the possibility of operation of the intermediate rail fastening type KPP-5 in real conditions (at speeds greater than 160 km / h) requires additional experimental studies.*

Keywords: *high-speed traffic, intermediate rail fastenings, calculations of railway track for strength.*

Вступ. Одним з пріоритетних напрямів розвитку залізничного транспорту України є підвищення швидкості руху пасажирських поїздів та подальше впровадження швидкісного, а в середньостроковій перспективі й високошвидкісного руху як у межах України, так і в сполученні між Україною та країнами Західної Європи. Загальновідомим фактом, який підтверджено багатьма дослідниками, є доволі суттєві відмінності в процесах взаємодії залізничної колії і рухомого складу на ділянках швидкісного і високошвидкісного руху. Це викликає необхідність розробляти нові інженерно-технічні рішення стосовно рухомого складу, залізничної інфраструктури, засобів сигналізації тощо, але насамперед впроваджувати нові елементи саме в конструкцію залізничної колії.

Невід’ємною конструктивною складовою, яка доволі суттєво впливає на процеси взаємодії залізничної колії та рухомого складу, а також безпосередньо бере участь у формуванні просторової жорсткості підрейкової основи, є вузли проміжних рейкових скріплень. За своїми конструктивними особливостями їх умовно можна розподілити на дві основні групи – ті, що мають металеву підкладку, та без неї (так звані безпідкладкові). Світові тенденції свідчать, що саме група безпідкладкових рейкових скріплень є перспективною як з точки зору оптимізації жорсткісних характеристик колії, так і в питаннях техніко-економічної ефективності (за рахунок економії металу при виготовленні, зменшенні витрат на поточне утримання тощо).

На сьогодні основним типом пружних безпідкладкових проміжних рейкових скріплень, виходячи з протяжності ділянок

укладання, на вітчизняних магістральних залізницях є проміжні рейкові скріплення типу КПП-5 українського виробництва. Тому, на наш погляд, доволі логічно розглядати саме цей тип скріплень, як реального «претендента» для експлуатації на ділянках швидкісного руху.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У загальному випадку несуча здатність окремих елементів залізничної колії забезпечується за умови неперевикнення розрахунковими напруженнями рекомендованого допустимого рівня в цих елементах. З огляду на це можна зробити висновок, що першою умовою можливості експлуатації відповідного типу проміжних рейкових скріплень є забезпечення необхідного рівня несучої здатності як окремими конструктивними елементами колії (рейки, шпали, баластний шар, основна площадка земляного полотна), так і конструкції в цілому.

Сама теорія розрахунків залізничної колії на міцність історично розвивалася за напрямками удосконалення розрахункової схеми та методики імовірнісного розрахунку. Цю довгу історію можна відслідковувати починаючи ще з XIX століття, що докладно показано в роботах [1, 2].

Основа сучасних розрахунків колії на міцність була розроблена ще у 1954 р. [3] колективом авторів у складі М. Ф. Веріго, В. М. Данилова, Є. М. Бромберга та ін. Передумови аналітичних розрахунків рейки як балки на пружній основі також були закладені в роботі проф. С. П. Тимошенка [4]. У 1986 р. вийшла праця проф. М. Ф. Веріго і А. Я. Когана «Взаємодія колії і рухомого складу» [5], яка вважається фундаментальною з вирішення задач розрахунків колії на міцність, у тому числі з використанням просторових розрахункових схем.

Крім того, слід зазначити праці українських вчених – проф. М. Б. Кургана і Д. М. Кургана [6–9], які розробили методологію розрахунків залізничної колії при взаємодії зі швидкісним рухомим

складом, що, безперечно, буде сприяти впровадженню швидкісного, а в перспективі й високошвидкісного руху поїздів як в Україні, так і в сполученні між Україною та країнами Західної Європи.

Особливе місце займають наукові праці Заслуженого діяча науки і техніки України, проф. Е. І. Даніленка, під керівництвом якого були розроблені вітчизняні «Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість», які на сьогодні є чинним офіційним документом у нормативній базі АТ «Укрзалізниця».

Визначення мети та завдання досліджень. Основною метою дослідження є оцінка можливості експлуатації проміжного рейкового скріплення типу КПП-5 на перспективних ділянках головних колій АТ «Укрзалізниця», де планується впровадження швидкісного руху. Виходячи з чого, одним із основних завдань було визначити напружений стан залізничної колії із проміжним рейковим скріпленням цього типу при швидкостях руху більше 160 км/год з огляду на особливості конструкції сучасних типів швидкісного рухомого складу.

Основна частина. Для оцінки напруженого стану в елементах залізничної колії було використано основні положення [10], згідно з якими динамічне навантаження враховується через відповідне визначення розрахункової сили, за яку приймається максимальна вірогідна сила з імовірністю неперевикнення 0,994 ($\lambda = 2,5$), що складається зі статичного навантаження та комплексу динамічних добавок:

$$P_{розр} = \bar{P} + \lambda \cdot S, \quad (1)$$

де \bar{P} – середнє значення сили, що діє від колеса на рейку;

S – середньоквадратичне відхилення сили, що діє від колеса на рейку.

У практичних розрахунках колії на міцність показники сили, що діє від колеса на рейку, визначаються за формулою:

$$\begin{cases} \bar{P} = P_{cm} + \bar{P}_p \\ S = \sqrt{S_p^2 + S_{pn}^2 + 0,05 \cdot S_{инк}^2 + 0,95 \cdot S_{бнк}^2} \end{cases}, \quad (2)$$

де P_{cm} – вага екіпажа, віднесена до одного колеса (статичне навантаження);

\bar{P}_p – середнє значення сили від коливань надресорної ваги екіпажа;

S_p^2 – середньоквадратичне відхилення сили від коливань надресорної ваги екіпажа;

S_{pn}^2 – середньоквадратичне відхилення сили від перекочування колеса по рейці з нерівністю;

$S_{инк}^2$ – середньоквадратичне відхилення сили, що виникає від наявності на колесі ізольованої нерівності;

$S_{бнк}^2$ – середньоквадратичне відхилення сили, що виникає від наявності на колесі безперервної нерівності.

Напруження в рейках (по осі підшви σ_{o-n} та головки σ_{o-z}) від дії згинального моменту $M_{дин}$ визначається за формулами:

$$\sigma_{o-n} = \frac{M_{дин}}{W_n}, \quad \sigma_{o-z} = \frac{M_{дин}}{W_z}, \quad (3)$$

де W_n і W_z – момент опору рейки, відповідно по низу підшви і по верху головки.

Для врахування позacentрового прикладення вертикальних сил та дії горизонтальних поперечних сил у розрахунки вводяться спеціальні коефіцієнти $m_{к-з}$ і f . Таким чином, напруження в кромках головки $\sigma_{к-з}$ та підшви $\sigma_{к-n}$ рейок можна визначити як

$$\sigma_{к-з} = m_{к-з} \cdot \sigma_{o-n} \quad \sigma_{к-n} = f \cdot \sigma_{o-n} \quad (4)$$

Коефіцієнти f знаходяться з довідкових таблиць [10] залежно від типу рухомого складу і плану лінії. Величину

перехідного коефіцієнта $m_{к-з}$ можна розрахувати як

$$m_{к-з} = \frac{Z_z}{Z_n} + (f-1) \frac{b_z}{b_n}, \quad (5)$$

де b_z , b_n – відповідно ширина головки і підшви рейки;

Z_z , Z_n – відстань від центральної горизонтальної осі до верху головки і низу підшви відповідно.

Напруження зминання в шпалах під підкладкою (прокладкою) визначаються залежно від величини сили тиску рейки на опору $Q_{дин}$:

$$\sigma_{ш} = \frac{Q_{дин}}{\omega} \cdot 10, \quad (6)$$

де ω – площа підкладки (або підрейкової прокладки).

Напруження стискання в баласті під шпалою також залежать від величини сили тиску рейки на опору $Q_{дин}$:

$$\sigma_{\delta} = \frac{Q_{дин}}{\Omega \cdot \alpha} \cdot 10, \quad (7)$$

де $\Omega \alpha = \frac{1}{2} \alpha \cdot a \cdot b$ – ефективна опорна площа напівшпали з урахуванням її згину (a , b – довжина шпали і ширина нижньої її постелі, α – коефіцієнт згину шпали).

Величину напружень у баласті $\sigma_{\delta(h)}$ на будь-якій глибині h , у тому числі і на основній площадці земляного полотна, прийнято визначати як

$$\sigma_{\delta(h)} = \sigma_{h_p} + \sigma_{hc_2} + \sigma_{hc_3}, \quad (8)$$

де σ_{h_p} – напруження в розрахунковій точці від тиску розрахункової шпали, Па;

σ_{hc_2} – напруження в тій самій точці M від тиску однієї сусідньої шпали (розташованої ліворуч від розрахункової), Па;

σ_{hc_3} – напруження в тій самій точці M від тиску іншої сусідньої шпали (розташованої праворуч від розрахункової), Па.

Як розрахункові екіпажі в рамках цього дослідження було прийнято рішення розглянути два типи рухомого складу – локомотиви та швидкісні електропоїзди (з конструкційною швидкістю більше 160 км/год).

Виходячи з дійсно великої різноманітності у світі видів рухомого складу для таких швидкостей руху, питання вибору конкретної рухомої одиниці було непростим. З одного боку, одним із факторів, який суттєво обмежував підбір екіпажів для проведення розрахунків, була

відсутність у відкритих джерелах необхідної технічної інформації, а з іншого – навіть маючи таку можливість, кількість розрахункових одиниць була б надмірно великою, що явно виходило за рамки даного теоретичного дослідження. З огляду на це для проведення розрахунків було обрано по 4 рухомих одиниці для кожної категорії (локомотиви та швидкісні електропоїзди). Хоча процес вибору і мав умовно суб'єктивний характер, але, по можливості, було враховано досвід експлуатації та характерні особливості в їхній конструкції. В табл. 1 наведено загальні відомості про рухомий склад [11–19], який було обрано для проведення розрахунків.

Таблиця 1

Основні технічні характеристики рухомого складу, який було обрано для проведення розрахунків

Вид рухомої одиниці	Статичне навантаження на рейки від колеса, кг	Діаметр колеса, см	База візка, см	Конструкційна швидкість, км/год	
Локомотиви					
1	ЧС200	9750	125	320	200
2	KZ4A	10250	125	290	200
3	ЭП20	10750	125	290	200
4	Травса	9000	101	280	260
Швидкісні електропоїзди					
1	Siemens Velaro RUS	8475	92	260	250
2	Stadler FLIRT 200	10000/8500	моторного візка 86 немоторного 80 мм	моторний 270 інші 275	200
3	Sm6 «Аллегро»	8500	98	270	220
4	Talgo 250	9000	101	280	250

Одразу необхідно зауважити, що згідно з викладеною методикою розрахунку колії на міцність вплив бокових сил враховується емпіричними коефіцієнтами для відповідної рухомої одиниці. В реальних експлуатаційних умовах вплив бокових сил (а також низку інших показників розрахункового екіпажа)

доцільно визначати (уточнювати) тільки експериментальними методами для конкретних ділянок колії, особливо це стосується саме ділянок зі швидкостями руху більше 160 км/год. Виходячи з цього, в рамках даного дослідження з об'єктивних причини не було можливості оцінити напружений стан залізничної колії із

проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5 українського виробництва в кривих.

Тому як основну для розрахунків було обрано пряму ділянку з безстиковою конструкцією з новими рейками типу Р65 (з термічною обробкою), шпали залізобетонні (типу СБ-3-0) з епюрою 1840 шт/км, проміжне скріплення КПП-5, двошарова баластна призма (товщина щебеню – 40 см).

Для проведення розрахунків у комплексі «Mathcad» розроблено програму з урахуванням теоретичних передумов, які було наведено вище. Розрахунки виконано для всіх обраних типів рухомого складу з урахуванням сезонності.

Попередній аналіз отриманих результатів показав, що максимальні напруження в кромці головки та підшви рейок виникають у літній період, на відміну від напружень під прокладкою (на шпалі), в баластному шарі та основній площадці земляного полотна, де максимум спостерігається в зимовий період.

Найбільш «близькі» до допустимих значень є величини напружень, які виникають у кромці підшви рейок, з чого стає очевидним, що саме цей параметр може вважатися найбільш впливовим з точки зору обмеження швидкості в обраних умовах проведення розрахунків. Також необхідно зауважити, що при швидкостях руху більше 160 км/год можуть експлуатуватися лише рейки з термічною обробкою, оскільки отримані результати свідчать, що для швидкості 140 км/год величина напружень у кромці підшви рейок перевищує допустимий рівень для рейок без термічної обробки.

Для систематизації отриманих результатів було складено зведену табл. 2, в якій за кожною одиницею рухомого складу наведено величини максимальних напружень, що виникають в елементах залізничної колії при максимальній швидкості (в даному випадку йдеться про величину конструкційної швидкості).

Таблиця 2

Результати розрахунків напружень, що виникають в елементах залізничної колії із проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5 українського виробництва

Тип рухомого складу	Конструкційна швидкість, км/год	Напруження в елементах залізничної колії, МПа				
		кромка головки рейки	кромка підшви рейки	під прокладкою на шпалі	в баласті	на основній площадці
ЧС200	220	285	274	2,32	0,180	0,056
KZ4A	200	261	249	2,33	0,181	0,056
ЭП20	200	269	257	2,45	0,190	0,059
Travca	260	282	271	2,29	0,178	0,055
Siemens Velaro RUS	250	273	262	2,14	0,167	0,052
Stadler FLIRT 200	200	261	249	2,35	0,182	0,057
Sm6 «Аллігро»	220	263	253	1,95	0,151	0,047
Talgo 250	250	275	264	2,16	0,168	0,052

Зважаючи на дані табл. 2, можна констатувати, що величина максимальних напружень у кромці головки рейок

змінюється в межах від 261 до 285 МПа для локомотивів і від 261 до 275 МПа – для швидкісних поїздів. Діапазони значень

максимальних напружень у кромці подошви рейок становлять від 249 до 274 МПа і від 249 до 264 МПа для локомотивів та швидкісних поїздів відповідно. Мінімальна різниця між значеннями допустимих напружень у кромці головки рейки і отриманими в результаті розрахунку складає 6 МПа для локомотива ЧС2000 при швидкості руху 220 км/год (9 МПа для локомотива «Травса» при швидкості руху 260 км/год), тобто майже на самій «межі» допустимих значень.

Отримані значення напружень під прокладкою (на шпалі), в баластному шарі, на основній площадці земляного полотна свідчать про існування певного запасу міцності, наприклад, теоретичної можливості використання полегшеної епюри шпал (1680 шт/км) або зменшення товщини баластного шару.

Величина максимально можливої швидкості руху по прямих ділянках залізничної колії із проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5 українського виробництва може дорівнювати конструкційній швидкості відповідної рухомої одиниці і становить від 200 до 260 км/год.

Порівняльний аналіз результатів розрахунків. Сьогодні на залізничному транспорті країн близького та далекого зарубіжжя в експлуатації є широкий спектр безпідкладкових проміжних рейкових скріплень. Наприклад, рейкові скріплення компанії «Pandrol», АРС-4, ЖБР-65, системи для прикріплення рейок компанії «Vossloh» та багато інших.

Усі вони мають свої переваги і недоліки [20–22], так само, як і проміжне рейкове скріплення КПП-5 українського виробництва. Тому метою проведення цього аналізу не є визначення, так би мовити, «слабких сторін» українського (або закордонного) скріплення, а лише порівняння отриманих результатів розрахунків із сучасними світовими аналогами.

Для порівняльного аналізу було обрано проміжне рейкове скріплення «Vossloh» (зокрема система для

прикріплення рейок W30 для баластної конструкції колії), яке в різних модифікаціях експлуатуються вже досить давно на залізницях світу.

Оскільки визначення напруженого стану в елементах залізничної колії із проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5 українського виробництва проводилось для прямих ділянок колії, наявність бокових упорів, спосіб прикріплення рейки до шпали (шурупами), розбіжності в характеристиках пружної клеми в системі прикріплення рейки до шпали W30 не є суттєвими з точки зору обраної методики розрахунків.

На нашу думку, в цьому випадку головною відмінністю системи W30 від проміжного рейкового скріплення типу КПП-5 можна вважати імовірну різницю у величині модуля пружності підрейкової основи. Загальновідомо, що цей параметр може бути визначений лише експериментально і на сьогодні немає відомостей (зокрема в «Правилах розрахунку залізничної колії на міцність і стійкість») щодо його реальних значень. Тому, спираючись на відмінності в пружних характеристиках підрейкових прокладок проміжного рейкового скріплення типу КПП-5 українського виробництва та системи W30, авторами було проведено аналогічні багатоваріантні розрахунки, в яких аналітично варіювалося (як у бік збільшення, так і зменшення) значення саме модуля пружності підрейкової основи, а також окремі геометричні показники, які відповідають основним характеристикам системи прикріплення рейок W30.

Як приклад у табл. 3 наведено результати одного з таких варіантів розрахунків.

Виходячи з даних табл. 3, можна зазначити, що загальний напружений стан в елементах залізничної колії майже не змінився. Спостерігається незначне зниження рівня напружень у рейках та несуттєве зростання в інших конструктивних елементах колії. Але всі ці значення теж менші за допустимі.

Це дає змогу зробити припущення про певну конкурентоспроможність вітчизняного скріплення порівняно із закордонним,

хоча, звісно, це потребує проведення окремих техніко-економічних розрахунків.

Таблиця 3

Результати розрахунків напружень, що виникають в елементах залізничної колії із системою прикріплення рейок W30 компанії «Vossloh»

Тип рухомого складу	Конструкційна швидкість, км/год	Напруження в елементах залізничної колії, МПа				
		кромка головки рейки	кромка підшви рейки	під прокладкою на шпалі	в баласті	на основній площадці
ЧС200	220	282	271	2,42	0,188	0,058
KZ4A	200	258	247	2.43	0.189	0.058
ЭП20	200	267	255	2.56	0.199	0.062
Travca	260	280	269	2.397	0.186	0.058
Siemens Velaro RUS	250	271	261	2,24	0,174	0,054
Stadler FLIRT 200	200	259	247	2.454	0.191	0.059
Sm6 «Аллегро»	220	261	251	2.037	0.158	0.049
Talgo 250	250	273	262	2.259	0.175	0.054

Висновки. Проведені розрахунки напруженого стану залізничної колії із проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5 українського виробництва дають змогу зробити такі висновки:

1. Для всіх типів рухомого складу (локомотиви та швидкісні електропоїзди), для яких було проведено розрахунки, отримані значення напружень, що діють в елементах залізничної колії, не перевищують допустимих. Тобто з точки зору міцності проміжні рейкові скріплення типу КПП-5 українського виробництва можуть експлуатуватись у прямих ділянках зі швидкостями більше 160 км/год з термічно обробленими рейками типу R65 на залізобетонних шпалах з епюрою укладання 1840 шт/км із щебеневим баластом товщиною 40 см.

2. Фактором, який суттєво впливає (в деяких випадках обмежує) на швидкість руху по залізничній колії із проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5 українського виробництва є величина напружень у кромці підшви рейки.

Величини інших напружень (у кромці головки рейки, під прокладкою (на шпалі), в баласті і на основній площадці земляного полотна) не перевищують допустимих за всіма діапазонами швидкостей, для яких проводились розрахунки.

3. Аналітичне порівняння рівня напружень, що виникають в елементах залізничної колії в прямих із проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5 українського виробництва та системою прикріплення рейок W30 виробництва компанії «Vossloh», показало приблизно той самий рівень напруженого стану в елементах залізничної колії.

4. Максимальна швидкість руху поїздів по прямих ділянках залізничної колії із проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5 українського виробництва дорівнює конструкційній швидкості відповідної рухомої одиниці і перебуває в межах від 200 до 260 км/год.

Усі вищенаведені висновки мають лише теоретичний характер. Для

остаточного визначення максимально можливої швидкості руху по конкретних ділянках залізничної колії із проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5 українського виробництва в реальних умовах експлуатації (при швидкості руху більше 160 км/год) необхідне проведення додаткових експериментальних досліджень.

Метою проведення цих експериментальних робіт є оцінка (або уточнення,

виходячи із конкретних експлуатаційних умов) окремих характеристик верхньої будови колії та рухомого складу, оскільки при швидкостях руху більше 160 км/год процеси взаємодії екіпажів та залізничної колії вже мають істотні особливості, які потрібно враховувати і досліджувати лише в експериментальному порядку.

Список використаних джерел

1. Даніленко Е. І. Залізнична колія. Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомих складом: підруч. для вищ. навч. закл.: у 2 т. Київ: Інпрес, 2010. Т. 2. 456 с.
2. Даренський О. М., Беліков Е. А. Аналіз розвитку теорій розрахунків залізничних колій. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*. 2016. № 154. С. 149–55.
3. Правила производства расчетов верхнего строения железнодорожного пути на прочность. Москва: Трансжелдориздат, 1954. 70 с.
4. Тимошенко С. П. Прочность и колебания элементов конструкций. Москва: Наука, 1975. 704 с.
5. Вериго М. Ф., Коган А. Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. Москва: Транспорт, 1986. 559 с.
6. Kurhan M. B., Kurhan D. M. Theoretical basis for the introduction of high-speed trains in Ukraine (DNUZT, Dnipro, 2016). 283 p.
7. Kurhan D., Kurhan M. Modeling the Dynamic Response of Railway Track // IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 708. p. 012013. doi: 10.1088/1757-899X/708/1/012013.
8. Kurhan M., Kurhan D. Problems of providing international railway transport. *Matec*. 2018. Vol. 230. P. 01007. doi: 10.1051/mateconf/201823001007.
9. Курган М. Б., Курган Д. М. Теоретичні основи впровадження високошвидкісного руху поїздів в Україні: монографія. Дніпро: Вид-во ДНУЗТ, 2016. 283 с.
10. Даніленко Е. І., Рибкін В. В. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість. ЦП-0117. Київ: Транспорт України, 2004. 64 с.
11. Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс: учеб. пособ.: в 2 т. / И. П. Киселев и др.; под ред. И. П. Киселева. Москва: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014. Т. 2. 272 с.
12. Velaro RUS-High-Speed Trains. URL: <https://press.siemens.com/global/en/feature/velarorus-high-speed-trains-russian-railways>.
13. Stadler FLIRT 200 (ЭПМ). URL: <http://history.rw.by/lokomotivy/epm/>.
14. Sm6 «Аллегро». URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Allegro_\(электропоезд\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Allegro_(электропоезд)).
15. Talgo 250. URL: <https://www.talgo.com/en/rolling-stock/high-speed/250/>.
16. Locomotive Travca. URL: <https://www.talgo.com/en/rolling-stock/locomotives/travca/>.
17. Электровоз ЭП20 – руководство по эксплуатации. URL: https://zinref.ru/000_uchebniki/05301_transport_jd_elektrovozi/000_00_ep_20_elektrovoz_rukovodstvo/000.htm.
18. Правила эксплуатации электровозов серии KZ4A. URL: <https://ktzh-gp.kz/upload/iblock/b09/fxqsgadnabwpzu%20.lbwszyjyuvgtzjacofaeyhfc%20ugdrvdlhfaegjcbejvesvgh%20bhmaorcjxg%20KZ4A.pdf>.

19. Электровоз постоянного тока: ЧС200. URL: <https://sites.google.com/site/tagapoezd/tagsredstva/chs200>.

20. Даренський О. М., Беліков Е. А Перспективні конструкції проміжних скріплень для умов промислового залізничного транспорту. *ІКСЗТ*. Харків: УкрДУЗТ, 2015. № 2. С .57–61.

21. Анкерное бесподкладочное промежуточное рельсовое скрепление АРС. Московский Государственный Университет Путей Сообщения (МИИТ). Москва, 2008. 34 с.

22. Онищенко В. Упругие рельсовые скрепления компании Vossloh. *Українські залізниці*, 2014. № 8 (14). С. 60–64.

Потапов Дмитро Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничної колії і транспортних споруд Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-7279-4271. Тел. +38 (057)730-10-60. E-mail: ppx_xiit@kart.edu.ua.

Вітольберг Володимир Геннадійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничної колії і транспортних споруд Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-7356-8316. Тел. +38 (057)730-10-60. E-mail: vitolberg@kart.edu.ua.

Бойко Володимир Дмитрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничної колії та колійного господарства Державного університету інфраструктури та технологій. ORCID iD: 0000-0002-9192-8394. Тел. +38 (044)591-51-47. E-mail: zkks@ukr.net.

Новіков Вадим Володимирович, кандидат технічних наук, старш. викладач кафедри машинобудування та технічного сервісу машин Українського державного університету залізничного транспорту. Тел: +38 (057) 730-10-55. E-mail: novikoff.vadim2013@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-9341-0129.

Potapov Dmytro PhD (Tech). Associate Professor, department of railway track and transport facilities, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-7279-4271. Tel. +38 (057)730-10-60. E-mail: ppx_xiit@kart.edu.ua.

Vitolberg Volodymyr PhD (Tech). Associate Professor, department of railway track and transport facilities, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-7356-8316. Tel. +38 (057)730-10-60. E-mail: vitolberg@kart.edu.ua.

Boyko Volodymyr PhD (Tech). Associate Professor, department of railway track and track facilities State University of Infrastructure and Technologies ORCID iD: 0000-0002-9192-8394. Tel. +38 (044)591-51-47. E-mail: zkks@ukr.net.

Novikov Vadym, PhD (Tech.), Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38(057) 730-10-55. E-mail: novikoff.vadim2013@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-9341-0129.

Статтю прийнято 15.12.2021 р.