

## УДК 625.143-047.37

М. П. НАСТЕЧИК – к.т.н., доцент, каф. «Колія та колійне господарство»,  
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка  
В. Лазаряна, nastechik\_mp@mail.ru  
Р. В. МАРКУЛЬ – каф. «Колія та колійне господарство», Дніпропетровський  
національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,  
guaranga\_mr@mail.ru  
В. Є. САВЛУК – завідувачий КГНДЛ, Дніпропетровський національний університет  
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, 331941@ukr.net

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ ІЗ ПРОМІЖНИМ РЕЙКОВИМ СКРІПЛЕННЯМ ТИПУ КПП-5

*Стаття рекомендована до публікації д. т. н., проф. А. Б. Бойніком (Україна),  
д. фіз.-мат. н., проф. В. І. Гаврилюком (Україна)*

### Вступ

Відповідно до наказу начальника Придніпровської залізниці від 19.02.2013 р. за № 87/Н [8] та наказу служби колії Придніпровської залізниці [16] були проведені експериментальні дослідження взаємодії залізничної колії із проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5 та рухомого складу.

Підставою для проведення експериментальних досліджень є відсутність чітких науково-обґрунтованих результатів роботи проміжних елементів вузла скріплення типу КПП-5 підчас експлуатації [6, 9, 11].

### Характеристика дослідної ділянки, методика проведення випробувань та обробки даних

Експериментальні дослідження проводились галузевою Колієвипробувальною науково-дослідною лабораторією Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, (КГНДЛ ДНУЗТу) при участі авторів з кафедри – «Колія та колійне господарство».

Дослідження проводились на ділянці Нижньодніпровськ вузол - Самарівка в кривій, радіусом 400 м, Придніпровської залізниці. Дослідна ділянка розміщувалась в зоні кругової кривої.

Ділянка: план лінії: крива, радіусом 400 м; конструкція колії – ланкова колія із рейками типу Р65, шпали залізобетонні,

баласт двошаровий, товщиною 35/20 см; епюра шпал 2000 шт/км; скріплення типу КБ-65.

На ділянці виконується оборот в основному вантажних поїздів. Вантажонапруженість на ділянці становить 50 млн. т. км. брутто / км. за рік.

По показникам стрічки вагона колієвимірвача, колія на даній ділянці утримується згідно [15] в стані – «відмінно».

Для проведення експериментальних досліджень, відповідно до наказу [16], було укладено в колію партію із 10 залізобетонних шпал типу СБ-3 під проміжне рейкове скріплення типу КПП-5 в межах кругової кривої, з'єднувальної гілки Нижньодніпровськ вузол – Самарівка (195 км. ПК8) Придніпровської залізниці.

Для проведення експерименту був попередньо сформований дослідний рухомий склад із двох електровозів типу ЧС7, двох піввагонів та двох вагонів для зерна.

Поїздки виконувались із швидкістю руху 5, 40, 90 км/год.

В процесі виконання експерименту на дослідній ділянці колії замірялись такі параметри як:

- напруження в рейках;
- вертикальні та горизонтальні сили, що діють на рейки;
- горизонтальні віджимання головки рейки;
- вертикальні осьові прогини рейок;

- напруження у верхній та нижній частинах прутка клеми першої гілки;
  - напруження у верхній та нижній частинах прутка клеми другої гілки;
- Допустимі величини сил, деформацій та напружень в колії згідно [14] становлять:
1. Напруження в кромках, МПа:
    - підшви рейки.....240
  2. Горизонтальні сили взаємодії колеса та рейки з умов міцності роздільних рейкових скріплень на перегонах та стрілочних переводах, кН:
    - для локомотива.....150
    - для вагона.....120
  3. Переміщення рейки, мм:
    - вертикальні.....10
    - горизонтальні (рекомендований показник, який визначається з випробувань).....6

Місця встановлення приладів на дослідній ділянці визначались на підставі натурних обмірів колії та математичного моделювання взаємодії рухомого складу із колією.

Вибір місць наклейки тензодатчиків на клеми типу КП-5 за умови появи по всій довжині її прутка максимальних напружень, здійснювалось за допомогою математичного моделювання в основі якого лежить теорія метода кінцевих елементів (МКЕ) [12, 13, 17].

Схема розташування тензометричних датчиків на клеми проміжного рейкового скріплення типу КПП-5 зображена на рис. 1.

Схема дослідної ділянки із пристроями приведена на рис. 2.

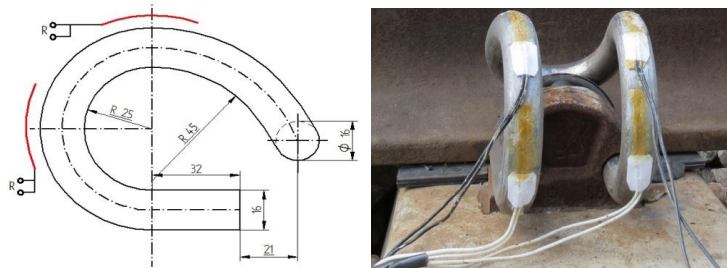


Рис. 1. Схема встановлення датчиків на клеми типу КП-5 проміжного рейкового скріплення типу КПП 5

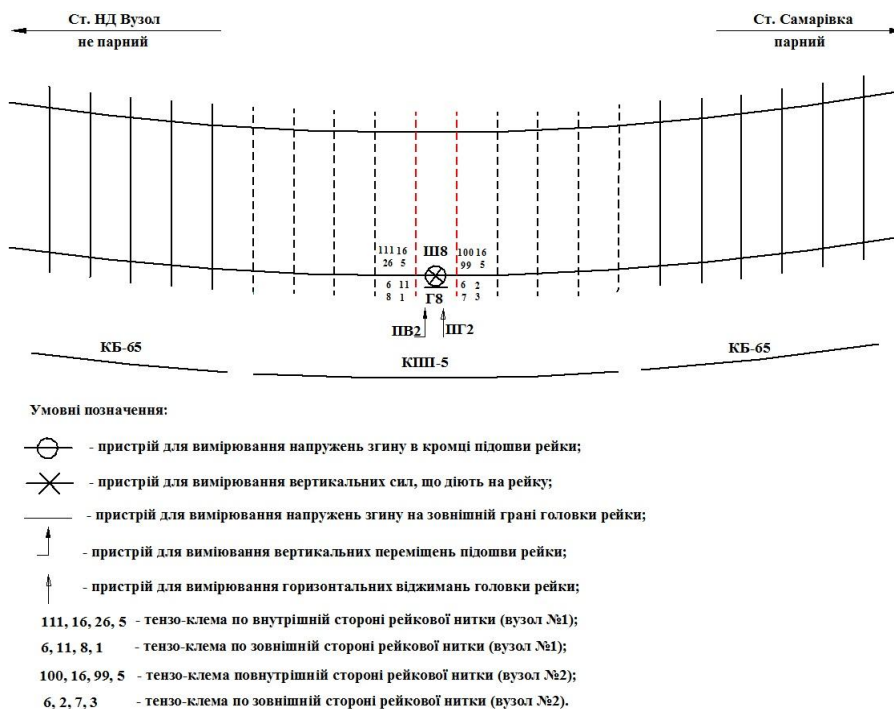


Рис. 2. Схема встановлення вимірювальних пристроїв на дослідній ділянці

Для реєстрації напружень в рейках, в елементах скріплень, вертикальних сил та бічних сил використовувалися тензорезистори КФ5П1 прямокутні з базою 20 мм опором  $200,0 \pm 0,5$  Ом.

Для вимірювання просторових деформацій рейкових ниток використовувалися прогиноміри конструкції ЦНИ МПС.

Для вимірювань напружень в елементах колії і їх деформацій використовувався тензоземетричний комплекс «ПОНІЛ-Ц» [18, 22].

Обробка та розшифрування експериментальних даних відбувалась за допомогою комп'ютерних програм, «PONIL Record» [19], «PONIL Change» [20] та «PONIL Decoding» [21], розроблених співробітниками кафедри «Колія та колійне господарство» та Колієвипробувальної лабораторії.

Експериментальні дані оброблялися по показниках кожного датчика, при заданій швидкості руху дослідного рухомого складу. Створювалась первинна вибірка, на основі якої виконувалась статистична обробка експериментальних даних.

Бокові динамічні сили, що діють від коліс на рейки в залежності від значень напружень, отриманих експериментально в кромках підшви рейки та головки рейок, розраховувались за методикою О. П. Єршкова [4]. Кінцевим виразом для визначення бокових сил по даній методиці є:

$$H = B \cdot \sigma_n^n \quad (1)$$

де  $H$  - бокові сили, що виникають в колії, в кН;

$B$  - коефіцієнт для визначення сил, в  $см^2$ ;

$\sigma_n^n$  - напруження в зовнішній кромці підшви рейки, МПа.

Виникаючі в колії бічні та вертикальні сили від дослідного рухомого складу зображені на рис. 3, 4.

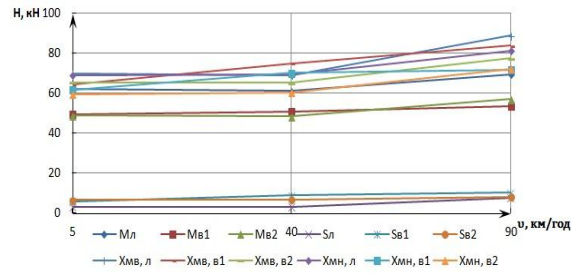


Рис. 3. Залежність горизонтальних сил від швидкості руху

Для кожної вибірки експериментальних даних визначались по стандартній методиці основна статистика: середнє ( $M$ ), середньоквадратичне відхилення ( $S$ ), максимально імовірні ( $X_{MB}$ ), максимально спостережувальні ( $X_{MN}$ ) значення, до прийнятого для розрахунків елементів верхньої будови колії рівня надійності 0,994 [1, 3, 10].

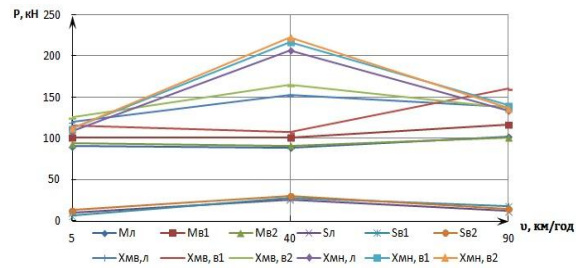


Рис. 4. Залежність вертикальних сил від швидкості руху

Максимальні значення бічних сил не перевищують 81,27 кН, максимальні імовірні – 84,06 кН, що не перевищують максимально-допустимих згідно [14].

Максимальні значення вертикальних сил (рис. 4) досягають 170,7 кН, максимальні імовірні значення – 222,4 кН, середнє значення – 106,4 кН.

Середні значення напружень в залежності від швидкості руху розподілялись в діапазоні від 130 МПа до 172 МПа під локомотивами та від 95,9 МПа до 162 МПа під вагонами. Максимальні спостережувальні 96,6-172 МПа під локомотивами та 76-142,8 МПа під вагонами (рис. 5).

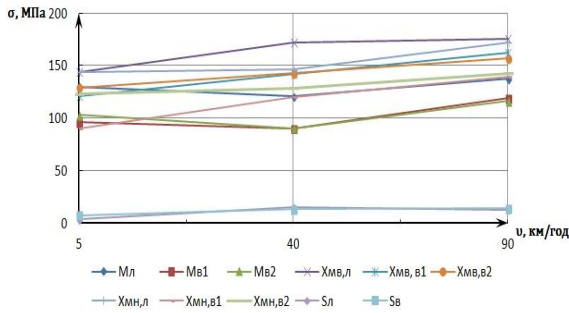


Рис. 5. Напруження в кромках підшви рейки що спостерігались в залежності від швидкості руху

Результати вибірки вертикальних осьових прогинів рейки (мм) зображені на рис. 6.

Діапазон середніх значень вертикальних осьових прогинів рейкової нитки розподілявся в діапазоні від 1,2 мм до 1,7 мм а по максимально спостережувальних значеннях від 1,4 мм до 1,8 мм.

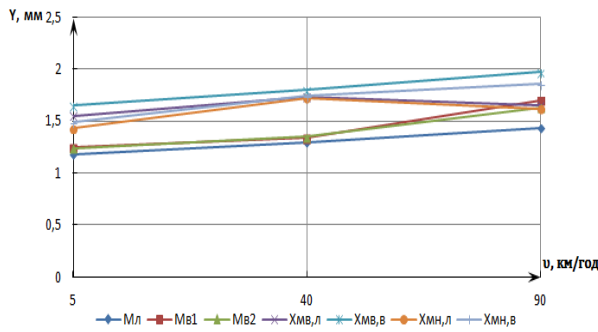


Рис. 6. Вертикальні прогини рейок що спостерігались

Результати вибірки горизонтальних віджимань головки рейки, зображені на рис. 7.

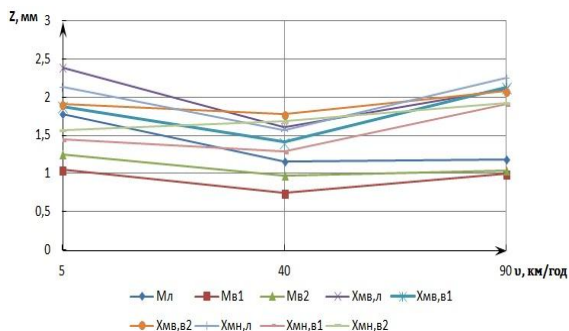


Рис. 7. Горизонтальні віджимання головки рейки що спостерігались

Згідно з рис. 7, діапазон середніх значень бокових горизонтальних віджимань головки рейки коливається від 1,2 мм до 1,8 мм – під локомотивами, від 0,7 мм до 1,2 мм – під вагонами. Максимальні спостережувальні значення від 1,6 мм до 2,2 мм – під локомотивами, від 1,3 мм до 1,9 мм – під вагонами.

### Крутні напруження в прутках клем типу КП-5 у вузлі рейкового скріплення типу КПП-5

З метою визначення максимально-імовірних місць появи напруженого стану в прутках клем як одного із основних елементів проміжного рейкового скріплення типу КПП-5, - визначались напруження.

Були вибрані 4-клеми проміжного рейкового скріплення типу КПП-5. Отримані в певних фіксованих експериментальних перерізах дані були об'єднані у вибірці по кожній рухомій одиниці дослідного рухомого складу для певної швидкості руху залежно від нумерації осей.

Аналізуючи експериментально-отримані дані, встановлено, що значення напружень у верхній та нижній частині прутка двох клем по внутрішній стороні рейкової нитки відрізняються на 5 % - під локомотивами, 8 %- під вагонами, на 7 % - під локомотивами та 6,5 % - під вагонами.

Значення напружень у верхній та нижній частині прутка двох клем по зовнішній стороні рейкової нитки відрізняються на 20,6 % - під локомотивами, 11,4 % - під вагонами, та 12 % - під локомотивами, 4,3 % - під вагонами.

Спостерігаються практично не змінні значення напружень, які виникають в двох клемах по зовнішній та в двох клемах по внутрішній стороні рейкової нитки у вузлі проміжного рейкового скріплення типу КПП-5. Згідно з цим експериментально-отримані значення напружень, що виникають в прутках клем об'єднані в чотири вибірки, які характеризують напруження в

верхній та нижній частині прутка клем по внутрішній стороні та у верхній та нижній частині прутка клеми по зовнішній стороні рейкової нитки.

Величини зміни напружень в прутках клеми по зовнішній стороні рейкової нитки в залежності від швидкості руху, представлені графічно на рис.8.

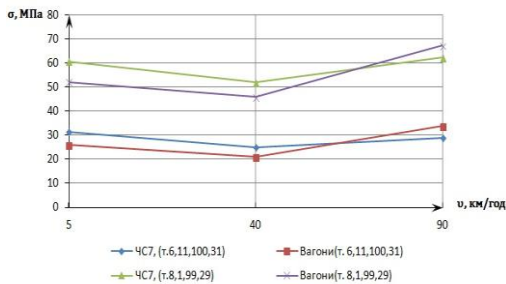


Рис. 8. Залежність напружень в прутках клеми від швидкості руху (зн. сторона рейкової нитки)

Значення напружень в верхній частині прутка клеми по зовнішній стороні рейкової нитки (група точок 6, 11, 100, 31) розподіляються в діапазоні від 18 МПа до 32 МПа – під локомотивами, від 17 МПа до 39 МПа – під вагонами. Максимальні спостережувальні значення напружень 45-104 МПа – під локомотивами, та 41-121 МПа під вагонами.

Значення напружень в нижній частині прутка клеми по зовнішній стороні рейкової нитки (група точок 8, 1, 99, 29) розподіляються в діапазоні від 38 МПа до 64 МПа – під локомотивами, від 41 МПа до 75 МПа – під вагонами. Максимальні спостережувальні значення 50-96 МПа – під локомотивами, та 49-108 МПа – під вагонами.

Досліджено, що експериментально-отримані напруження в прутках клеми по зовнішній стороні рейкової нитки у верхній частині прутка клеми на 50 % менші ніж величина напружень у нижній частині прутка клеми – під локомотивами, та на 48 % - під вагонами.

Величини зміни напружень в прутках клеми по зовнішній стороні рейкової нитки в залежності від швидкості руху, представлені графічно на рис.9.

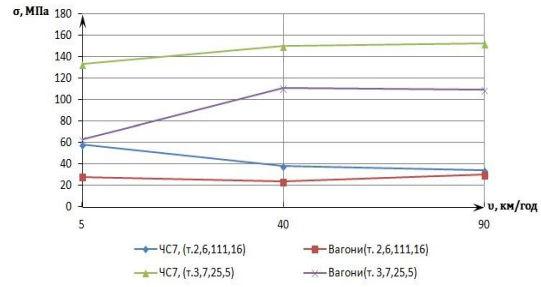


Рис. 9. Залежність напружень в прутках клеми від швидкості руху (вн. сторона рейкової нитки)

Середнє значення напружень у верхній частині прутка клеми по внутрішній стороні рейкової нитки в залежності від швидкості руху (група точок 2, 6, 111, 16) розподіляються в діапазоні від 28,02 МПа до 57,8 МПа – під локомотивами, від 21,36 МПа до 40,51 МПа – під вагонами. Максимальні спостережувальні значення 58-100 МПа – під локомотивами, 53-75 МПа – під вагонами.

Значення напружень в нижній частині прутка клеми по внутрішній стороні рейкової нитки (група точок 3, 7, 25, 5) розподіляються від 64,2 МПа до 152,4 МПа – під локомотивами та від 114 МПа до 144 МПа – під вагонами. Максимальні спостережувальні 135-426 МПа – під локомотивами, та 187-416 – під вагонами.

Встановлено, отримані значення напружень в прутках клеми по внутрішній стороні рейкової нитки у верхній частині прутка клеми на 62 % менші ніж напруження у нижній частині прутка клеми – під локомотивами, та на 72 % - під вагонами.

В загальному, аналізуючи опрацьовані дані, встановлено, що середні значення напружень у верхній частині прутка клеми по внутрішній стороні рейкової нитки на 45 % більше ніж по зовнішній частині рейкової нитки – під локомотивами, та на 4 % більше – під вагонами. Середні значення напружень у нижній частині прутка клеми по внутрішній стороні рейкової нитки на 58 % більше чим по зовнішній стороні – під локомотивами, та на 50 % більше – під вагонами.

### Порівняння результатів розрахунку напруженого стану в клемах у вузлі скріплення типу КПП-5 по розробленій моделі та експерименту

Для перевірки достовірності математичної моделі, розробленої на основі теорії моделювання методом кінцевих елементів (далі МКЕ) були виконані розрахунки у відповідності з конструкцією дослідної ділянки.

У зв'язку з цим була створена математична модель залізничної колії із проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5, яка враховувала особливості її роботи при використанні теорії МКЕ [12, 13, 17]. Геометричні розміри проміжних елементів ділянки залізничної колії, що закладались в модель як вихідні дані, для розрахунку приймалися згідно нормативних креслень, які представлені відповідно у [6, 7].

На рис. 10 – 13 наочно представлені результати розрахунків відповідно по МКЕ та експерименту і їх порівняння.

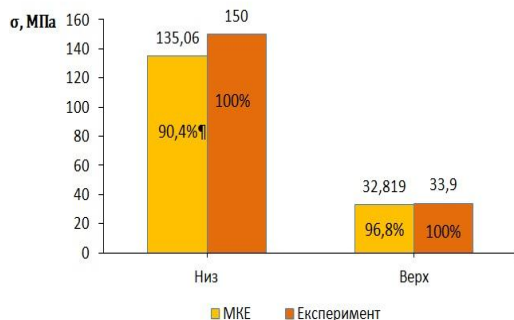


Рис. 10. Напруження в клемі 1(вн. стор. р. н) при різних методиках для локомотивів

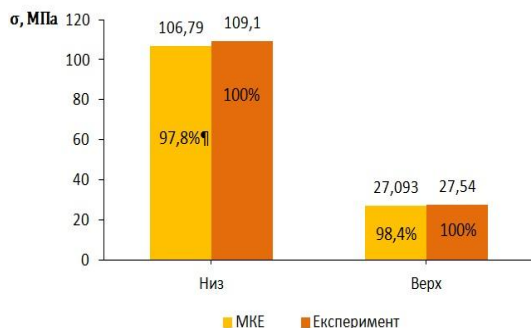


Рис. 11. Напруження в клемі 1(вн. стор. р. н) при різних методиках для вагонів



Рис. 12. Напруження в клемі 2(зн. стор. р. н) при різних методиках для локомотивів

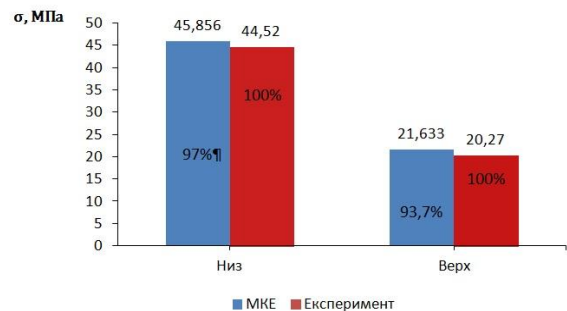


Рис. 13. Напруження в клемі 2(зн. стор. р. н) при різних методиках для вагонів

Відповідно із вище отриманими значеннями можна зробити висновок, що в місцях технологічних згинів прутка клеми, де виникають максимальні напруження від кручення, під час експлуатації будуть виникати концентратори напружень в металі клеми, що в подальшому до втрат клемою своїх пружних властивостей з одночасною появою релаксації [5, 9].

### Результати

Згідно з проведених експериментальних досліджень залізничної колії із скріпленням типу КПП-5 встановлено: максимальні значення бічних сил не перевищують 81,3 кН, вертикальні – 170,7 кН.

Середні значення напружень в рейках розподіляються в діапазоні 130-172 МПа – під локомотивами, та 95,8-162 МПа – під вагонами.

Діапазон середніх значень вертикальних осьових прогинів рейки коливається в межах 1,2 – 1,7 мм, горизонтальних віджимань в діапазоні 0,7 – 1,9 мм.

Середні значення напружень в прутках клем по зовнішній стороні рейкової нитки на 48-50 % менше чим напруження, які виникають в прутках клеми по внутрішній стороні рейкової нитки.

### Наукова новизна та практична значимість

В даній роботі вперше було отримані положення та експериментальні результати роботи залізничної колії із скріпленням типу КПП-5. Це дозволило більш чітко дослідити та проаналізувати роботу проміжних елементів вузла скріплення а саме найбільш імовірні місця появи напруженого стану в прутках клеми. Це пояснюється тим, що клеми являються одним із основних елементів у вузлі скріплення, стабільність роботи яких суттєво впливає на силовий ланцюжок – «рейка-клема-прокладка», і на надійність роботи залізничної колії вцілому.

Одночасно від цього буде забезпечуватись безпека руху на залізничному транспорті.

### Висновки

В цілому по експериментальних дослідженнях встановлено, динамічні бокові, вертикальні сили, вертикальні і горизонтальні прогини рейки, зафіксовані підчас досліджень не перевищують гранично-допустимих згідно [14].

Напруження, що виникають в прутках клем типу КПП-5 у вузлі рейкового скріплення типу КПП-5 в основному не перевищують максимальних допустимих згідно з [2].

Згідно з експериментальними та теоретичними дослідженнями підтверджується стабільність роботи залізничної колії із скріпленням типу КПП-5 в ділянках колії радіусом  $R = 400\text{ м}$ . Одночасно з цим буде і забезпечуватись безпека руху на залізничному транспорті з точки зору взаємодії колії та рухомого складу.

### Бібліографічний список

1. Балух, Х. Диагностика верхнего строения пути [Текст] / Пер. с польск.

- И. В. Шварца. Под ред. М. Ф. Вериги. – Транспорт., 1981. – 415 с.
2. Говоруха, В. В. Создание и внедрение упругих элементов промежуточного скрепления рельсового пути [Текст] / В. В. Говоруха // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2003. – Вип. 2. – С. 162–171.
3. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст]: учеб. пособие для вузов / В. Е. Гмурман. – М.: Высш. шк., 2005. – 479 с.
4. Ершков, О. П. Исследование жесткости железнодорожного пути и ее влияние на работу рельсов в кривых участках [Текст] / О. П. Ершков. Труды ВНИИЖТа. – М.: Издательский отдел ЦНИИ МПС. 1963. – Вып. № 264. – 152 с.
5. Костюк, М. Д. Оцінка параметрів пружної клеми марки КП.-5.2 / М. Д. Костюк, В. В. Рибкін., І. О. Бондаренко., Н. М. Івченко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2003. – Вип. 2. – С. 11–17.
6. Посібник з устрою, монтажу та утриманню проміжних пружних скріплень типу КПП. ЦП-0104 [Текст]: Затв.: Наказ Укрзалізниці 14.09.2005 № 34Ц / Мін-во трансп. та зв'язку України. – К., 2005. – 72 с.
7. Практичні рекомендації щодо проведення вхідного контролю якості матеріалів верхньої будови колії [Текст]: Затв.: Наказ Укрзалізниці 30.01.2003 № ЦП-7/72 / Мін-во трансп. України. – Д.: Арт-прес., 2003. – 196 с.
8. Проведення випробувань піввагона моделі 12-7039-01 та вагона для зерна моделі 19-7053, виготовлених ПАТ «КВБЗ». Наказ від 19.02.2013 за № 87/Н.
9. Рибкін, В. В. Оцінка втомлено-міцнісних характеристик елементів вузла проміжного рейкового скріплення типу КБ-65 та КПП-5 при повторно-змінних циклах навантаження конструкції [Текст] / В. В. Рибкін,

- І. О. Бондаренко, Р. В. Маркуль // Пробл. взаємодії колії та рухомого складу, присвяченій 100-річчю проф. М. А. Фрішмана. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2013. – С. 39–40.
10. Рибкін, В. В. Надійність залізничної колії: навч. посіб. [Текст] / В. В. Рибкін, І. О. Бондаренко, Д. М. Курган. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2013. – 154 с.
11. Рибкін, В. В. Оцінка впливу величини бічної-горизонтальної сили, що передається на вузол проміжного рейкового скріплення типу КБ та КПП-5 [Текст] / В. В. Рибкін, І. О. Бондаренко, Р. В. Маркуль // Пробл. взаємодії колії та рухомого складу, присвяченій 100-річчю проф. М. А. Фрішмана : пр. міжнарод. наук.-практ. конф. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2013. – С. 38–39.
12. Розин, Л. А. Метод конечных элементов. [Текст] / Л. А. Розин // Сорсовский образовательный журнал. – 2000 – №4. – С. 120-127.
13. Стренг, Г. Теория метода конечных элементов [Текст] / Г. Стренг, Дж. Фикс. – М.: Мир., 1977. – 349 с.
14. Технічні вказівки з проведення натурних випробувань рухомого складу на колію та стрілочні переводи [Текст]: Затв.: Наказ Укрзалізниці 04.03.2010 №028 ЦЗ/ Мін-во трансп. та зв'язку України. – К., 2010. – 17 с.
15. Технічні вказівки щодо оцінки стану рейкової колії за показниками колієвимірювальних вагонів та забезпечення безпеки руху поїздів при відступах від норм утримання рейкової колії. ЦП0020 [Текст]: Затв.: Наказ Укрзалізниці 17.01.2005 № 9-Ц/ Мін-во трансп. та зв'язку України. – К., 2005. – 48 с.
16. Укладання в колію 10 шпал типу СБ-3 під скріплення типу КПП-5 в межах кругової кривої з'єднувальної гілки Нижньодніпровськ вузол – Самарівка (195 км ПК 8) Придніпровської залізниці для поведіння випробувань взаємодії рухомого складу та колії із скріпленням типу КПП-5. Наказ від 22.04.2013 за № ПС04/1069.
17. Численные методы в механике / за ред. Н. Г. Сурьянникова. М.: Мир., 2004. – 564 с.
18. Бондаренко, І. О. Використання цифрової вимірювальної техніки для експериментальних досліджень взаємодії колії і рухомого складу [Текст] / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган, О. М. Патласов, В. Є. Савлук. Вісник ДНУЗТу № 37. Д. 2011. С. 124-128.
19. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 48583 від 04.04.2013 «Комп'ютерна програма «PONIL Record».
20. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 48584 від 04.04.2013 «Комп'ютерна програма «PONIL Change».
21. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 48585 від 04.04.2013 «Комп'ютерна програма «PONIL Decoding».
22. Рыбкин, В. В. Определение допускаемых скоростей движения по новым конструкциям стрелочных переводов, предназначенных для сварки в плети бесстыкового пути [Текст] / Рыбкин В. В., Савлук В. Е./ IX научно-техническая конференция с международным участием. Труды МИИТ – Москва, «Республиканская типография «Красный Октябрь» – 2012. – С. 194-198

**Ключові слова:** проміжне скріплення типу КПП-5, пружна клема, експериментальні дослідження, напружений стан.

**Ключевые слова:** промежуточное скрепление типа КПП-5, упругая клемма, экспериментальные исследования, напряженное состояние.

**Keywords:** with intermediate rail fastening type КПП-5, the elastic terminal, experimental research, the state of stress.

Надійшла до редколегії 05.11.2014  
Прийнята до друку 10.11.2014