

УДК 625.1/.3:0.45/.049

А.О. Сулим, С.О. Столєтов, Е.В. Третьак, В.С. Речкалов, П.О. Хозя

ТЕОРЕТИЧНО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ З ВПЛИВУ РУХОМОГО СКЛАДУ НА ЗАЛІЗНИЧНУ КОЛІЮ. ЧАСТИНА 1. ОПИСАННЯ ПРОЦЕДУРИ КОМПЛЕКСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В статті запропоновано процедуру теоретично-експериментальних досліджень з впливу рухомого складу на залізничну колію. Розглянуто основні аспекти і етапи, а також описано математичне забезпечення виконання цих досліджень. Встановлено, що повний комплекс досліджень з впливу на колію складається з доекспериментальних, експериментально-розрахункових та експериментальних досліджень за допомогою вимірювального комплексу. Запропоновано подальші дослідження направити на апробацію зазначеної процедури досліджень.

Вступ та постановка проблеми. Залізнична колія є найбільш капіталоемною ланкою системи, що забезпечує безпечні умови перевезень, і тому для неї в першу чергу необхідно визначати оптимальні умови експлуатації, у тому числі найбільші допустимі та раціональні швидкості руху поїздів. Під раціональними швидкостями руху розуміють такі найбільші швидкості руху, які при заданих термінах служби елементів колії, заданих витратах на її експлуатацію, заданій системі експлуатації колії повністю забезпечують за міцністю її елементів безпечне слідування поїздів [1].

Отже дослідження, направлені на визначення оптимальних умов експлуатації інфраструктури залізничного транспорту, є досить важливими. Важливість проведення досліджень, в першу чергу, диктується безпечними умовами перевезень, в другу – забезпеченням мінімальних витрат під час експлуатації інфраструктури залізничного транспорту. Одним з важливих етапів проведення зазначених досліджень є комплексні випробування з впливу рухомого складу на колію, які включають оцінку динамічних якостей рухомого складу, його вплив на залізничну колію та стрілочні переводи, результати яких використовуються для встановлення допустимих швидкостей руху та умов обертання.

Випробування з впливу на колію виконуються, насамперед, для новоствореного рухомого складу з метою перевірки критерію неперевищення допустимих умов взаємодії. Дані випробування виконують в прямій, пологій та крутій кривих та на стрілочних переводах з вимірюванням динамічних і силових процесів [1–4].

Аналіз досліджень [1–3, 5–13] з впливу рухомого складу на колію за останній період свідчить, що основна їх частина направлена на визначення впливу на колію вантажних вагонів з підвищеним осьовим навантаженням та швидкісного пасажирського рухомого складу (пасажирських вагонів, швидкісних електропоїздів і локомотивів).

© Сулим А.О., Столєтов С.О., Третьак Е.В., Речкалов В.С, Хозя П.О., 2018

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

За результатами аналізу вищезазначених досліджень також встановлено, що останнім часом відбуваються суттєві зміни в конструкції верхньої будови колії та новоствореного рухомого складу. Дослідженнями в цьому напрямку займається значна кількість вітчизняних та іноземних вчених. Слід окремо виділити дослідження науковців Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка Лазаряна (Рибкіна В.В., Уманова М.І., Татуревича А.П., Циганенка В.В., Савлука В.Є., Кургана М.Б., Кургана Д.М., Арбузова М.А., Патласова О.М., Бондаренка О.І.), Державного економіко-технологічного університету транспорту (Даніленка Е.І., Йосифовича Р.М., Карпова М.І., Молчанова В.М., Велиця В.П.), Всеросійського науково-дослідного інституту залізничного транспорту (Веріго М.Ф., Ромена Ю.С., Тихова М.С., Заверталока А.В., Когана О.Я.). Отже питання дослідження взаємодії нового рухомого складу з інфраструктурою залізничного транспорту (залізничною колією та стрілочними переводами) залишається важливим і актуальним. Отримання позитивних результатів досліджень з впливу новоствореного рухомого складу на колію є одним з важливих етапів постановки його на виробництво.

Таким чином, дана стаття присвячена актуальному питанню щодо дослідження впливу дослідного рухомого складу на залізничну колію, зокрема розробці процедури повного комплексу досліджень.

Мета роботи – розробка процедури дослідження з впливу рухомого складу на залізничну колію та стрілочні переводи.

Матеріал і результати досліджень. В цій роботі запропоновано процедуру комплексних досліджень з впливу рухомого складу на залізничну колію, яка складається з наступних етапів:

- доекспериментальні дослідження (теоретичні дослідження з використанням аналітичних методів розрахунку або методів математичного моделювання, що виконуються перед проведенням випробувань);
- експериментально-теоретичні дослідження (розрахунково-експериментальна оцінка показників впливу на колію та стрілочні переводи з використанням результатів ходових динамічних випробувань дослідного рухомого складу);
- експериментальні дослідження (експериментальна оцінка показників впливу на колію та стрілочні переводи дослідного рухомого складу з використанням вимірювального комплексу).

Перший етап. Доекспериментальні дослідження виконуються для оцінки показників впливу на залізничну колію на етапі проектування та виготовлення дослідного рухомого складу. Основним нормативним документом на території України для розрахунку впливу рухомого складу на колію є Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість (ЦП 0117) (далі – Правил розрахунків) [14]. Також під час розрахунків необхідно керуватись Типовою методикою оцінки впливу рухомого складу на колію [15] та діючими нормами, встановленими в ДСТУ 7571:2014 [4].

Вхідні дані для розрахунків беруться з технічної документації на дослідний рухомий склад (ТЗ, ТУ тощо), Правил розрахунків [14] та типової методики [15].

Згідно вищезазначених документів основними показниками з впливу рухомого складу на залізничну колію, які необхідно визначати під час доекспериментальних досліджень, є наступні:

- динамічні напруження в кромках підшви рейки на прямих і кривих ділянках
-

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

залізничної колії;

- напруження в шпалах під підкладками;
- напруження в баласті під шпалою;
- напруження на основній площадці земляного полотна;
- бічні сили, які передаються від колеса на рейку;
- динамічне вертикальне навантаження від колеса на рейку;
- коефіцієнт запасу стійкості рейко-шпальної решітки від поперечного зсуву по баласту, який визначають навантаженням, що передається на рейки;
- коефіцієнт запасу стійкості рейко-шпальної решітки від поперечного зсуву по баласту, який визначають за рамними силами;
- динамічне погонне навантаження на залізничну колію від візка.

Нижче наведено аналітичні вирази для визначення зазначених показників впливу дослідного рухомого складу на залізничну колію.

Аналітичний метод розрахунку.

1. Визначення динамічного навантаження від одиночного колеса на рейку

Динамічне вертикальне навантаження від колеса на рейку, визначається за формулою [14, 15]:

$$P_{розр} = P_{max}^{im} = \bar{P} + \lambda_{\phi} \cdot S, \quad (1)$$

де \bar{P} - середнє значення динамічної сили, кН;

S – середньоквадратичне відхилення, кН;

λ_{ϕ} - нормуючий множник ($\lambda_{\phi}=2,5$) для заданого рівня імовірності $\Phi=0,994$.

Середнє значення динамічного навантаження визначається за формулою [14]:

$$\bar{P} = P_{ст} + \bar{P}_p, \quad (2)$$

де $P_{ст}$ – статичний тиск колеса на рейку (береться з паспортних даних рухомого складу), кН;

\bar{P}_p – середнє значення сили інерції, що викликається коливаннями надресорної частини екіпажу, кН (розраховується за формулою) [14, 15]:

$$\bar{P}_p = 0,75P_p^{max}, \quad (3)$$

Максимальне динамічне навантаження колеса на рейку від вертикальних коливань надресорної частини екіпажу P_p^{max} визначається одним з наступних способів.

Перший спосіб. Динамічне навантаження від колеса на рейку P_p^{max} з використанням емпіричних залежностей динамічних прогинів ресорного підвішування Z_{max} від швидкостей руху визначається за формулою [14, 15]:

$$P_p^{max} = \mathcal{K}_p Z_{max}, \quad (4)$$

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

де J_p – жорсткість ресорного підвішування візка, приведена до одного колеса, кН/м (береться як довідкове значення з табл. 1 додатку 1 ЦП 0117);

Z_{\max} – максимальний динамічний прогин ресор, м (береться за результатами експериментальних досліджень або як довідкове значення з таблиці 5 ЦП 0117).

Другий спосіб. При відомих теоретичних довідкових значеннях k_d – коефіцієнта динамічних добавок від вертикальних коливань надресорної частини екіпажу (іменованого також коефіцієнтом вертикальної динаміки екіпажу) P_p^{\max} визначається за формулою [14, 15]:

$$P_p^{\max} = k_d (P_{cm} - q_k), \quad (5)$$

де q_k – віднесена до колеса вага необресорених частин, кН (береться з паспортних даних досліджуваного рухомого складу або як довідкове значення з таблиці 1 ЦП 0117).

За відсутності теоретичних довідкових даних значення коефіцієнта вертикальної динаміки k_d визначається за формулою [14, 15]:

$$k_d = 0,1 + 0,2 \frac{V}{f_{cm}}, \quad (6)$$

де V – швидкість руху, км/год.

При двухступеневому ресорному підвішуванні f_{cm} приймається як сума статичних прогинів обох ступенів, які приведені в довідкових даних рухомого складу (ЦП 0117).

Сумарне середнє відхилення динамічного вертикального навантаження колеса на рейку \bar{S} визначається за формулою композиції законів розподілу його складових:

$$\bar{S} = \sqrt{S_p^2 + S_{pn}^2 + 0,05S_{инк}^2 + 0,95S_{бнк}^2}, \quad (7)$$

де S_p – середнє квадратичне відхилення динамічного навантаження колеса на рейку від вертикальних коливань надресорної частини екіпажу, кН;

S_{pn} – середнє квадратичне відхилення динамічного навантаження колеса на рейку від сил інерції необресорених мас під час проходження колесом ізольованої нерівності колії, кН;

$S_{инк}$ – середнє квадратичне відхилення динамічного навантаження колеса на рейку від сил інерції необресорених мас, що виникають під час проходження ізольованої нерівності на рейковій нитці, кН;

$S_{бнк}$ – середнє квадратичне відхилення динамічного навантаження колеса на рейку від сил інерції необресореної маси, що виникають через наявність на поверхні кочення коліс плавних ізольованих нерівностей, кН.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Звичайно при відсутності конкретної інформації приймається середній відсоток осей, що мають ізолювану плавну нерівність, рівним 5%, відповідно – середній відсоток осей, що мають безперервну нерівність, рівний 95%.

Середнє квадратичне відхилення динамічного навантаження колеса на рейку від вертикальних коливань надресорної частини екіпажу визначається за формулою:

$$S_p = 0,08P_p^{\max} \quad (8)$$

Середнє квадратичне відхилення динамічного навантаження колеса на рейку S_p від сил інерції необресорених мас P_{pn}^{\max} , що виникають при проході ізолюваної нерівності на рейковій нитці визначається за формулою [14, 15]:

$$S_{pn} = 0,707P_{pn}^{\max} = 2,34 \cdot 10^{-5} \alpha_1 \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \varepsilon \cdot l_{ш} \bar{P} V \sqrt{\frac{U_z q_k}{k}}, \quad (9)$$

де V – швидкість руху, м/с;

\bar{P} – середнє динамічне навантаження, Н;

$\alpha_0, \alpha_1, \varepsilon, \beta, \gamma$ – коефіцієнти впливу залежно від типу рейок, шпал, баласту (значення коефіцієнтів наведено в табл. 1);

$l_{ш}$ – відстань між осями шпал, м;

U_z – модуль пружності підрейкової основи, МПа;

q_k – величина необресореної маси екіпажу, Н, яка приходить на 1 колесо;

k – коефіцієнт відкосої жорсткості основи і рейки, m^{-1} .

Таблиця 1 – Значення коефіцієнтів впливу

Параметри	α_0	α_1	ε	β	γ
Дерев'яні шпали	0,433	1,0	1,0	-	-
Залізобетонні шпали	0,403	0,931	0,322	-	-
P50	-	-	-	1,00	-
UIS60	-	-	-	0,90	-
P65	-	-	-	0,87	-
P75	-	-	-	0,82	-
Щебінь і сортований гравій	-	-	-	-	1,0
Кар'єрний гравій і черепашник	-	-	-	-	1,1
Пісок	-	-	-	-	1,5

Середнє квадратичне відхилення динамічного навантаження колеса на рейку $S_{инк}$, кН від сил інерції необресореної маси $P_{инк}^{\max}$, що виникають через наявність на поверхні кочення ізолюваних нерівностей визначається за формулою [14, 15]:

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

$$S_{инк} = 0,25 P_{инк}^{max} = 0,5 \cdot 10^6 \alpha_0 \cdot \xi \cdot e_0 \frac{U_z}{k}, \quad (10)$$

де e_0 – розрахункова глибина ізольованої нерівності на колії, м. Прийнято вважати її рівною $2/3$ від повної глибини нерівності, внаслідок швидкого загладжування її країв;

ξ – безрозмірний прогин, рівний відношенню максимального додаткового прогину рейки до глибини нерівності на колесі.

Середнє квадратичне відхилення динамічного навантаження колеса на рейку $S_{обнк}$ від сил інерції необресореної маси $P_{обнк}^{max}$ при русі колеса з плавною безперервною нерівністю на поверхні кочення визначається за формулою [14, 15]:

$$S_{обнк} = 0,225 \cdot P_{обнк}^{max} = \frac{6,739 \cdot 10^{-3} \alpha_0 U_z V^2 \sqrt{q_k}}{d^2 \sqrt{k U_z - 326 k^2 q_k} \cdot 10^{-6}}, \quad (11)$$

де d – діаметр колеса, м.

Після визначення середньоквадратичних відхилень усіх змінних значень сил інерції можна визначити сумарне середньоквадратичне відхилення S з формули (7) і після цього визначається максимальне імовірне значення динамічного навантаження з формули (1).

2. Визначення еквівалентних навантажень на колію

При практичних розрахунках на міцність приймається:

– в розрахунковому перетині рейки, тобто в перетині, де визначаються напружений стан, діє максимальне імовірне динамічне колісне навантаження $P_{розр} = P_{дин}^{max}$, а вплив сусідніх коліс приймається у вигляді середнього динамічного тиску $\bar{P}_{дин}$, зважаючи на те, що максимум динамічного тиску розрахункового колеса не співпадає з максимумом тиску сусідніх коліс;

– вплив на рейкову нитку усіх інших коліс поїзда враховується за допомогою завантаження лінії впливу моментів M і лінії впливу поперечних сил Q (від дії одного колісного навантаження $P=1$) системою колісних навантажень $\bar{P}_{дин_i}$ і визначенням еквівалентних вантажів $P_{екв}^I$ і $P_{екв}^{II}$ за допомогою функцій μ_i і η_i , які визначають ступінь впливу на розрахунковий переріз кожного з інших коліс поїзда.

Максимальне еквівалентне навантаження для розрахунків напружень в рейках від вигину і кручення визначається за формулою [14, 15]:

$$P_{екв}^I = P_{дин}^{max} + \sum \bar{P}_i \cdot \mu_i. \quad (12)$$

Максимальне еквівалентне навантаження для розрахунків прогинів рейок, а також напружень і сил в елементах підрейкової основи визначаються за формулою:

$$P_{екв}^{II} = P_{дин}^{max} + \sum \bar{P}_i \cdot \eta_i. \quad (13)$$

Функції μ_i і η_i знаходяться в залежності від величини kx_i , де x_i - відповідає

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

відстаням від розрахункового перерізу до кожного колеса, яке враховується:

$$\begin{aligned}\mu_i &= e^{-kx_i} (\cos kx_i - \sin kx_i) \\ \eta_i &= e^{-kx_i} (\cos kx_i + \sin kx_i)\end{aligned}\tag{14}$$

Сусідні колеса можуть здійснювати як позитивний так і негативний вплив (внаслідок зміни знаку функцій μ і η по довжині балки), тобто вони можуть довантажувати або розвантажувати розрахунковий переріз. Очевидно, що для того щоб з'ясувати найбільші імовірні внутрішні зусилля (напруження) в рейках, необхідно знайти найгірший варіант завантаження рейки системою колісних навантажень. Робиться це на лініях впливу μ і η , тобто вибирається найгірший варіант завантаження ліній впливу.

3. Визначення показників напружено-деформованого стану елементів конструкції верхньої будови колії

Згинаючий момент в будь-якому перерізі рейки $M_{дин}$ та сила тиску рейки на опори $Q_{дин}$ визначається за формулами [14, 15]:

$$M_{дин} = \frac{1}{4k} P'_{екв} = \frac{1}{4k} (P_{розр} + \sum \bar{P}_i \cdot \mu_i),\tag{15}$$

$$Q_{дин} = \frac{kl}{2} P''_{екв} = \frac{kl}{2} (P_{розр} + \sum \bar{P}_i \cdot \eta_i).\tag{16}$$

Динамічний прогин в будь-якому перерізі рейки $Z_{дин}$ визначається за виразом:

$$Z_{дин} = \frac{P''_{екв}}{K_{Z(p-n)}} = \frac{k}{2U_z} \cdot P''_{екв} = \frac{k}{2U_z} (P_{розр} + \sum \bar{P}_i \cdot \eta_i),\tag{17}$$

де $K_{Z(p-n)}$ – розрахункова жорсткість рейкової нитки, що враховує сумісну роботу рейки і основи.

Максимальні напруження в елементах верхньої будови колії визначаються за формулами:

– в підшві рейки від дії згинаючого моменту $M_{дин}$ [14, 15]:

$$\sigma_o = \frac{M_{дин}}{W_n},\tag{18}$$

де W_n – момент опору рейки по низу підшви.

– в кромках підшви рейки [14, 15]:

$$\sigma_k = f \cdot \sigma_o,\tag{19}$$

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

де f – розрахунковий коефіцієнт, який знаходиться з довідкових таблиць залежно від типу рухомого складу і плану лінії.

– в шпалах під підкладкою [14, 15]:

$$\sigma_{ш} = \frac{Q_{дин}}{\omega}, \quad (20)$$

де ω – площа рейкової підкладки.

– в баласті під шпалою [14, 15]:

$$\sigma_B = \frac{Q_{дин}}{\Omega \cdot \alpha}, \quad (21)$$

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).

4. Визначення напруження на основній площадці земляного полотна

Розрахункова формула для визначення нормальних напружень σ_h у баласті (у тому числі і на основній площадці земляного полотна) в розрахунковій точці M (на глибині h від підошви шпали по розрахунковій вертикалі) має вид [14, 15]:

$$\sigma_h = \sigma_{h_p} + \sigma_{hc_2} + \sigma_{hc_3}, \quad (22)$$

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

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

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

Кожен з членів суми в правій частині рівняння (22) є функція від тисків на баласт, що передаються безпосередньо від нижньої постелі шпал, відповідно: під розрахунковою шпалою $\sigma_{\bar{\sigma}_{p1}}$, під шпалою, розташованою ліворуч $\sigma_{\bar{\sigma}_{c2}}$ і шпалою; розташованою праворуч від розрахункової $\sigma_{\bar{\sigma}_{c3}}$. Крім того, ці напруження залежать від товщини баластового шару h , розташованого вище розрахункової точки (до нижньої постелі шпал):

$$\sigma_{h_p} = f(\sigma_{\bar{\sigma}_{p1}}); \quad \sigma_{hc_2} = f(\sigma_{\bar{\sigma}_{c2}}); \quad \sigma_{hc_3} = f(\sigma_{\bar{\sigma}_{c3}}), \quad (23)$$

де $\sigma_{\bar{\sigma}_{p1}}$ – напруження стискання в баласті під постеллю розрахункової шпали;

$\sigma_{\bar{\sigma}_{c2}}$ і $\sigma_{\bar{\sigma}_{c3}}$ – ті ж напруження під постелями сусідніх ліворуч і праворуч шпал.

Розрахункова схема для визначення напружень в баласті і на основній площа-

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

дці земляного полотна наведена на рис. 1 і рис. 2.

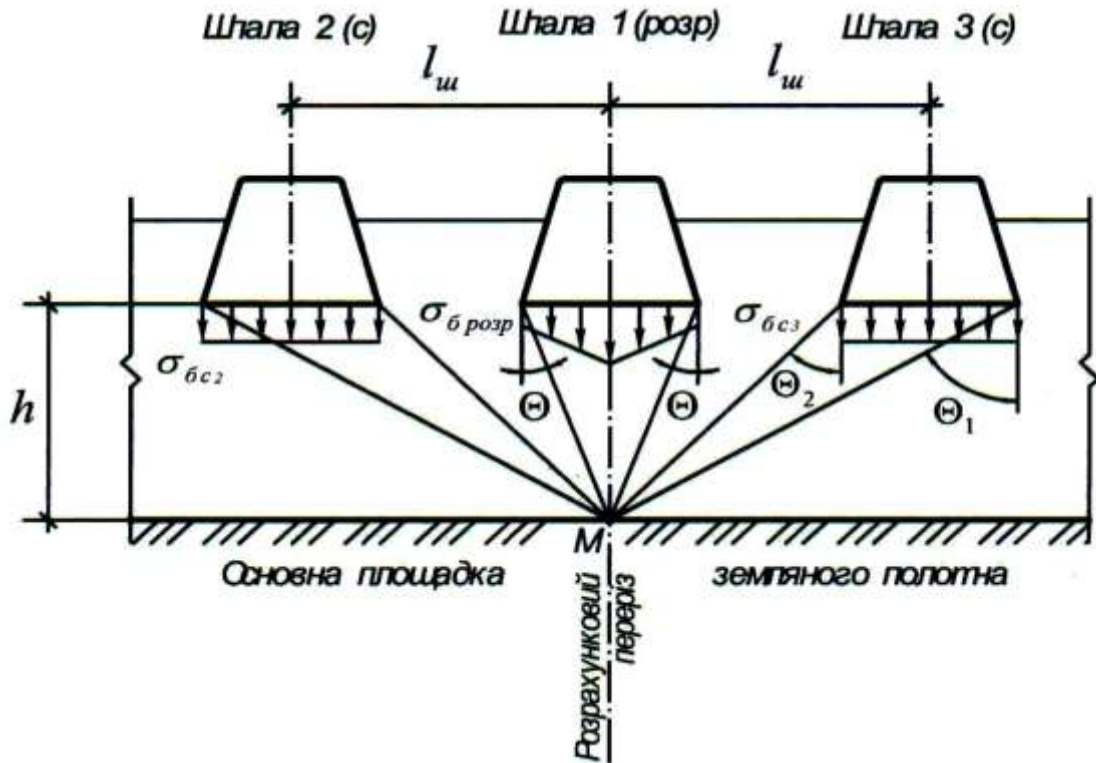


Рис.1 – Схема передачі тиску на земляне полотно від трьох суміжних шпал

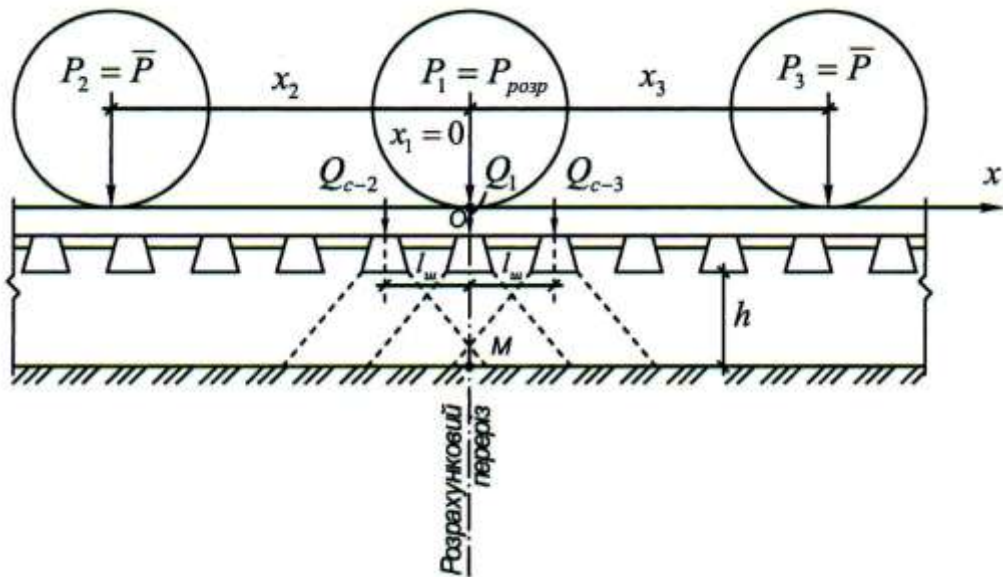


Рис. 2 – Розрахункова схема для визначення напружень в баласті і на основній площадці земляного полотна (на прикладі трьохосьового візка)

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Напруження стискання в баласті під шпалами визначаються в залежності від величини тиску рейки на шпали [14, 15]:

$$\sigma_{\bar{\sigma}_{p_1}} = \frac{Q_{p_1}}{\Omega\alpha}; \quad \sigma_{\bar{\sigma}_{c_2}} = \frac{Q_{c_2}}{\Omega\alpha}; \quad \sigma_{\bar{\sigma}_{c_3}} = \frac{Q_{c_3}}{\Omega\alpha}, \quad (24)$$

де Q_{p_1} - тиск рейки на розрахункову шпалу;

Q_{c_2} і Q_{c_3} - тиск рейки на сусідні (ліворуч і праворуч) шпали.

Сили тиску рейки на розрахункову і сусідні шпали обчислюються за формулами:

$$Q_{p_1} = \frac{kl}{2} \cdot P_{екв(p_1)}^{II} = \frac{kl}{2} (P_{розр_1} + \sum \bar{P} \cdot \eta_{2,3}); \quad (25)$$

$$Q_{c_2} = \frac{kl}{2} \cdot P_{екв(c_2)}^{II} = \frac{kl}{2} (P_{розр} \eta_{p_2} + \sum \bar{P} \eta_{c_2}); \quad (26)$$

$$Q_{c_3} = \frac{kl}{2} \cdot P_{екв(c_3)}^{II} = \frac{kl}{2} (P_{розр} \eta_{p_3} + \sum \bar{P} \eta_{c_3}). \quad (27)$$

Нормальні вертикальні напруження в розрахунковій точці на глибині h від тиску розрахункової шпали визначаються за формулою [14, 15]:

$$\sigma_{h_p} = \sigma_{\bar{\sigma}_{p_1}} r_1 [0,635mC_1 + 1,275(2-m)C_2], \quad (28)$$

де

$$C_1 = \frac{b}{2h} - \frac{b^3}{24h^3}; \quad (29)$$

$$C_2 = \frac{bh}{b^2 + 4h^2}. \quad (30)$$

Коефіцієнт, який враховує заміну реальної криволінійної епюри тиску шпали на баласт епюрою ламаного обрису (рис. 1) визначається за формулою [14, 15]:

$$m = \frac{0,873}{\sigma_B + 0,427} \geq 1. \quad (31)$$

При розрахунковому $m < 1$ приймається $m=1$.

Значення коефіцієнтів C_1 і C_2 при різних h і b наведено в табл. 2.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Таблиця 2 – Результати розрахунків коефіцієнтів

<i>h</i> , см	<i>C</i> ₁ при ширині шпали <i>b</i>			<i>C</i> ₂ при ширині шпали <i>b</i>		
	23 см	25 см	28 см (з/б)	23 см	25 см	28 см (з/б)
20	0,512	0,544	0,586	0,216	0,225	0,235
25	0,428	0,458	0,502	0,190	0,200	0,213
30	0,365	0,393	0,433	0,167	0,178	0,192
35	0,317	0,342	0,379	0,148	0,158	0,172
40	0,280	0,302	0,336	0,133	0,142	0,156
45	0,250	0,271	0,301	0,120	0,129	0,142
50	0,226	0,245	0,273	0,109	0,118	0,13
55	0,206	0,223	0,249	0,100	0,108	0,12
60	0,189	0,205	0,229	0,092	0,100	0,111
65	0,175	0,190	0,212	0,086	0,093	0,103
70	0,163	0,177	0,197	0,080	0,087	0,096

Нормальні вертикальні напруження в тій же розрахунковій точці (*M*) від тиску сусідніх шпал визначаються за формулами [14, 15]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{hc_2} &= \frac{r_1}{\pi} \cdot A \cdot \sigma_{\delta c_2} \\ \sigma_{hc_3} &= \frac{r_1}{\pi} \cdot A \cdot \sigma_{\delta c_3} \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

де значення коефіцієнтів *A* і кутів Θ_1 і Θ_2 знаходяться за формулами [14, 15]:

$$A = \Theta_1 - \Theta_2 + 0,5(\sin 2\Theta_1 - \sin 2\Theta_2). \quad (33)$$

Кути Θ_1 і Θ_2 (у радіанах) визначаються за формулами [14, 15]:

$$\Theta_1 = \arctg \frac{l_{uu} + 0,5b}{h}, \quad \Theta_2 = \arctg \frac{l_{uu} - 0,5b}{h}. \quad (34)$$

У формулах (28) – (34) позначено:

b – ширина нижньої постелі шпали, м;

h – відстань до точки *M* від нижньої постелі шпал, м;

*r*₁ – коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу тиску вздовж шпали, м;

*l*_{uu} – відстань між осями шпал, м.

Значення коефіцієнта *A* при різних *h*, *l*_{uu} і *b* наведені в табл. 3.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Таблиця 3 – Коефіцієнти A для розрахунку напружень в баласті на глибині h

h , см	Значення коефіцієнта A при ширині шпали b								
	23 см при $l_{ш}$, м			25 см при $l_{ш}$, м			27 см при $l_{ш}$, м		
	0,51	0,55	0,63	0,51	0,55	0,63	0,51	0,55	0,63
20	0,046	0,035	0,021	0,051	0,039	0,023	0,059	0,0451	0,0268
25	0,077	0,059	0,037	0,085	0,066	0,041	0,098	0,0757	0,0467
30	0,110	0,087	0,056	0,122	0,096	0,062	0,140	0,1107	0,0708
35	0,145	0,117	0,078	0,159	0,128	0,085	0,182	0,1468	0,0947
40	0,176	0,145	0,100	0,194	0,160	0,110	0,221	0,1817	0,1247
45	0,205	0,172	0,122	0,224	0,188	0,133	0,255	0,2137	0,1514
50	0,229	0,195	0,142	0,250	0,214	0,156	0,283	0,2417	0,1764
55	0,248	0,215	0,161	0,271	0,235	0,176	0,306	0,2655	0,1991
60	0,264	0,232	0,178	0,288	0,253	0,194	0,324	0,2849	0,219
65	0,276	0,245	0,192	0,300	0,237	0,209	0,338	0,3004	0,236
70	0,284	0,255	0,204	0,309	0,278	0,222	0,348	0,3122	0,2502

В табл. 4 наведено розрахункові формули для визначення еквівалентних навантажень, діючих на розрахункову і сусідні шпали при 2-вісному або 3-вісному типах візка.

Таблиця 4 – Значення $P_{екв}^{II}$ для розрахунку напружень на основній площадці земляного полотна

Тип візка		$P_{екв}^{II}$		
		Для $\sigma_{бр1}$	Для $\sigma_{бс2}$	Для $\sigma_{бс3}$
Дво- вісний	$P_{екв}^{II}$	$P_{розр} + \bar{P} \cdot \eta_{x_2}$	$P_{розр} \cdot \eta_{l_{ш}} + \bar{P} \cdot \eta_{(x_2 - l_{ш})}$	$P_{розр} \cdot \eta_{l_{ш}} + \bar{P} \cdot \eta_{(x_2 + l_{ш})}$
Три- вісний	$P_{екв}^{II}$	$P_{розр} + \bar{P} \cdot (\eta_{x_2} + \eta_{x_3})$	$P_{розр} \cdot \eta_{l_{ш}} + \sum \bar{P} [\eta_{(x_2 - l_{ш})} + \eta_{(x_3 + l_{ш})}]$	$P_{розр} \cdot \eta_{l_{ш}} + \sum \bar{P} [\eta_{(x_3 - l_{ш})} + \eta_{(x_2 + l_{ш})}]$

Після визначення напружень σ_{h_p} , σ_{hc_2} і σ_{hc_3} виконують за формулою (22) розрахунок сумарного напруження σ_h в розрахунковій точці (M) від впливу тисків усіх шпал, які розглядаються. Відзначимо, що наведений розрахунок однаково застосовується як для визначення розрахункових напружень на основній площадці земляного полотна, так і в будь-якій точці, розташованій під віссю розрахункової шпали в масиві баласту, слід тільки змінити значення h . Аналогічним способом

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

можна розрахувати напруження і в будь-яких інших точках (наприклад під будь-якою сусідньою шпалою), але вони будуть меншими.

5. Визначення бічної сили взаємодії гребеня набігаючого колеса та головки рейки

Бічне зусилля взаємодії гребеня набігаючого колеса та головки рейки визначається за формулою [16]:

$$Y_b = \overline{H}_p + \mu \times \left(2 \times Q_{\text{ш}}^{cm} \times \left(\frac{b-a_1}{l} \times (1 - \overline{\kappa}_{\text{де}}) + \frac{b}{l} \times \overline{\kappa}_{\text{обк}} \right) - \left(\frac{r}{l} \times \overline{H}_p \right) + Q_{\text{кн}}^n \times \frac{b-a_1}{l} \right), \quad (35)$$

де $Q_{\text{ш}}^{cm}$ – сила тяжіння обресорених частин вагона, що діє на шийку осі колісної пари, кН;

$Q_{\text{кн}}^n$ – сила тяжіння необресорених частин вагона, що приходить на колісну пару, кН;

$2b$ – відстань між серединами шийок осі, м;

l – середня відстань між точками контакту коліс з рейками, м;

a_1 – середня відстань між точками контакту коліс з рейками, м;

r – радіус середньо зношеного колеса, м;

$\overline{\kappa}_{\text{обк}}$ – розрахункове значення коефіцієнта динаміки бокової качки;

$$\overline{\kappa}_{\text{обк}} = 0,25 \cdot \overline{\kappa}_{\text{де}}; \quad (36)$$

$\overline{\kappa}_{\text{де}}$ – розрахункове значення коефіцієнта вертикальної динаміки екіпажу:

$$\overline{\kappa}_{\text{де}} = a + 3,6 \times 10^{-4} \cdot b \cdot \frac{v - 15}{f_{cm}}, \quad (37)$$

де a – коефіцієнт;

v – розрахункова (максимально допустима, на відповідному типі баласту) швидкість руху, м/с;

f_{cm} – статичний прогин ресорного підвішування, м;

b – коефіцієнт, що враховує вплив числа осей n у візку або групі візків під одним кінцем екіпажу;

$$b = \frac{n + 2}{2n}, \quad (38)$$

де n – число осей у візку;

\overline{H}_p – розрахункове середнє значення рамної сили визначається за формулою:

$$\overline{H}_p = P_0 \cdot b \cdot \delta \cdot (5 + v), \quad (39)$$

де P_0 – розрахункове статичне осьове навантаження, кН;

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

δ – коефіцієнт, що враховує тип ходових частин вагона.

6. Відношення максимального горизонтального навантаження до середнього вертикального навантаження на шпалу

Відношення максимального горизонтального навантаження до середнього вертикального навантаження рейки на шпалу, що визначає запас стійкості рейкошпальної решітки від поперечного зсуву по баласту, визначається за формулою [4]:

$$\alpha = \frac{H_{ш}}{P_{ш}^{cp}}, \quad (40)$$

де $H_{ш}$ – максимальна горизонтальна сила, що передається від рейки на шпалу;

$P_{ш}^{cp}$ – середнє значення вертикальної сили, що передається від рейки на шпалу.

Максимальна горизонтальна сила, що передається від рейки на шпалу, визначається за формулою [16]:

$$H_{ш} = 0,5 \cdot k \cdot l_{ш} \cdot Y_{\delta}. \quad (41)$$

Максимальне значення вертикальної сили, що передається від рейки на шпалу, визначається за формулою [16]:

$$P_{ш}^{cp} = 0,5 \cdot k \cdot l_{ш} \cdot (\bar{P} + \eta \cdot \bar{P}) \quad (42)$$

7. Коефіцієнт запасу стійкості рейко-шпальної решітки від поперечного зсуву по баласту, який визначають за рамними силами

Коефіцієнт запасу стійкості рейко-шпальної решітки від поперечного зсуву по баласту, який визначають за рамними силами, як відношення рамної сили до вертикального статичного навантаження колісної пари на рейки [16]:

$$\gamma = \frac{H_p}{P_0}. \quad (43)$$

Наближено рамну силу H_p , що діє від колісної пари на раму візка можна розглядати як випадкову величину з функцією розподілу виду [16]:

$$P(H_p) = 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{4} \cdot \frac{H_p^2}{H_p^2} \cdot \beta^2\right). \quad (44)$$

Значення рамної сили H_p визначається як квантиль цієї функції при розрахунковій односторонній імовірності $P(H_p)$ за формулою [16]:

$$H_p = \bar{H}_p \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \ln \frac{1}{1 - P(H_p)}}, \quad (45)$$

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

При розрахунках на міцність за допустимим напруженням приймається $P(H_p)=0,97$.

8. Динамічне погонне навантаження на залізничну колію від візка

Динамічне погонне навантаження на залізничну колію визначається за формулою [4]:

$$q_{дин} = \frac{n \cdot P_0 \cdot (1 + K_{де})}{l + 2,2}, \quad (46)$$

де n – число осей у візку;

l – база візка;

$K_{де}$ – коефіцієнт, що дорівнює відношенню динамічної складової вертикальної сили, діючої на підресорну масу одиниці залізничного рухомого складу та виникаючої від коливань підкидання та галопування, тобто до її статичної складової (приймається $K_{де}=0,75 K_{д}$).

Метод математичного моделювання.

Аналогічним чином доекспериментальні дослідження можуть бути виконані методом математичного моделювання. При цьому в існуючому програмному середовищі моделюється дослідний рухомий склад та верхня будова залізничної колії. Виконуються розрахунки з впливу на колію при імітації різних швидкостей руху дослідного рухомого складу на типових ділянках колії.

Другий етап. Експериментально-теоретичні дослідження передбачають оцінку показників впливу на колію та стрілочні переводи з використанням результатів ходових динамічних випробувань дослідного рухомого складу. Вхідні дані для розрахунків беруться з урахуванням результатів визначення показників коефіцієнта вертикальної динаміки обресорених частин візка та рамних сил, які отримано в ході ходових динамічних випробувань.

Під час проведення розрахунково-експериментальної оцінки впливу дослідного рухомого складу на колію та стрілочні переводи визначаються показники аналогічні тим, які визначаються під час доекспериментальних досліджень, а саме:

– динамічні напруження в кромках підшви рейки на прямих і кривих ділянках залізничної колії;

– напруження в шпалах під підкладками;

– напруження в баласті під шпалою;

– напруження на основній площадці земляного полотна;

– бічні сили, які передаються від колеса на рейку;

– динамічне вертикальне навантаження від колеса на рейку;

– коефіцієнт запасу стійкості рейко-шпальної решітки від поперечного зсуву по баласту, який визначають навантаженням, що передається на рейки;

– коефіцієнт запасу стійкості рейко-шпальної решітки від поперечного зсуву по баласту, який визначають за рамними силами;

– динамічне погонне навантаження на залізничну колію від візка.

1. Динамічні напруження в кромках підшви рейки на прямих і кривих ділянках залізничної колії визначаються з використанням формул (1)–(3), (5), (7)–(19). При цьому динамічне навантаження від колеса на рейку визначається за формулою

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

(5) з використанням значення коефіцієнта вертикальної динаміки, отриманого експериментальним шляхом.

2. Напруження в шпалах під підкладками розраховують за допомогою формули (20).

3. Напруження в баласті під шпалою визначають за допомогою формули (21).

4. Напруження на основній площадці земляного полотна розраховують за формулами (22)–(34) з використанням довідкових даних з таблиць 2-4.

5. Бічні сили, які передаються від колеса на рейку визначаються за формулою:

$$Y_{\sigma} = H_p + \mu \cdot P_{дин}^{6H}, \quad (47)$$

де μ – коефіцієнт тертя, що приймається рівним 0,25;

$P_{дин}^{6H}$ – вертикальна сила, що передається від колеса на внутрішню рейку;

$$P_{дин}^{6H} = 2 \times Q_{ш}^{cm} \times \left(\frac{b-a_l}{l} \times (1 - \overline{\kappa_{\delta\epsilon}}) + \frac{b}{l} \times \overline{\kappa_{\delta\beta\kappa}} \right) - \left(\frac{r}{l} \times \overline{H_p} \right) + q_{kn}^n \times \frac{b-a_l}{l}. \quad (48)$$

6. Динамічне вертикальне навантаження від колеса на рейку визначається за формулами (1)–(3), (5), (7)–(11). Якщо з урахуванням сусідніх коліс, то ще додатково ведуться розрахунки за формулами (12)–(14).

7. Коефіцієнт запасу стійкості рейко-шпальної решітки від поперечного зсуву по баласту, який визначають навантаженням, що передається на рейки, розраховують за формулами (40)–(42).

8. Коефіцієнт запасу стійкості рейко-шпальної решітки від поперечного зсуву по баласту, який визначають за рамними силами, розраховують за формулами (43)–(45).

9. Динамічне погонне навантаження на залізничну колію від візка обчислюється за формулою (46).

Третій етап. Експериментальні дослідження передбачають оцінку показників впливу на колію та стрілочні переводи дослідного рухомого складу з використанням вимірювального комплексу. В Україні випробування проводяться на коліях типових конструкцій відповідно до вимог ДСТУ 7571 [4].

Випробування на ділянках починається з найменшої швидкості. Рішення про необхідність виконання поїздок з великими швидкостями і до допустимих включно приймається тільки після експрес-аналізу результатів вимірювань.

Як правило, реєстрація та запис процесів виконано за допомогою вимірювального комплексу, до складу якого входять: персональний комп'ютер, аналого-цифровий перетворювач, підсилювач сигналів та вимірювальні тензометричні датчики. Обробка даних зазвичай здійснюється на персональному комп'ютері за допомогою атестованої комп'ютерної програми.

У процесі виконання експериментальних досліджень напружено-деформованого стану колії та стрілочного перевodu безпосередньо вимірюються наступні показники:

- напруження в кромках підшви рейок;
- динамічні вертикальні навантаження від коліс на рейки;
- напруження розтягнення у передньому вильоті рамних рейок і перевідних

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

кривих стрілочних переводів;

– напруження розтягнення в зовнішніх кромках підошви вістряків та осердя хрестовини з рухомими елементами;

– напруження в головці контррейки стрілочного переводу; – напруження в підошві хвостової частини хрестовини.

За результатами експериментальних досліджень розраховуються такі показники:

– бічні сили від колеса на рейки;

– напруження в шпалах під підкладками;

– напруження в баласті під шпалою;

– напруження на основній площадці земляного полотна;

– коефіцієнт запасу стійкості рейко-шпальної решітки від поперечного зсуву по баласту, який визначають навантаженням, що передається на рейки;

– коефіцієнт запасу стійкості рейко-шпальної решітки від поперечного зсуву по баласту, який визначають навантаженням, що передається на рейки;

– динамічне погонне навантаження на залізничну колію від візка.

За результатами статистичної обробки для кожної вибірки визначається за стандартною методикою: експериментальне середнє значення, середньоквадратичне відхилення, максимальне зареєстроване значення та максимальне ймовірне значення показників, отриманих під час випробувань з довірчою ймовірністю 0,994.

Висновки.

1. Запропоновано та розроблено процедуру комплексних досліджень з впливу рухомого складу на залізничну колію, яка включає наступні етапи досліджень: доекспериментальні, теоретично-експериментальні, експериментальні.

2. Використання запропонованої комплексної процедури досліджень дозволить виключити явні промахи під час отримання максимально імовірних значень показників з впливу на колію та в цілому підвищити точність і якість отримання результатів.

Рекомендації.

Подальші дослідження необхідно направити на апробацію комплексної процедури досліджень шляхом порівняння показників впливу конкретного типу рухомого складу, отриманих за результатами доекспериментальних, теоретично-експериментальних, експериментальних етапів досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ромен, Ю.С. Установление условий обращения вагонов с увеличенной осевой нагрузкой / Ю.С. Ромен, А.М. Орлова, М.С. Тихов, А.В. Заверталюк // Транспорт Российской Федерации. – 2013. – № 3 (46). – С. 25–35.

2. Рыбкин, В.В. Результаты экспериментальных исследований по воздействию на путь / В.В. Рыбкин, М.И. Уманов, А.П. Татуревич, В.В. Цыганенко и др. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2004. – Вип. 5. – С. 183–187.

3. Рибкін, В.В. Проведення випробувань з впливу на колію та стрілочні переводи рухомого складу нового покоління з осьовим навантаженням 25 т на вісь / В.В. Рибкін, Савлук В.С // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – Х., 2012. – Вип. 130. – С. 127–131.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

4. ДСТУ 7571:2014. Рухомий склад залізниць. Норми допустимого впливу на залізничну колію шириною 1520 мм; Уведено вперше; надано чинності 2014-12-02. – К.: Мінекономрозвитку України, 2014. – 33 с.
5. Курган, М.Б. Перебудова кривих для впровадження швидкісного руху пасажирських поїздів / М.Б. Курган, М.А. Гусак, Н.П. Хмелевська // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 40. – С. 90–97.
6. Курган, Д.М. Особливості сприйняття навантаження елементами залізничної колії при високих швидкостях руху / Д.М. Курган // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту – Д., 2015. – № 2 (56). – С. 136–145.
7. Курган, Д.М. Визначення динамічного навантаження від колеса на рейку для швидкісних поїздів / Д.М. Курган // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту – Д., 2015. – № 3 (57). – С. 118–128.
8. Арбузов, М.А. Експериментальне дослідження взаємодії колії та рухомого складу в межах з'їзду / М.А. Арбузов, О.М. Патласов, С.О. Токарев // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту – Д., 2016. – № 5 (65). – С. 64–78.
9. Даніленко, Е.І. Новітні дослідження бічної пружності рейкових ниток при спільній дії вертикальних і горизонтальних сил / Е.І. Даніленко // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту – Д., 2015. – № 6 (60). – С. 65–77.
10. Даніленко, Е.І. Дослідження впливу динамічних колісних навантажень, вантажонапруженості і швидкостей руху поїздів на міцність, стійкість і строки служби рейок, скріплень та інших елементів ВБК / Е.І. Даніленко, Р.М. Йосифович, О.А. Олійник, О.О. Сорока // Збірник наукових праць ДЕТУТ: Серія «Транспортні системи і технології». – К.: ДЕТУТ, 2013. – Вип. 22. – С. 10–20.
11. Даніленко, Е.І. Про необхідність внесення змін в існуючі нормативні допуски по ширині рейкової колії у прямих та кривих при впровадженні швидкісного руху на залізницях України / Е.І. Даніленко, М.І. Карпов, В.М. Молчанов, Р.М. Йосифович // Залізничний транспорт України. – 2014. – № 2. – С. 9–17.
12. Велінець, В.П. Експериментальні дослідження горизонтальної поперечної жорсткості рейкових ниток при різних конструкціях рейкових скріплень / В.П. Велінець // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту – Д., 2015. – № 6 (60). – С. 57–64.
13. Настечик, М.П. Дослідження напруженого стану в елементах вузла скріплення типу КПП-5 під дією рухомого складу / М.П. Настечик, І.О. Бондаренко, Р.В. Маркуль // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту – Д., 2015. – № 2 (56). – С. 146–156.
14. Даніленко Е.І. Правила розрахунків залізничної колії на міцність та стійкість : ЦП-0117 / Е.І. Даніленко, В.В. Рибкін. – К.: Транспорт України, 2004. – 64 с.
15. ТМ 06.178-2004 Типова методика оцінки впливу рухомого складу на колію. Полтавська обл., м. Кременчук: ДП «УкрНДІВ», 2004. – 34 с.
16. Нормы для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных): ВНИИВ-ВНИИЖТ. М., 1983. – 258 с.