
УДК 625.143.5

ЗМІННІСТЬ ПРУЖНО-ЖОРСТКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БОКОВОГО ВИГИНУ ТА КРУЧЕННЯ РЕЙКОВОЇ НИТКИ ЗАЛЕЖНО ВІД ВІДНОШЕННЯ КОЛІСНИХ НАВАНТАЖЕНЬ $P_{дин}/H_{дин}$

Д-р техн. наук Е. І. Даніленко, кандидати техн. наук В. М. Молчанов,
Т. П. Даніленко (ДУІТ)

ИЗМЕНЯЕМОСТЬ УПРУГО-ЖЕСТКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БОКОВОГО ИЗГИБА И КРУЧЕНИЯ РЕЛЬСОВОЙ НИТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СООТНОШЕНИЯ КОЛЕСНЫХ НАГРУЗОК $P_{дин}/H_{дин}$

Д-р техн. наук Э. И. Даниленко, кандидаты техн. наук В. Н. Молчанов,
Т. П. Даниленко (ГУИТ)

THE VARIABILITY OF ELASTIC STIFFNESS CHARACTERISTICS OF THE RAIL THREADS SIDE BENDING AND TORSION DEPENDING ON THE CORRELATION OF ACTING WHEEL LOADS P_{dyn}/H_{dyn}

D. Sc. (Tech.) E. I. Danilenko, PhD (Tech.) V. M. Molchanov, T. P. Danilenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.179.2018.147749>

Характеристики бокової пружності рейкових ниток і пружності рейкових ниток при крученні є найменш вивченими, особливо в умовах спільної дії на колію вертикальних і горизонтальних сил і крутного моменту.

Діюча методика інженерних розрахунків колії на міцність, як відомо, розглядає в якості основної діючої сили на рейку вертикальні динамічні сили від коліс рухомого складу. Вплив на роботу рейки горизонтальних динамічних сил безпосередньо не враховується, а враховується

тільки опосередковано через застосування так званих коефіцієнтів впливу, які в багатьох випадках не мають точного підтвердження для конкретних розрахункових випадків.

Метою статті є викладення результатів новітніх досліджень з визначення характеристик бокової пружності і кручення рейкових ниток залізничної колії з різними конструкціями рейкових скріплень при спільній дії на рейкові нитки вертикальних і горизонтальних сил. У роботі використано комплексний метод розв'язання задачі, який включає експериментальну та теоретичну частини.

У результаті виконаних досліджень отримано нові дані характеристик горизонтальної бокової пружності рейкових ниток для сучасних конструкцій залізничної колії на залізобетонних і дерев'яних шпалах з рейками Р65, UIC60, Р50 і Р43 зі скріпленнями типів КБ, КПП-5, КПП-1, Д0.

Ключові слова: пружність, жорсткість, рейкові нитки, вигин, кручення, вертикальні сили, бокові сили.

Характеристики боковой упругости рельсовых нитей и упругости рельсовых нитей при кручении являются наименее изученными, особенно в условиях совместного действия на колею вертикальных и горизонтальных сил и крутящего момента.

Действующая методика инженерных расчетов пути на прочность, как известно, рассматривает в качестве основной действующей силы на рельс вертикальные динамические силы от колес подвижного состава. Влияние на работу рельса горизонтальных динамических сил непосредственно не учитывается, а учитывается только косвенно через применение так называемых коэффициентов влияния, которые во многих случаях не имеют точного подтверждения для конкретных расчетных случаев.

Целью статьи является изложение результатов новейших исследований по определению характеристик боковой упругости и кручения рельсовых нитей железнодорожного пути с различными конструкциями рельсовых скреплений при совместном действии на рельсовые нити вертикальных и горизонтальных сил. В работе использован комплексный метод решения задачи, который включает экспериментальную и теоретическую части.

В результате выполненных исследований получены новые данные характеристик горизонтальной боковой упругости рельсовых нитей для современных конструкций железнодорожного пути на железобетонных и деревянных шпалах с рельсами Р65, UIC60, Р50 и Р43 со скреплениями типов КБ, КПП-5, КПП-1, Д0.

Ключевые слова: упругость, жесткость, рельсовые нити, изгиб, кручение, вертикальные силы, боковые силы.

Characteristics of lateral elasticity of rail threads and elasticity of rail threads at torsion are the least studied, especially in conditions of joint action on a track of vertical and horizontal forces and torque. However, to date, the reference technical literature provides a very wide range of results of these characteristics, especially in the plane of the lateral bending of the rail thread and its torsion.

The current method of engineering calculations of the path for strength, as is known, considers as the main acting force on the rail – the vertical dynamic forces from the wheels of the rolling stock, the effect on the rail of horizontal dynamic forces is not directly taken into account, but only indirectly through the use of so-called influence coefficients. However, in many cases, these coefficients do not have accurate confirmation for specific calculations, and thus, the current method of calculating the strength of the track does not allow to obtain sufficiently accurate results of deformations of rail threads under actual wheel loads, especially in complex conditions of the joint action on the rail vertical and horizontal dynamic forces.

The purpose of the article is to present the results of the latest research to determine the characteristics of the lateral elasticity and torsion of the rail track threads with different designs of rail fasteners under the joint action on the rail threads of vertical and horizontal forces. The paper uses a complex method of solving the problem, which includes experimental and theoretical parts.

As a result of the performed research, new data on the characteristics of the horizontal lateral elasticity of rail threads for modern railway track structures on reinforced concrete and wooden sleepers with rails R65, UIC60, R50 and R43 with fasteners of types KB, KPP-5, KPP-1, D0 were obtained.

Keywords: *elasticity, stiffness, rail threads, bending, torsion, vertical forces, horizontal forces.*

Вступ. Чинна на вітчизняних залізницях методика інженерних розрахунків колії на міцність [6], як відомо, розглядає в якості основної діючої сили на рейку вертикальні динамічні сили від коліс рухомого складу $R_{\text{дин}}$, при цьому вплив на роботу рейки горизонтальних динамічних сил $H_{\text{дин}}$ безпосередньо не враховується, а враховується тільки опосередковано через застосування так званих коефіцієнтів впливу. Однак у багатьох випадках дані коефіцієнти не мають точного підтвердження для фактично діючих на рейки динамічних сил, і, таким чином, діюча методика розрахунків колії на міцність не дозволяє отримувати достатньо точні результати деформацій рейкових ниток під фактичними колісними навантаженнями, особливо в складних умовах спільної дії на рейку вертикальних і горизонтальних динамічних сил $R_{\text{дин}}$ і $H_{\text{дин}}$.

Але при повній постановці аналітичного розв'язання задачі з розрахунку залізничної колії на міцність, де за мету береться визначення точних значень деформацій і напружень у головці і підшві рейок, необхідно з достатньою точністю враховувати дію на рейкову нитку всіх зовнішніх сил і при цьому спільно розглядати виникаючі в рейковій нитці деформації, а саме вертикальний і горизонтальний вигин рейкової нитки та її кручення. Деформації і напруження рейкових ниток при аналітичних розрахунках з достатньою точністю можна визначити тільки за умови знання характеристик просторової пружності

рейкових ниток, визначених також з достатньою точністю.

До характеристик просторової пружності рейкової нитки належать жорсткості у вертикальній і горизонтальній площині і жорсткість рейкової нитки при крученні, а також функціонально пов'язані з ними модулі пружності у вертикальній і горизонтальній площині (боковий і поздовжній) і модуль пружності при крученні. При цьому особливо важливим для проведення точних аналітичних розрахунків є знаходження правильних функціональних залежностей між діючими на рейкову нитку зовнішніми силами від коліс рухомого складу і виникаючими від них деформаціями і напруженнями в цій рейковій нитці, з урахуванням усіх характеристик просторової пружності рейкової нитки і особливостей конструктивного улаштування залізничної колії. Однак, як вже вказано, загальною особливістю всіх наведених у вітчизняній літературі характеристик жорсткості та пружності при боковому вигині та крученні рейкової нитки (для будь-яких конструкцій колії) є відсутність функціональної залежності вказаних характеристик від реально діючих на рейку динамічних вертикальних і горизонтальних сил $R_{\text{дин}}$ та $H_{\text{дин}}$.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивчення характеристик просторової пружності рейкових ниток необхідне для вирішення задач з розрахунку рейок на міцність у повній постановці, тобто при спільній дії на колію вертикальних і горизонтальних сил і

крутного моменту. Вивченням даних характеристик займалось багато вчених і дослідників протягом XIX–XX ст., у тому числі такі видатні вітчизняні вчені, як С. П. Тимошенко, О. П. Єршков, В. Г. Альбрехт, В. І. Ангелейко, Г. М. Шахунянц, В. Ф. Яковлев та ін.

Однак до теперішнього часу в довідковій технічній літературі надається дуже різноманітний спектр результатів даних характеристик, особливо в площині бокового вигину рейкової нитки та при її крученні. Причому наведені довідкові дані не враховують реальне відношення діючих на рейкову нитку вертикальних і горизонтальних сил $P_{дин}/H_{дин}$ і, як правило, стосуються аналізу застарілих конструкцій верхньої будови колії, що застосовувались на вітчизняних залізницях 40–50 років тому [1, 2, 3, 4, 5].

Необхідно також вказати, що загальною особливістю всіх наведених у вітчизняній літературі даних щодо жорсткості та пружності при боковому вигині та крученні рейкової нитки (для будь-яких конструкцій колії) є відсутність встановлення функціональної залежності вказаних характеристик від реально діючих на рейку динамічних вертикальних і горизонтальних сил $P_{дин}$ та $H_{дин}$.

Практично відсутні дані щодо встановлення функціональних залежностей характеристик просторової жорсткості рейкових ниток у функції від відношення

діючих на рейку сил $P_{дин}/H_{дин}$ у сучасних закордонних і вітчизняних дослідженнях кінця XX-го, початку XXI-го ст. [13, 15, 16, 17].

Визначення мети та завдання досліджень. Метою даної статті є вирішення завдань визначення характеристик жорсткості і пружності рейкових ниток при боковому вигині і крученні під час спільної дії на рейку вертикальних і горизонтальних бокових колісних навантажень, а також функціональної залежності вказаних характеристик від діючих на рейки динамічних сил $P_{дин}$ і $H_{дин}$. Крім того, до основних завдань дослідження віднесено встановлення конкретних функціональних залежностей характеристик жорсткості та пружності рейкових ниток від спільно діючих вертикальних і горизонтальних поперечних сил при боковому вигині та крученні.

Основна частина. Нашими сучасними експериментальними і теоретичними дослідженнями 2012–2016 рр. [7, 8, 9] встановлено фактичне існування безпосередньої функціональної залежності реальних значень жорсткості та модуля пружності рейкової нитки при боковому вигині та крученні від діючих на рейку вертикальних і горизонтальних колісних навантажень, крім того, встановлено, що саме ця залежність має реальний вплив на змінність характеристик жорсткості та пружності рейкових ниток залежно від відношення $P_{дин}/H_{дин}$

$$\beta_y^{(T)} = f_1\left(\frac{P_{дин}}{H_{дин}}\right); \beta_\varphi^{(T)} = f_2\left(\frac{P_{дин}}{H_{дин}}\right); U_y^{(T)} = f_3\left(\frac{P_{дин}}{H_{дин}}\right); U_\varphi^{(T)} = f_4\left(\frac{P_{дин}}{H_{дин}}\right).$$

Вказані дослідження були виконані на Південно-Західній залізниці на прикладі випробовувань різноманітних конструкцій залізничної колії на залізобетонних і дерев'яних шпалах з сучасними конструкціями вітчизняних скріплень безпідкладкового та підкладкового типів (КБ, КПП-5, КПП-1, Д0).

Поставлене завдання вирішено у два етапи.

1. Розв'язання задачі бокового вигину рейкової нитки від спільної дії бокових і вертикальних сил з урахуванням сил тертя по підшві рейки та опору рейкових скріплень.

Докладно результати розв'язання даної задачі для рейкових ниток на

залізобетонних і дерев'яних шпалах викладено в наукових роботах [7, 9, 10]. Наведемо тут основні теоретичні аспекти.

Розрахункова схема для розв'язання задачі бокового вигину рейкової нитки з

урахуванням сил тертя по підшві рейки при спільній дії на рейку вертикальної і горизонтальної сил приймається за рис. 1.

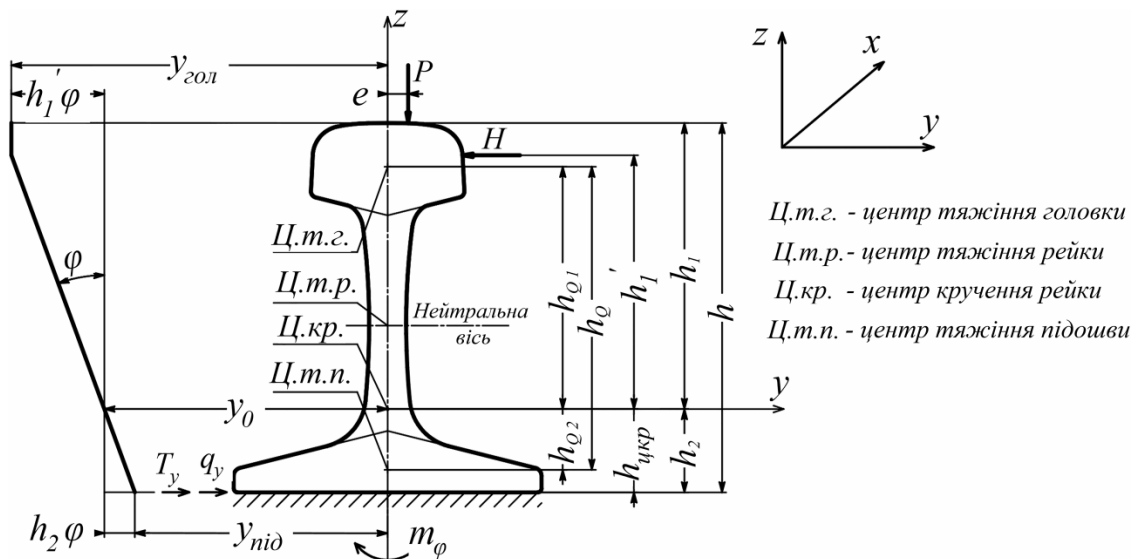


Рис. 1. Схема дії сил на розрахунковий переріз рейкової нитки при горизонтальному вигині та крученні

При цьому для статичної задачі приймається, що сили P та H розглядаються як статичні зосереджені сили, які прикладені в одному поперечному перерізі, перпендикулярному до поздовжньої осі рейки.

Для розрахункової схеми на рис. 1 рівняння рівноваги рейкової нитки в горизонтальній поперечній площині має вигляд

$$\Sigma q_y + \Sigma T_y = H, \quad (1)$$

де q_y – реактивний боковий опір підшви рейки в перерізі прикладення сили H ;

Σq_y – сумарний реактивний опір по всій довжині бокової деформації підшви;

T_y – реактивна складова сил тертя по підшві рейки в перерізі прикладення сили H ;

ΣT_y – сумарна реакція сил тертя по всій довжині поперечної (бокової) деформації підшви.

Реакції q_y і T_y визначаються за формулами

$$q_y = U_y(y - \phi h_2), \quad (2)$$

$$T_y = U_z \cdot z \cdot f, \quad (3)$$

де U_y – модуль пружності підрейкової основи при горизонтальному поперечному вигині рейкової нитки від дії тільки бокової горизонтальної сили (без урахування дії вертикальних сил і сил тертя по підшві рейки);

y – горизонтальний прогин рейки в перерізі прикладеної сили H (тут приймається переміщення центра бокового вигину рейки);

U_z – модуль пружності підрейкової основи при вертикальному вигині рейкової нитки; z – вертикальний прогин рейки в перерізі прикладення сили;

f – коефіцієнт тертя по підшві рейки.

Для узагальнення дії всіх сил по довжині поперечної (бокової) деформації рейки слід переписати рівняння (1) в інтегральній формі:

$$\int_{-x_y}^{+x_y} U_y (y - \varphi h_2) dx + \int_{-x_z}^{+x_z} U_z \cdot z \cdot f \cdot dx = H \quad (4)$$

І далі необхідно розв'язувати рівняння (4) відносно шуканої величини

модуля пружності рейкової нитки U_y в поперечній (боковій) площині.

Тут $\pm x_y$ – межі інтегрування при горизонтальному боковому вигині.

Переходячи далі до розгляду рейкової нитки як балки на пружній основі, О. П. Єршковим прийнята така розрахункова схема (рис. 2), де розглядається просторовий вигин рейкової нитки при спільній дії вертикального P і горизонтального (бокового) навантаження H .

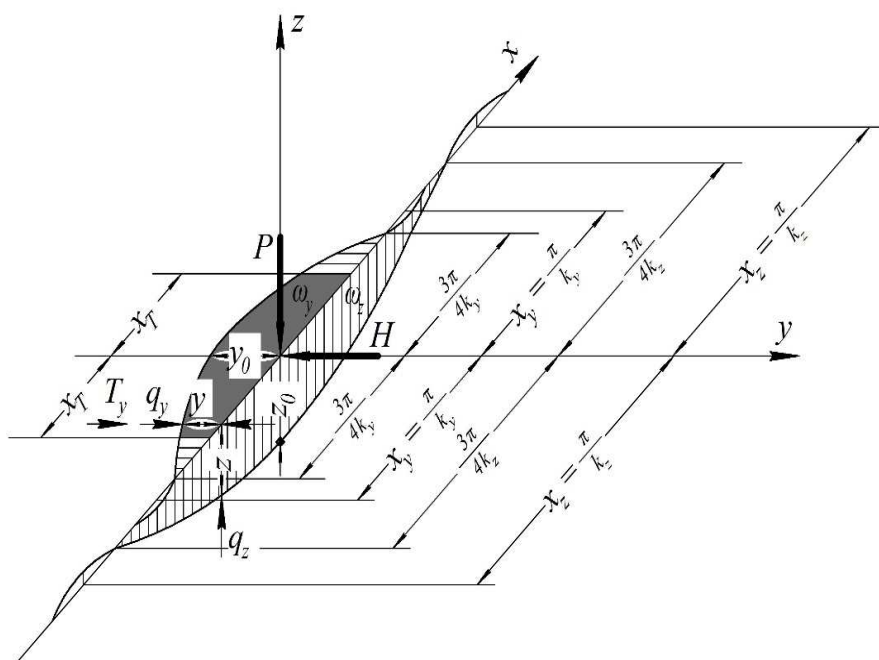


Рис. 2. Схема просторового вигину рейкової нитки при спільній дії вертикального і горизонтального (бокового) навантаження

На рис. 2 показані епюри прогинів у вертикальній площині (z_i) і в боковій площині (y_i) по всій довжині рейки, а також (темним кольором) показана ділянка хвилі тертя по підшві рейки, що розповсюджується на довжину півхвилі тертя (X_T) в обидва боки від точки прикладення сил P і H .

Прийнявши за основу встановлене експериментально співвідношення між горизонтальними боковими прогинами головки і підшви рейки u_z/y_n та існуючі за геометричними параметрами співвідношення між кутом повороту осі

рейки φ і боковими прогинами головки і підшви (див. рис. 1), а також визначивши відношення між ординатами епюри прогинів η_z/η_y відповідно до розрахункової схеми на рис. 2 у межах хвилі тертя від ($-X_T$) до ($+X_T$), у кінцевому результаті О. П. Єршков отримав такий вираз для визначення шуканої величини модуля пружності рейкової нитки при боковому вигині:

$$U_y^{(T)} = U_y \frac{\frac{H}{P}}{\frac{H}{P} - f_1 \cdot a} \quad (5)$$

$$U_y^{(T)} = U_y^{(T)0} \frac{\frac{H_{дин}}{P_{дин}}}{\frac{H_{дин}}{P_{дин}} - f_1 \cdot a} \quad (6)$$

Тобто О. П. Єршковим була отримана формула, що встановлює зв'язок між модулем поперечної пружності $U_y^{(T)}$ за наявності спільної дії горизонтальної і вертикальної сил ($H \neq 0, P \neq 0$) (з урахуванням сил тертя по підшві рейки) і модулем пружності U_y тієї самої рейкової нитки (при дії лише горизонтальної сили ($H \neq 0$) без вертикальної сили ($P=0$)). Формула (5) отримала достатню відомість і стала широко використовуватись, починаючи з 1960-1970 рр. при розрахунках верхньої будови колії на міцність, у дещо модернізованому вигляді, наприклад як формула (6), що наведена в «Довіднику інженера-колієника», виданому в 1972 р.

У формулах (2) і (3) прийнято:

f_1 – коефіцієнт тертя по підшві рейки при горизонтальному вигині;

a – коефіцієнт, що показує співвідношення площ епюр горизонтальних прогинів рейкової нитки за наявності сил тертя по підшві рейки і за їх відсутності (О. П. Єршковим для існуючих на той час натурних конструкцій колії значення цього коефіцієнта рекомендовано приймати постійним і рівним $a=0,9$);

$H_{дин}, P_{дин}$ – динамічні горизонтальна і вертикальна сили.

Основною заслугою методу О. П. Єршкова є урахування сил тертя між рейкою та підрейковою основою при розв'язанні задачі бокового вигину та кручення рейкової нитки, що є суттєвим удосконаленням теорії розрахунків рейкової нитки, яка була закладена С. П. Тимошенко у роботах [11, 12].

Однак, як показали наші дослідження, формули (2) і (3) не є коректними і потребують коригування як у

частині визначення модулів пружності $U_y^{(T)}$ і U_y , так і в частині коефіцієнтів a і f_1 . Перш за все величину модуля пружності U_y (при дії на рейку тільки горизонтальної сили H і за відсутності дії вертикальної сили P) не можна визначати згідно з існуючою звичайною методикою, що наведена в роботах О.П. Єршкова [1, 2], а також у пізніших наукових роботах інших авторів, наприклад [13] та ін.

Тобто є неправильним застосування відомої формули для визначення U_y

$$U_y = \frac{1}{\sqrt[3]{64 \cdot EI_{зоп}}} \cdot (\beta_y^{нід})^{4/3} \quad (7)$$

Справа в тому, що при розрахунках бокового модуля U_y в дослідженнях зазвичай використовуються експериментальні дані жорсткості рейкових ниток по головці $\beta_y^{гол}$ і підшві рейки $\beta_y^{нід}$. Однак їх не можна без коригування застосовувати для визначення залежності модуля пружності підрейкової основи від $U_y = f(\beta_y)$ залежно від жорсткості.

При боковому вигині рейки правильно розраховувати горизонтальний боковий модуль пружності рейкової нитки відносно центра вигину рейки в боковій площині, який для рейки співпадає з центром кручення, але не співпадає з центром тяжіння (на відміну від вертикального вигину).

Тому слід коригувати жорсткість рейкової нитки відносно центра бокового вигину і визначати фактичний боковий модуль пружності також відносно центра бокового вигину рейкової нитки та з урахуванням сил тертя по підшві рейки.

Розрахункова формула для визначення фактичного бокового модуля пружності рейкової нитки з урахуванням сил тертя по підшві при дії тільки горизонтальної бокової сили H , але за відсутності вертикальної сили P , повинна мати такий вигляд:

$$U_y^{(T)^o} = (K_y^{(T)^o})^4 \cdot 4EI_{zop}, \quad (8)$$

де $K_y^{(T)^o}$ – коефіцієнт відносної жорсткості основи та рейки (з урахуванням сил тертя по підшві рейки),

$$K_y^{(T)^o} = \sqrt{\frac{H}{8EI_{zop} \cdot y_0^{н.зг.}}}, \quad (9)$$

де y_0 – ордината переміщення центра бокового вигину рейки при дії горизонтальної сили H , прикладеної до головки (за відсутності вертикальної сили P);

EI_{zop} – жорсткість рейки в горизонтальній (боковій) площині.

Це перша необхідна частина коригування формул (5) і (6), яка стосується визначення модуля пружності $U_y^{(T)^o}$.

Друга необхідна частина коригування полягає в необхідності більш точного визначення коефіцієнтів a і f_1 при розрахунках фактичного модуля бокової пружності рейкової нитки $U_y^{(T)}$ за наявності спільної дії на рейку горизонтальної і вертикальної сил ($H \neq 0, P \neq 0$).

На відміну від прийнятої О. П. Єршковим величини коефіцієнта $a = const = 0.9$, у наших сучасних досліджен-

нях 2012-2016 рр. встановлено, що величина коефіцієнта a не є постійною, а, навпаки, суттєво змінюється залежно від конструкції підрейкової основи, рейкових скріплень, відношення вертикальної і горизонтальної сил P/H і довжини ділянки x_T – пружної півхвилі тертя по підшві рейки при горизонтальному вигині рейки в умовах спільної дії сил P і H , тобто $a = f(k_z, P/H, x_T)$.

За нашими розрахунками, аналітичний вираз залежності коефіцієнта a у функції від коефіцієнта відносної жорсткості рейкової нитки у вертикальній площині k_z , а також у функції від горизонтальної жорсткості, що виражено у відношенні P/H і довжині пружної півхвилі тертя x_T по підшві рейки при горизонтальному зміщенні, має вигляд

$$a = \frac{e^{-k_z \cdot x_T} \cdot \cos k_z \cdot x_T - 1}{e^{-\pi} \cdot \cos \pi - 1}. \quad (10)$$

Графік залежності a і x_T у функції від P/H має вигляд, що приведений на рис. 3, де для прикладу наведено графік $a = f(P/H)$ $x_T = f(P/H)$ для конструкції ВБК із такими елементами: рейка – Р65, шпали – залізобетонні, епіюра шпал 1840 шт./км, тип скріплень – КБ.

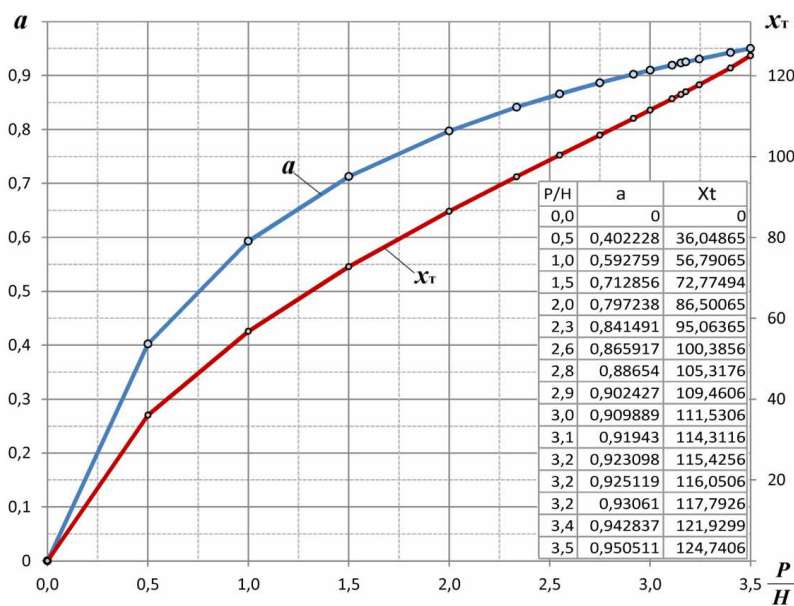


Рис. 3. Графік залежності a і x_T у функції від P/H

Для сучасних конструкцій верхньої будови колії коефіцієнт a може змінюватись у межах від $a_{\min} = 0$ до $a_{\max} = 1,00$ і не може бути $a \neq 1,00$, оскільки еюра сил тертя може існувати тільки в межах довжини хвилі x_T горизонтального поперечного вигину рейки (див. рис. 2). При цьому при $a_{\min} = 0$, що відповідає $P=0$, буде мати місце рівність $U_y^{(T)} = U_y^{(T)0}$. Отриманий у наших дослідженнях результат повністю відповідає математичній логіці прийнятих до розгляду фізичних характеристик. Навпаки, в існуючому трактуванні рішення О. П. Єршкова [1, 2] при $P=0$ і $a \neq 0$ формули (2) і (3) не відповідають математичній логіці.

Довжини півхвилі тертя по підосві рейки x_T , наприклад для рейок Р65 при скріпленнях КБ на залізобетонних шпалах, можуть змінюватись від $x_T^{\min} = 0$ (при $P_{\min} = 0$) до $x_T^{\max} = 100 - 125$ см (при $P_{\max}/H_{\max}=2,6-3,5$) для різних конструкцій верхньої будови колії при різних скріпленнях. (Нагадаємо, що в рішеннях О. П. Єршкова [1, 2] було рекомендовано для всіх випадків приймати $x_T^{\max} = 120$ см для конструкцій верхньої будови колії на дерев'яних шпалах з рейками типу Р43 та Р50.)

Коефіцієнт тертя по підосві рейки О. П. Єршковым було прийнято постійним $f_1=0,15$ для скріплень типу Д0 на дерев'яних шпалах. Насправді коефіцієнт f_1 слід приймати різним для різних скріплень. За нашими дослідженнями, коефіцієнт тертя по підосві рейки f_1 слід приймати різним залежно від типів рейкових скріплень і рейкових опор. А саме для скріплень, наведених у табл. 2, слід приймати f_1 відповідно рівним: КБ – 0,3; КПП-5 – 0,32; КПП-1 – 0,28; Д0 – 0,15.

Врешті-решт нашими дослідженнями визначено, що формула, яка встановлює зв'язок між модулем поперечної пружності

$U_y^{(T)}$ для конструкції колії, що знаходиться під спільною дією сил горизонтальної H і вертикальної P , і модулем поперечної пружності $U_y^{(T)0}$ для конструкції колії, що знаходиться під дією тільки горизонтальної бокової сили H (при $P=0$), повинна мати такий вигляд:

$$U_y^{(T)} = U_y^{(T)0} \frac{\frac{H_{\text{дин}}}{P_{\text{дин}}}}{\frac{H_{\text{дин}}}{P_{\text{дин}}} - f_1 \cdot a}. \quad (11)$$

Формула (11) якісно відрізняється від формул (5) і (6). По-перше, значення модуля пружності рейкової нитки $U_y^{(T)0}$ при дії на рейку тільки горизонтальної сили H (і відсутності вертикальної сили P) визначаються іншим способом, а саме за формулами (8) та (9), тобто всупереч з формулами (5) і (6).

По-друге, коефіцієнт a , що показує співвідношення площ еюр горизонтальних прогинів рейкової нитки за наявності сил тертя по підосві рейки і за їх відсутності, не є величиною постійною і визначається за формулою (10), яка відрізняється від рекомендованого значення в дослідженнях [1, 2].

Коефіцієнт a може набувати значення від найбільших a_{\max} (при найбільш несприятливому відношенні сил P_{\max}/H_{\max}) до мінімальних a_{\min} (за відсутності вертикальної сили $P=0$). При значеннях вертикального і горизонтального навантаження на рейку, близьких до реальних сил взаємодії між колесом і рейкою $P_{\text{дин}}/H_{\text{дин}}$, коефіцієнт a слід рекомендувати приймати як найбільш імовірне значення $a_{\text{ймов}}$ при $x_T = x_T^{\text{ймов}}$.

По-третє, як вже вказано, визначено, що для різних типів скріплень на залізобетонних і дерев'яних шпалах необхідно брати відповідно різні величини коефіцієнтів тертя f_1 .

Результати розрахунків фактичних модулів поперечної пружності рейкових ниток $U_y^{(T)}$ при спільній дії вертикальних $P_{дин}$ і горизонтальних $H_{дин}$ колісних навантажень на рейку і фактичних модулів поперечної пружності $U_y^{(T)0}$ (при дії на рейку тільки горизонтальних сил) наведено в табл. 1 для різних типів конструкції колії з рейками типів Р65, УІС60, Р50, Р43 для колії на дерев'яних шпалах зі скріпленнями

Д0 і на залізобетонних шпалах зі скріпленнями типу КБ, КПП-5, КПП-1 залежно від відношення діючих сил P/H від імовірних до максимальних значень.

Функціональні залежності реальних значень модулів пружності у функції від відношення діючих на рейку вертикальних і горизонтальних колісних навантажень

$$U_y^{(T)} = f\left(\frac{P_{дин}}{H_{дин}}\right) \text{ наведені на рис. 4.}$$

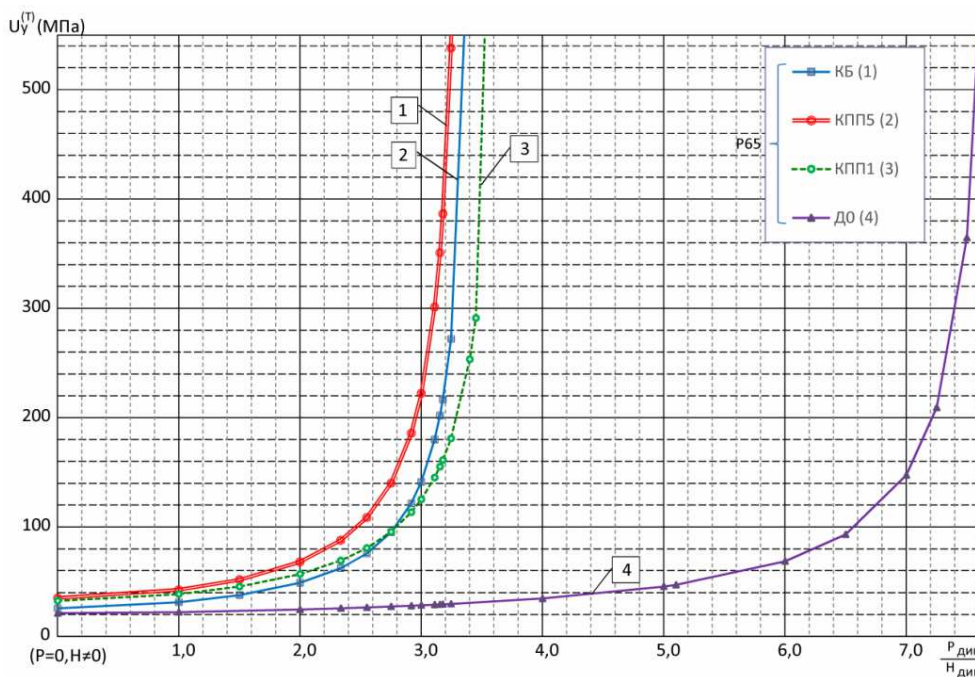


Рис. 4. Графіки функціональних залежностей модулів поперечної пружності від відношення діючих на рейку вертикальних і горизонтальних сил $U_y^{(T)} = f\left(\frac{P_{дин}}{H_{дин}}\right)$

Таблиця 1

$\frac{P}{H}$	КБ		КПП5		КПП1		Д0	
	$U_y^{(T)}$, кг/см ²	$U_\varphi^{(T)}$, кг/рад	$U_y^{(T)}$, кг/см ²	$U_\varphi^{(T)}$, кг/рад	$U_y^{(T)}$, кг/см ²	$U_\varphi^{(T)}$, кг/рад	$U_y^{(T)}$, кг/см ²	$U_\varphi^{(T)}$, кг/рад
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,000	255,81	52116,68	349,47	33100,93	324,79	31090,95	211,65	62783,25
1,000	311,1392	63389,01	425,2673	40280,26	385,4746	36899,61	221,538	65717,74
1,500	376,6273	76731,03	516,9069	48960,13	455,0097	43555,87	231,783	68756,62
2,000	490,3797	99906,05	680,2802	64434,45	569,0066	54468,24	245,253	72752,62
2,336	623,3871	127003,9	877,9239	83154,77	692,0577	66247,32	256,300	76029,52
2,550	757,7896	154386	1085,318	102798,7	806,4204	77194,71	264,302	78403,31

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2,750	952,3659	194027,4	1400,16	132619,7	956,4791	91559,1	272,515	80839,56
2,917	1216,707	247882,1	1857,828	175968,8	1135,408	108687,1	279,984	83055,19
3,000	1412,533	287778,3	2221,62	210426,4	1252,553	119900,8	283,908	84219,10
3,110	1799,296	366574,1	3010,569	285153,6	1452,763	139065,9	289,359	85836,17
3,154	2019,293	411394,7	3507,059	332179,9	1551,45	148512,8	291,597	86500,23
3,178	2167,312	441550,8	3863,247	365917,1	1612,636	154369,8	292,865	86876,31
3,245	2719,908	554132,3	5379,315	509515,3	1810,629	173322,7	296,449	87939,49
3,400	6678,109	1360544	63129,14	5979435	2533,384	242508,5	318,947	94613,38
4,0							346,215	102702,2
5,0							455,312	135065,1
6,0							686,066	203516,5
7,0							1474,037	437262,5

2. Розв'язання задачі визначення характеристик жорсткості і пружності рейкової нитки при крученні.

Розрахункова схема і порядок розв'язання задачі приймається аналогічними розробленими О. П. Ершковим в 1960-х рр. [1, 2]. Однак при розв'язанні даної задачі нами зроблені необхідні корегування, що враховують неточності в рішеннях [1, 2], а також прийняті нові характеристики сучасних рейок і рейкових скріплень.

Для вирішення завдання в цілому необхідно на першому етапі розв'язати задачу про визначення розрахунково-аналітичним шляхом однієї з найважливіших розрахункових характеристик – модуля пружності колії при крученні рейкової нитки $U_y^{(T)}$ від спільної дії позацентрово прикладених горизонтальної і вертикальної сил H і P , з урахуванням сил тертя, що виникають на підшві рейки.

Докладно результати розв'язання даної задачі наведені в роботі [8], тому наведемо тут лише головні теоретичні викладки та кінцеві числові результати.

Вихідне рівняння рівноваги рейки при її крученні відносно поздовжньої осі x для розрахункового перерізу складається у

відповідності з розрахунковою схемою (рис. 1):

$$\sum m_x - \sum q_y \cdot h_2 - T_y \cdot h_2 = M_{кр}. \quad (12)$$

де $\sum m_x$ – перша складова сумарного реактивного опору крученню рейки по всій довжині деформації кручення, що викликана реактивними моментами m_x ;

m_x – реактивний опір крученню рейки в перерізі, де прикладений зовнішній крутний момент $M_{кр}$,

$$m_x = U_\varphi \cdot \varphi, \quad (13)$$

де φ – кут закручування рейки;

U_φ – модуль пружності підрейкової основи при крученні рейкової нитки;

$\sum q_y \cdot h_2$ – друга складова реактивного опору крученню рейки по всій довжині деформації кручення, яка викликана реактивними силами $\sum q_y$, де

$$q_y = U_y (y - \varphi h_2), \quad (14)$$

де y – горизонтальне переміщення центра вигину рейки (співпадає з центром кручення рейки) від дії бокової сили H ;

h_2 – відстань від центру кручення рейки до низу підшви;

$T_y \cdot h_2$ – третя складова сумарного реактивного опору крученню рейки по всій довжині деформації кручення, що викликана реактивними силами ΣT_y ; T_y – реактивна складова сил тертя по підшві рейки в перерізі прикладення зовнішнього крутного моменту,

$$T_y = U_z \cdot z \cdot f, \quad (14)$$

де z – вертикальне переміщення центра вигину рейки від дії вертикальної сили;

f – коефіцієнт тертя по підшві рейки (залежить від типу скріплення і підрейкових прокладок);

$M_{кр}$ – зовнішній крутний момент при спільній дії на рейку сил H і P ,

$$M_{кр} = H \cdot h'_1 - P \cdot e, \quad (15)$$

де h'_1 – відстань від центра кручення до місця прикладення сили H ;

e – ексцентриситет прикладення сили P відносно осі симетрії рейки.

Для розв'язання задачі в повному обсязі, з урахуванням дії всіх сил на довжині деформації закручування рейки, рівняння (12) виражається в інтегральній формі в такому вигляді:

$$\int_{-x_\phi}^{+x_\phi} U_\phi \cdot \phi \cdot dx - h_2 \left[\int_{-x_y}^{+x_y} U_y (y - \phi \cdot h_2) dx \right] + \left[\int_{-x_T}^{+x_T} U_z \cdot z \cdot f \cdot dx \right] = H \cdot h'_1 - P \cdot e. \quad (16)$$

Після деяких спрощень, викладених у роботах [8], рівняння (16) приведено до більш спрощеного вигляду

$$\int_{-x_\phi}^{+x_\phi} U_\phi \cdot \phi \cdot dx - h_2 \cdot H = H \cdot h'_1 - P \cdot e, \quad (17)$$

і його розв'язання відносно модуля пружності підрейкової основи при крученні U_ϕ має вигляд

$$U_\phi = \frac{H(h'_1 + h_2) \cdot h''}{(\delta - 1) \cdot \omega_y^{(n)}} - \frac{P \cdot e \cdot h''}{(\delta - 1) \cdot \omega_y^{(n)}}; \quad (18)$$

$$\delta = \frac{\omega_y^{(n)}}{\omega_y^{(z)}}, \quad (19)$$

де $\omega_y^{(n)}$ і $\omega_y^{(z)}$ – площі епюр поперечних переміщень (n) – підшви і (z) – головки рейки при спільній дії на рейку горизонтальної і вертикальної сил;

h'' – відстань між точками замірів поперечних переміщень головки і підшви рейки;

δ – відношення площ епюр переміщень головки і підшви рейки.

Інші позначення є на рис. 2.

Слід зазначити, що формула (18), отримана нами, відрізняється від аналогічної формули О. П. Єршкова, яка отримана ним у роботі [1], де допущена помилка при виведенні даної формули, – у ній відсутній співмножник (h'') у чисельнику другої складової правої частини рівняння. (Як показали наші розрахунки, при обчисленнях це може призводити до помилки у визначенні модуля пружності колії при крученні на 20 % і більше залежно від відношення сил P/H .)

Вираз для кута закручування рейкової нитки О. П. Єршковым отриманий у такому вигляді:

$$\phi = \frac{M_{кр}}{2D \cdot h_Q^2 \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot (r_1 + r_2)}, \quad (20)$$

де $M_{кр}$ – крутний момент зовнішніх сил (визначається за формулою (15));

h_Q – відстань між центрами тяжіння головки і підшви;

D – приведена жорсткість головки і підшви рейки при горизонтальному вигині, що визначаються за формулою С. П. Тимошенка [12, 13].

$$D = E \frac{I_c \cdot I_n}{I_c + I_n}, \quad (21)$$

де I_c, I_n – моменти інерції головки та підшви рейки відносно вертикальної осі.

Знаменник формули (20) являє собою жорсткість рейкової нитки при крученні β_φ , яка не закріплена і вільно розміщена на рейкових опорах, при дії на неї горизонтальної бокової сили H , а також позacentрово прикладеної вертикальної сили P і крутного моменту від дії цих сил. При цьому не враховується дія вертикального вигину і тертя по підшві рейки між рейкою і підрейковими опорами.

$$\beta_\varphi = 2D \cdot h_Q^2 \cdot r_1 \cdot r_2 (r_1 + r_2). \quad (22)$$

У виразах (20) і (22), крім вже вказаних характеристик D і h_Q , присутні досить важливі коефіцієнти r_1 і r_2 , які визначені в дослідженнях О. П. Єршкова [1, 2] як r_1 – коефіцієнт, що характеризує вигино-крутну жорсткість рейки, яка визначається за формулою

$$r_1 = \sqrt{\frac{C_{кр}}{D h_Q^2}}, \quad (23)$$

r_2 – коефіцієнт відносної жорсткості рейкової основи і рейки при крученні, що визначається за формулою

$$r_2 = \sqrt{\frac{U_\varphi}{C_{кр}}}. \quad (24)$$

Після визначення коефіцієнтів r_1 і r_2 за формулами (23) і (24) О. П. Єршковым було прийнято їх відношення для рейок Р43 і Р50 $r_1/r_2 \approx 0,15$ і в результаті кінцеві формули для визначення φ та

співвідношення β_φ і U_φ приведені до вигляду

$$\varphi = \frac{M_{кр}}{2,30D \cdot h_Q^2 \cdot r_1^2 \cdot r_2}, \quad (25)$$

$$\beta_\varphi = 2,30D \cdot h_Q^2 \cdot r_1^2 \cdot r_2 = 2,30 \cdot C_{кр} \cdot \sqrt{\frac{U_\varphi}{C_{кр}}}, \quad (26)$$

$$U_\varphi = \frac{\beta_\varphi^2}{5,30 \cdot C_{кр}}. \quad (27)$$

У формулах (23)–(27) характеристика $C_{кр}$ – жорсткість поперечного перерізу рейки при чистому крученні, визначається за формулою Сен-Венана [11, 12]

$$C_{кр} = \frac{F^4 \cdot G}{4\pi^2 \cdot I_p}, \quad (28)$$

де F – площа поперечного перерізу рейки;

I_p – полярний момент інерції рейки;

G – модуль зсуву.

Формули (25) і (27) після опублікування досліджень О. П. Єршкова у роботах [1, 2] у 1960 р. отримали широке розповсюдження і стали використовуватись при розрахунках рейок на міцність з урахуванням кручення. У тому числі дана методика була прийнята за основу розрахунків довідкових даних з крутильних характеристик рейок для «Довідника інженера-коліяника» [5] і була використана в інших широко опублікованих виданнях [13, 14].

Однак наші сучасні дослідження (2012-2016 рр.) [9, 10] показали, що використання викладеної вище методики потребує суттєвого коригування для забезпечення правильності кінцевих результатів, що використовуються для сучасних конструкцій верхньої будови колії.

Перш за все необхідно вказати, що характеристика β_φ розраховується за формулами (22) або (27) і характеризує

жорсткість рейкової нитки, яка не пов'язана скріпленнями з основою і залежить тільки від форми рейки і жорсткості елементів її перерізу. Саме тому характеристика U_φ у формулі (27) не може називатися модулем пружності реальної підрейкової основи, оскільки вона отримана з розв'язання задачі, де вплив основи не враховувався. Правильно називати цю характеристику U_φ модулем

пружності при крученні фіктивної рейкової основи.

Фактичне значення реального модуля пружності рейкової нитки при крученні $U_\varphi^{(T)}$ для випадку спільної дії вертикальних і горизонтальних сил (H і P) і з урахуванням сил тертя по підшві рейки, а також з урахуванням опору рейкових скріплень слід визначати за формулою, отриманою в наших дослідженнях,

$$U_\varphi^{(T)} = \frac{(h_1' + h_2) \cdot h''}{\delta - 1} U_y^{(T)} - \frac{P \cdot e \cdot h''}{(\delta - 1) \cdot H} U_y^{(T)}, \quad (29)$$

де $U_y^{(T)}$ – фактичне (реальне) значення модуля пружності рейкової нитки в горизонтальній боковій площині, визначене в попередній частині даної статті за формулою (11), яке в тому числі враховує фактичний опір рейкових скріплень горизонтальним боковим зміщенням головки та підшви рейки.

Крім того, як показали наші розрахунки, реальне відношення коефіцієнтів r_1/r_2 не є постійним, як

вказано в О. П. Єршкова, але воно складає $r_1/r_2 \approx 0,15$ (для рейок типу P50 і P43); $r_1/r_2 \approx 0,16$ (для рейок типу UIC60) і $r_1/r_2 \approx 0,17$ (для рейок типу P65). Саме тому в кінцевому вигляді формули, що визначають співвідношення фактичних (реальних) значень жорсткості рейкової нитки $\beta_\varphi^{(T)}$ і модуля пружності підрейкової основи при крученні рейкової нитки, потрібно визначати за формулами:

- для рейок типу P50 і P43 $\beta_\varphi^{(T)} = \sqrt{5,30 \cdot C_{кр} \cdot U_\varphi^{(T)}} ; \quad (30,а)$

- для рейок типу P65 $\beta_\varphi^{(T)} = \sqrt{5,475 \cdot C_{кр} \cdot U_\varphi^{(T)}} ; \quad (30,б)$

- для рейок типу UIC60 $\beta_\varphi^{(T)} = \sqrt{5,382 \cdot C_{кр} \cdot U_\varphi^{(T)}} . \quad (30,в)$

Результати перевірочних розрахунків показали, що реальні значення модуля пружності при крученні $U_\varphi^{(T)}$ суттєво більші значень модуля пружності фіктивної основи U_φ і відрізняються приблизно у 2,5-3,5 разу для реальних експлуатаційних відношень вертикальних і горизонтальних сил P/H . А реальні значення жорсткості рейкової нитки при крученні $\beta_\varphi^{(T)}$ (з урахуванням її зв'язків з підрейковою основою) відрізняються в бік збільшення

від фіктивного значення жорсткості β_φ приблизно в 1,5-2,0 рази для експлуатаційних відношень вертикальних і горизонтальних сил P/H .

Результати виконаних розрахунків характеристик модулів пружності рейкових ниток $U_\varphi^{(T)}$ і жорсткості підрейкової основи $\beta_\varphi^{(T)}$ наведені нижче для конструкцій залізничної колії на залізобетонних і дерев'яних шпалах з сучасними конструкціями вітчизняних скріплень безпідкладко-

вого та підкладкового типів (КБ, КПП-5, КПП-1, Д0) (див. табл. 1). Основні графічні залежності $U_{\varphi}^{(T)} = f\left(\frac{P_{дин}}{H_{дин}}\right)$ наведено на рис. 5.

У відомих роботах закордонних вчених [15, 16], які займались дослідженням подібних питань, на жаль, не наводяться вказані результати.

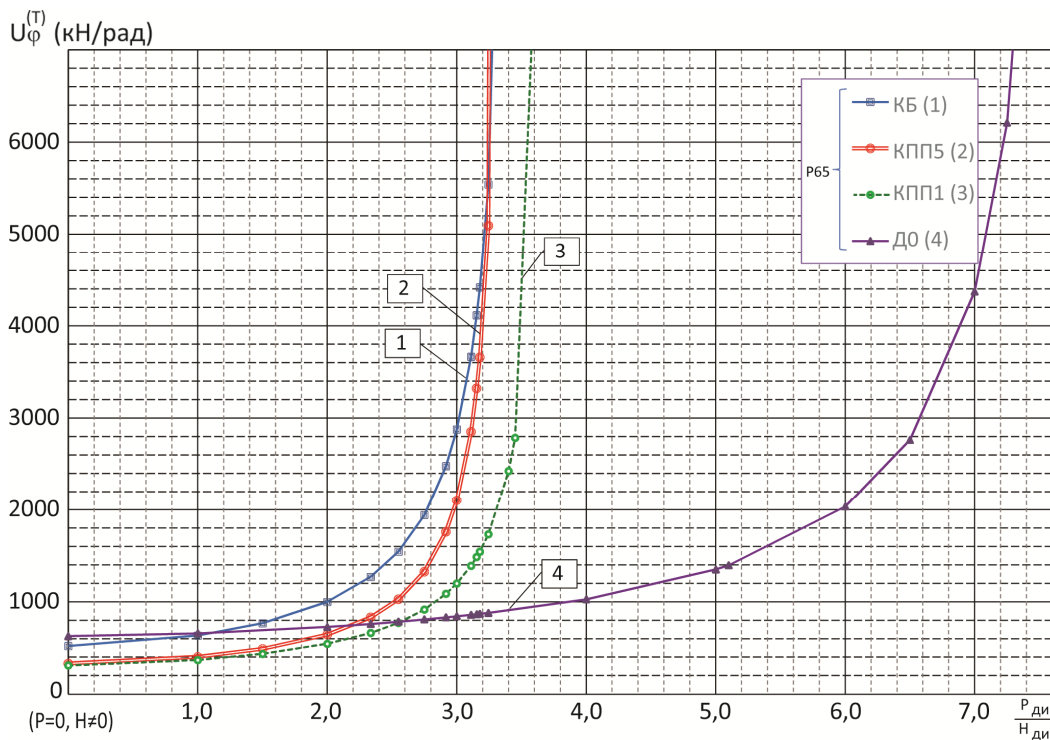


Рис. 5. Графіки функціональних залежностей модулів пружності при крученні від відношення діючих на рейку вертикальних і горизонтальних сил $U_{\varphi}^{(T)} = f\left(\frac{P_{дин}}{H_{дин}}\right)$

У даних дослідженнях отримано досить точні результати характеристик $U_y^{(T)}$ та $U_{\varphi}^{(T)}$ за відкоригованою методикою, тому автори не рекомендують користуватися числовими результатами більш ранніх робіт [7, 8, 9], які були розраховані за методикою О. П. Єршкова.

Висновки. Слід зазначити, що в результаті виконаних досліджень скручування рейкової нитки при спільній

дії вертикальних і горизонтальних навантажень уперше для вітчизняної колійної науки (як і при дослідженнях бокового вигину рейкової нитки) встановлено змінність пружно-жорсткісних характеристик рейкової нитки при крученні і функціональну залежність цих характеристик від відношення діючих колісних навантажень $P_{дин}/H_{дин}$.

Список використаних джерел

1. Ершков, О. П. Расчет рельса на действие боковых сил в кривых [Текст] / О. П. Ершков // Труды ВНИИЖТ. – 1960. – Вып. 192. – С. 5-59.

2. Ершков, О. П. Характеристики пространственной упругости рельсовой нити [Текст] / О. П. Ершков // Труды ВНИИЖТ. – 1960. – Вып. 192. – С. 59-101.
3. Бесстыковой путь [Текст] / под ред. В. Г. Альбрехта, Е. М. Бромберга. – М. : Транспорт, 1982. – 206 с.
4. Вериго, М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава [Текст] / М. Ф. Вериго, А. Я. Коган. – М. : Транспорт, 1986. – 559 с.
5. Справочник инженера-путейца [Текст] / под ред. В. В. Басилова, М. А. Чернышева. – М. : Транспорт, 1972. – Т. 1. – 768 с.
6. Вериго, М. Ф. Общие положения для корректировки Правил расчетов железнодорожного пути на прочность и предложения по изменению этих правил [Текст] / М. Ф. Вериго, С. С. Крепкогорский // Труды ЦНИИ МПС. – 1972. – Вып. 466. – С. 4-50.
7. Даниленко, Е. І. Новітні дослідження бічної пружності рейкових ниток при спільній дії вертикальних і горизонтальних сил [Текст] / Е. І. Даниленко // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 6 (60) – С. 65–77. doi: 10.15802/stp2015/57021.
8. Даниленко, Э. И. Расчет характеристик жесткости и упругости рельсовой нити при кручении под воздействием вертикальных и горизонтальных сил [Текст] / Э. И. Даниленко // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2016. - № 5. – С. 79-91.
9. Даниленко, Е. І. Експериментальні дослідження характеристик горизонтальної поперечної жорсткості і модуля пружності залізничної колії при різних конструкціях рейкових скріплень [Текст] / Е. І. Даниленко, В. П. Велинець // Залізнич. транспорт України. – 2015. – № 4. – С. 3–11.
10. Даниленко, Э. И. Теоретическое решение задачи по определению реального бокового модуля упругости пути при совместном действии на рельсовую нить горизонтальных и вертикальных сил [Текст] / Э. И. Даниленко, В. П. Велинець // Зб. наук. праць Держ. економ.-техн. ун-ту трансп. – К., 2014. – Вип. 24. – С. 106–122.
11. Тимошенко, С. П. Метод исследований статистических и динамических напряжений в рельсе [Текст] / С. П. Тимошенко // В кн. «Статистические и динамические проблемы теории упругости». – К. : Наукова думка, 1975. – С. 209–220.
12. Тимошенко, С. П. Напряжения в железнодорожном рельсе [Текст] / С. П. Тимошенко // В кн. «Статические и динамические проблемы теории упругости». – К. : Наукова думка, 1975. – С. 318–355.
13. Татуревич, А. П. Результаты определения фактических значений жесткости пути для исследований взаимодействия пути и подвижного состава [Текст] / А. П. Татуревич // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2003. – Вип. 2. – С. 95-100.
14. Шахунянц, Г. М. Железнодорожный путь [Текст] / Г. М. Шахунянц. – М. : Транспорт, 1969. – 536 с.
15. Настечик, М. П. Розробка технології контролю та утримання залізничної колії зі скріпленням типу КПП-5 [Текст] / М. П. Настечик, Р. В. Маркуль, В. В. Савицький // Тези XIV Міжнар. конф. «Проблеми механіки залізничного транспорту» ДНУЗТ. – Дніпропетровськ, 2016. – С. 92-93.
16. Tests on lateral resistance in railway tracks during the operation of a tamping machine [Text] / W. Koc, A. Wilk, P. Chrostowski, S. Grulkowski // Proc. Of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: J. of Rail and Rapid Transit. – 2011. Vol. 225. – Iss. 3. – P. 325–334. doi: 10.1243/09544097JRRT324.

17. Experimental study on the transverse stiffness of WJ-8 rail fastening [Text] / Lin C., Zeng Zh., Wu B. [et al.] // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 596. – P. 3–6. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.596.3.

Даніленко Едуард Іванович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри залізничної колії та колійного господарства Державного університету інфраструктури та технологій. Тел.: (044)-5915147. E-mail: zkks@ukr.net.

Молчанов Віталій Миколайович, канд. техн. наук, доцент кафедри залізничної колії та колійного господарства Державного університету інфраструктури та технологій. Тел.: (044)-5915147. E-mail: zkks@ukr.net.

Даніленко Тетяна Петрівна, канд. техн. наук, доцент кафедри вагонів та вагонного господарства Державного університету інфраструктури та технологій. Тел.: (044)-5915147. E-mail: zkks@ukr.net.

Даниленко Эдуард Иванович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой железнодорожного пути и путевого хозяйства Государственного университета инфраструктуры и технологий. Тел.: (044)-5915147. E-mail: zkks@ukr.net.

Молчанов Виталий Николаевич, канд. техн. наук, доцент кафедры железнодорожного пути и путевого хозяйства Государственного университета инфраструктуры и технологий. Тел.: (044)-5915147. E-mail: zkks@ukr.net.

Даниленко Татьяна Петровна, канд. техн. наук, доцент кафедры вагонов и вагонного хозяйства Государственного университета инфраструктуры и технологий. Тел.: (044)-5915147. E-mail: zkks@ukr.net.

Danilenko Eduard, D. Sc. (Tech.), professor, Head of Department «Railway and track facilities» State University of infrastructure and technology. Tel.: (044) 591-51-47. E-mail: zkks@ukr.net.

Molchanov Vitalii, PhD (Tech.), Associate professor, Department of Railway and track facilities, State University of infrastructure and technology. Tel.: (044) 591-51-47. E-mail: zkks@ukr.net.

Danilenko Tatyana, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Wagons and carriages, State University of infrastructure and technology. Tel.: (044) 591-51-74. E-mail: tpdanilei@ukr.net.

Статтю прийнято 12.10.2018 р.