

УДК 625.142.42

*Доктори техн. наук В.В. Рибкін,  
М.В. Савицький,  
асп. П.О. Пішійко*

## **ВИЗНАЧЕННЯ НАВАНТАЖЕНЬ НА ЗАЛІЗОБЕТОННІ ШПАЛИ ПРИ РІЗНИХ ТИПАХ І ШВИДКОСТЯХ РУХОМОГО СКЛАДУ**

**Вступ.** Відповідно до загальної тенденції розвитку залізничного транспорту розвинених країн світу спостерігається збільшення швидкостей руху пасажирських поїздів за рахунок використання новітніх технологій. Постійно ведеться робота з удосконалення конструкцій верхньої будови колії, адже підвищення швидкості руху поїздів прямо залежить від якості елементів колії та їхньої надійності.

Одним з факторів, що впливає на якість залізничної колії, є підрейкові основи, зокрема залізобетонні залізничні шпали. Актуальною на даний час є проблема оцінки можливостей сучасних конструкцій шпал при експлуатації у верхній будові при прискореному та швидкісному русі пасажирських поїздів, а саме надійність залізобетонних попередньо напружених шпал.

Через це виникла необхідність визначення навантажень на шпалу від різних типів рухомого складу та при різних швидкостях руху поїздів, що в подальшому

може застосовуватись при розрахунку надійності шпал.

**Аналіз попередніх досліджень.** Для залізниць України розроблені «Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість» [1], в яких наведені практичні інженерні розрахунки верхньої будови колії на міцність. Але під час аналізу літературних джерел [3] було встановлено, що в розрахунках навантажень на залізобетонні залізничні шпали за роботою [1] є деякі недоліки, які, на думку авторів, необхідно враховувати для отримання більш точних результатів.

**Метою** даної статті стало висвітлення методики інженерного розрахунку навантажень на залізничні залізобетонні шпали, що застосовувалась при виконанні науково-дослідних робіт науковцями Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна, і результатів, що були отримані в ході розрахунку.

Визначення навантажень на залізобетонні шпали виконувалось на

основі методики інженерного розрахунку, що була запропонована А.Ф. Золотарським у його наукових виданнях. Також у роботі були змінені деякі параметри розрахунку навантажень на основі даних «Правил розрахунку залізничної колії на міцність і стійкість» і досвіду вчених Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна.

Для розрахунку навантажень, що діють на залізобетонну шпалу, необхідно визначити сили, що діють на рейку. При цьому приймаються такі основні передумови і допущення:

- всі елементи верхньої будови колії і земляне полотно знаходяться у справному стані і відповідають технічним умовам на їх експлуатацію;

- рейка вважається нескінченно довгою балкою, що лежить на пружній основі, реактивний опір якого пропорційний величині пружної деформації;

- при розрахунку впливу на колію системи вантажів приймається умова незалежності впливу сил;

- ходові частини і ресорне підвішування екіпажів знаходяться в справному стані, що відповідає вимогам правил технічної експлуатації;

- над шпалою, що розраховується, знаходиться колесо з максимальним імовірним значенням вертикальної і горизонтальної сил;

- при вписуванні екіпажа в криву на рейку діють рамна і бічна динамічні сили;

- інерційними силами, викликаними коливанням рам рухомого складу, зневажаємо;

- при вигині у вертикальній площині рейка розглядається як балка, що лежить на суцільній пружній основі;

- вважається справедливою гіпотеза про лінійну залежність пружної деформації підрейкової основи від тиску, що діє;

- рейка піддається просторовому крученню і вигину від впливу коліс рухомого складу;

- динамічне навантаження на шпалу (брус) замінюється еквівалентним статичним навантаженням.

Максимальне ймовірне вертикальне навантаження колеса на рейку визначають за формулою

$$P_{дин} = P_{cp} + 2,5\sqrt{S_p^2 + S_{инк}^2 + S_{нер}^2} + 0,95 \cdot S_{инк}^2 + 0,05 \cdot S_{инк}^2 + \sum \eta_i P_{cp}, \quad (1)$$

де  $P_{cp}$  – середнє навантаження колеса на рейку;

$S_p$  – середньоквадратичне відхилення зусиль;

$S_{инк}$  – середньоквадратичне відхилення динамічного навантаження;

$S_{нер}$  – середньоквадратичне відхилення навантаження колеса на рейку, викликане нерівномірністю передачі навантаження окремим шпалам унаслідок наявності в колії поруч з розрахунковою шпалою непрацюючих шпал;

$S_{инк}$  – середньоквадратичне динамічне відхилення динамічного навантаження

колеса на рейку від сил інерції необресорених мас унаслідок наявності безперервних нерівностей на поверхні котіння коліс;

$S_{инк}$  – середньоквадратичне відхилення динамічного навантаження колеса на рейку від сил інерції необресорених мас через наявність плавних ізольованих нерівностей на поверхні котіння коліс;

$\sum \eta_i P_{cp}$  – еквівалентний вантаж, що замінює при розрахунку тиску рейки на шпалу дію усіх інших коліс екіпажа, крім розрахункового колеса.

Середнє навантаження колеса на рейку  $P_{cp}$ , визначається за формулою

$$P_{cp} = P_{cm} + 0,75P_p, \quad (2)$$

де  $P_{cm}$  – статичне навантаження колеса на рейку, за паспортними даними екіпажа;

$P_p$  – максимальне зусилля, що виникає від коливання надресорної частини екіпажа,

$$P_p = \mathcal{J} \cdot z_{\max}, \quad (3)$$

де  $\mathcal{J}$  – приведена жорсткість ресор, прийнята за паспортними даними екіпажа;

$$S_{nn} = 1,788 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha_1 \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \varepsilon \cdot l_{ш} \cdot P_{cp} \sqrt{\frac{u}{k}} \sqrt{q \cdot v}, \quad (5)$$

де  $\alpha_1$  – коефіцієнт, що враховує матеріал, з якого вироблені шпали (для дерева - 1, для залізобетону - 0,931);

$\beta$  – коефіцієнт, що враховує вплив типу рейки на виникнення динамічної нерівності,

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{I_{P50}}{I_j}}, \quad (6)$$

де  $I_{P50}$  – момент інерції рейки P50;

$I_j$  – момент інерції рейки розглядуваного типу;

$\gamma$  – коефіцієнт, що враховує вплив роду баласту на утворення нерівності колії (приймається 1 – при щебеневому баласті; 1,1 – при баласті з кар’єрного гравію і черепашнику; 1,5 – при баласті з піску);

$\varepsilon$  – коефіцієнт, що враховує вплив типу шпали на виникнення динамічної нерівності (згідно з дослідженнями ВНДІЗТу приймається 1 – для дерев’яних шпал та 0,322 – для залізобетонних шпал);

$z_{\max}$  – максимальний прогин ресор, мм, при русі екіпажа, який визначається за емпіричними формулами вигляду  $z_{\max} = a + 0,75P_p$ .

Середньоквадратичне відхилення зусиль визначається за формулою

$$S_p = 0,08 \cdot P_p. \quad (4)$$

Середньоквадратичне відхилення динамічного навантаження колеса на рейку від сил інерції необресорених мас при проходженні колесом плавної ізольованої нерівності  $S_{nn}$  колії визначається за формулою

$l_{ш}$  – розрахункові відстані між осями шпал;

$u$  – модуль пружності підрейкової основи при вигині рейки у вертикальній площині;

$k$  – коефіцієнт відносної пружності основи і рейки,

$$k = \sqrt[4]{\frac{u}{4E_p I_y}}; \quad (7)$$

$q$  – величина необресореної маси екіпажа, яка приходить на одне колесо;

$v$  – швидкість руху рухомого складу.

Середньоквадратичне відхилення навантаження колеса на рейку, викликане нерівномірністю передачі навантаження окремим шпалам унаслідок наявності в колії поруч з розрахунковою шпалою непрацюючих шпал  $S_{нер}$ :

$$S_{нер} = 0,176 \cdot P_{cp}. \quad (8)$$

Середньоквадратичне динамічне відхилення динамічного навантаження колеса на рейку від сил інерції необресорених мас унаслідок наявності безперервних нерівностей на поверхні котіння коліс  $S_{ннк}$ :

$$S_{ннк} = \frac{\alpha_0 i v \pi^2}{\sqrt{2g}} \sqrt{\frac{uq}{k}}, \quad (9)$$

де  $\alpha_0$  – коефіцієнт, що враховує вплив інерції мас колії, які коливаються, на величину динамічної сили (0,403 – для колії з залізобетонними шпалами);

$i$  – середній ухил одиночної нерівності колії;

$g$  – прискорення вільного падіння (9,8 м/с<sup>2</sup>).

Середньоквадратичне відхилення динамічного навантаження колеса на рейку від сил інерції необресорених мас через наявність плавних ізольованих нерівностей на поверхні котіння коліс  $S_{інк}$ :

$$S_{інк} = 0,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_0 \cdot \xi \cdot e_0 \cdot \frac{u}{k}, \quad (10)$$

де  $\xi$  – безрозмірний прогин, що дорівнює відношенню максимального додаткового прогину рейки до глибини нерівностей на колесі (відповідно до «Правил розрахунку залізничної колії на міцність та стійкість» значення  $\xi$  прийнято 1,47);

$e_0$  – розрахункова глибина ізольованої нерівності на колії (відповідно до табл. 10 з роботи [1] найбільші розрахункові глибини нерівностей на колесах дорівнюють: для локомотивів і моторвагонного рухомого складу –  $0,047 \times 10^{-2}$ , а для вагонів –  $0,067 \times 10^{-2}$ ).

Еквівалентний вантаж, що замінює при розрахунку тиску рейки на шпалу дію усіх сусідніх коліс екіпажа, крім розрахункового колеса  $\sum \eta_i P_{cp}$ ,

визначається відповідно до значень, наведених у табл. 3 дод. 1 роботи [1].

При вписуванні екіпажа в криву на рейку додатково діють рамна  $Z_p$  і бічна  $H_H$  ( $H_B$ ) сили (рис. 1). Індексом «H» і «B» позначені зовнішня і внутрішня рейки. Зазначені сили визначаються залежно від величини поперечного непогашеного прискорення  $a_{нн}$  за формулами, які складені на підставі «графіків-паспортів» [4], або за формулами, що складені на їх основі. Зокрема для чотиривісного вантажного вагона на візках ЦНІИ-ХЗ формули мають вигляд

$$Z_p = 31,5 + 26a_{нн}, \quad (11)$$

$$H = 54 + 25a_{нн}; \quad (12)$$

для електровоза ВЛ60 з розбігом середньої осі:

$$Z_p = 22 + 28a_{нн}, \quad (13)$$

$$H = 48 + 26a_{нн}. \quad (14)$$

При розрахунку шпал необхідно приймати найбільше допустиме значення  $a_{нн} = 0,7$  м/с<sup>2</sup>.

Рамна динамічна сила визначається за формулою

$$Z_{p.дин} = Z_p (1 + 0,0024v). \quad (15)$$

Додаткова вертикальна сила дорівнює

$$\Delta P = \frac{Z_{p.дин} r}{t}, \quad (16)$$

де  $r$  – радіус колеса;

$t$  – відстань між осями рейок.

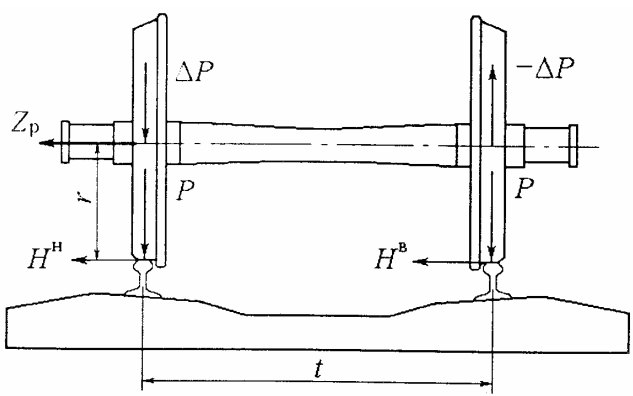


Рис. 1. Схема зовнішніх сил, що діють на шпалу

Повне вертикальне динамічне навантаження на зовнішню і внутрішню рейки в перевідній кривій визначаються за формулами

$$P_{дин}^H = P_{дин} + \Delta P, \quad (17)$$

$$P_{дин}^B = P_{дин} - \Delta P. \quad (18)$$

Динамічні бічні навантаження на зовнішню та внутрішню рейки

$$H_{дин}^H = H^H (1 + 0,003v) + P_{cp} f_{cp}, \quad (19)$$

$$H_{дин}^B = P_{cp} f_{mp}, \quad (20)$$

де  $f_{mp}$  - коефіцієнт тертя колеса по рейці, який дорівнює 0,25...0,3.

Вертикальні навантаження, що діють на шпалу в кривій, від впливу зовнішньої і внутрішньої рейок визначаються таким чином:

$$P_{ш}^H = \frac{klP_{дин}^H}{2}, \quad (21)$$

$$P_{ш}^B = \frac{klP_{дин}^B}{2}, \quad (22)$$

де  $l$  – відстань між осями брусів.

Вертикальні навантаження, що діють на шпалу в кривій, від впливу зовнішньої і внутрішньої рейок визначаються таким чином:

$$P_{ш}^H = \frac{klP_{дин}^H}{2}, \quad (23)$$

$$P_{ш}^B = \frac{klP_{дин}^B}{2}, \quad (24)$$

де  $l$  – відстань між осями брусів.

На рис. 2 показана схема зовнішніх сил, що діють на шпалу в підрейковому перетині, горизонтальні сили  $H_{ш}^H$  та  $H_{ш}^B$  умовно показані вище підрейкової площини шпали, але фактично вони діють у її площині.

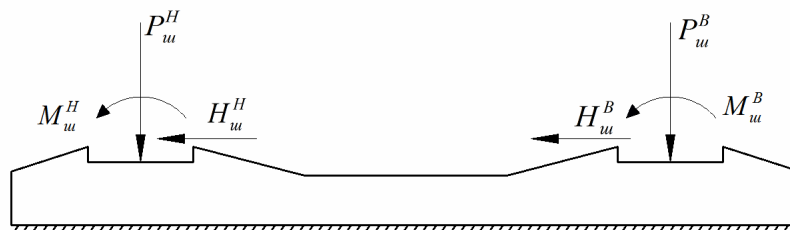


Рис. 2. Зовнішні сили, що діють на шпалу

Бічні навантаження, що діють на шпалу (брус) у перевідній кривій, від зовнішньої і внутрішньої рейок, визначаються за формулами

$$H_{ш}^H = \frac{k_z l}{2} H_{дин}^H, \quad (25)$$

$$H_{ш}^B = \frac{k_z l}{2} H_{дин}^B, \quad (26)$$

де  $k_z$  – коефіцієнт відносної міцності підрейкової основи і рейки при дії горизонтального бічного навантаження, м-1,

$$k_z = \sqrt[4]{\frac{u_z}{4E_p I_z}}, \quad (27)$$

де  $u_z$  – модуль пружності підрейкової основи при вигині рейки в горизонтальній площині при одночасній дії горизонтальних бічних і вертикальних сил, що проходять через центри ваги,

$I_z$  – момент інерції поперечного перетину рейки відносно вертикальної осі, що проходить через центр ваги.

Бічна сила, що прикладена на рівні підшви рейки, створює в підрельсовому перетині шпали згинальний момент:

$$M_{ш}^H = H_{ш}^H (h'_{ш} + h_{II}), \quad (28)$$

$$M_{ш}^B = H_{ш}^B (h'_{ш} + h_{II}), \quad (29)$$

де  $h'_{ш}$  – відстань від нейтральної осі до верху шпали в підрейковому перетині;

$h_{II}$  – висота підкладки та прокладок під рейкою та між підкладкою і шпалою.

Для моделювання навантажень на шпалу авторами були обрані такі види рухомого складу: локомотив ДС-3 (максимальна швидкість руху 160 км/год), локомотив ЧС7 (максимальна швидкість 160 км/год), чотиривісний вантажний вагон вантажопідйомністю 71 т на візках ЦНИИ-Х3-0 (максимальна швидкість 120 км/год); восьмивісні вантажні вагони вантажопідйомністю 142,4 т на візках ЦНИИ-Х3-0 (максимальна швидкість 100 км/год) і пасажирський вагон на візках КВ3-ЦНИИ (максимальна швидкість 160 км/год).

Після виконання розрахунків були отримані результати, що наведені в таблиці (для величин  $P_{ш}^B, H_{ш}^H (H_{ш}^B), M_{ш}^H (M_{ш}^B)$ ). Для навантажень при максимальних швидкостях руху побудовані діаграми, що показані на рис. 3. На рис. 4 наведений графік зміни значення вертикальної сили  $P_{ш}^H$ , що діє на зовнішню рейку залежно від швидкості рухомого складу.

Таблиця

Результати розрахунку навантажень на шпалу від різних типів рухомого складу

Найменування рухомого складу (максимальна швидкість руху, км/год)	Швидкість руху, км/год	$P_{ш}^H$ , кН	$P_{ш}^B$ , кН	$H_{ш}^H$ , кН	$H_{ш}^B$ , кН	$M_{ш}^H$ , кН·м	$M_{ш}^B$ , кН·м
1	2	3	4	5	6	7	8
ДС3 (160)	20	76,16	63,06	53,87	19,13	7,47	2,65
	40	77,21	63,51	55,96	19,26	7,76	2,67
	60	78,75	64,44	58,14	19,47	8,06	2,70
	80	80,77	65,87	60,40	19,76	8,37	2,74
	100	83,27	67,77	62,74	20,14	8,70	2,79
	120	86,24	70,14	65,17	20,59	9,03	2,85
	140	89,67	72,97	67,68	21,14	9,38	2,93
	160	93,57	76,27	70,27	21,76	9,74	3,02

Продовження таблиці

1	2	3	4	5	6	7	8
ЧС7 (160)	20	71,30	58,20	52,13	17,39	7,22	2,41
	40	72,34	58,64	54,22	17,51	7,51	2,43
	60	73,86	59,56	56,39	17,72	7,82	2,46
	80	75,87	60,96	58,65	18,01	8,13	2,50
	100	78,34	62,84	60,99	18,39	8,45	2,55
	120	81,27	65,17	63,42	18,85	8,79	2,61
	140	84,67	67,97	65,93	19,39	9,14	2,69
	160	88,52	71,22	68,52	20,02	9,50	2,77
ЦНИИ-ХЗ-0 4вісі 71 т (120)	20	76,75	64,86	56,98	19,45	7,90	2,70
	40	78,06	65,62	59,34	19,70	8,22	2,73
	60	80,05	67,06	61,87	20,10	8,57	2,79
	80	82,73	69,20	64,55	20,66	8,95	2,86
	100	86,10	72,03	67,40	21,38	9,34	2,96
	120	90,18	75,56	70,40	22,26	9,76	3,09
ЦНИИ-ХЗ-0 8 вісний 142,4 т (100)	20	77,36	65,46	57,14	19,62	7,92	2,72
	40	78,73	66,29	59,52	19,88	8,25	2,76
	60	80,83	67,84	62,08	20,31	8,60	2,81
	80	83,67	70,14	64,81	20,91	8,98	2,90
	100	87,24	73,16	67,71	21,69	9,38	3,01
КВЗ-ЦНИИ (160)	20	46,10	35,09	45,83	11,09	6,35	1,54
	40	46,84	35,33	47,91	11,20	6,64	1,55
	60	47,66	35,64	49,98	11,30	6,93	1,57
	80	48,54	36,03	52,05	11,41	7,21	1,58
	100	49,49	36,47	54,12	11,51	7,50	1,60
	120	50,50	36,98	56,19	11,62	7,79	1,61
	140	51,57	37,54	58,26	11,73	8,08	1,63
	160	52,68	38,15	60,33	11,83	8,36	1,64

**Висновки:**

1. Визначення навантажень на шпалу є актуальною проблемою, яка потребує додаткових досліджень, через відсутність комплексної стандартизованої методики їх визначення.

2. Серед різних типів рухомого складу найбільші навантаження на шпалу спричиняють вантажні вагони та

локомотиви, навантаження від яких у середньому перевищують навантаження від пасажирського рухомого складу за величиною вертикальної сили – на 40%, за величиною горизонтальної сили – на 13 %, за величиною згинального моменту – 13%, при умові руху поїздів з максимальною розрахунковою швидкістю руху.

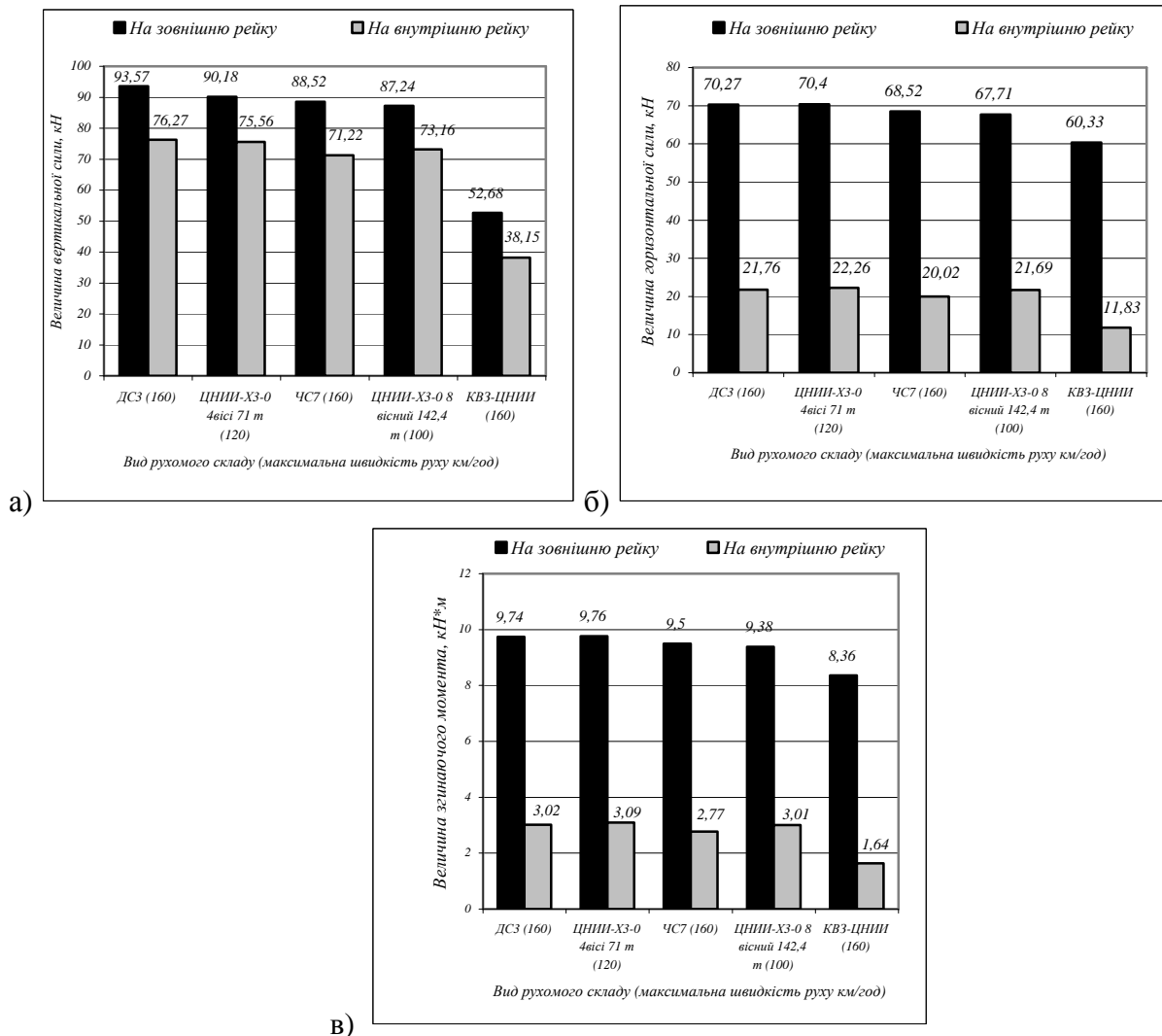


Рис. 3. Діаграми величин: а – вертикальних сил  $P_{ш}^H$  ( $P_{ш}^B$ ); б – горизонтальних сил  $H_{ш}^H$  ( $H_{ш}^B$ ); в – згинальних моментів  $M_{ш}^H$  ( $M_{ш}^B$ ), що діють на шпалу при максимальній швидкості рухомого складу

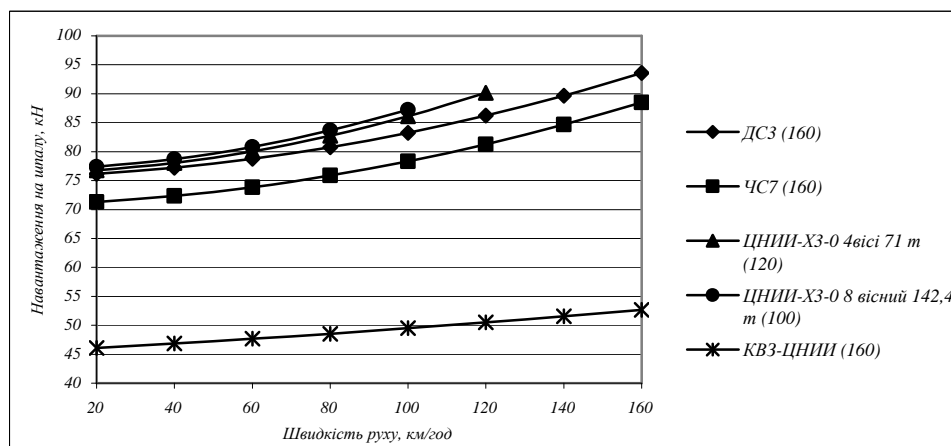


Рис. 4. Графіки зміни величини вертикальної сили  $P_{ш}^H$  залежно від типу та швидкості рухомого складу



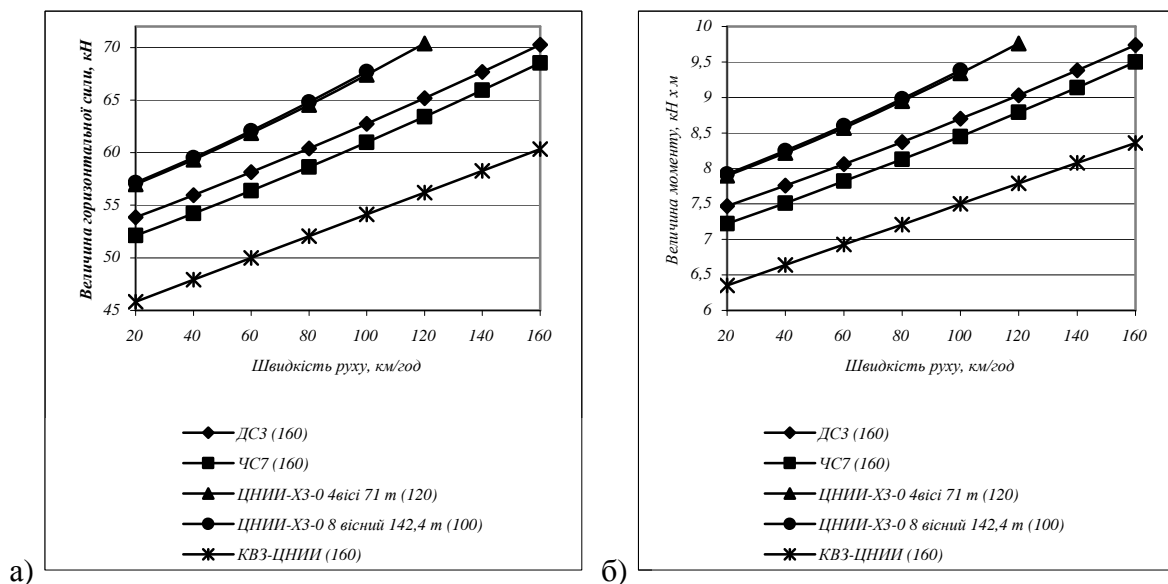


Рис. 5. Графіки зміни величин: а – горизонтальної сили  $H_{ш}^H$ ; б – згинаючого моменту  $M_{ш}^H$ , залежно від типу та швидкості рухомого складу

### Список літератури

1. ЦП-0117. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість [Текст]. – К.: Транспорт України, 2006. – 125 с.
2. ГОСТ 10629-88. Шпалы железобетонные, предварительно напряженные для железных дорог колеи 1520 мм. Технические условия. Официальное издание [Текст]. – М.: Госстрой СССР. Издательство стандартов, 1989. – 24 с.
3. Золотарский, А.Ф. Железобетонные шпалы для рельсового пути [Текст]/ А.Ф. Золотарский, Б.А. Евдокимов, Н.М. Исаев [и др.]. – М.: Транспорт, 1980. – 180 с.
4. Ершков, О.П. Применение графиков-паспортов для оценки воздействия локомотивов на путь в кривых [Текст] / О.П. Ершков. – М.: Транспорт, 1964. – 200 с.

**Ключові слова:** шпала, залізниця, колія, методика.

### Анотації

У статті наведена методика та результати розрахунку навантажень на залізничні залізобетонні шпали від різних видів рухомого складу.

В статье приведена методика и результаты расчета нагрузок на железнодорожные железобетонные шпалы от разных видов подвижного состава.

The article gives the method of calculation of loadings is resulted on railway reinforce-concrete railroad ties from the different types of trains and the results of calculation.