



УДК 629.463.65.027.4:625.143.3.033.373

ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЗНОСУ ЗА НЕРІВНОМІРНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ ВАНТАЖНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

*Фомін О.В., докт. техн. наук, професор, Державний університет інфраструктури та технологій,
м. Київ, Швець А. О., пров. інженер каф. «Теоретична та будівельна механіка», Болотов О. М., с.н.с.
ГНДЛ ДМРС, Сапарова Л. С., с.н.с. ГНДЛ ДМРС, Дніпровський національний університет
залізничного транспорту імені акад. В. А. Лазаряна, м. Дніпро*

У статті викладено результати теоретичних досліджень впливу повздовжнього та поперечного зміщення центру мас вантажу у піввагонах на показники зносу поверхонь коліс та рейок з урахуванням швидкості руху в криволінійних ділянках залізничної колії. Описано залежності фактору зносу коліс, показників зносу на гребні колеса та поверхні кочення колеса вантажного рухомого складу від швидкості руху.

Ключові слова: зміщення центру мас вантажу, знос гребнів коліс, піввагони, показники зносу.

DEFINITION OF INDICATORS WEAR IN AN UNEVEN LOAD FREIGHT ROLLING STOCK

*O. Fomin, Doctor of Technical Sciences, Professor, State University of Infrastructure and Technologies, Kyiv,
A. Shvets, O. Bolotov, L. Saparova, Dnipro National University of Railway Transport named after acad. V.A.
Lazaryan, Dnipro*

The article presents the results of theoretical studies of the effect of longitudinal and transverse displacement of the center of mass of the load in open wagons on the wear indicators of the surfaces of wheels and rails, taking into account the speed in curved sections of the railway track. The dependences of the wear factor of the wheels, the wear indicators on the wheel flange and the rolling surface of the wheel of a freight rolling stock on the speed of movement are described.

Keywords: *displacement the center of gravity of the load, wear of the crests of wheels, gondola cars, wear indicators.*

Збільшення інтенсивності зносу гребнів колісних пар рухомого складу та бокових поверхонь головок рейок як і раніше залишається однією з найсерйозніших проблем залізничного транспорту. Знос поверхонь кочення коліс (прокат) й рейок внутрішньої рейкової нитки в кривих поступилися місцем зносам гребнів колісних пар і зовнішніх рейок [1-4].

Знос коліс й рейок залежить від фізико-механічних процесів, що протікають в



області їх контакту. Характер протікання цих процесів та їх інтенсивність в значній мірі залежать від зовнішніх впливів на поверхню контакту, зокрема, від сил взаємодії контактуючих тіл і їх відносних переміщень, які істотно залежать від кутів набігання коліс на рейки. Ці сили й переміщення визначаються умовами взаємодії коліс рухомого складу та колії. Одним з можливих шляхів вирішення проблеми зниження інтенсивного зносу гребнів коліс та бокових поверхонь головок рейок є встановлення умов зниження зовнішніх впливів або зниження динамічної навантаженості зони контакту, а також зменшення кутів набігання коліс на рейки [5-7].

Для вивчення сил взаємодії та кутів набігання колісних пар на рейки було використано математичне моделювання вимушених просторових коливань систем «вагон – рейкова колія» при русі в кривих вантажного вагона на візках моделі 18-100. Вихідними величинами є показники зносу гребнів коліс, які представляють собою середню роботу сил тертя (псевдоковзання) на контакті гребня колеса та бокової грані головки рейки, а також величини направляючих сил і кутів набігання коліс на рейки.

Загальновідомо, що значний вплив на знос пари «колесо – рейка» здійснюють навантаження, що передаються від коліс на рейки. З огляду на нерівномірність розподілу маси вантажу по осях та колесам ці навантаження можуть значно перевищувати допустимі величини. Крім того, однією з головних причин збільшення бокового зносу рейок і гребнів коліс вважається надлишок підвищення зовнішньої рейки в кривих. При цьому збільшується кут набігання коліс на рейки і через різницю довжин зовнішньої та внутрішньої рейок в кривих відбувається прослизання коліс по зовнішній рейковій нитці, що призводить до підвищеного зносу пари «колесо-рейка». З експериментів по дослідженню динамки руху вантажних вагонів в прямих і кривих ділянках колії з нерівностями було визначено, що з підвищенням навантажень від коліс на рейки направляючі зусилля та фактор бокового зносу гребнів коліс й рейок значно збільшується по відношенню до підвищення навантаження. Крім того, при неправильно завантажених вагонах є реальна загроза безпеці руху поїздів. У зв'язку з цим розглянуті деякі причини підвищеного зносу рейок і гребнів коліс, пов'язані з нерівномірністю завантаження вагонів під час руху по криволінійних ділянках залізничної колії [8-13].

Визначимо показники зносу коліс і рейок. На рис. 1 (а, б) зображено набігаюче колесо та рейка. Зусилля та реакції позначені індексом imj . Індекс $i=1, 2$ – номер візка; індекс $j=1$ – ліва, $j=2$ права сторона вагона; індекс $m=1, 2$ – номер колісної пари у візку [1].

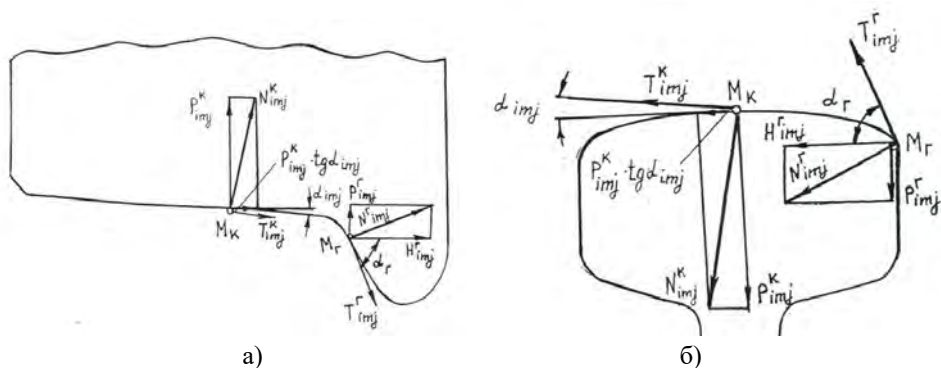


Рис. 1. Зусилля та реакції при контакті у двох точках: а) колесо; б) рейка

На поверхні катання застосовується вираз який представляє собою погонну роботу сил тертя або середню роботу сил тертя на розглянутій ділянці колії:

$$P_{ximj} = \sqrt{(T_{ximj}^K \varepsilon_{ximj})^2 + (T_{yimj}^K \varepsilon_{yimj})^2}, \quad (1)$$

де T_{ximj}^K , T_{yimj}^K – складові сил псевдоковзання; ε_{ximj} , ε_{yimj} – поздовжнє та поперечне прослизання коліс.

$$T_{ximj}^K = -\frac{f_{imj}^K \varepsilon_{ximj}}{\sqrt{1 + (\gamma_{imj}^K \varepsilon_{imj})^2}}, \quad T_{yimj}^K = -\frac{f_{imj}^K \varepsilon_{yimj}}{\sqrt{1 + (\gamma_{imj}^K \varepsilon_{imj})^2}}, \quad (2)$$

Підставив вираз (2) до (1) отримаємо:

$$P_{kximj} = -\frac{f_{imj}^K \varepsilon_{imj}^2}{\sqrt{1 + (\gamma_{imj}^K \varepsilon_{imj})^2}}, \quad (3)$$

де f_{imj}^K – коефіцієнт кріпа; γ_{imj}^K – коефіцієнт.

$$f_{imj}^K = \left(235 - 2,4P_{imj}^K + 0,01(P_{imj}^K)^2 \right) P_{imj}^K, \quad (4)$$

$$\gamma_{imj}^K = \left(235 - 2,4P_{imj}^K + 0,01(P_{imj}^K)^2 \right) / f_{tp}. \quad (5)$$

Де P_{imj}^K – вертикальний тиск колеса на поверхні кочення; f_{tp} – коефіцієнт тертя.

Показник зносу на гребні колеса визначається аналогічно показнику зносу на поверхні кочення колеса:

$$P_{rimj} = \sqrt{\left(T_{ximj}^r \varepsilon_{ximj}^r\right)^2 + \left(T_{yimj}^r \varepsilon_{yimj}^r / \cos^2 \alpha_r\right)^2}. \quad (6)$$

Де T_{ximj}^r , T_{yimj}^r – складові сил псевдоковзання на гребні колеса та рейки; ε_{ximj}^r – повне прослизання гребня колеса відносно рейки.

$$T_{ximj}^r = -\frac{f_{imj}^r \varepsilon_{ximj}^r}{\sqrt{1 + \left(\gamma_{imj}^r \varepsilon_{imj}^r\right)^2}}, \quad T_{yimj}^r = -\frac{f_{imj}^r \varepsilon_{yimj}^r}{\sqrt{1 + \left(\gamma_{imj}^r \varepsilon_{imj}^r\right)^2}}, \quad (7)$$

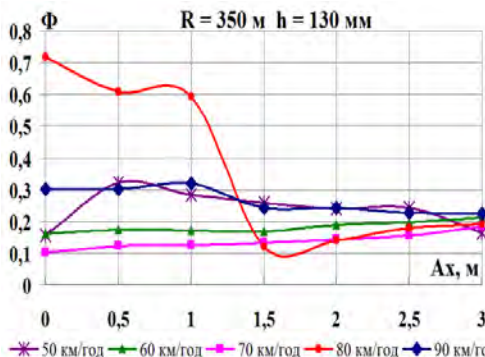
$$\varepsilon_{imj}^r = \sqrt{\left(\varepsilon_{ximj}^r\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{yimj}^r}{\cos \alpha_r}\right)^2}, \quad \varepsilon_{yimj}^r = \varepsilon_{yimj}. \quad (8)$$

Повздовжнє прослизання визначається відповідно до виразу:

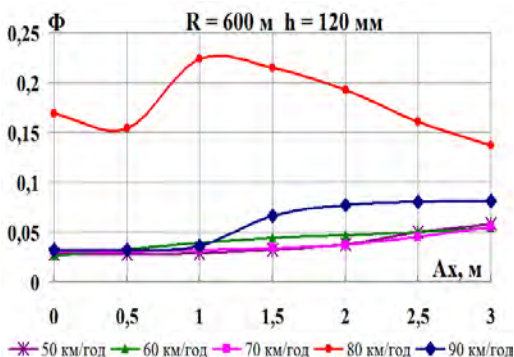
$$\varepsilon_{ximj}^r = -\left((-1)^j b_2 \frac{\varphi_{kim}}{v} + \frac{\Delta r_r}{r}\right), \quad (9)$$

Фактор зносу коліс та рейок визначений як характеристика, що дорівнює добутку спрямовуючої сили на кут набігання колеса на рейку. При контакті колеса та рейки у двох точках спрямовуючою силою є тиск гребня колеса на рейкою.

Вплив зсуву центру мас вантажу у кузові піввагона розглядався у повздовжньому та поперечному напрямках, та одночасно в обох напрямках. На рис. 2-4 наведено графіки зміни динамічних показників при русі в кривих ділянках колії $R=600$ м й 350 м. Зсув у повздовжньому напрямку (рис. 2) розглядався в межах до $A_x=3$ м, що є допустимим за нормативною документацією для вантажів малої ваги [9, 12, 14, 15].



а)



б)

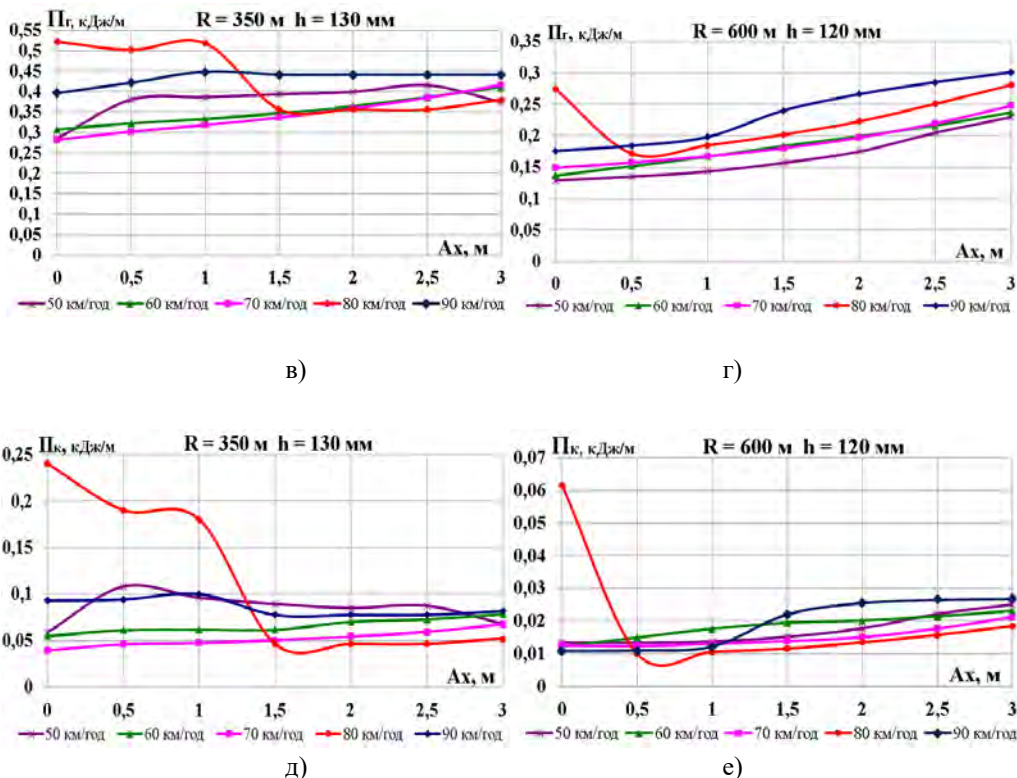


Рис. 2. Графіки залежності від зміщення вантажу в повздовжньому напрямку:
 а, б) фактор зносу; в, г) показник зносу на гребні колеса;
 д, е) показник зносу на поверхні кочення колеса

Як видно з рис. 2 (а, б) із збільшенням повздовжнього зміщення центру мас вантажу усі наведені показники зносу збільшуються, але не значно, в усьому діапазоні швидкостей за винятком швидкості 80 км/год в обох кривих. Зміщення центру мас вантажу у бік переднього візка довантажує набігаючу колісну пару, що у свою чергу знижує її впливання. Рівень фактору зносу Φ та показника P_r на гребні колеса у кривих малого радіусу в середньому у 2 рази більший за відповідні значення у кривих середнього радіусу. Показник зносу на поверхні кочення колеса P_k в кривих малого радіусу перевищує відповідні значення для $R = 600$ м у 5 разів. З отриманих результатів випливає, що повздовжнє зміщення вантажу викликає збільшення показників зносу на гребні і не повинно перевищувати значень, визначених нормативною документацією.

Поперечне зміщення вантажу розглядалося в межах від $A_y = 0$ до 0,2 м (рис. 3). Для вантажів вагою 63 т, при якій проводились розрахунки, допускається повздовжнє зміщення $A_y = 0,15$ м, на шляху прямування це значення може становити 0,2 м [15].

На рис. 3 показано вплив на досліджуванні показники зносу поперечного зміщення центру мас вантажу A_y у кривих $R=350$ м та $R=600$ м відповідно. Вплив поперечного зміщення центру мас вантажу більш істотно позначається на показниках зносу ніж поздовжнє зміщення. Із збільшенням A_y фактор зносу Φ (рис. 3 а, б) у кривій $R=350$ м зростає при перевищенні значення $A_y = 0,15$ м, а кривій $R=600$ м навпаки навіть знижується.

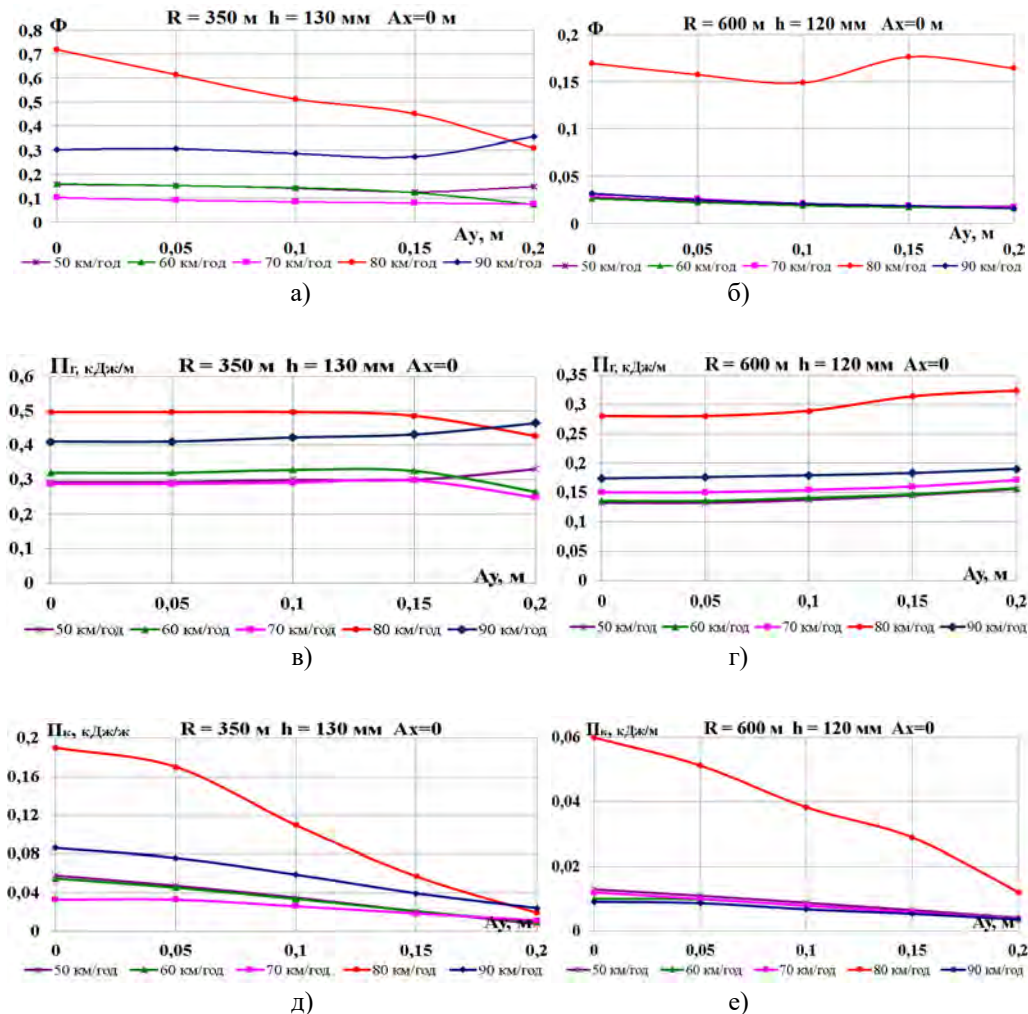


Рис. 3. Графіки залежності від зміщення вантажу в поперечному напрямку:
а, б) фактор зносу; в, г) показник зносу на гребні колеса; д, е) показник зносу на поверхні
кочення колеса

Зі збільшенням A_y показники зносу Π_r ростуть, проте не дуже значно. Наприклад, у діапазоні швидкостей 50-70 км/год при збільшенні поперечного зсуву A_y від 0 до допустимого для даної ваги значення 0,15 м показник Π_r зростає в середньому на 7% на кривій $R=600$ м і на 3,5% на кривій $R=350$ м (рис. 3 в, г). Показник зносу на поверхні кочення колеса Π_k з ростом A_y навіть зменшується, що можна пояснити зменшенням навантаження на це колесо (рис. 3 д, е). З усього діапазону швидкостей знову значно вирізняється швидкість 80 км/год.

Спільне зміщення центру мас уздовж осей X , Y розглянуто в межах A_x та A_y від 0 до 0,15 м (рис. 4) [15].

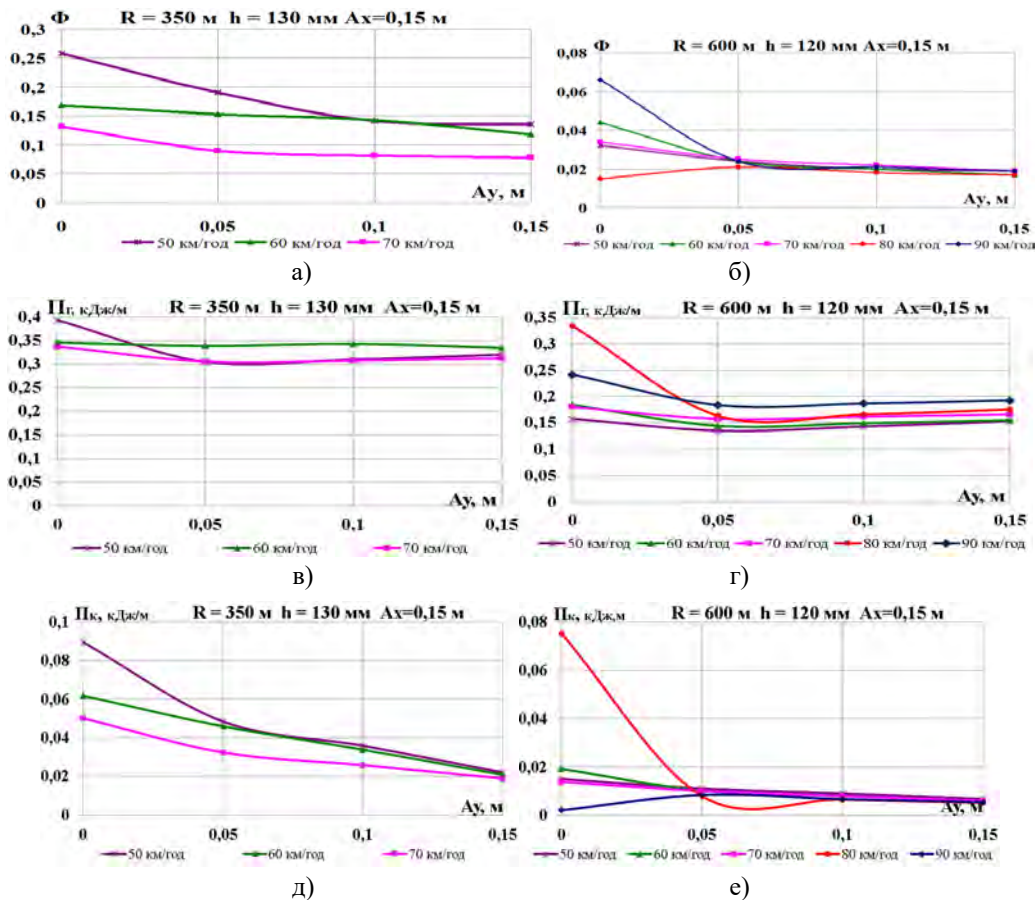


Рис. 4. Графіки залежності від одночасного зміщення вантажу в поперечному та поздовжньому напрямках: а, б) фактор зносу; в, г) показник зносу на гребні колеса; д, е) показник зносу на поверхні кочення колеса



Графіки залежності досліджуваних показників зносу від величини зміщення центру мас вантажу в поперечному напрямку A_y при величині поздовжнього зміщення центру мас вантажу $A_x = 0,15$ м наведено на рис. 4. Як видно з порівняння графіків, наведених на рис. 3 при $A_x = 0$ й рис. 4 при $A_x = 0,15$ м відмінності у показниках P_r , P_k та Φ після $A_y = 0,05$ м невеликі, тобто наявність спільно поперечного та поздовжнього зсувів центру мас вантажу практично не позначається на досліджуваних показниках. Крім того, після перевищення поперечного зміщення у $A_y = 0,05$ м набігаюча колісна пара має значно менший кут виляння [15].

Висновки: В ході виконання теоретичних досліджень з урахуванням процесів коливання вантажного вагону та вантажу при поздовжньому та поперечному зміщенні центру мас вантажу у піввагоні отримано залежності показників зносу з урахуванням швидкості руху. На підставі проведеного теоретичного дослідження можливо зробити висновки:

- поздовжнє зміщення вантажу викликає збільшення показників зносу на гребні і не повинно перевищувати значень, визначених нормативною документацією;
- вплив поперечного зміщення центру мас вантажу більш істотно позначається на показниках зносу ніж поздовжнє зміщення;
- наявність одночасного зміщення центру мас вантажу в поперечному та поздовжньому напрямках практично не позначається на досліджуваних показниках зносу при перевищенні значення $A_y = 0,05$ м;
- за результатами розрахунків, усі три показники зносу гребня колеса дають якісно однакові результати.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Разработка рекомендаций по снижению износа колес и рельсов за счет снижения сил динамического взаимодействия железнодорожных экипажей и пути с учетом стационарных и нестационарных режимов движения. В 3 т. Т. 2. Исследования влияния на износ различных факторов при стационарном режиме движения грузового вагона : отчет по НИР (заключ.)* : 91.134.95.97/379.95.97 ЦТех / Днепропетр. нац. ун-т ж. д. трансп. им. акад. В. Лазаряна ; рук. Блохин Е. П., Пишинько А. Н. ; исполн.: Данович В. Д. [та ін.]. – Дніпропетровськ, 1998. – 176 с. – № ДР 0196U023134. – Инв. № 416(II).
2. *Знос коліс та рейок при нерівномірному завантаженні піввагонів* / Анжела О. Швець, О. М. Болотов, Л. С. Сапарова, Анжеліка О. Швець // Вісн. сертифікації залізн. трансп. – 2019. – № 1. – С. 4–17.
3. *Фомін, О.В. Варіаційне описання конструктивних виконань вантажних вагонів [Текст] / О.В. Фомін, А.В. Гостра* // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту Міністерства освіти і науки України: Серія «Транспортні системи і технології». – Київ: ДЕТУТ, 2015. – Вип.26-27. – С.137–147.
4. *Мямлін, С. В. Визначення впливу показників тертя в системі «кузов–візок» на динаміку вантажного вагона* / С. В. Мямлін, Л. О. Недужа, А. О. Швець // Наука та прогрес

транспорту. Вісник ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна. – № 2(50). – 2014. – С. 152–163. doi: 10.15802/stp2014/23792.

5. Фомін, О.В. Модернізація елементів стіни бокової універсальних напіввагонів вітчизняного виробництва [Текст] / О.В. Фомін // Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ, 2011. – Вип. №26. – С.111–115.

6. *Experimental confirmation of the theory of implementation of the coupled design of center girder of the hopper wagons for iron ore pellets* / Fomin O., Kulbovsky I., Sorochinska E., Sapronova S., Bambura O. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 5, Issue 1 (89). P. 11–18. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109588>

7. Фомін О.В. Математичні моделі зміни основних показників базових несучих елементів кузовів напіввагонів / О.В. Фомін, О.А. Логвіненко, Р.Ю. Дьомін, Г.П. Бородай, В.В. Фомін, О.В. Бурлуцький // Науково-практичний журнал «Залізничний транспорт України». – Київ: ДНДЦ УЗ, 2013. – № 5/6(102/103). – С. 95–104.

8. *Effect of the state of car running gears and railway track on wheel and rail wear* / E. P. Blokhin, O. M. Pshinko, V. D. Danovich, M. L. Korotenko // *Railway Bogies and Running Gears : Proceedings of the 4th International Conference, 1998 / Technical University of Budapest.*. – Budapest : SSME-TUB, 1998. – С. 313–323.

9. *Research of Wheel-Rail Wear Due to Non-Symmetrical Loading of a Flat Car* / O. V. Shatunov, A. O. Shvets, O. A. Kirilchuk, A. O. Shvets // *Наука та прогрес транспорту*. – 2019. – № 4. – С. 102–117. – DOI: 10.15802/stp2019/177457.

10. *Shatunov, O. V. Study of dynamic indicators of flat wagon with load centre shift* / O. V. Shatunov, A. O. Shvets // *Наука та прогрес транспорту*. – 2019. – № 2 (80). – С. 127–143. doi: 10.15802/stp2019/165160

11. *Shvets, A. O. Influence of Loading from the Axle of a Gondola Car on its Dynamic Indicators and Railway Track* / A. O. Shvets, O. O. Bolotov // *Наука та прогрес транспорту*. – 2019. – № 1 (79). – С. 151–166. – doi: 10.15802/stp2019/158127

12. Швець, А. О. Вплив поздовжнього та поперечного зміщення центру ваги вантажу в піввагонах на їх динамічні показники / А. О. Швець // *Наука та прогрес транспорту*. – 2018. – № 5. – С. 115–128. doi: 10.15802/stp2018/146432.

13. Sapronova, S., Tkachenko, V., Fomin, O., Hatchenko, V., Maliuk, S. (2017). *Research on the safety factor against derailment of railway vehicles*. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (7 (90)), 19–25. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.116194>

14. Данович, В. Д. Математическая модель пространственных колебаний сцепа пяти вагонов, движущихся по прямолинейному участку пути / В. Д. Данович, А. А. Малышева // *Транспорт. Нагруженность и прочность подвижного состава : Сб. науч. тр. – Днепропетровск : «Наука и образование», 1998. – С. 62–69.*

15. *Технические условия размещения и крепления грузов. Приложение 3 к Соглашению о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС)*. – Київ : Девольта, 2011. – Т. 1. – 436 с.

REFERENCES:

1. Blokhin, E. P., Pshinko, O. M., & Danovich, V. D. (1998). *Razrabotka rekomendacij po snizheniyu iznosa koles i rel'sov za schet snizheniya sil dinamicheskogo vzaimodejstviya zheleznodorozhnyh ehkipazhej i puti s uchetom stacionarnykh i nestacionarnykh rezhimov dvizheniya. Naturnye issledovaniya faktorov, vliyayushchikh na povyshennyy iznos rel'sov i grebney koles*

- gruzovykh vagonov (№ SR 0196U023134). Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. (in Russian)
2. Shvets, Angela O., Bolotov, O. M., Saparova, L. S., & Shvets, Angelika O. (2019). Wear Wheels and Rails at the Uneven Loading of Gondola Cars. *Visnyk sertyfikatsii zaliznychnoho transportu*, 1(53), 4–17. (in Ukrainian)
 3. Fomin, O.V., Gostra, A. V. (2015) *Variacijne opisannja konstruktivnih vikonan' vantazhnih vagoniv* [Variations describe the structural designs of freight cars] *Proceedings of the State Economic and Technological University of Transport, Ministry of Education and Science of Ukraine series "Transport systems and technologies"*, Vol. 26-27, 137-147 [in Ukrainian].
 4. Myamlin, S. V., Neduzha, L. A., & Shvets, A. A. (2014). Vyznachennja vplyvu pokaznykiv tertija v systemi «kuzov-vizok» na dynamiku vantazhnogho vaghona [Determining the impact of friction parameters in the «body-bogie» on the dynamics of freight cars]. *Nauka ta prohres transportu– Science and Transport Progress*, 2 (50), 152-163. doi: 10.15802/stp2014/23792. (in Ukrainian)
 5. Fomin, O.V. (2011) *Modernization of elements wall lateral of universal freight gondola domestic production// Scientific-and-technical (Sci.-Tech.) collected works – Donetsk: DonIZT. – Vol. No. 26.- pp.111-115* [in Ukrainian]
 6. Fomin, O., Kulbovsky, I., Sorochinska, E., Sapronova, S., Bambura, O. (2017). Experimental confirmation of the theory of implementation of the coupled design of center girder of the hopper wagons for iron ore pellets. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (1 (89)), 11–18. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109588>
 7. Fomin O.V. *Matematicheskiye modeli osnovopolagayushchikh pokazaniy bazovykh nesushchikh elementov kuzova* / O.V. Fomin, O.A. Logvinenko, R.YU. D'omin, G.P. Boroday, V.V. Fomin, O.V. Burluts'kiy // *Naukovo-prakticheskij zhurnal «Zaliznichnij transport Ukraïni»*. - Kiïv: DNDTS UZ, 2013. - № 5/6 (102/103). - S. 95-104.
 8. Blokhin, E. P., Pshinko, O. M., Danovich, V. D., & Korotenko M. L. (1998). Effect of the state of car running gears and railway track on wheel and rail wear. *Railway Bogies and Running Gears: Proceedings of the 4th International Conference, Budapest*, 313–323.
 9. Shatunov, O. V., Shvets, A. O., Kirilchuk, O. A., & Shvets, A. O. (2019). Research of Wheel-Rail Wear Due to Non-Symmetrical Loading of a Flat Car. *Science and Transport Progress*, 4, 102–117. doi: 10.15802/stp2019/177457.
 10. Shatunov, O. V., & Shvets, A. O. (2019). Study of dynamic indicators of flat wagon with load centre shift. *Science and Transport Progress*, 2(80), 127-143. doi: 10.15802/stp2019/165160 (in English)
 11. Shvets, A. O., & Bolotov, O. O. (2019). Influence of Loading from the Axle of a Gondola Car on its Dynamic Indicators and Railway Track. *Science and Transport Progress*, 1 (79), 151-166. doi: 10.15802/stp2019/158127 (in English)
 12. Shvets, A. O. (2018). Influence of the Longitudinal and Transverse Displacement of the Cargo Gravity Center in Gondola Cars on their Dynamic Indicators. *Science and Transport Progress*, 5 (77), 115–128. doi: 10.15802/stp2018/146432. (in Ukrainian)
 13. Sapronova, S., Tkachenko, V., Fomin, O., Hatchenko, V., Maliuk, S. (2017). Research on the safety factor against derailment of railway vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (7 (90)), 19–25. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.116194>
 14. Danovich, V. D., & Malysheva, A. A. (1998). *Mathematical Model of Spatial Oscillations of the Coupling of Five Cars Moving Along a Rectilinear Section of the Track. Transport. Stress loading and durability of a rolling stock* (pp. 62-69). Dnepropetrovsk. (in Russian)



15. Tekhnicheskie usloviya razmeshcheniya i krepleniya Грузов. Prilozhenie 3 k Soglasheniyu o mezhdunarodnom zheleznodorozhnom Грузовом сообщении (SMGS). (2011). Kyiv: Devolta. (in Russian)
