

Ловська А. О., Фомін О. В., Скуріхін Д. І., Рибін А. В.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ ВАГОНА-ХОПЕРА З ПРУЖНО-ФРИКЦІЙНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ В НЕСУЧІЙ КОНСТРУКЦІЇ

В статті висвітлено особливості математичного моделювання динамічної навантаженості удосконаленої несучої конструкції вагона-хопера. Особливістю несучої конструкції вагона-хопера є те, що замість типових профілів виконання хребтової балки, що представлена двома швеллерами №30, запропоновано використання П-подібного профілю в якому розміщуються пружні елементи, перекриті горизонтальним листом. Таке рішення сприяє зменшенню динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-хопера при коливаннях підсакакування за рахунок сил тертя, які виникають в його складових. Дане рішення запропоновано на рівні концепту.

При створенні математичної моделі враховано, що вагон-хопер складається з трьох твердих тіл – несучої конструкції та двох візків моделі 18-100 з відповідними характеристиками жорсткості та відносного тертя. Також враховано, що вагон завантажений умовним вантажем з використанням повної вантажопідйомності. Дослідження проведені у плоскій системі координат, площині XZ, за умови руху вагона-хопера стиковою нерівністю, яка описується періодичною функцією. В якості прототипу обрано вагон-хопер моделі 20-9749, побудови ДП "Укрспецвагон", призначений для перевезення окатишів та гарячого агломерату. Розв'язок математичної моделі здійснено в програмному комплексі MathCad, який реалізує метод Рунге – Кутти. При цьому стартові умови покладені рівними нулю. На підставі проведених розрахунків встановлено, що максимальне вертикальне прискорення несучої конструкції вагона-хопера складає $3,1 \text{ м/с}^2$ ($0,32g$). З урахуванням запропонованого рішення стає можливим знизити вертикальні прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-хопера майже на 20%. Хід вагона оцінюється як "відмінний".

Проведені дослідження сприятимуть створенню інноваційних конструкцій рухомого складу та підвищенню ефективності його експлуатації.

Ключові слова: транспортна механіка, вагон-хопер, несуча конструкція, хребтова балка, динамічна навантаженість.

Актуальність дослідження. Ефективність функціонування транспортної галузі зумовлює необхідність впровадження в експлуатацію сучасних конструкцій транспортних засобів. Оскільки основний сегмент перевізного процесу відводиться залізничному транспорту, то до створення сучасних конструкцій вагонів повинні перед'являтися особливі вимоги. Зокрема це стосується їх несучих конструкцій.

Постановка проблеми. Одним з найбільш поширених типів вагонів, які експлуатуються на коліях промислових підприємств є вагони-хопери для перевезення окатишів та гарячого агломерату. Розвантаження таких вагонів здійснюється на обидва боки колії через розвантажувальні люки. Важливо зазначити, що даний тип вагона зазнає дії значних навантажень в експлуатації, які сприяють пошкодженню його несучої конструкції. Це викликає необхідність проведення позапланових видів ремонтів, а відповідно і додаткових витрат на утримання.

Найбільш визначальним видом навантажень при експлуатації вагонів відносно магістральних колій є динамічні. Здебільшого ці навантаження зумовлені рейковою нерівністю. Циклічність дії динамічних навантажень зменшує втомну міцність несучих конструкцій вагонів. У зв'язку з цим виникає необхідність розробки та впровадження принципово нових рішень, які сприятимуть зменшенню динамічної навантаженості несучих конструкцій вагонів, а відповідно підвищенню їх втомної міцності і проектного строку служби. Тому виникає необхідність проведення досліджень в цьому напрямку та створення відповідних напрацювань.

Теоретичний аналіз дослідження. Особливості удосконалення несучих конструкцій вагонів вантажного типу та вимоги до них висвітлюються у публікації [1]. Разом з цим запропоноване удосконалення спрямоване на посилення несучої конструкції вагона, а не зменшення його динамічної навантаженості в експлуатації.

Аналіз динамічних якостей вантажних вагонів проводиться у роботі [2]. Розрахунок проведений за методом скінчених елементів. При складанні розрахункової схеми враховано багатовимірну систему вільності вагона.

Дослідження динаміки транспортних засобів при ударній навантаженості несучих конструкцій проводиться у роботі [3]. Наведено математичні моделі, які дозволяють визначити прискорення, що діють на транспортні засоби при ударі.

Однак при цьому в даних роботах не запропоновано заходів щодо зменшення динамічної навантаженості транспортних засобів в експлуатації.

Визначення динамічної навантаженості рухомого складу шляхом експериментальних випробувань проводиться у публікації [4]. До уваги прийнятий випадок динамічної навантаженості несучої конструкції вагона при проходженні складної дільниці колії.

Особливості дослідження впливу динамічних навантажень на міцність несучої конструкції напіввагона моделі С70 висвітлюються у роботі [5]. При складанні розрахункової схеми враховано нормативи залізниць Китаю.

Однак у даних роботах не запропоновано заходів щодо зменшення динамічної навантаженості несучих конструкцій вагонів в експлуатації.

В роботі [6] проведено визначення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-хопера з пружними елементами в хребтовій балці. Встановлено, що дана реалізація сприяє зменшенню його динамічної навантаженості у порівнянні з вагоном-прототипом на 20%. Важливо сказати, що при проведенні розрахунків авторами не враховано сили тертя, які виникають між складовими хребтової балки.

Заходи щодо зменшення динамічної навантаженості вагонів в експлуатації шляхом використання енергопоглинальних матеріалів в їх несучих конструкціях висвітлюються у роботах [7, 8]. Сформовані математичні моделі підтверджені шляхом комп'ютерного моделювання. Разом з цим питанням зменшення динамічної навантаженості несучих конструкцій вагонів-хоперів в даних роботах уваги не приділяється.

Мета статті. Метою статті є висвітлення особливостей математичного моделювання динамічної навантаженості вагона-хопера з пружно-фрикційними зв'язками в несучій конструкції.

Задачі дослідження. Для досягнення зазначеної мети визначені такі завдання:

- запропонувати заходи щодо удосконалення несучої конструкції вагона-хопера;
- визначити динамічну навантаженість несучої конструкції вагона-хопера.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для зменшення навантаженості несучої конструкції вагона-хопера пропонується удосконалення його рами. При цьому передбачається використання замість типових профілів виконання хребтової балки, що представлена двома швелерами №30, П-подібного профілю в якому розміщуються пружні елементи, перекриті горизонтальним листом (рис. 1). Таке рішення сприяє зменшенню динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-хопера при коливаннях підсакування за рахунок сил тертя, які виникають в його складових. Дане рішення запропоновано на рівні концепту. Дослідження проведено на прикладі вагона-хопера моделі 20-9749, побудови ДП "Укрспецвагон", який призначено для перевезення окатишів та гарячого агломерату.

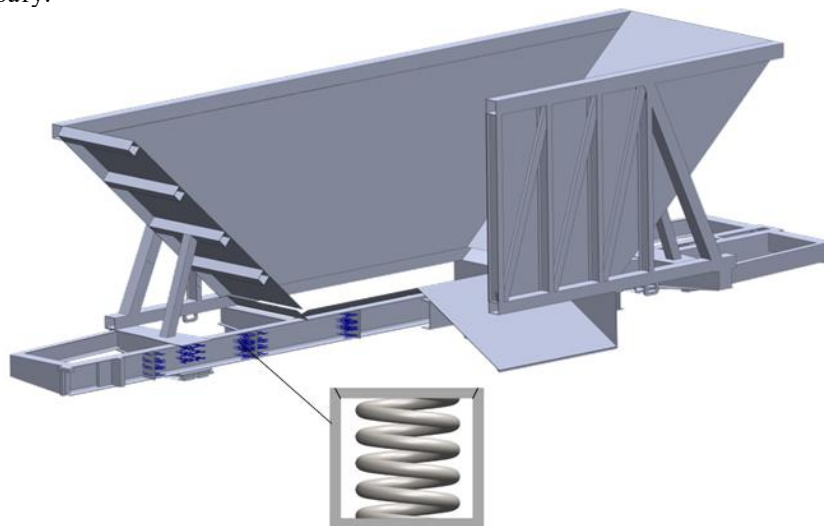


Рисунок 1 – Несуча конструкція вагона-хопера з пружно-фрикційними зв'язками в хребтовій балці

Для визначення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-хопера з урахуванням запропонованих заходів проведено математичне моделювання. Дослідження здійснені в плоскій системі координат, площині XZ. Розрахункова схема вагона-хопера наведена на рис. 2.

Вагон-хопер при цьому розглядається як система з трьох твердих тіл – несучої конструкції та двох візків. Також враховано, що вагон завантажений умовним вантажем з використанням повної вантажопідйомності.

Прийнято припущення, що на систему накладені такі зв'язки:

- переміщення кузова з вантажем та візків уздовж осі колії однакові;
- колісні пари рухаються без проковзування;
- через відсутність пружних елементів в буксовому підвішуванні підстрибування візків визначаються підстрибуванням колісних пар.

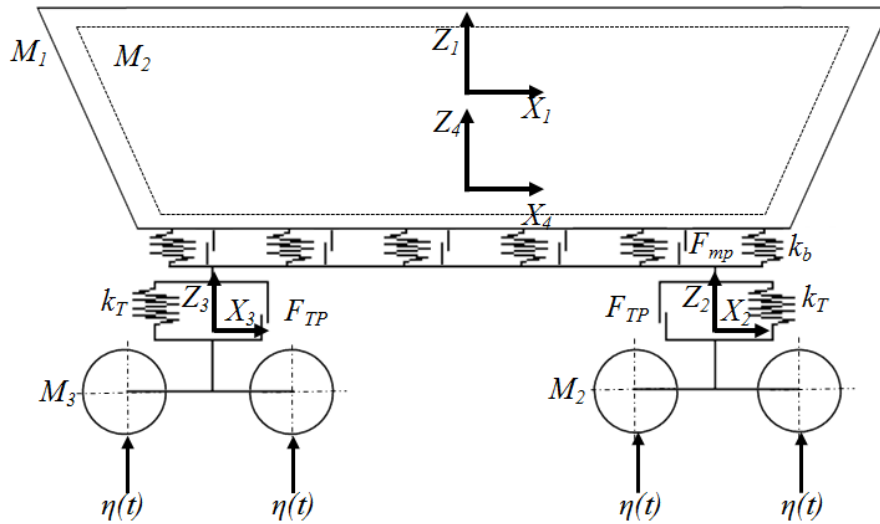


Рисунок 2 – Розрахункова схема вагона-хопера

Переміщення вагона-хопера описуються диференціальними рівняннями

$$\begin{cases}
 M_1 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_1 + C_{1,1} \cdot q_1 + C_{1,2} \cdot q_2 + C_{1,3} \cdot q_3 = \\
 = -F_{TP} \cdot \left(\text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_1 \right) + \text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_2 \right) \right) - F_z, \\
 M_2 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_2 + C_{2,1} \cdot q_1 + C_{2,2} \cdot q_2 + C_{2,3} \cdot q_3 + B_{2,2} \cdot \frac{d}{dt} q_2 = \\
 = F_{TP} \cdot \text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_1 \right) + k(\eta_1 + \eta_2) + \beta \left(\frac{d}{dt} \eta_1 + \frac{d}{dt} \eta_2 \right), \\
 M_3 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_3 + C_{3,1} \cdot q_1 + C_{3,2} \cdot q_2 + C_{3,3} \cdot q_3 + B_{3,3} \cdot \frac{d}{dt} q_3 = \\
 = F_{TP} \cdot \text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_2 \right) + k(\eta_3 + \eta_4) + \beta \left(\frac{d}{dt} \eta_3 + \frac{d}{dt} \eta_4 \right), \\
 M_4 \cdot \ddot{q}_4 = F_z - M_4 \cdot g,
 \end{cases} \quad (1)$$

при цьому

$$F_z = -F_{mp} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - \dot{q}_4) + k_b \cdot (q_1 - q_4), \quad (2)$$

де M_i – інерційні коефіцієнти елементів коливальної системи (кузов вагона, дві ходові частини (візки моделі 18-100), вантаж);

C_{ij} – характеристика пружності елементів коливальної системи;

B_{ij} – функція розсіювання;

q_i – узагальнені координати, що відповідають поступальному переміщенню відносно вертикальної осі, відповідно, кузова вагона, першого та другого візка, а також вантажу;

k_T – жорсткість ресорного підвішування;

k_b – жорсткість пружних елементів в рамі;

k – жорсткість колії;

β – коефіцієнт демпфірування;

F_{TP} – сила абсолютного тертя у ресорному комплекті;

F_{mp} – сила тертя між похилими частинами вертикальних стінок П-подібного профілю і горизонтального листа;

δ_i – деформації пружних елементів ресорного підвішування;

$\eta(t)$ – нерівність колії.

При цьому прийнято, що

$Z_1 \sim q_1$ – координата, яка характеризує поступальні переміщення несучої конструкції вагона-хопера відносно вертикальної осі;

$Z_2 \sim q_2$ – координата, яка характеризує поступальні переміщення першого візка за ходом руху відносно вертикальної осі;

$Z_3 \sim q_3$ – координата, яка характеризує поступальні переміщення другого візка за ходом руху відносно вертикальної осі;

$Z_4 \sim q_4$ – координата, яка характеризує поступальні переміщення вантажу, розміщеного у кузові вагона-хопера відносно вертикальної осі.

Враховано, що вагон-хопер рухається стиковою нерівністю, яка описується періодичною функцією [9]:

$$\eta(t) = \frac{h}{2}(1 - \cos \omega t), \quad (3)$$

де h – глибина нерівності;

ω – частота коливань, яка визначається за формулою $\omega = 2\pi V/L$ (V – швидкість руху вагона, L – довжина нерівності).

Для визначення сили тертя, яка виникає в хребтовій балці складено розрахункову схему, наведену на рис. 3.

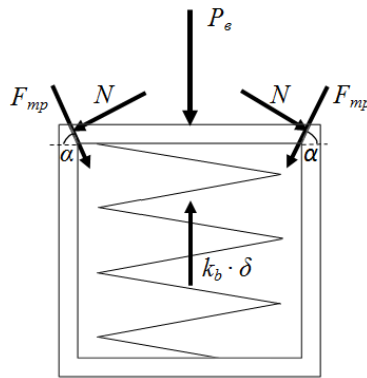


Рисунок 3 – Схема дії сил на хребтову балку вагона-хопера

P_s – вертикальна сила, обумовлена вагою вантажу, розміщеного у кузові; N – сила, яка виникає між похилими частинами вертикальних стінок П-подібного профілю і горизонтальним листом; δ – величина стиску пружних елементів під дією сили P_s ; α – кут нахилу вертикальної стінки профілю в зоні взаємодії з горизонтальним листом.

Відомо, що сила тертя визначається за формулою

$$F_{mp} = \mu \cdot N, \quad (4)$$

де μ – коефіцієнт тертя (сталь – сталь).

При цьому

$$N = \frac{k_b \cdot \delta - 2F_{mp} \cdot \sin \alpha}{2 \cos \alpha}, \quad (5)$$

тоді, при $\alpha = 45^\circ$ маємо

$$F_{mp} = \frac{k_b \cdot \delta \cdot \mu}{\sqrt{2}(1 + \mu)}, \quad (6)$$

З урахуванням проведених розрахунків F_{mp} склало близько 61 кН.

Розв'язок системи диференціальних рівнянь руху (1) здійснено в програмному комплексі MathCad за

методом Рунге – Кутта [10 – 12]. При цьому стартові умови покладені рівними нулю [13 – 15].
Отримані результати наведено на рис. 4.

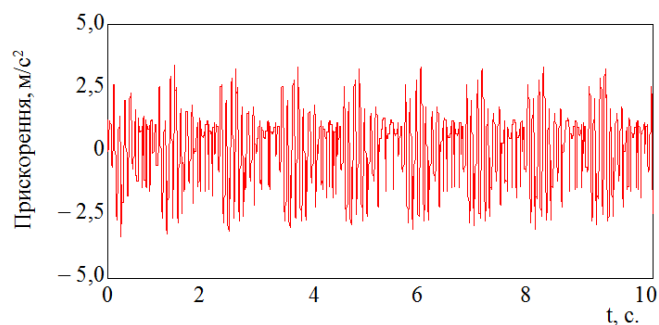


Рисунок 4 – Прискорення несучої конструкції вагона-хопера в центрі мас

Отже максимальне вертикальне прискорення несучої конструкції вагона-хопера склало близько $3,1 \text{ м/с}^2$ ($0,32g$). З урахуванням запропонованого рішення стає можливим знизити вертикальні прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-хопера майже на 20%. Хід вагона оцінюється як “відмінний” [16].

Висновки:

1. Запропоновано заходи щодо удосконалення несучої конструкції вагона-хопера. Дані заходи полягають у впровадженні в хребтову балку пружно-фрикційних зв'язків. Це сприятиме зменшенню динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-хопера в експлуатації.

2. Визначено динамічну навантаженість несучої конструкції вагона-хопера. Встановлено, що максимальне вертикальне прискорення, яке діє на несучу конструкцію вагона-хопера складає $3,1 \text{ м/с}^2$ ($0,32g$). З урахуванням запропонованого рішення стає можливим знизити вертикальні прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-хопера майже на 20%. Хід вагона оцінюється як “відмінний”.

Проведені дослідження сприятимуть створенню інноваційних конструкцій рухомого складу та підвищенню ефективності його експлуатації.

Література

1. Płaczek M. A concept of technology for freight wagons modernization. M. Płaczek, A. Wróbel, A. Buchacz. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. No. 161. doi:10.1088/1757-899X/161/1/012107.
2. Haraka S. S. Structural dynamic analysis of freight railway wagon using finite element method. S. S. Haraka, S. C. Sharma, S. P. Harsha. Procedia Materials Science. 2014, No. 6. P. 1891 – 1898.
3. Jan Zamecnik. Evaluation of wagon impact tests by various measuring equipment and influence of impacts on cargo stability. Jan Zamecnik, Juraj Jagelcak. Communications. 2015. No. 4. P. 21 – 27.
4. Ермоленко И. Ю. Исследование динамики подвижного состава с использованием экспериментального вагона-лаборатории при движении по сложным участкам дороги ВСЖД. И. Ю. Ермоленко, В. Н. Железняк. Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 4 (52). С. 199 – 203.
5. Chen Chao. Study of Railway Freight Vehicle Body's Dynamic Model Based on Goods Loading Technical Standards. Chen Chao, Han Mei, Han Yanhui. Procedia Engineering. 2012. No. 29. P. 3572 – 3577.
6. Fomin O. Dynamic Loading Determination of the Supporting Structure of the Hopper Wagon Having Elastic Elements in the Center Sill. O. Fomin, J. Gerlici, A. Lovska, Y. Fomina. Proceedings of 25th International Scientific Conference. Transport Means 2021, Part II, 2021, October 6 – 8, Kaunas, Lithuania. P. 705 – 710.
7. Fomin O. Research into the Strength of an OpenWagon with Double Sidewalls Filled with Aluminium Foam. Fomin O., Gerlici J., Gorbunov M., Vatulina G., Lovska A., Kravchenko K. Materials. 2021. Vol. 14 (12), 3420. <https://doi.org/10.3390/ma14123420>
8. Fomin O. Dynamics and strength of circular tube open wagons with aluminum foam filled center sills. Fomin O., Gorbunov M., Gerlici J., Lovska A., Kravchenko K. Materials. 2021. Vol. 14(8), 1915. <https://doi.org/10.3390/ma14081915>
9. Дьомін Ю. В. Основи динаміки вагонів: навч. посіб. / Ю. В. Дьомін, Г. Ю. Черняк. – Київ: КУЕТТ, 2003. – 269 с.
10. Кирьянов Д. В. Mathcad 13 / Д. В. Кирьянов. – Петербург: СПб. 2006. – 608 с.
11. Дьяконов В. MATHCAD 8/2000: специальный справочник. / В. Дьяконов. – Питер: СПб. 2000. – 592 с.
12. Lovska Alyona. Dynamic load modelling within combined transport trains during transportation on a railway ferry. Alyona Lovska, Oleksij Fomin, Václav Pištěk, Pavel Kučera. Applied Science. 2020. №10, 5710. doi:10.3390/app10165710
13. Fomin Oleksij. Determination of dynamic loading of bearing structures of freight wagons with actual dimensions. Oleksij Fomin, Alyona Lovska. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Vol. 2/7 (110). P. 6 – 15. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.220534>
14. Шишацький А. В. Удосконалена методика оцінювання параметрів сигналів з цифровими видами модуляції. А. В. Шишацький, В. В. Лютов, О. Г. Жук, Р. М. Животовський. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2016. № 4(25). С. 117 – 121.
15. Шишацький А. В. Алгоритм вибору робочих частот для засобів військового радіозв'язку в умовах впливу навмисних завад. А. В. Шишацький, В. В. Ольшанський, Р. М. Животовський. Системи озброєння і військова техніка. 2016. № 2. С. 62 – 66.
16. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних).

References

- 1 M. Płaczek. (2016). A concept of technology for freight wagons modernization / M. Płaczek, A. Wróbel, A. Buchacz // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – No. 161. doi:10.1088/1757-899X/161/1/012107.
- 2 S. S. Haraka. (2014). Structural dynamic analysis of freight railway wagon using finite element method / S. S. Haraka, S. C. Sharma, S. P. Harsha // Procedia Materials Science. – No. 6. P. 1891 – 1898.
- 3 Jan Zamecnik. (2015). Evaluation of wagon impact tests by various measuring equipment and influence of impacts on cargo stability / Jan Zamecnik, Juraj Jagelcak // Communications. – No. 4. P. 21 – 27.
- 4 Ermolenko I. Yu. (2016). Issledovanie dinamiki podvizhnogo sostava s ispolzovaniem eksperimentalnogo vagona-laboratorii pri dvizhenii po slozhnym uchastkam dorogi VSZhD / I. Yu. Ermolenko, V. N. Zheleznyak // Sovremennye tehnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie. – № 4 (52). S. 199 – 203.
- 5 Chen Chao. (2012). Study of Railway Freight Vehicle Body's Dynamic Model Based on Goods Loading Technical Standards / Chen Chao, Han Mei, Han Yanhui // Procedia Engineering. – No. 29. P. 3572 – 3577.
- 6 Fomin O. (2021). Dynamic Loading Determination of the Supporting Structure of the Hopper Wagon Having Elastic Elements in the Center Sill / O. Fomin, J. Gerlici, A. Lovska, Y. Fomina // Proceedings of 25th International Scientific Conference. Transport Means 2021, Part II, 2021, October 6 – 8, Kaunas, Lithuania. P. 705 – 710.
- 7 Fomin O. (2021). Research into the Strength of an Open Wagon with Double Sidewalls Filled with Aluminium Foam / Fomin O., Gerlici J., Gorbunov M., Vatulia G., Lovska A., Kravchenko K. // Materials. – Vol. 14 (12), 3420. <https://doi.org/10.3390/ma14123420>
- 8 Fomin O. (2021). Dynamics and strength of circular tube open wagons with aluminum foam filled center sills / Fomin O., Gorbunov M., Gerlici J., Lovska A., Kravchenko K. // Materials. – Vol. 14(8), 1915. <https://doi.org/10.3390/ma14081915>
- 9 Domin Yu. V., Chernyak G. Yu. Osnovi dinamiki vagoniv: navch. posib. – Kiyiv: KUETT, 2003. – 269 s.
- 10 Kiryanov D. V. Mathcad 13. – Peterburg: SPb, 2006. – 608 s.
- 11 Dyakonov V. MATHCAD 8/2000: specialnyj spravochnik. – Piter: SPb, 2000. – 592 s.
- 12 Lovska Alyona. (2020). Dynamic load modelling within combined transport trains during transportation on a railway ferry / Alyona Lovska, Oleksij Fomin, Václav Píštěk, Pavel Kučera // Applied Science. – №10, 5710. doi:10.3390/app10165710
- 13 Fomin Oleksij. (2021). Determination of dynamic loading of bearing structures of freight wagons with actual dimensions / Oleksij Fomin, Alyona Lovska // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Vol. 2/7 (110). P. 6 – 15. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.220534>
- 14 Shishackij A. V. (2016). Udoskonalena metodika ocinyuvannya parametriv signaliv z cifrovimi vidami modulyaciyi / A. V. Shishackij, V. V. Lyutov, O. G. Zhuk, R. M. Zhivotovskij // Nauka i tehnika Povitryanih Sil Zbrojnih Sil Ukrayi-ni. – № 4(25). S. 117 – 121.
- 15 Shishackij A. V. (2016). Algoritm viboru robochih chastot dlya zasobiv vijskovogo radiozv'yazku v umovah vplivu navmis-nih zavad / A. V. Shishackij, V. V. Olshanskij, R. M. Zhivotovskij // Sistemi ozbroynyya i vijskova tehnika. – № 2. S. 62 – 66.
- 16 DSTU 7598:2014. Vagoni vantazhni. Zagal'ni vimogi do rozrahunkiv ta proektuvannya novih i modernizovanih vagoniv kolii 1520 mm (nesamohidnih).

The article highlights the features of mathematical modeling of the dynamic load of the improved load-bearing structure of the hopper car. The peculiarity of the supporting structure of the hopper car is that instead of the typical profiles of the ridge beam, which is represented by two channels №30, the use of U-shaped profile is proposed in which elastic elements covered with horizontal sheet are placed. This solution helps to reduce the dynamic load of the load-bearing structure of the hopper car during oscillations of the jump due to the friction forces that occur in its components. This solution is proposed at the concept level.

When creating a mathematical model, it is taken into account that the hopper car consists of three solid bodies - a load-bearing structure and two carts model 18-100 with the appropriate characteristics of stiffness and relative friction. It is also taken into account that the car is loaded with a conditional load using full capacity. The research was carried out in a flat coordinate system, the XZ plane, under the condition of hopper car movement with a joint inequality, which is described by a periodic function. The hopper car of model 20-9749, built by Ukrspetsvagon, designed for transportation of pellets and hot sinter, was chosen as a prototype. The solution of the mathematical model was carried out in the MathCad software package, which implements the Runge-Kutta method. The starting conditions are set to zero. Based on the calculations, it is established that the maximum vertical acceleration of the load-bearing structure of the hopper car is 3.1 m/s² (0.32 g). Taking into account the proposed solution, it becomes possible to reduce the vertical accelerations that affect the load-bearing structure of the hopper car by almost 20%. The car is rated "excellent".

The conducted research will contribute to the creation of innovative structures of rolling stock and increase the efficiency of its operation.

Key words: transport mechanics, hopper car, load-bearing structure, ridge beam, dynamic loading.

Ловська А. О. – д.т.н., доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту.

Фомін О. В. – д.т.н., професор кафедри “Вагони та вагонне господарство” Державного університету інфраструктури та технологій.

Скуріхін Д. І. – к.т.н., доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту.

Рибін А. В. – к.т.н., старший викладач кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту.