

УДК 629.463.62
DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.1-2/22>

Фомін О.В.

Державний університет інфраструктури та технологій

Ловська А.О.

Український державний університет залізничного транспорту

ВИЗНАЧЕННЯ ВЕРТИКАЛЬНИХ ПРИСКОРЕНЬ НЕСУЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ ВАГОНА-ПЛАТФОРМИ З В'ЯЗКИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ У ПОВЗДОВЖНІХ БАЛКАХ

Розвиток та успішне функціонування залізничної галузі вимагає впровадження в експлуатацію інноваційних конструкцій рухомого складу. Досягти цього можливо за рахунок використання нових технічних рішень на стадії проектування несучих конструкцій вагонів із використанням принципів мультифункціональності (можливості виконувати декілька функцій).

Для зменшення динамічної навантаженості несучих конструкцій вагонів і покращення втомної міцності пропонується впровадження в них матеріалів із в'язкими властивостями. Таке рішення реалізоване на прикладі довгобазної несучої конструкції вагона-платформи для перевезення контейнерів моделі 13-7024 побудови ПАТ «КВБЗ».

Розміщення в'язких елементів передбачається у повздовжніх балках рами як основних несучих елементів. Для цього пропонується заміна основних повздовжніх балок рами балками П-подібного профілю, перекритими горизонтальними листами. Усередині профілю розміщується матеріал із в'язкими властивостями. Передбачається гасіння динамічних навантажень, які діють на несучу конструкцію, за рахунок сил в'язкого опору, що виникають в основних повздовжніх балках рами.

Для визначення динамічної навантаженості вагона-платформи із в'язкими зв'язками у повздовжніх балках проведено математичне моделювання. Дослідження проведені у плоскій системі координат – площині XZ. Розв'язок диференціальних рівнянь руху здійснений у програмному комплексі MathCad.

Прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи, склали близько $2,1 \text{ м/с}^2$ ($\approx 0,2g$) і не перевищують допустимі значення відповідно до нормативної документації.

Проведені дослідження сприятимуть створенню інноваційних конструкцій рухомого складу, зменшенню його динамічної навантаженості в експлуатації, покращенню втомної міцності, а також підвищенню ефективності використання залізничного транспорту.

Ключові слова: вагон-платформа, несуча конструкція, динамічна навантаженість, моделювання динаміки, прискорення конструкції.

Постановка проблеми. Забезпечення конкурентоспроможності залізничної галузі на ринку транспортних перевезень зумовлює необхідність впровадження в експлуатацію інноваційних конструкцій рухомого складу. Важливо зазначити, що на стадії проектування такого рухомого складу особлива увага повинна приділятися несучим конструкціям. Для створення інноваційних несучих конструкцій вагонів необхідне забезпечення їхньої мультифункціональності, під якою розуміються можливості виконувати об'єктом декілька функцій в експлуатації.

Водночас однією з найпоширеніших проблем залишається забезпечення втомної міцності несучих конструкцій вагонів, особливо довгобазних, наприклад, вагонів-платформ. Відомо, що такі

вагони випробовують дію періодичних циклічних навантажень у вертикальній і повздовжній площинах. Це зумовлює пошкодження несучих елементів конструкції вагонів, тому важливим при проектуванні таких вагонів є впровадження заходів, спрямованих на підвищення втомної міцності несучих конструкцій шляхом використання нових інноваційних рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження міцності несучої конструкції вагона-платформи для комбінованих перевезень описані у роботі [1]. Розрахунки проводилися на основі стандартів PN-EN.

Особливості проектування, аналізу та проектної розробки залізничних вагонів наведено у [2]. Дослідження проведені для Індійської залізниці.

Використані міжнародні стандарти для різних умов завантаження, дотримання оптимальних габаритів вагонів тощо.

Однак при проектуванні конструкції вагонів не враховано заходи щодо зменшення втомної міцності їхніх несучих конструкцій за експлуатаційних режимів навантаження.

Динаміка несучої конструкції вагона вивчається у роботі [3]. До уваги взяте використання різних типів візків під вагонами, однак авторами не проводилося дослідження впливу технічних характеристик візків на втомну міцність несучих конструкцій вагонів.

Результати розрахунку на міцність несучої конструкції вагона-платформи наведені в [4]. Вагон має понижену середню частину рами, а хребтова балка проходить лише в консольних частинах, однак у роботі не зазначено, чи покращується втомна міцність несучої конструкції вагона-платформи з урахуванням запропонованих технічних рішень.

Аналіз конструкцій інноваційного рухомого складу, побудови «Уралвагонзавода» проведений у праці [5]. Висвітлені питання щодо модернізації рухомого складу та його складників для підвищення ефективності роботи. Заходи щодо зменшення динамічної навантаженості несучих конструкцій вагонів для покращення втомної міцності в роботі не розглядаються.

Особливості конструкції та проектування універсального довгобазного вагона для інтермодальних перевезень у Європі висвітлюються у [6]. Наведені результати розрахунку несучої конструкції вагона на міцність, однак при проектуванні вагона не запропоновано заходів щодо зменшення його динамічної навантаженості в експлуатації.

Аналіз теоретичних та експериментальних досліджень міцнісних якостей елементів рухомого складу на прикладі хребтової балки вантажного вагона висвітлюється у [7]. Розрахунки виконано з використанням сучасного пакету прикладних програм. Важливо зазначити, що такий підхід може бути реалізований стосовно металевих несучих конструкцій вагонів. Тобто використання його для дослідження мультифункціональних і мультиматеріальних конструкцій не є доцільним.

Аналіз літературних джерел [1–7] дозволяє зробити висновок, що досі питання покращення втомної міцності несучих конструкцій довгобазних вагонів із в'язкими зв'язками у повздовжніх балках не висвітлювалися. Це викликає необхідність проведення відповідних досліджень у цьому напрямі.

Постановка завдання. Метою статті є визначення вертикальних прискорень несучої конструкції вагона-платформи із в'язкими зв'язками у повздовжніх балках для покращення втомної міцності в експлуатації.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для зменшення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи та підвищення втомної міцності за експлуатаційних режимів пропонується впровадження у неї в'язких елементів. Розміщення в'язких елементів передбачається у повздовжніх балках рами як її основних несучих елементах. Для цього пропонується заміна основних повздовжніх балок рами на балки П-подібного профілю, перекритого горизонтальним листом (рис. 1). У середині профілю розміщується матеріал із в'язкими властивостями.

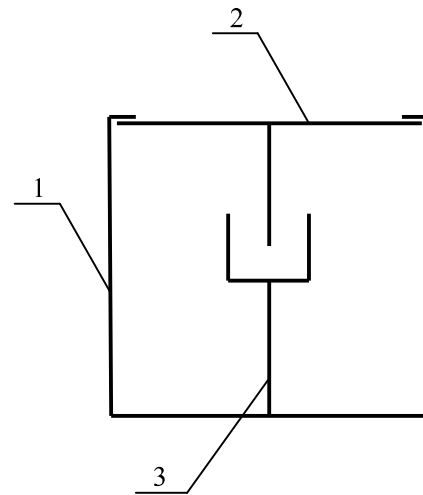


Рис. 1. Переріз основної повздовжньої балки рами вагона-платформи: 1 – П-подібний профіль; 2 – горизонтальний лист; 3 – матеріал із в'язкими властивостями

Передбачається гасіння динамічних навантажень, які діють на несучу конструкцію, за рахунок сил в'язкого опору, що виникають в основних повздовжніх балках рами.

Для визначення динамічної навантаженості вагона-платформи із в'язкими зв'язками у повздовжніх балках проведено математичне моделювання. Як прототип обрано вагон-платформу моделі 13-7024 побудови ПАТ «КВБЗ» з урахуванням запропонованого удосконалення. Дослідження проведені у плоскій системі координат – площині XZ. Розрахункова схема наведена на рис. 2.

Вагон-платформа розглядається як система із трьох твердих тіл: рами та двох візків моделі 18-100 з ресорними комплектами, які мають жорсткість і

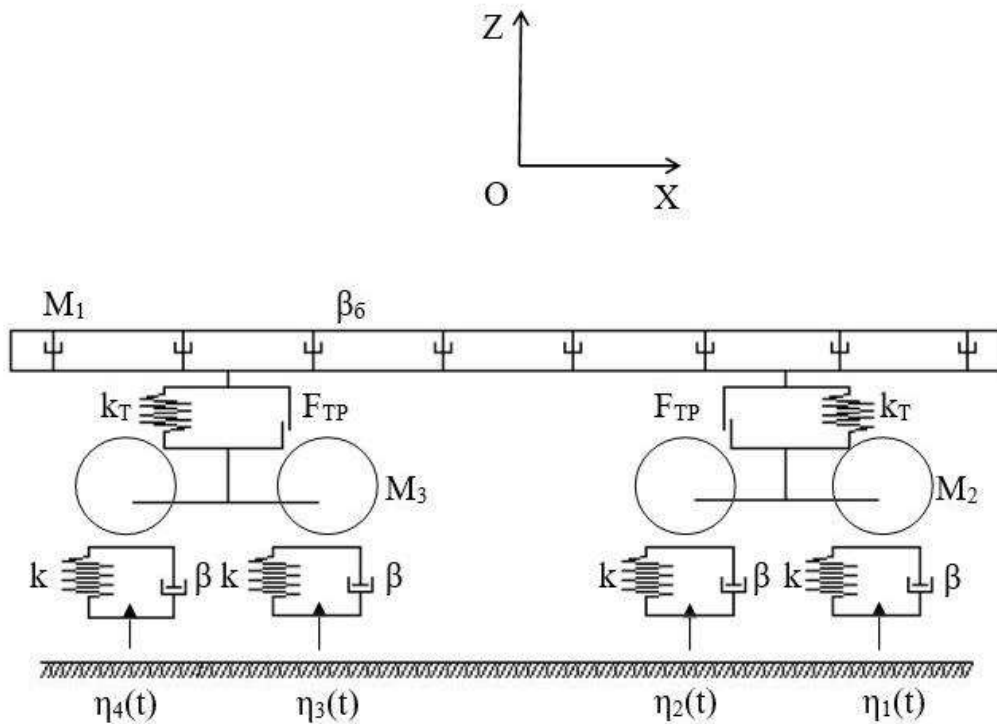


Рис. 2. Розрахункова схема вагона-платформи

коефіцієнт відносного тертя. Розглянутий випадок руху вагона у порожньому стані.

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

- переміщення рами та візків вагона-платформи уздовж осі колії однакові: $q_1 = q_2 = q_3$;

- колісні пари рухаються без проковзування:

$\psi_{ij} = x_{ij}/R$, ($i, j = 1, 2$), де R – радіус колеса, 0,475 м;

- через відсутність пружних елементів у буксовому підвішуванні підстрибування візків визначаються підстрибуванням колісних пар.

При складанні рівнянь руху вагона враховано, що він рухається пружно-в'язкою колією [8]. Реакції колії пропорційні як її деформації, так і швидкості цієї деформації.

Диференціальні рівняння руху вагона-платформи мають вигляд:

$$M_1 \cdot \ddot{q}_1 + C_{1,1} \cdot \dot{q}_1 + C_{1,2} \cdot \dot{q}_2 + C_{1,3} \cdot \dot{q}_3 + \beta_6 \cdot \dot{q}_1 = -F_{TP} \cdot (\text{sign}(\dot{\delta}_1) + \text{sign}(\dot{\delta}_2)) + \beta_6 \cdot \dot{\eta}(t), \quad (1)$$

$$M_2 \cdot \ddot{q}_2 + C_{2,1} \cdot \dot{q}_1 + C_{2,2} \cdot \dot{q}_2 + B_{2,2} \cdot \dot{q}_2 = F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{\delta}_1) + k(\eta_1 + \eta_2) + \beta(\dot{\eta}_1 + \dot{\eta}_2), \quad (2)$$

$$M_3 \cdot \ddot{q}_3 + C_{3,1} \cdot \dot{q}_1 + C_{3,3} \cdot \dot{q}_3 + B_{3,3} \cdot \dot{q}_3 = F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{\delta}_2) + k(\eta_3 + \eta_4) + \beta(\dot{\eta}_3 + \dot{\eta}_4), \quad (3)$$

де M_1 – маса несучої конструкції вагона-платформи; M_2, M_3 – маса відповідно першого та дру-

гого за ходом руху візка; β_6 – коефіцієнт в'язкого опору матеріалу, який знаходиться у повздовжніх балках; C_{ij} – характеристики пружності елементів коливальної системи, що визначаються значеннями коефіцієнтів жорсткості пружин k_T ; B_{ij} – функція розсіювання; a – половина бази візка; k – жорсткість колії; β – коефіцієнт демпфірування; F_{TP} – сила абсолютного тертя у ресорному комплекті; δ_i – деформації пружних елементів ресорного підвішування; $\eta(t)$ – нерівність колії.

Прийнято припущення, що в'язкий зв'язок у повздовжніх балках рами вагона-платформи працює за вимушених коливань вагона, тобто не впливає на власні коливання несучої конструкції.

Враховано, що вагон рухається стиковою нерівністю, яка описується періодичною функцією [8]:

$$\eta(t) = \frac{h}{2}(1 - \cos \omega t), \quad (4)$$

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

Вхідними параметрами моделі є технічні характеристики несучої конструкції вагона-платформи, ресорного підвішування, збурюючої дії (рейкової нерівності). Значення коефіцієнту в'язкого опору прийнято рівним 1100 кН·с/м. Розв'язок диференціальних рівнянь руху (1–3) здійснений у програмному комплексі MathCad [9–11].

Розв'язок рівнянь визначався у вигляді

$$F(t, y) = \begin{pmatrix} y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ \frac{-F_{TP} \cdot (\text{sign}(\dot{\delta}_1) + \text{sign}(\dot{\delta}_2)) + \beta_6 \cdot \dot{\eta}(t) - C_{1,2} \cdot y_2 - C_{1,3} \cdot y_3 - \beta_6 \cdot y_4}{M_1} \\ \frac{F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{\delta}_1) + k(\eta_1 + \eta_2) + \beta(\dot{\eta}_1 + \dot{\eta}_2) - C_{2,1} \cdot y_1 - C_{2,2} \cdot y_2 - B_{2,2} \cdot y_3}{M_2} \\ \frac{F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{\delta}_2) + k(\eta_3 + \eta_4) + \beta(\dot{\eta}_3 + \dot{\eta}_4) - C_{3,1} \cdot y_1 - C_{3,3} \cdot y_3 - B_{3,3} \cdot y_6}{M_3} \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$Y0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$Z = rkfixed(Y0, tn, tk, n, F).$$

$$y_1 = q_1, y_2 = q_2, y_3 = q_3, y_4 = \dot{y}_1, y_5 = \dot{y}_2, y_6 = \dot{y}_3.$$

Початкові переміщення та швидкості прийняті рівними нулю [12].

Результати розрахунку наведені на рис. 3, 4.

Отже, прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи, становлять близько $2,1 \text{ м/с}^2$ ($\approx 0,2g$) і не перевищують допустимі значення [13; 14], (рис. 5). Допустимі прискорення несучої конструкції прийняті рівними $0,75g$ («допустимий» хід руху).

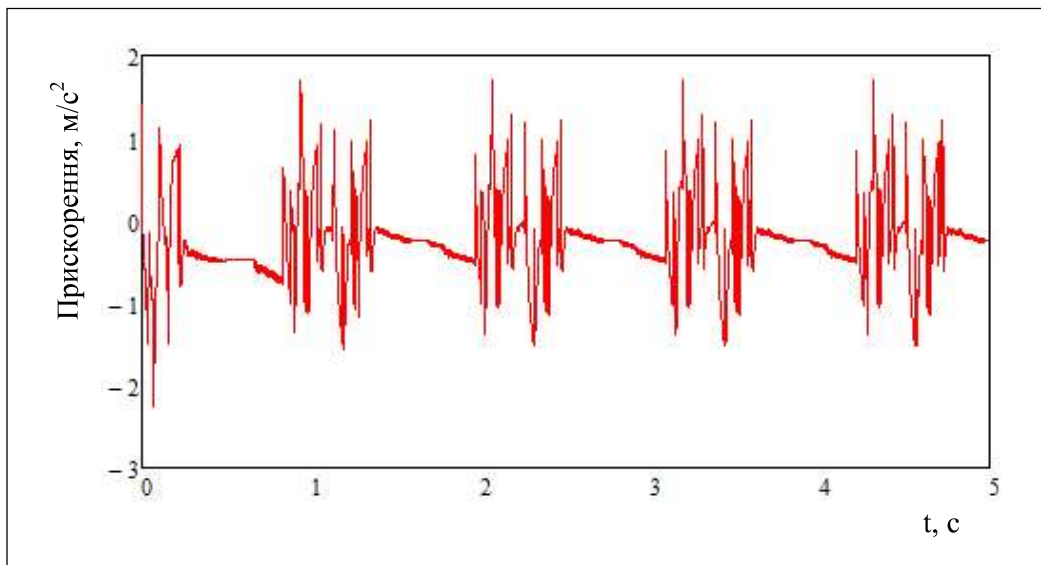


Рис. 3. Прискорення несучої конструкції вагона-платформи в центрі мас

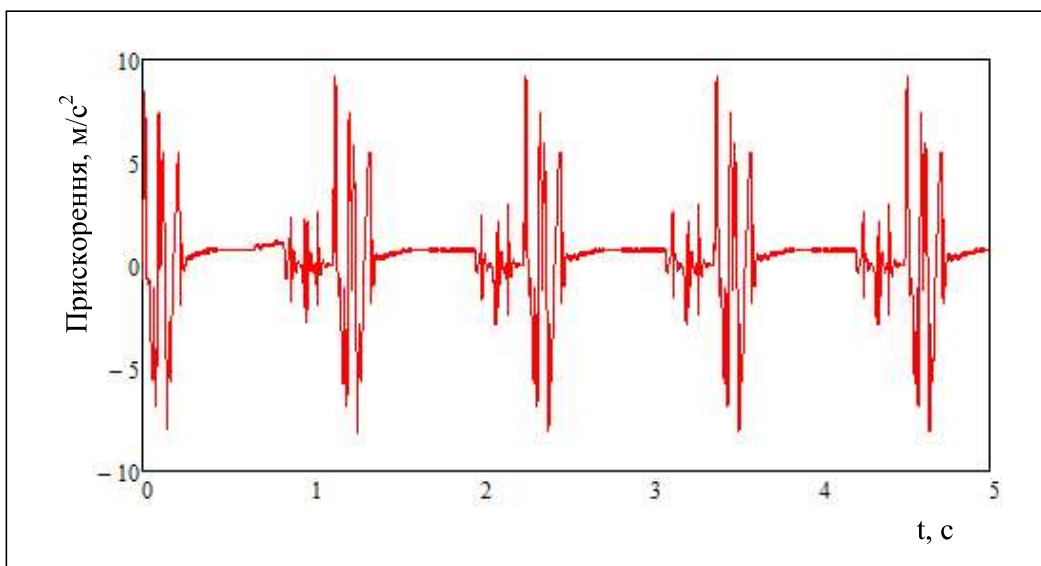


Рис. 4. Прискорення візків

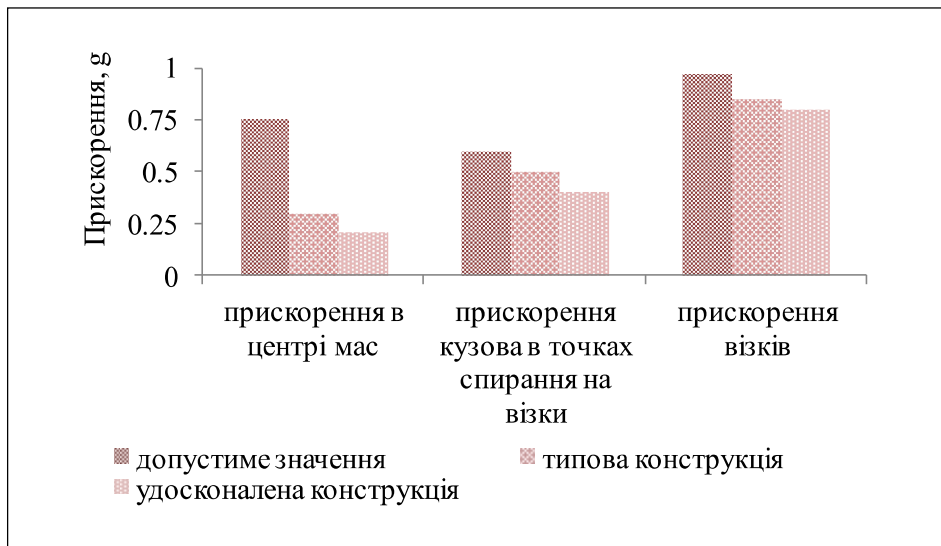


Рис. 5. Прискорення, які діють на вагон-платформу

Прискорення в зонах спирання несучої конструкції на візки дорівнюють близько 0,45 g, а прискорення візків – близько 0,8 g.

Висновки. Для зменшення динамічної навантаженості довгобазного вагона-платформи запропоновано удосконалення його конструкції. Особливістю удосконаленої несучої конструкції вагона-платформи є виконання основних поєздовжніх балок рами з П-подібного профілю, перекритого горизонтальним листом. Усередині профілю розміщується матеріал із в'язкими властивостями. Завдяки цьому забезпечується перетворення динамічних навантажень, що діють на поєздовжню балку, в роботу сил в'язкого опору.

Проведено математичне моделювання динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи з урахуванням заходів щодо удосконалення. Встановлено, що прискорення, які діють на несучу конструкцію в центрі мас, становлять близько 0,2g, що нижче майже на 15% порівняно з типовою конструкцією. Прискорення, які діють у зонах спирання несучої конструкції вагона-платформи на візки, дорівнює близько 0,45 g, а прискорення візків – близько 0,8 g.

Проведені дослідження сприятимуть створенню інноваційних конструкцій рухомого складу, зменшенню його динамічної навантаженості в експлуатації, покращенню втомної міцності, а також підвищенню ефективності використання залізничного транспорту.

Список літератури:

1. Krason W. Niezgodna T. FE numerical tests of railway wagon for intermodal transport according to PN-EU standards. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences technical sciences*. 2014. Vol. 62. № 4. P. 843–851.
2. Nandan Shivendra, Trivedi Rishikesh, Kant Satyajeet, Ahmad Javed, Maniraj M. Design, analysis and prototype development of railway wagons on different loading conditions. Preprint. 2020, March. URL: <https://www.researchgate.net/publication/340001068>.
3. Myamlin Sergey, Povilas Lingaitis Leonas, Dailidka Stasys, Vaičiūnas Gediminas, Bogdevičius Marijonas, Bureika Gintautas. Determination of the dynamic characteristics of freight wagons with various bogie. *Transport*. 2015. Vol. 30 (1). P. 88–92.
4. Stoilov V., Simić G., Purgić S., Milković D., Slavchev S., Radulović S., Maznichki V. Comparative analysis of the results of theoretical and experimental studies of freight wagon Sdggmrss-twin. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019, Vol. 664. 012026, doi: 10.1088/1757-899X/664/1/012026
5. Инновационный подвижной состав производства «Уралвагонзавода» для железных дорог «пространства 1520 мм». *Транспорт Российской Федерации*. 2010. № 3 (28). С. 20–21.
6. Marton Peter, Gerlici Juraj, Fabián Peter. Versatile, efficient and long wagon for intermodal transport in Europe. *Communications*. 2013. № 2. P. 118–123.
7. Недужа Л.О., Швець А.О. Теоретичні та експериментальні дослідження міцнісних якостей хребтової балки вантажного вагона. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2018. № 1 (73). P. 131–147.
8. Дьомін Ю.В., Черняк Г.Ю. Основы динамики вагонів : навчальний посібник. Київ, 2003. 269 с.

9. Fomin O., Lovska A., Píštěk V., Kučera P. Research of stability of containers in the combined trains during transportation by railroad ferry. *MM Science Journal*. 2020. March. P. 3728–3733.
10. Fomin O., Lovska A., Píštěk V., Kučera P. Dynamic load effect on the transportation safety of tank containers as part of combined trains on railway ferries. *Vibroengineering Procedia*. 2019. Vol. 29. P. 124–129.
11. Vatulia G., Komagorova S., Pavliuchenkov M. Optimization of the truss beam. Verification of the calculation results. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 230. 02037. doi: 10.1051/mateconf/201823002037.
12. Fomin O., Lovska A. Improvements in passenger car body for higher stability of train ferry. *Engineering Science and Technology*. September. 2020, Vol. 23. P. 1455–1465. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.08.010>.
13. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Київ, 2015. 162 с.
14. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. Москва, 2016. 54 с.

Fomin O.V., Lovska A.O. DETERMINATION OF VERTICAL ACCELERATIONS IN THE CARRYING STRUCTURE OF THE FLAT WAGON WITH VISCOUS BONDS IN LONGITUDINAL BEAMS

The development and successful operation of the railway industry requires the introduction of innovative rolling stock structures. This can be achieved through the use of new technical solutions at the design stage of load-bearing structures of wagons using the principles of multifunctionality (the ability to perform several functions).

To reduce the dynamic load on the load-bearing structures of wagons, and as a consequence to improve the fatigue strength, it is proposed to introduce materials with viscous properties. This solution is implemented on the example of a long-base load-bearing structure of a flat wagon for transportation of containers of model 13-7024 of construction PUBLIC JOINT STOCK COMPANY “KVBZ”.

The placement of viscous elements is provided in the longitudinal beams of the frame as its main supporting elements. For this purpose, it is proposed to replace the main longitudinal beams of the frame with beams of U-shaped profile, covered with horizontal sheets. In the middle of the profile is a material with viscous properties. This provides for the damping of dynamic loads acting on the load-bearing structure, due to the forces of viscous resistance arising in the main longitudinal beams of the frame.

To determine the dynamic load of the flat wagon with viscous connections in the longitudinal beams, mathematical modeling was performed. The research was conducted in a flat wagon coordinate system – the XZ plane. The solution of differential equations of motion is carried out in the MathCad software package.

The accelerations acting on the load-bearing structure of the flat wagon were about 2.1 m/s^2 ($\approx 0.2 \text{ g}$) and do not exceed the permissible values in accordance with the regulatory documentation.

The conducted researches will promote creation of innovative designs of a rolling stock, reduction of its dynamic loading in operation, and accordingly and improvement of fatigue strength, and also increase of efficiency of use of railway transport.

Key words: flat wagon, supporting structure, dynamic loading, dynamics modeling, structure acceleration.