

УДК 629.463. 001.63
DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/33>

Фомін О.В.

Державний університет інфраструктури та технологій

Ловська А.О.

Український державний університет залізничного транспорту

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕРТИКАЛЬНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ ВАГОНА-ХОПЕРА ДВОХСЕКЦІЙНОГО

У статті наведені результати дослідження вертикальної навантаженості вагона-хопера двохсекційного. Особливістю несучої конструкції вагона є те, що вона розділена на дві окремі секції, що сприяє можливості здійснення перевезень різнотипних вантажів у ньому. В зонах обпирання секцій вагона-хопера на середню частину рами встановлена балка прямокутного перерізу для забезпечення відповідної жорсткості конструкції. При проектуванні вагона у якості прототипу обрано вагон-хопер моделі 20-9749, побудови ДП "Укрспецвагон" (Україна).

Для визначення основних показників динаміки вагона проведено математичне моделювання в плоскій системі координат. До уваги прийняті поступальні та кутові переміщення вагона у вертикальній площині. Враховано, що вагон рухається у порожньому стані стиковою нерівністю. Колія при цьому має пружно-в'язкі властивості. В моделі враховано технічні характеристики візків моделі 18-100. Визначення інерційних коефіцієнтів несучої конструкції здійснено за допомогою опцій програмного комплексу SolidWorks, де побудовано просторову модель кузова.

Розв'язок математичної моделі здійснений за методом Рунге-Кутта в програмному комплексі MathCad. Початкові переміщення та швидкості прийняті рівними нулю. Результати розрахунків встановили, що всі досліджувані показники динаміки знаходяться в межах допустимих. Прискорення, які діють на несучу конструкцію в центрі мас склали $5,2 \text{ м/с}^2$ ($0,53g$), прискорення в зонах спирання несучої конструкції на візки дорівнюють $8,4 \text{ м/с}^2$ ($0,86g$). Сили, що діють в ресорному підвішуванні візків складають $42,7 \text{ кН}$. Коефіцієнт вертикальної динаміки дорівнює $0,6$. Рух вагона оцінюється як "добрий".

Проведені дослідження сприятимуть підвищенню ефективності експлуатації вагонів-хоперів, а також створенню напрацювань щодо проектування їх перспективних конструкцій.

Ключові слова: транспортна механіка, вагон-хопер, несуча конструкція, динамічна навантаженість, показники динаміки.

Постановка проблеми. Залізничний транспорт вже тривалий час є найбільш пріоритетною галуззю транспортної системи. Він забезпечує можливість перевезення майже всіх типів вантажів та є одним з найбільш безпечних. Разом з цим для утримання першості залізничної галузі на ринку вітчизняних та міжнародних перевезень важливим є впровадження в експлуатацію перспективних конструкцій рухомого складу, які мають не тільки покращені техніко-економічні показники, а і характеризуються багатofункціональністю, тобто можливістю перевезень широкою номенклатури вантажів.

Одним з найбільш небезпечних вантажів, які перевозяться залізницею є високотемпературні. Для їх транспортування використовуються здебільшого вагони-хопери. Важливо сказати, що даний тип вагону є вузькоспеціалізованим. Для

підвищення ефективності експлуатації вагонів-хоперів можливим є удосконалення їх несучих конструкцій шляхом адаптації до перевезень більш широкою номенклатури вантажів, в тому числі одночасного перевезення різнотипних вантажів. Це сприятиме рентабельності залізничних перевезень, а також створенню напрацювань щодо проектування перспективних конструкцій рухомого складу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В роботі [1] розглянуто розробку та оптимізацію технологічного процесу вакуумної інфузії для виготовлення вагонів-хоперів з використанням полімерних композиційних матеріалів. Дослідження проведені стосовно вагона-хопера моделі 19-5167. Обґрунтовано використання полімерних композиційних матеріалів в складових кузова і даху.

В публікації [2] розглянуто питання оптимізації дизайну вагонів-хоперів із використанням функціональних стільникових сендвіч-панелей. Розроблена нова процедура оптимізації конструкції для мінімізації ваги вагонів-хоперів. Встановлено, що запропонована методологія дозволяє зменшити матеріалоемність вагона-хопера більше ніж на 16% у порівнянні з прототипом. Разом з цим запропоновані конструкції вагонів-хоперів не дозволяють здійснювати одночасне перевезення різнотипних вантажів у них, що скорочує їх ефективність експлуатації.

Особливості застосування перспективних матеріалів у вагонобудуванні, зокрема, магнієвих сплавів для підвищення ефективності їх експлуатації висвітлюється у роботі [3]. Екструдовані елементи, що утворюють кузов вагона, були розроблені з використанням алгоритму оптимізації. Наведені результати чисельного моделювання, які підтвердили конструктивні характеристики нового кузова вагона.

В публікації [4] розглянуто проектування кузова залізничного транспортного засобу з екструдованих алюмінієвих панелей. При цьому застосовано структурну оптимізацію. Кожна алюмінієва панель виготовлена з сендвіч-панелей, які зварені між собою. Запропонована конструкція кузова сприяє зменшенню його маси при збереженні достатньої міцності. Важливо сказати, що авторами не досліджено температурної навантаженості несучих конструкцій удосконалених вагонів. Також запропоновані конструкції вагонів не сприяють можливості одночасного перевезення різнотипних вантажів.

Для спрощення конструкції кузова вагона, зменшення його ваги та поліпшення механічних властивостей в публікації [5] запропоновано заміну сендвіч панелей на профлист. Жорсткість кузова вагона оцінено шляхом модального аналізу. Встановлено, що запропоновані панелі зменшують масу кузова вагона на 600–700 кг у порівнянні з типовою конструкцією.

Методологія багатомасштабного проектування та оптимізації сендвіч-конструкцій з решітчастою серцевиною для легких вагонів-хоперів висвітлюється в роботі [6]. При проектуванні вагона використані Північноамериканські стандарти. Запропонований дизайн був підтверджений шляхом порівняння комп'ютерного моделювання з точними аналітичними рівняннями. Важливо сказати, що запропоновані конструкції вагонів не дозволяють здійснювати одночасне перевезення різнотипних вантажів.

В роботі [7] проведено визначення основних показників міцності несучих конструкцій вагонів, в тому числі, вагона-хопера, які вичерпали свій нормативний ресурс експлуатації. Встановлено, що строк служби досліджуваних несучих конструкцій вагонів може бути продовженим. Запропоновано модернізацію несучих конструкцій вагонів під перевезення завданої номенклатури вантажів. Однак при проведенні розрахунків авторами не враховано термічні навантаження, які можуть діяти на несучі конструкції вагонів в експлуатації.

Обґрунтування створення несучих конструкцій вагонів секційного типу з труб круглого перерізу проводиться у роботі [8]. Дані конструкції вагонів дозволяють здійснювати одночасне перевезення різнотипних вантажів у одному вагоні. Для зменшення динамічної навантаженості несучих конструкцій вагонів запропоновано використання на них концепту упряжного пристрою. Разом з цим процес проектування та технічного обслуговування даних конструкцій вагонів викликає складнощі в експлуатації.

Аналіз літературних джерел [1 – 8] дозволяє зробити висновок, що питання удосконалення несучих конструкцій вагонів-хоперів є досить актуальними. Однак вони потребують подальшого розвитку для підвищення ефективності їх експлуатації. Тому виникає необхідність проведення досліджень в цьому напрямку.

Постановка завдання.

Метою дослідження є висвітлення особливостей визначення вертикальної навантаженості вагона-хопера двохсекційного в експлуатації. Для досягнення поставленої мети сформовані такі завдання:

- створити розрахункову схему вагона-хопера двохсекційного для визначення основних показників його динаміки;
- визначити основні показники динаміки вагона-хопера двохсекційного.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для підвищення ефективності залізничних перевезень запропоновано конструкцію вагона-хопера двохсекційного (рис. 1). Особливістю його несучої конструкції є те, що вона розділена на дві окремі секції, що сприяє можливості перевезень різнотипних вантажів у ньому. В зонах обпирання секцій на середню частину рами встановлена балка прямокутного перерізу для забезпечення відповідної жорсткості конструкції. При проектуванні вагона у якості прототипу обрано

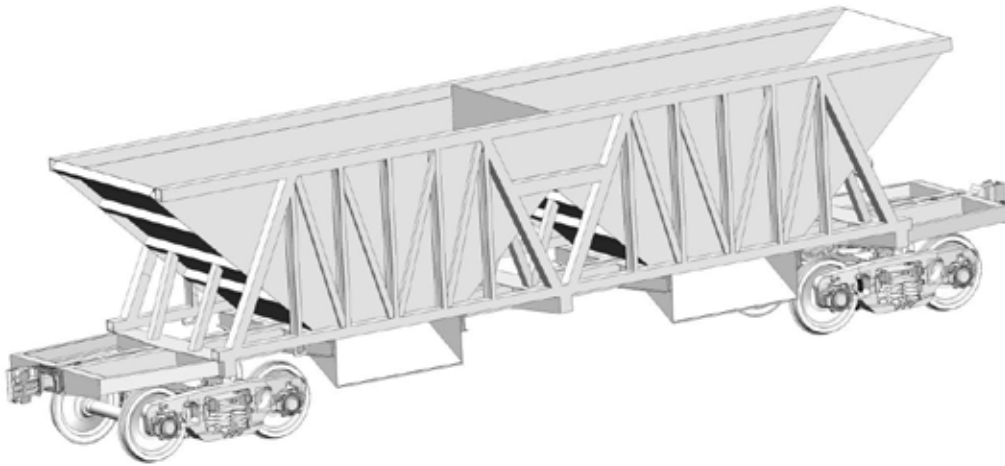


Рис. 1. Вагон-хопер двохсекційний

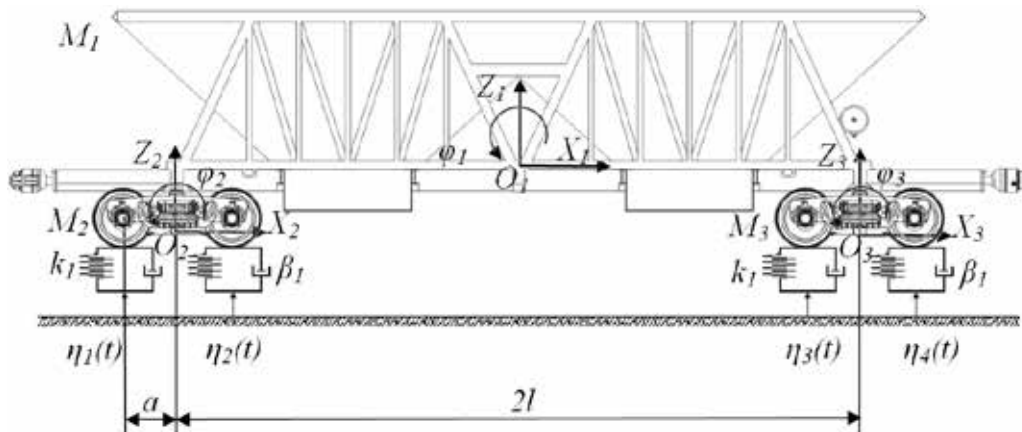


Рис. 2. Розрахункова схема вагона-хопера

вагон-хопер моделі 20-9749, побудови ДП "Укр-спецвагон" (Україна).

Для визначення вертикальної навантаженості вагона-хопера проведено математичне моделювання. При цьому використано математичну модель, наведену у роботі [9]. Модель описує поступальні та кутові переміщення вагона-хопера у вертикальній площині при його русі стиковою нерівністю. Колія при цьому розглянута як пружно-в'язка.

Розрахункова схема вагона-хопера наведена на рис. 2. Враховано, що вагон переміщується у порожньому стані оскільки при цьому спостережується найбільша навантаженість його конструкції.

В моделі враховано технічні характеристики візків моделі 18-100.

$$M_1 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_1 + C_{1,1} \cdot q_1 + C_{1,3} \cdot q_3 + C_{1,5} \cdot q_5 = -F_{TP} \cdot (\Delta_1 + \Delta_2), \quad (1)$$

$$M_2 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_2 + C_{2,2} \cdot q_2 + C_{2,3} \cdot q_3 + C_{2,5} \cdot q_5 = F_{TP} \cdot l \cdot (\Delta_1 + \Delta_2), \quad (2)$$

$$M_3 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_3 + C_{3,1} \cdot q_1 + C_{3,2} \cdot q_2 + C_{3,3} \cdot q_3 + B_{3,3} \cdot \frac{d}{dt} q_3 = \\ = F_{TP} \cdot \Delta_1 + k_1 (\eta_1 + \eta_2) + \beta_1 \left(\frac{d}{dt} \eta_1 + \frac{d}{dt} \eta_2 \right), \quad (3)$$

$$M_4 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_4 + C_{4,4} \cdot q_4 + B_{4,4} \cdot \frac{d}{dt} q_4 = \\ = -k_1 (\eta_1 - \eta_2) - \beta_1 \cdot a \cdot \left(\frac{d}{dt} \eta_1 - \frac{d}{dt} \eta_2 \right), \quad (4)$$

$$M_5 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_5 + C_{5,1} \cdot q_1 + C_{5,2} \cdot q_2 + C_{5,5} \cdot q_5 + B_{5,5} \cdot \frac{d}{dt} q_5 = \\ = F_{TP} \cdot \Delta_2 + k_1 (\eta_3 + \eta_4) + \beta_1 \left(\frac{d}{dt} \eta_3 + \frac{d}{dt} \eta_4 \right), \quad (5)$$

$$M_6 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_6 + C_{6,6} \cdot q_6 + B_{6,6} \cdot \frac{d}{dt} q_6 = \\ = -k_1 \cdot a \cdot (\eta_3 - \eta_4) - \beta_1 \cdot a \cdot \left(\frac{d}{dt} \eta_3 - \frac{d}{dt} \eta_4 \right), \quad (6)$$

$$\Delta_1 = \text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_1 \right), \quad \Delta_2 = \text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_2 \right), \quad (7)$$

M_1, M_2 – відповідно, маса та момент інерції несучої конструкції вагона-хопера; M_3, M_4 – відповідно, маса та момент інерції першого за ходом руху візка; M_5, M_6 – відповідно, маса та момент інерції другого за ходом руху візка; C_{ij} – характеристика пружності складових коливальної системи; B_{ij} – функція розсіювання; a – напівбаза візка; q_i – узагальнені координати, що відповідають поступальному та кутовому переміщенням навколо вертикальної вісі, відповідно, кузова вагона-хопера, першого та другого візка; k_i – жорсткість ресорного підвішування візків; β_i – коефіцієнт демпфірування; F_{TP} – сила тертя, що виникає у ресорному комплекті.

Вхідні параметри, які використовувалися при математичному моделюванні наведені у табл. 1. Визначення інерційних коефіцієнтів несучої конструкції здійснено за допомогою опцій програмного комплексу SolidWorks, де побудовано просторову модель кузова.

Розв’язок математичної моделі (1) – (6) здійснений за методом Рунге-Кутта в програмному комплексі MathCad. Початкові переміщення та швидкості прийняті рівними нулю [10, 11]. Результати розрахунків наведені на рис. 3 – 6.

Результатирозрахунківвстановили,щоотримані показники динаміки знаходяться в межах допустимих [12, 13]. Прискорення, які діють на несучу конструкцію в центрі мас склали $5,2 \text{ м/с}^2$ ($0,53g$),

Таблиця 1

Вхідні параметри до математичного моделювання вертикальної навантаженості вагона-хопера

Назва параметру	Розмірність	Значення
Несуча конструкція вагона-хопера		
Маса	т	12,3
Момент	$\text{т} \cdot \text{м}^2$	206,3
Напівбаза	м	5,07
Візок		
Маса	т	4,3
Момент інерції	$\text{т} \cdot \text{м}^2$	3,0
Напівбаза	м	0,925
Жорсткість ресорного підвішування	кН/м	8000
Коефіцієнт відносного тертя		0,1
Колія		
Жорсткість	кН/м	100000
Коефіцієнт демпфірування	$\text{кН} \cdot \text{с} / \text{м}$	200
Амплітуда нерівності	м	0,01
Довжина нерівності	м	3,0
Відстань між нерівностями	м	25,0

прискорення в зонах спирання несучої конструкції на візки дорівнюють $8,4 \text{ м/с}^2$ ($0,86g$). Сили, що діють в ресорному підвішуванні візків складають $42,7 \text{ кН}$. Коефіцієнт вертикальної динаміки дорівнює $0,6$.

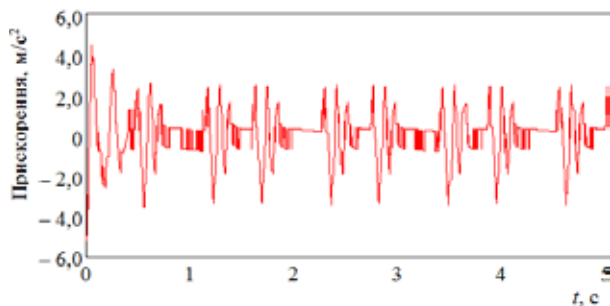


Рис. 3. Прискорення в центрі мас несучої конструкції вагона-хопера

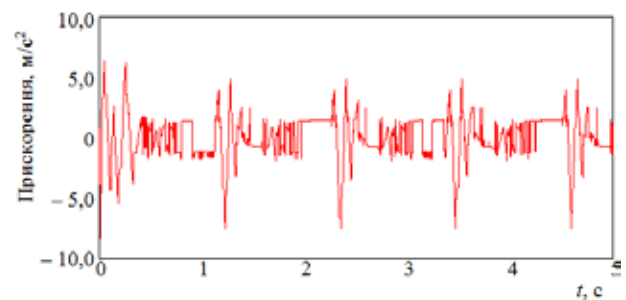


Рис. 4. Прискорення несучої конструкції вагона-хопера з зонах спирання на візки

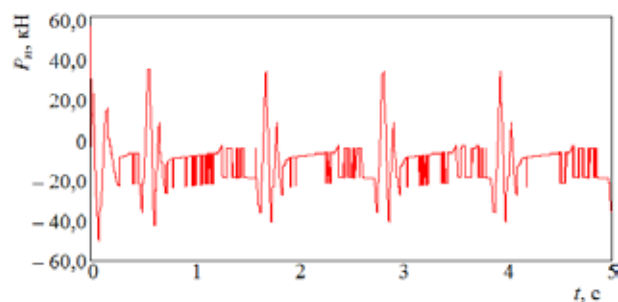


Рис. 5. Сили в ресорному підвішуванні

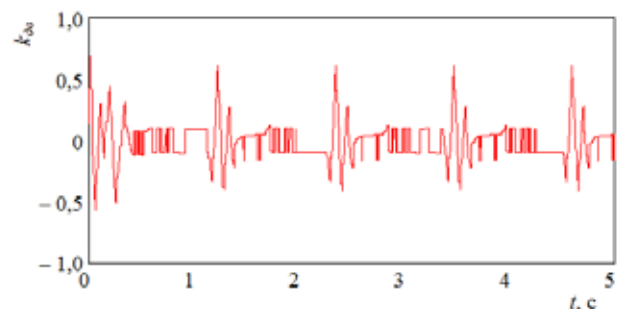


Рис. 6. Коефіцієнт вертикальної динаміки

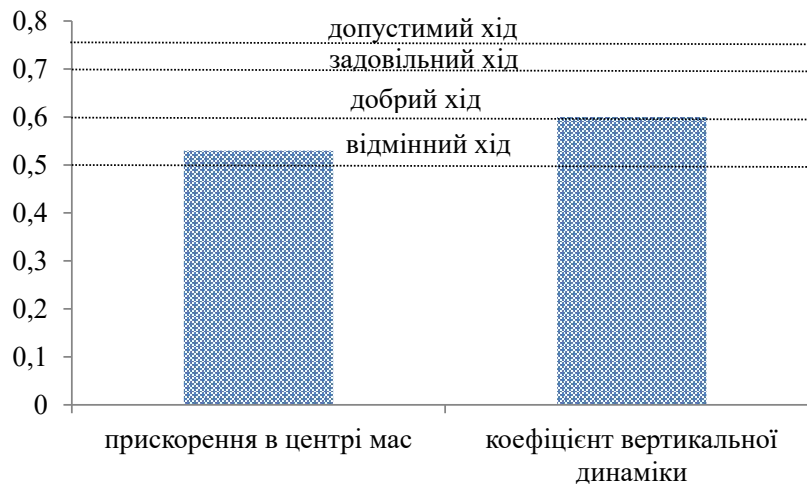


Рис. 7. Показники динаміки вагона-хопера двохсекційного

Розраховані показники динаміки відповідають “доброму” ходу руху вагона (рис. 7).

При цьому прискорення, яке діє в центрі мас несучої конструкції на рис. 7 приведене в частках g .

Висновки.

1. Створено розрахункову схему несучої конструкції вагона-хопера двохсекційного для визначення основних показників його динаміки. Дослідження проведені у плоскій системі координат. Модель враховує переміщення

вагона стиковою нерівністю у порожньому стані.

2. Визначено основні показники динаміки вагона-хопера двохсекційного. Прискорення, які діють на несучу конструкцію в центрі мас склали $5,2 \text{ м/с}^2$, прискорення в зонах спирання несучої конструкції на візки дорівнюють $8,4 \text{ м/с}^2$. Сили, що діють в ресорному підвішуванні візків склали $42,7 \text{ кН}$. Коефіцієнт вертикальної динаміки дорівнює $0,6$. При цьому хід руху вагона оцінюється як “добрий”.

Список літератури:

1. Ushakov A. E., Safonov A. A., Sergeichev I. V., et al. Design and optimization of a vacuum infusion technological process for hopper car fabrication using polymeric composite materials. *J Mach Manuf Reliab*. 2015, Vol. 44(3). P. 276 – 282. doi:10.3103/S105261881503022X
2. Ayman Al-Sukhon, Mostafa SA ElSayed. Design optimization of hopper cars employing functionally graded honeycomb sandwich panels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2021, December. doi: 10.1177/09544097211049640
3. Lee W. G., Kim J. S., Sun S. J., et al. The next generation material for lightweight railway car body structures: Magnesium alloys. *Proc Inst Mech Eng F J Rail Rapid Transit*. 2016, Vol. 232(1). P. 25 – 42. doi:10.1177/0954409716646140.
4. Lee H. A., Jung S. B., Jang H. H., et al. Structural-optimization-based design process for the body of a railway vehicle made from extruded aluminum panels. *Proc Inst Mech Eng F J Rail Rapid Transit*. 2015, Vol. 230(4). P. 1283 – 1296. doi:10.1177/0954409715593971.
5. Wennberg D., Stichel S., Wennhage P. Substitution of corrugated sheets in a railway vehicle’s body structure by a multiple-requirement based selection process. *Proc Inst Mech Eng F J Rail Rapid Transit*. 2012, Vol. 228(2). P. 143 – 157. doi:10.1177/0954409712467139.
6. Molavitabrizi D., Laliberte J. Methodology for multiscale design and optimization of lattice core sandwich structures for lightweight hopper railcars. *Proc Inst Mech Eng C: J Mech Eng Sci*. 2020, Vol. 234(21). P. 4224 – 4238. doi: 10.1177/0954406220920694.
7. Fomin Olexsij, Lovska Alyona. Determination of dynamic loading of bearing structures of freight wagons with actual dimensions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021, Vol. 2/7 (110). P. 6 – 15. doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.220534
8. Alyona Lovska, Olexsij Fomin, Vaclav Pistek, Pavel Kucera. Calculation of loads on carrying structures of articulated circular-tube wagons equipped with new draft gear concepts. *Applied Sciences*. 2020, Vol. 10(21). 7441. doi:10.3390/app10217441
9. Дьомін Ю. В., Черняк Г. Ю. Основи динаміки вагонів. Київ, 2003. 269 с.

10. Fomin Oleksij, Lovska Alyona. Establishing patterns in determining the dynamics and strength of a covered freight car, which exhausted its resource. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020, Vol. 6. Issue 7 (108). P. 21 – 29. doi: 10.15587/1729-4061.2020.217162

11. Fomin Oleksij, Lovska Alyona. Determination of dynamic loading of bearing structures of freight wagons with actual dimensions. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021, Vol. 2/7 (110). P. 6 – 15. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.220534>

12. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Київ, 2015. 162 с.

13. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. Москва, 2016. 54 с.

Fomin O.V., Lovska A.O. INVESTIGATION OF VERTICAL LOADING OF A HOPPER TWO-SECTIONAL WAGON

The article presents the results of the study of the vertical load of a two-section hopper car. The peculiarity of the load-bearing structure of the car is that it is divided into two separate sections, which facilitates the possibility of transportation of various types of cargo in it. In the support areas of the hopper sections, a rectangular beam is installed on the middle part of the frame to ensure the appropriate rigidity of the structure. When designing the car, a hopper car model 20-9749, built by Ukrspetsvagon (Ukraine), was chosen as a prototype.

Mathematical modeling in a flat coordinate system was performed to determine the main indicators of car dynamics. The translational and angular movements of the car in the vertical plane are taken into account. It is taken into account that the car moves in an empty state with butt roughness. The track has elastic and viscous properties. The model takes into account the technical characteristics of trolleys model 18-100. The inertial coefficients of the load-bearing structure were determined using the options of the SolidWorks software package, where a spatial model of the body was built.

The solution of the mathematical model was carried out by the Runge-Kutta method in the MathCad software package. Initial displacements and velocities are assumed to be zero. The results of the calculations showed that all the studied indicators of the dynamics are within acceptable limits. The accelerations acting on the load-bearing structure in the center of mass were 5.2 m/s^2 (0.53g), the accelerations in the zones of support of the load-bearing structure on the carts are 8.4 m/s^2 (0.86 g). The forces acting in the spring suspension of the trolleys are 42.7 kN. The coefficient of vertical dynamics is equal to 0.6. The movement of the car is assessed as "good".

The conducted researches will promote increase of efficiency of operation of hopper cars, and also creation of developments concerning designing of their perspective designs.

Key words: transport mechanics, hopper car, load-bearing structure, dynamic loading, dynamics indicators.