

273 ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.463. 001.63

doi: 10.32782/2225-6733.44.2022.9

© Фомін О.В.¹, Ловська А.О.²**ВИЗНАЧЕННЯ НАВАНТАЖЕНОСТІ НЕСУЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ
ВАГОНА-ЦИСТЕРНИ
З ПРУЖНЬО-ФРИКЦІЙНОЮ ХРЕБТОВОЮ БАЛКОЮ**

В статті наведені результати визначення навантаженості несучої конструкції вагона-цистерни з пружньо-фрикційною хребтовою балкою. Дослідження проведені стосовно вагона-цистерни моделі 15-1443-06, призначеного для перевезення світлих нафтопродуктів. Для визначення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-цистерни сформовано математичну модель, яка враховує його переміщення при коливаннях підсакування. Зв'язок несучої конструкції з ходовими частинами описувався як послідовне пружне з'єднання. Вагон-цистерна при цьому розглядається як система з трьох твердих тіл – несучої конструкції та двох візків моделі 18-100 з ресорними комплектами, які мають жорсткість та коефіцієнт відносного тертя. Розв'язок системи диференціальних рівнянь руху вагона-цистерни здійснений за методом Рунге-Кутта при початкових умовах рівних нулю. Встановлено, що максимальне вертикальне прискорення, яке діє в центрі мас несучої конструкції вагона-цистерни при русі у порожньому стані складає близько $1,72 \text{ м/с}^2$ (0,17g), що майже на 20% нижче за прискорення в типовій конструкції. Розраховано основні показники міцності несучої конструкції вагона-цистерни. При цьому застосований метод скінчених елементів, який реалізовано в програмному комплексі SolidWorks Simulation (CosmosWorks). В якості скінчених елементів використовувалися просторові ізопараметричні тетраедри. Розрахунок здійснений в квазістатичі. Встановлено, що максимальні еквівалентні напруження виникають у зоні розміщення люка-лаза та складають 173,7 МПа, що на 13% нижче ніж у типовій конструкції. Проведені дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування інноваційних конструкцій залізничних транспортних засобів з покращеними техніко-економічними характеристиками, а також підвищенню ефективності експлуатації залізничного транспорту.

Ключові слова: транспортна механіка, вагон-цистерна, несуча конструкція, динамічна навантаженість, міцність.

O.V. Fomin, A.O. Lovska. Determination of load-carrying capacity of tank wagon with a loaded-friction spine girder. This article shows the results of load-carrying capacity estimation of tank wagon with lumber-friction backbar. The research was carried out on the basis of tank wagon model 15-1443-06, designed for transportation of light petroleum products. To determine the dynamic load-bearing structure of the tank wagon, a mathematical model, which takes into account its displacement during rocking motion. The connection between the supporting structure and running parts is described as the last pipeline connection. In this case the tank car is regarded as a system of three solid bodies - a load-bearing structure and two trolleys of model 18-100 with reshoring kits, which have stiffness and coefficient of wear resistance. The system of differential ratings of tank wagon's motion was developed by Runge-Kutt method under zero initial conditions. It

¹ д-р техн. наук, професор, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0003-2387-9946, fomin1985@ukr.net

² д-р техн. наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, ORCID: 0000-0002-8604-1764, alyonaLovskaya.vagons@gmail.com

was found that the maximum vertical acceleration, which acts in the center of mass of the load-carrying structure of the tank-car in the empty state is about 1.72 m/s² (0,17g), which is about 20% lower than the acceleration of the standard structure. The main indicators of the strength of the load-bearing structure of the tank wagon were calculated. The method of joined elements, which is implemented in the SolidWorks Simulation (CosmosWorks) program complex, was used herewith. As lumped elements, we used spacious isoparametric tetrahedrons. The calculation was performed in quasi-statistics. It was found that the maximum equivalent loads occur in the area of the manhole placement are 173.7 MPa, which is 13% lower than in the standard structure. The conducted research will contribute to the creation of guidelines for the design of innovative structures of rail transport vehicles with improved technical and economic characteristics, as well as to increase the efficiency of the operation of rail transport.

Key words: *transport mechanics, tank car, load-bearing structure, dynamic load capacity, strength.*

Постановка проблеми. Забезпечення сталого розвитку транспортної галузі можливе при злагодженій роботі окремих її складових. Відомо, що привалюючий відсоток перевезень припадає на залізничний транспорт. Тому питання підвищення ефективності функціонування залізничного транспорту на сучасному етапі розвитку транспортної галузі вимагають особливої уваги.

Перевезення наливних вантажів залізницею здійснюється здебільшого в вагонах-цистернах. Несуча конструкція даного типу вагона випробовує значних динамічних навантажень в експлуатації, обумовлених як податливістю перевозимих вантажів, так і експлуатаційними режимами. Внаслідок циклічності дії таких навантажень можуть мати місце пошкодження складових несучої конструкції та необхідність здійснення позапланових видів ремонту. Крім того, виникнення пошкоджень несучої конструкції вагона на шляху прямування загрожує безпеці руху, в тому числі екологічності перевезень вантажів залізницею.

У зв'язку з цим виникає необхідність розробки та впровадження в експлуатацію інноваційних рішень щодо зменшення динамічної навантаженості несучих конструкцій вагонів в експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження динаміки транспортних засобів при ударній навантаженості несучих конструкцій проводиться у роботі [1]. Наведені математичні моделі, які дозволяють визначити прискорення, що діють на транспортні засоби при ударі.

Однак при цьому в роботі не запропоновано заходів щодо зменшення динамічної навантаженості транспортних засобів при експлуатаційних режимах.

Визначення можливих шляхів покращення техніко-економічних показників вагонів проводиться у роботі [2]. При цьому дані впровадження розглянуті на прикладі вантажних вагонів ВСННЛ. Однак в роботі не запропоновані заходи щодо зменшення динамічної навантаженості несучих конструкцій вагонів в експлуатації.

В роботі [3] наведені можливі удосконалення несучих конструкцій вагонів, а також вимоги, які повинні пред'являтися до їх сучасних моделей. Запропоновані технічні рішення щодо удосконалення спрямовані на підвищення строку служби вагонів. Важливо сказати, що зазначене удосконалення сприяє посиленню несучої конструкції вагона, а не зменшенню його динамічної навантаженості при експлуатаційних режимах.

В роботі [4] наведені напрямки удосконалень конструкцій вагонів-цистерн. Особливістю запропонованого вагона-цистерни є те, що котел має конусоподібні консольні вставки та беззачорний зчіпний пристрій.

Варіанти конструктивних та технічних рішень щодо підвищення ефективності перевезень рідких вантажів у вагонах-цистернах висвітлено у роботі [5]. Обґрунтовано найбільш раціональну конструктивну схему вагона-цистерни з точки зору підвищення продуктивності його використання.

Необхідно відмітити, що в даних роботах не запропоновані заходи щодо зменшення динамічної навантаженості несучих конструкцій вагонів-цистерн в експлуатації.

В роботі [6] наведені результати визначення навантаженості несучої конструкції вагона-цистерни при маневровому співударянні. Визначено вплив наливного вантажу на динамічну

навантаженість котла. Разом з цим, заходів щодо зменшення навантаженості вагона-цистерни в експлуатації авторами не запропоновано.

Заходи щодо зменшення динамічної навантаженості несучих конструкцій вантажних вагонів шляхом використання податливих зв'язків висвітлюються у роботах [7, 8]. Сформовані математичні моделі підтверджені шляхом комп'ютерного моделювання. Разом з цим питанням зменшення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-цистерни в даних роботах уваги не приділяється.

Метою дослідження є висвітлення результатів визначення навантаженості несучої конструкції вагона-цистерни з пружньо-фрикційною хребтовою балкою. Для досягнення зазначеної мети поставлені такі завдання:

- визначити динамічну навантаженість несучої конструкції вагона-цистерни з пружньо-фрикційною хребтовою балкою;

- визначити міцність несучої конструкції вагона-цистерни.

Виклад основного матеріалу. Для зменшення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-цистерни при експлуатаційних режимах пропонується впровадження в хребтову балку пружньо-фрикційних зв'язків. Дані зв'язки реалізуються шляхом створення хребтової балки з П-подібного профілю в якому розміщуються пружні елементи, перекриті горизонтальним листом. При роботі пружних елементів між вертикальними частинами П-подібного профілю та горизонтального листа виникають сили тертя завдяки чому зменшується динамічна навантаженість несучої конструкції вагона (рис. 1).



Рис. 1 – Переріз хребтової балки вагона-цистерни: а) типова хребтова балка; б) хребтова балка з пружними елементами

Дослідження проведені стосовно вагона-цистерни моделі 15-1443-06, призначеного для перевезення світлих нафтопродуктів.

Рама вагона-цистерни з пружньо-фрикційною хребтовою балкою наведена на рис. 2.

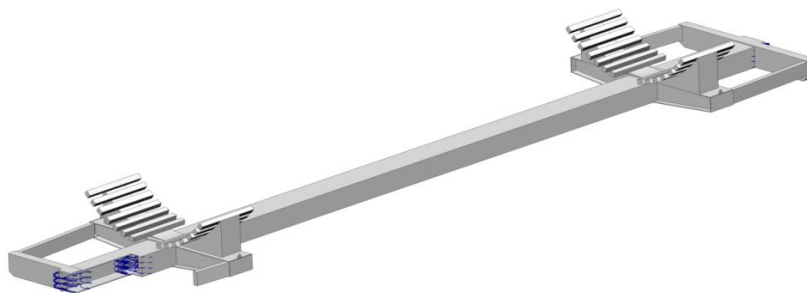


Рис. 2 – Рама вагона-цистерни з пружньо-фрикційною хребтовою балкою

Для визначення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-цистерни з урахуванням запропонованих заходів здійснено математичне моделювання. Дослідження проведені в площині XZ [9, 10]. Розрахункова схема вагона-цистерни наведена на рис. 3.

Вагон-цистерна при цьому розглядається як система з трьох твердих тіл – несучої конструкції та двох візків моделі 18-100 з ресорними комплектами, які мають жорсткість та коефіцієнт відносного тертя.

Враховано, що переміщення несучої конструкції вагона-цистерни та візків відносно колії

однакові. Колія має пружно-в'язкі характеристики.

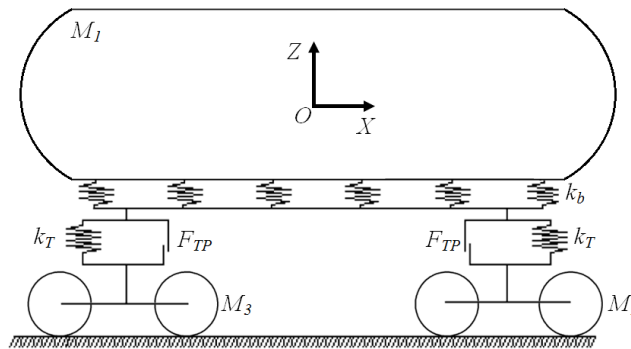


Рис. 3 – Розрахункова схема вагона-цистерни

Переміщення вагона-цистерни описуються рівняннями

$$\begin{cases} M_1 \cdot \ddot{q}_1 + C_{1,1} \cdot \dot{q}_1 + C_{1,2} \cdot \dot{q}_2 + C_{1,3} \cdot \dot{q}_3 + F_{TP}^p \cdot \text{sign}(\dot{q}_1) = -F_{TP} \cdot (\text{sign}(\dot{\delta}_1) + \text{sign}(\dot{\delta}_2)), \\ M_2 \cdot \ddot{q}_2 + C_{2,1} \cdot \dot{q}_1 + C_{2,2} \cdot \dot{q}_2 + B_{2,2} \cdot \dot{q}_2 = F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{\delta}_1) + k(\eta_1 + \eta_2) + \beta(\dot{\eta}_1 + \dot{\eta}_2), \\ M_3 \cdot \ddot{q}_3 + C_{3,1} \cdot \dot{q}_1 + C_{3,3} \cdot \dot{q}_3 + B_{3,3} \cdot \dot{q}_3 = F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{\delta}_2) + k(\eta_3 + \eta_4) + \beta(\dot{\eta}_3 + \dot{\eta}_4), \end{cases} \quad (1)$$

де M_i – інерційні коефіцієнти елементів коливальної системи (несуча конструкція вагона-цистерни та дві ходові частини); C_{ij} – характеристика пружності елементів коливальної системи; B_{ij} – функція розсіювання; q_i – узагальнені координати, що відповідають поступальному переміщенню відносно вертикальної осі, відповідно, несучої конструкції вагона-цистерни, першого та другого візка; k – жорсткість колії; β – коефіцієнт демпфірування; F_{TP} – сила абсолютного тертя у ресорному комплекті; F_{TP}^p – сила тертя, яка виникає в хребтовій балці; δ_i – деформації пружних елементів ресорного підвішування; $\eta(t)$ – нерівності колії.

В рівняннях руху (1)-(3) прийнято

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

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

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

При цьому зв'язок несучої конструкції вагона-цистерни з ходовою частиною описувався як послідовне пружне з'єднання:

$$C = \frac{k_b \cdot (k_T + k_T)}{k_b + (k_T + k_T)}, \quad (2)$$

де k_T – жорсткість ресорного підвішування; k_b – жорсткість пружних елементів, які розміщуються в хребтовій балці.

Прийнято, що вагон переміщується у порожньому стані 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).

Вхідними параметрами моделі є технічні характеристики несучої конструкції вагона-цистерни, ресорного підвішування, а також збурюючої дії.

Розв’язок диференціальних рівнянь руху здійснений в програмному комплексі MathCad. При цьому початкові переміщення та швидкості покладені рівними нулю [11-13].

Розв’язок моделі в програмному комплексі MathCad визначався у вигляді

$$F(t, y) = \begin{bmatrix} y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ \frac{-F_{TP} \cdot (\text{sign}(\dot{\delta}_1) + \text{sign}(\dot{\delta}_2)) - C_{1,1} \cdot y_1 - C_{1,2} \cdot y_2 - C_{1,3} \cdot y_3 - F_{TP}^p \cdot \text{sign}(y_4)}{M_1} \\ \frac{F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{\delta}_1) + k(\eta_1 + \eta_2) + \beta(\dot{\eta}_1 + \dot{\eta}_2) - C_{2,1} \cdot y_1 - C_{2,2} \cdot y_2 - B_{2,2} \cdot y_5}{M_2} \\ \frac{F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{\delta}_2) + k(\eta_3 + \eta_4) + \beta(\dot{\eta}_3 + \dot{\eta}_4) - C_{3,1} \cdot y_1 - C_{3,3} \cdot y_3 - B_{3,3} \cdot y_6}{M_3} \end{bmatrix} \quad (4)$$

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

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

Отримані результати наведені на рис. 4.

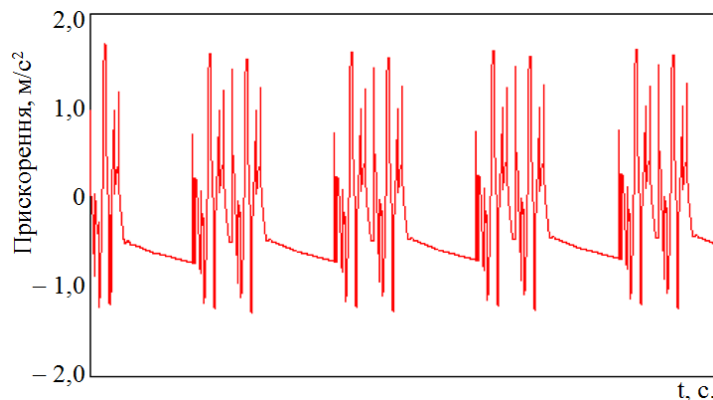


Рис. 4. – Прискорення несучої конструкції вагона-цистерни в центрі мас

Максимальне вертикальне прискорення несучої конструкції вагона-цистерни у порожньому стані складає близько 1,72 м/с² (0,17g). З урахуванням запропонованого рішення стає можливим знизити вертикальні прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-цистерни майже на 20%.

Для визначення основних показників міцності несучої конструкції вагона-цистерни проведено розрахунок за методом скінчених елементів в програмному комплексі SolidWorks Simulation (CosmosWorks). В якості скінчених елементів використовувалися просторові ізопараметричні тетраедри. Для визначення оптимальної кількості елементів застосований графоаналітичний метод [14, 15]. Кількість вузлів моделі склала 263879, елементів – 815114. Максимальний розмір елемента склав 40 мм, а мінімальний – 8 мм. Відсоток елементів з співвідношенням боків менше трьох – 19,2, більше десяти – 0,323. Мінімальна кількість елементів в колі склала 9, співвідношення збільшення розміру елементів – 1,7. Матеріал несучої конструкції вагона – сталь марки 09Г2С.

Розрахункова схема несучої конструкції вагона-цистерни наведена на рис. 5. Розрахунок здійснений в квазістатичі. При складанні розрахункової схеми враховано, що на несучу конст-

рукцію діє вертикальне динамічне навантаження P_{δ}^{δ} з урахуванням використання повної вантажопідйомності умовним вантажем, а також тиск від наливного вантажу $P_{нв}$. Закріплення моделі здійснювалося в зонах обпирання несучої конструкції на ходові частини.

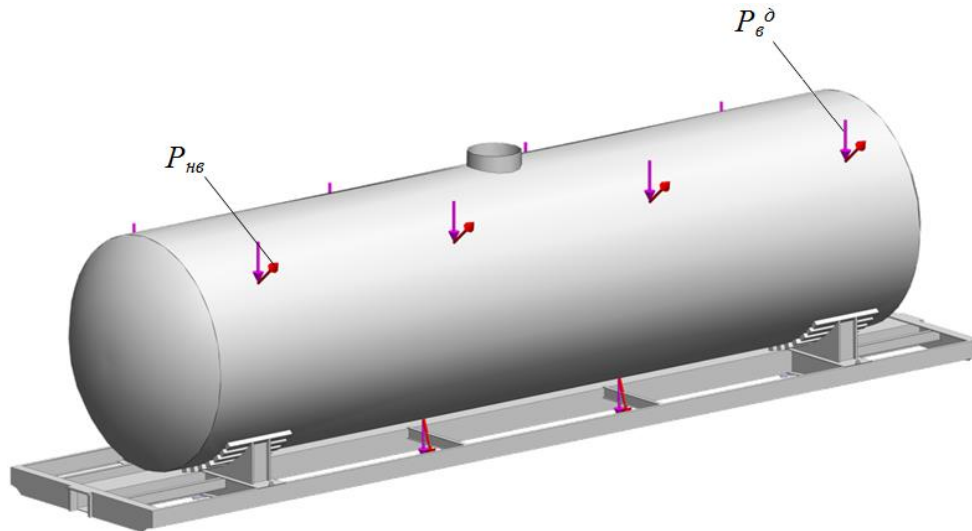


Рис. 5 – Розрахункова схема несучої конструкції вагона-цистерни

Результати розрахунку на міцність несучої конструкції вагона-цистерни наведені на рис. 6.

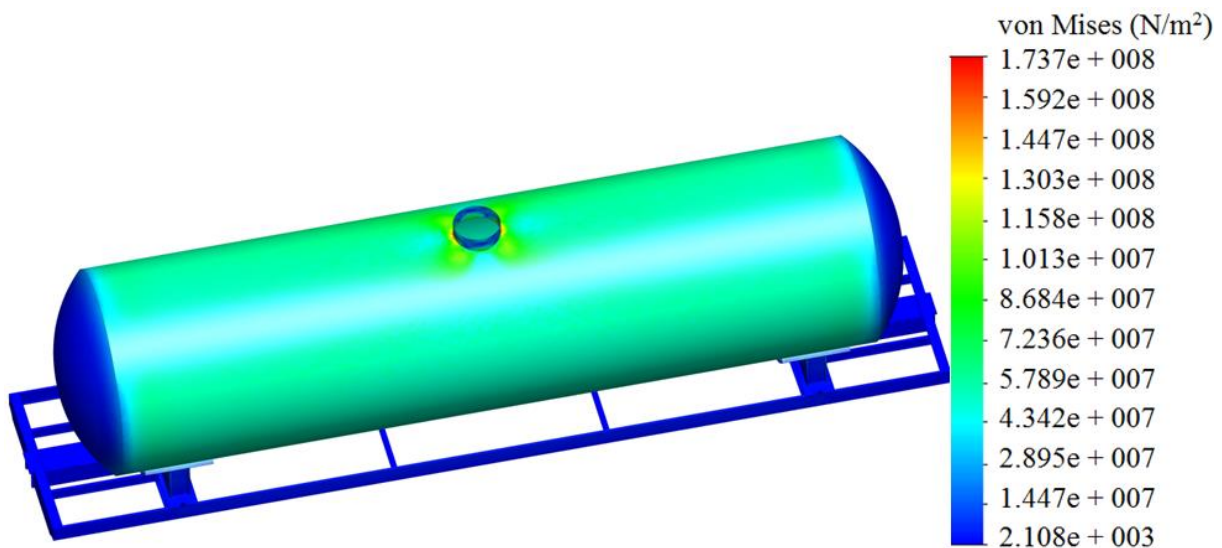


Рис. 6 – Напружений стан несучої конструкції вагона-цистерни

Максимальні еквівалентні напруження при цьому виникають у зоні розміщення люка-лаза та складають 173,7 МПа, а отже не перевищують допустимих значень [16, 17]. Важливо сказати, що отримана величина напружень на 13% нижче ніж у типовій конструкції.

Проведені розрахунки доводять, що використання пружньо-фрикційних зв'язків в несучій конструкції вагона-цистерни є доцільним рішенням.

Висновки

1. Визначено динамічну навантаженість несучої конструкції вагона-цистерни з пружньо-фрикційною хребтовою балкою. Для цього сформовано математичну модель, яка враховує переміщення несучої конструкції вагона-цистерни в вертикальній площині.

Максимальне вертикальне прискорення несучої конструкції вагона-цистерни у порож-

ньому стані складає близько $1,72 \text{ м/с}^2$ ($0,17g$). З урахуванням запропонованого рішення стає можливим знизити вертикальні прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-цистерни майже на 20%.

2. Визначено міцність несучої конструкції вагона-цистерни. Максимальні еквівалентні напруження при цьому виникають у зоні розміщення люка-лаза та складають 173,7 МПа, що на 13% нижче ніж у типовій конструкції.

Проведені дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування інноваційних конструкцій залізничних транспортних засобів з покращеними техніко-економічними характеристиками, а також підвищенню ефективності експлуатації залізничного транспорту.

Перелік використаних джерел:

1. 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. – Pp. 21-27. – Mode of access: <https://doi.org/10.26552/com.C.2015.4.21-27>.
2. 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. – Pp. 3572-3577. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.533>.
3. M. Płaczek. A concept of technology for freight wagons modernization / M. Płaczek, A. Wróbel, A. Buchacz // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – No. 161(2016). – Pp. 1-12. – Mode of access: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/161/1/012107>.
4. Атаманчук Н. А. Направления совершенствования конструкций вагонов-цистерн для перевозки нефтепродуктов / Атаманчук Н. А., Цыганская Л. В. // Транспорт Российской Федерации. – 2013. – № 3(46). – С. 14-17.
5. Собержанский А.Н. Совершенствование конструкций вагонов-цистерн / А.Н. Собержанский, Л.В. Цыганская // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 35. – С. 25-28.
6. Integration of geometry and analysis for the study of liquid sloshing in railroad vehicle dynamics / H. Shi, L. Wang, B. Nicolsen, A. A Shabana // Proc IMechE, Part K: J Multi-body Dynamics. – 2017. – Vol. 231, iss. 4. – Pp. 608-629. – Mode of access: <https://doi.org/10.1177/1464419317696418>.
7. Establishing patterns in the dynamic loading on the body of a semi-wagon with an elastic middle part of the girder beam / O. Fomin, A. Lovska, I. Medvediev, H. Shatkovska // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – № 5/7(107) – Pp. 30-37. – Mode of access: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.211936>.
8. Determining the load on the long-based structure of the platform car with elastic elements in longitudinal beams / S. Panchenko, O. Fomin, G. Vatulia, O. Ustenko, A. Lovska // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – №1/7 (109). – Pp. 6-13. – Mode of access: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.224638>.
9. Дьомін Ю.В. Основи динаміки вагонів / Ю.В. Дьомін, Г.Ю. Черняк. – К. : КУЕТТ, 2003. – 269 с.
10. Fomin Oleksij. Establishing patterns in determining the dynamics and strength of a covered freight car, which exhausted its resource / O. Fomin, A. Lovska // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – Vol. 6, no. 7 (108). – Pp. 21-29. – Mode of access: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217162>.
11. The concept of the organization of interaction of elements of military radio communication systems / I.O. Romanenko, A.V. Shyshatskyi, R.M. Zhyvotovskiy, S.M. Petruk // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2017. – No. 1. – Pp. 97-100. – Mode of access: <https://doi.org/10.30748/nitps.2017.26.20>.
12. The improvement of method for the multi-criteria evaluation of the effectiveness of the control of the structure and parameters of interference protection of special-purpose radio communication systems / A. Minochkin, A. Shyshatskyi, V. Hasan, A. Hasan, A. Opalak, A. Hlushko, O. Demchenko, A. Lyashenko, O. Havryliuk, S. Ostapenko // Technology Audit and Production Reserves. – 2021. – Vol. 4, no. 2(60). – Pp. 22-27. – Mode of access: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.235465>.
13. Calculation of loads on carrying structures of articulated circular-tube wagons equipped with new

- draft gear concepts / Alyona Lovska, Oleksij Fomin, Pavel Kučera, Václav Píštěk // Applied Science. – 2020. – Vol. 10, 7441. – Pp. 1-11. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/app10217441>.
14. Rationalization of cross-sections of the composite reinforced concrete span structure of bridges with a monolithic reinforced concrete roadway slab / G.L. Vatulia, O.V. Lobiak, S.V. Deryzemlia, M.A. Verevicheva, Ye.F. Orel // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 664, 012014. – Pp. 1-9. – Mode of access: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/664/1/012014>.
 15. Vatulia G. Optimization of the truss beam. Verification of the calculation results / G. Vatulia, S. Komagorova, M. Pavliuchenkov // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 230, 02037. – Pp. 1-8. – Mode of access: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823002037>.
 16. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). – Введ. 2015-07-01. – Київ, 2015. – 162 с.
 17. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. – Введ. 2016-07-01. – М. : Стандартинформ, 2016. – 54 с.

References:

1. Jan Zamecnik, Juraj Jagelcak. Evaluation of wagon impact tests by various measuring equipment and influence of impacts on cargo stability. *Communications*, 2015, no. 4, pp. 21-27. **doi: 10.26552/com.C.2015.4.21-27**.
2. Chen Chao, Han Mei, Han Yanhui. Study of Railway Freight Vehicle Body's Dynamic Model Based on Goods Loading Technical Standards. *Procedia Engineering*, 2012, no. 29, pp. 3572-3577. **doi: 10.1016/j.proeng.2012.01.533**.
3. M. Płaczek, A. Wróbel, A. Buchacz. A concept of technology for freight wagons modernization. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2016, no. 161(2016), pp. 1-12. **doi:10.1088/1757-899X/161/1/012107**.
4. Atamanchuk N.A., Cyganskaya L.V. Napravleniya sovershenstvovaniya konstrukcij vagonov-cistern dlya perevozki nefteproduktov [Directions for improving the design of tank cars for the transportation of petroleum products]. *Transport Rossijskoj Federacii – Transport of the Russian Federation*, 2013, №3(46), pp. 14-17. (Rus.)
5. Soberzhanskij A.N., Cyganskaya L.V. Sovershenstvovanie konstrukcij vagonov-cistern [Improving the designs of tank cars]. *Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zalizničnogo transportu im. akademika V. Lazaryana – Bulletin of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 2010, vol. 35, pp. 25-28. (Rus.)
6. Shi H., Wang L., Nicolsen B., A Shabana A. Integration of geometry and analysis for the study of liquid sloshing in railroad vehicle dynamics. *Proc IMechE, Part K: J Multi-body Dynamics*, 2017, vol. 231, iss. 4, pp. 608-629. **doi: 10.1177/1464419317696418**.
7. Fomin O., Lovska A., Medvediev I., Shatkovska H. Establishing patterns in the dynamic loading on the body of a semi-wagon with an elastic middle part of the girder beam. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, № 5/7(107), pp. 30-37. **doi: 10.15587/1729-4061.2020.211936**.
8. Panchenko S., Fomin O., Vatulia G., Ustenko O., Lovska A. Determining the load on the long-based structure of the platform car with elastic elements in longitudinal beams. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, №1/7 (109), pp. 6-13. **doi: 10.15587/1729-4061.2021.224638**.
9. Domin Yu. V., Chernyak G. Yu. *Osnovi dinamiki vagoniv* [Fundamentals of Carriage Dynamics]. Kyiv, KUETT Publ., 2003. 269 p. (Ukr.)
10. Fomin O., Lovska A. 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, no. 7 (108), pp. 21-29. **doi: 10.15587/1729-4061.2020.217162**
11. Romanenko I.O., Shyshatskyi A.V., Zhyvotovskyyi R.M., Petruk S.M. The concept of the organization of interaction of elements of military radio communication systems. *Nauka i tekhnika*

- Povitrianih Sil Zbroinikh Sil Ukraini – Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*, 2017, no. 1, pp. 97-100. doi: 10.30748/nitps.2017.26.20.
12. Minochkin A., Shyshatskyi A., Hasan V., Hasan A., Opalak A., Hlushko A., Demchenko O., Lyashenko A., Havryliuk O., Ostapenko S. The improvement of method for the multi-criteria evaluation of the effectiveness of the control of the structure and parameters of interference protection of special-purpose radio communication systems. *Technology Audit and Production Reserves*, 2021, vol. 4, no. 2(60), pp. 22-27. doi: 10.15587/2706-5448.2021.235465.
 13. Lovska A., Fomin O., Kučera P., Pištěk V. Calculation of loads on carrying structures of articulated circular-tube wagons equipped with new draft gear concepts. *Applied Science*, 2020, vol. 10, 7441, pp. 1-11. doi: 10.3390/app10217441.
 14. Vatulia G.L., Lobiak O.V., Deryzemlia S.V., Verevicheva M.A., Orel Ye.F. Rationalization of cross-sections of the composite reinforced concrete span structure of bridges with a monolithic reinforced concrete roadway slab. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 664, 012014, pp. 1-9. doi: 10.1088/1757-899X/664/1/012014.
 15. Vatulia G., Komagorova S., Pavliuchenkov M. Optimization of the truss beam. Verification of the calculation results. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 230, 02037, pp. 1-8. doi: 10.1051/mateconf/201823002037.
 16. DSTU 7598:2014. *Vagoni vantazhni. Zagalni vimogi do rozrahunkiv ta proektuvannya novih i modernizovanih vagoniv kolii 1520 mm (nesamohidnih)* [State standart 7598: 2014. Freight cars. Zagalni vimogi do rozrahunkiv ta proektuvannya new and modernizovanih vagoniv kolii 1520 mm (nesamohidnih)]. Kyiv, 2015. 162 p. (Ukr.)
 17. GOST 33211-2014. *Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam* [State standart 33211-2014. Freight cars. Requirements for durability and dynamic qualities]. Moskva: Standartinform, 2016. 54 p. (Rus.)

Рецензент: С.Ю. Сапронова
д-р техн. наук, проф., ДУІТ

Стаття надійшла 13.01.2022

УДК 629.463.001.63

doi: 10.32782/2225-6733.44.2022.10

© Фомін О.В.¹, Ловська А.О.², Сова С.С.³, Литвиненко А.С.⁴

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ НЕСУЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ ВАГОНА-ХОПЕРА

В статті наведені результати комп'ютерного моделювання температурної навантаженості несучої конструкції вагона-хопера. Для цього створено просторову модель несучої конструкції вагона-хопера в програмному комплексі SolidWorks. В якості прототипу обраний вагон-хопер моделі 20-9749, побудови ДП "Укрспецвагон" та призначений для перевезення окатишів та гарячого агломерату. Розрахунок на міцність несучої конструкції вагона-хопера проведений за методом скінчених елементів, який реалізовано в програмному комплексі CosmosWorks. При скла-

¹ д-р техн. наук, професор, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0003-2387-9946, fomin1985@ukr.net

² д-р техн. наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, ORCID: 0000-0002-8604-1764, alyonaLovskaya.vagons@gmail.com

³ аспірант, Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, м. Северодонецьк, ORCID: 0000-0002-9810-8957, gorbunov0255@gmail.com

⁴ аспірант, Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, м. Северодонецьк, ORCID: 0000-0002-5182-9607, andrijlitvinenko7@gmail.com