

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.463.66:519.87

О. В. ФОМІН¹, А. О. ЛОВСЬКА^{2*}, А. М. ФОМІНА³, С. С. СОВА⁴

¹Каф. «Вагони та вагонне господарство», Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, Київ, Україна, 04071, тел. +38 (044) 591 51 26, ел. пошта fomin1985@ukr.net, ORCID 0000-0003-2387-9946

^{2*}Каф. «Інженерія вагонів та якості продукції», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Феєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта alyonalovskaya.vagons@gmail.com, ORCID 0000-0002-8604-1764

³Каф. «Залізничний, автомобільний транспорт та підйомно-транспортні машини», Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, пр. Центральний, 59-а, Северодонецьк, Україна, 93400, тел. +38 (06452) 403 42, ел. пошта anyta220885@gmail.com, ORCID 0000-0002-9810-8997

⁴Каф. «Залізничний, автомобільний транспорт та підйомно-транспортні машини», Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, пр. Центральний, 59-а, Северодонецьк, Україна, 93400, тел. +38 (06452) 403 42, ел. пошта gorbunov0255@gmail.com, ORCID 0000-0003-3380-7604

Дослідження навантаження несучої конструкції вагона-хопера з дахом із композитного матеріалу

Мета. У роботі передбачено дослідити навантаження несучої конструкції вагона-хопера з дахом із композитного матеріалу. Це дозволить зменшити тару вагона-хопера та сприятиме збільшенню його вантажопідйомності. **Методика.** Дослідження проведено на прикладі вагона-хопера для перевезення зерна моделі 19–6869 виробництва ДМЗ «Карпати». Важливо, що використання композитного матеріалу сприяє зменшенню маси даху майже на 40 % порівняно з металевою конструкцією. Тому проведено математичне моделювання динамічного навантаження вагона-хопера з дахом із композитного матеріалу. Розв’язок диференціальних рівнянь здійснено за методом Рунге–Кутти в програмному комплексі MathCad. Початкові умови взято рівними нулю. Для проведення розрахунків узято параметри ресорного підвішування візків моделі 18–100. Отримані результати розрахунків використано під час визначення основних показників міцності даху. Просторову модель даху вагона-хопера створено в середовищі програмного комплексу SolidWorks. Розрахунок здійснено за методом скінченних елементів, який реалізовано в програмному комплексі SolidWorks Simulation (CosmosWorks). Для побудови скінченно-елементної моделі даху вагона-хопера використано ізопараметричні тетраедри. Оптимальну кількість елементів моделі визначено за графоаналітичним методом. **Результати.** Отримано основні показники динаміки несучої конструкції вагона-хопера з дахом із композиту. Прискорення кузова в центрі мас склало 5,0 м/с². Коефіцієнт вертикальної динаміки дорівнює 0,67. Установлено, що максимальні еквівалентні напруження в даху за всіх розглянутих схем навантаження не перевищують допустимих значень, тобто міцність даху забезпечується. **Наукова новизна.** Проведено математичне моделювання динамічного навантаження несучої конструкції вагона-хопера з дахом із композиту. Визначено уточнені величини прискорень як складові динамічного навантаження, що діють на нього в експлуатації, а також коефіцієнт вертикальної динаміки. Установлено показники міцності даху з композиту за основних експлуатаційних режимів навантаження. **Практична значимість.** Проведені дослідження сприятимуть проектуванню інноваційних конструкцій рухомого складу, а також підвищенню ефективності його експлуатації.

Ключові слова: транспортна механіка; вагон-хопер; несуча конструкція; дах із композиту; динамічне навантаження; міцність

Вступ

Перспективи розвитку залізничної галузі зумовлюють необхідність упровадження в експлуатацію рухомого складу з поліпшеними техніко-економічними показниками. Одним із провідних напрямів створення сучасного рухомого складу є врахування принципів мультима-

теріальності на стадії проектування та виготовлення.

В останні роки в машинобудуванні все частіше застосовують композитні матеріали, які добре зарекомендували себе не тільки з точки зору міцнісних якостей. Це сприяє зменшенню тари транспортних засобів, поліпшує їх дина-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

мічні та антикорозійні якості, підвищує строк служби тощо.

Тому виникає необхідність проведення відповідних досліджень у цьому напрямі з метою обґрунтування створення інноваційних конкурентоспроможних конструкцій рухомого складу широкої колії.

У роботі [6] розглянуто перспективи використання композитних матеріалів у вантажному вагонобудуванні, наведено результати моделювання міцності кришки люка з композитного матеріалу.

Аналіз використання композитних матеріалів у конструкціях вагонів розглянуто в публікації [1]. Визначено основні напрями створення нових конструкцій вагонів із використанням композитних матеріалів. Проте в роботі відсутні приклади застосування цього матеріалу в несучих конструкціях вагонів.

У роботі [15] висвітлено особливості розробки нових полімерних композитних матеріалів для настилу підлоги залізничних вагонів. Наведено перспективи застосування цього матеріалу в пасажирському вагонобудуванні. Аналіз фізико-механічних та ізоляційних властивостей композитних матеріалів, армованих вуглецевим волокном, для підлоги вагонів проведено в роботі [11]. Обґрунтовано доцільність застосування цього матеріалу у вагонобудуванні. Однак у вказаних роботах не приділено уваги питанням визначення основних показників міцності несучих конструкцій вагонів із композитними складовими.

У роботі [13] наведено особливості застосування композитних панелей під час модернізації вантажних вагонів вузької колії. Зазначено переваги запропонованої модернізації та перспективи її подальшого розвитку. Водночас аналізу напруженого стану несучої конструкції вантажного вагона з композитними складовими в роботі не проведено.

Результати розрахунку на міцність несучої конструкції вантажного вагона з композитними стінами наведено в роботі [12]. Для проведення розрахунків узято нормативні значення навантажень, які діють на вагон в експлуатації. Тобто автори не визначали динамічне навантаження

вагона з урахуванням запропонованого вдосконалення.

У роботі [14] досліджено міцність несучої конструкції вагона з композитного матеріалу, армованого волокном, у разі маневрового співударяння. Наведено висновки щодо отриманого напруженого стану несучої конструкції вагона під час ударних навантажень. Однак динамічне навантаження несучої конструкції вагона з композитними складовими авторами не визначали.

Аналіз можливості модернізації вантажного вагона шляхом використання композитних панелей у його складових подано в публікації [10]. Досліджено використання композиту у дверях критого вагона, обґрунтовано доцільність упровадження модернізації. Разом із тим доцільність застосування композитних матеріалів в інших складових вантажних вагонів потребує подальшого дослідження.

Мета

Автори вбачають основну мету статті в дослідженні навантаження несучої конструкції вагона-хопера з дахом із композитного матеріалу. Це дозволить зменшити тару вагона-хопера та сприятиме збільшенню його вантажопідйомності. Для досягнення зазначеної мети передбачено такі завдання:

- провести математичне моделювання динамічного навантаження несучої конструкції вагона-хопера з дахом із композитного матеріалу;
- провести розрахунок на міцність даху за основних режимів навантаження.

Методика

Дослідження проведено на прикладі вагона-хопера для перевезення зерна моделі 19–6869 виробництва ДМЗ «Карпати» (рис. 1).

Дах вагона складається з обшивки, виконаної з листового прокату товщиною 3 мм [2]. Матеріал даху – сталь марки 09Г2С. Дах приварений до внутрішніх діафрагм кузова, торцевих стін та через верхні об'язування до бокових стін.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ



Рис. 1. Вагон-хопер моделі 19–6869

Fig. 1. Hopper car model 19–6869

У середній частині даху вздовж поздовжньої осі вагона розміщені п'ять завантажувальних люків. Дах обладнаний трапами, які призначені для безпечної роботи працівників.

Для зменшення навантаження несучої конструкції вагона-хопера пропонуємо використати дах із композитною обшивкою. Використання композитного матеріалу сприяє зменшенню маси даху майже на 40 % порівнянно з металевою конструкцією. До того ж пропонуємо використати композиту із титановою матрицею, який має щільність 4180 кг/м^3 та межу міцності вздовж волокон $100 \dots 1300 \text{ МПа}$ залежно від

виду волокон та їх кількості, а в поперечному напрямку – 650 МПа .

Для визначення вертикального навантаження несучої конструкції вагона-хопера з дахом із композитного матеріалу проведено математичне моделювання з використанням математичної моделі, наведеної в [5]. У рамках дослідження модель доопрацьовано з урахуванням додаткового ступеня вільності – у поздовжній площині [9].

Розрахункова схема вагона-хопера наведена на рис. 2.

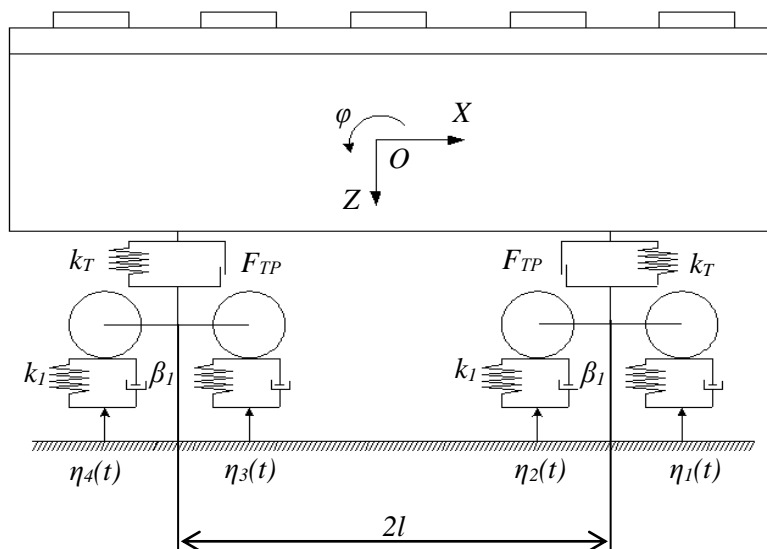


Рис. 2. Розрахункова схема вагона-хопера

Fig. 2. Design diagram of a hopper car

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Під час проведення розрахунків узято до уваги, що вагон переміщується в порожньому стані по стиковій нерівності. При цьому колія має пружно-в'язкі властивості.

Рівняння руху вагона-хопера мають вигляд:

$$\left(M_1 + (M_3 + M_5) + \frac{nI}{r^2} \right) \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_1 + M_1 \cdot h \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_3 = P_l; \quad (1)$$

$$M_1 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_1 + C_{1,1} \cdot q_1 + C_{1,3} \cdot q_3 + C_{1,5} \cdot q_5 = -F_{TP} \cdot \left(\text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_1 \right) + \text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_2 \right) \right); \quad (2)$$

$$M_2 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_2 + C_{2,2} \cdot q_2 + C_{2,3} \cdot q_3 + C_{2,5} \cdot q_5 = F_{TP} \cdot l \cdot \left(\text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_1 \right) + \text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_2 \right) \right); \quad (3)$$

$$M_3 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_3 = H_1; \quad (4)$$

$$M_3 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_3 + C_{3,1} \cdot q_1 + C_{3,2} \cdot q_2 + C_{3,3} \cdot q_3 + B_{3,3} \cdot \frac{d}{dt} q_3 = F_{TP} \cdot \text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_1 \right) + k_1 (\eta_1 + \eta_2) + \beta_1 \left(\frac{d}{dt} \eta_1 + \frac{d}{dt} \eta_2 \right); \quad (5)$$

$$M_4 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_4 + C_{4,4} \cdot q_4 + B_{4,4} \cdot \frac{d}{dt} q_4 = -k_1 (\eta_1 - \eta_2) - \beta_1 \cdot a \cdot \left(\frac{d}{dt} \eta_1 - \frac{d}{dt} \eta_2 \right); \quad (6)$$

$$M_5 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_3 = H_2; \quad (7)$$

$$M_5 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_5 + C_{5,1} \cdot q_1 + C_{5,2} \cdot q_2 + C_{5,5} \cdot q_5 + B_{5,5} \cdot \frac{d}{dt} q_5 = F_{TP} \cdot \text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_2 \right) + k_1 (\eta_3 + \eta_4) + \beta_1 \left(\frac{d}{dt} \eta_3 + \frac{d}{dt} \eta_4 \right); \quad (8)$$

$$M_6 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_6 + C_{6,6} \cdot q_6 + B_{6,6} \cdot \frac{d}{dt} q_6 = -k_1 \cdot a \cdot (\eta_3 - \eta_4) - \beta_1 \cdot a \cdot \left(\frac{d}{dt} \eta_3 - \frac{d}{dt} \eta_4 \right). \quad (9)$$

де M_1, M_2 – маса та момент інерції несучої конструкції вагона-хопера; M_3, M_4 – маса та момент інерції першого візка за ходом руху; M_5, M_6 – маса та момент інерції другого візка за ходом руху; C_{ij} – характеристики пружності елементів коливальної системи, які визначають значення коефіцієнтів жорсткості пружин k_b ; B_{ij} – функція розсіювання; a – половина бази візка; k – жорсткість колії; β – коефіцієнт демпфування; $\eta_i(x)$ – функція, яка описує нерівність колії; δ_i – деформація пружних елементів ресорного підвішування; F_{TP} – абсолютна сила тертя в ре-

сорному комплекті; H_1, H_2 – величини горизонтальних сил, прикладених до п'ятників першого та другого візків; h – висота центра мас несучої конструкції вагона-хопера.

Результати

Розв'язок диференціальних рівнянь проведено за методом Рунге–Кутта в програмному комплексі MathCad.

Початкові умови взято рівними нулю [7, 8]. Під час проведення розрахунків використано

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

параметри ресорного підвішування візка моделі 18–100.

Результати розрахунків наведено на рис. 3, 4.

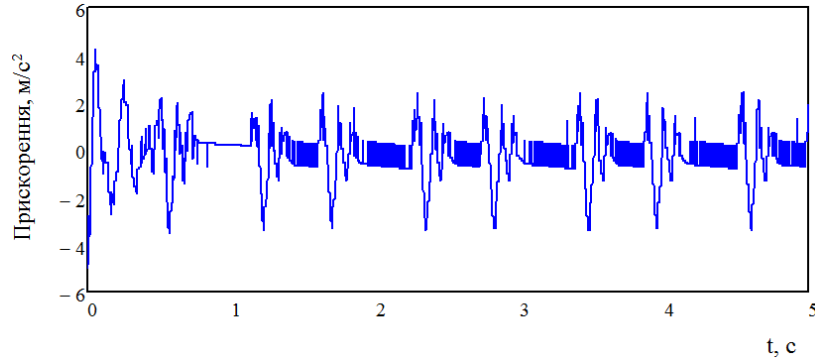


Рис. 3. Прискорення несучої конструкції вагона-хопера в центрі мас

Fig. 3. Load-bearing structure acceleration of the hopper car in the mass center

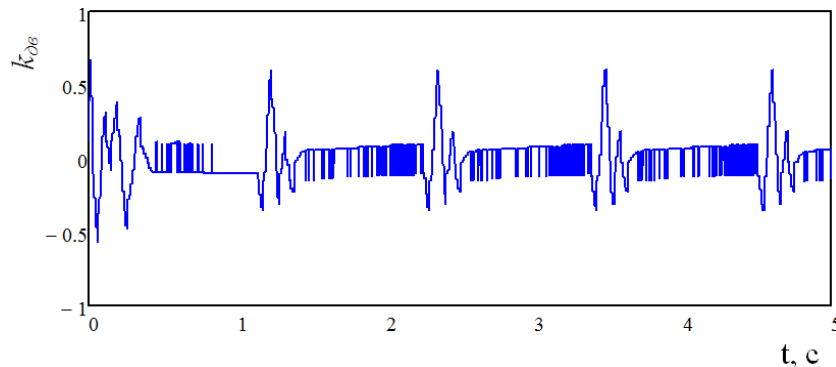


Рис. 4. Коефіцієнт вертикальної динаміки несучої конструкції вагона-хопера

Fig. 4. Vertical dynamics coefficient of the load-bearing structure of the hopper car

Прискорення несучої конструкції вагона-хопера в центрі мас склало $5,0 \text{ м/с}^2$, що на 6 % вище ніж у типовій конструкції. Коефіцієнт вертикальної динаміки дорівнює 0,67 та є вищим на 4,5 % ніж у конструкції вагона-хопера з металевим дахом. Отримані показники динаміки вищі за ті, що виникають у несучій конструкції вагона-прототипу, оскільки його тара зменшилася. Водночас це дозволяє збільшити ко-

рисний об'єм кузова вагона-хопера, що сприятиме і підвищенню ефективності його експлуатації.

Отримані результати враховано під час визначення основних показників міцності даху. Просторову модель даху вагона-хопера створено в програмному комплексі SolidWorks (рис. 5).

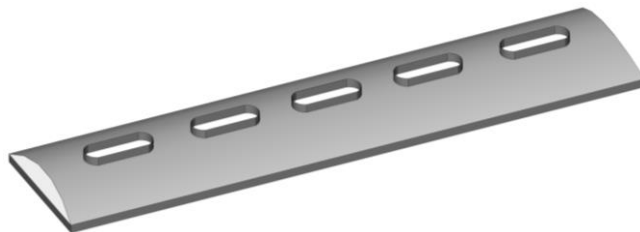


Рис. 5. Просторова модель даху вагона-хопера

Fig. 5. Spatial model of the hopper car roof

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Розрахунок проведено за методом скінченних елементів у програмному комплексі SolidWorks Simulation (CosmosWorks).

Під час створення скінченно-елементної моделі враховано ізопараметричні тетраедри. Оптимальну кількість елементів моделі визначено за графоаналітичним методом. Кількість вузлів моделі склала 85 545, елементів – 253 872. Максимальний розмір елемента становить 40 мм, а мінімальний – 12 мм. Відсоток елементів зі співвідношенням боків більше десяти – 60,6. Мінімальна кількість елементів у колі склала 9, співвідношення збільшення розміру елементів – 1,6.

Модель було закріплено за периметром даху в зоні взаємодії з верхнім обв'язуванням кузова вагона.

Розрахунок проведено для I та III режиму навантаження даху. Однак при цьому не проведено розрахунку на міцність у разі дії двох сил по 1 кН кожна, розподілених на майданчику 0,25 x 0,25 м та доданих на відстані 0,5 м одна від одної будь-якій частині даху, оскільки дах обладнано трапом для працівників.

На рис. 6. наведено напружений стан даху під час дії на нього вертикального динамічного навантаження. При цьому максимальні еквівалентні напруження виникають у зонах розміщення завантажувальних люків та складають близько 70 МПа (рис. 3), тобто не перевищують допустимі [3, 4].

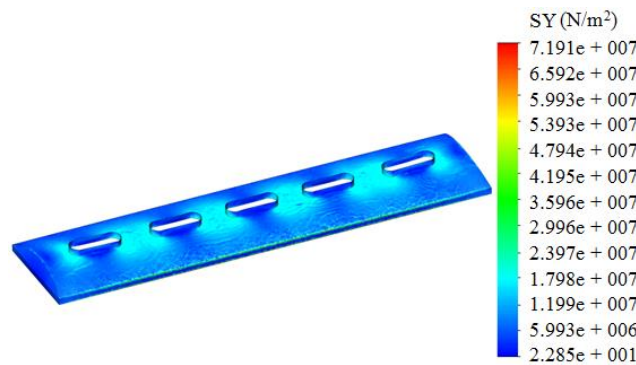


Рис. 6. Напружений стан даху

Fig. 6. Tense state of the roof

За інших розрахункових схем міцність даху також забезпечується експлуатації.

Наукова новизна та практична значимість

Проведено математичне моделювання динамічного навантаження несучої конструкції вагона-хопера з дахом із композиту. Визначено уточнені величини прискорень як складові динамічного навантаження, що діють на нього в експлуатації, а також коефіцієнт вертикальної динаміки.

Визначено основні показники міцності даху з композиту за основних експлуатаційних режимів навантаження.

Проведені дослідження сприятимуть проєктуванню інноваційних конструкцій рухомого складу, а також підвищенню ефективності його

Висновки

1. Проведено математичне моделювання динамічного навантаження несучої конструкції вагона-хопера з дахом із композитного матеріалу.

Прискорення несучої конструкції вагона-хопера в центрі мас склало 5,0 м/с², що на 6 % вище ніж у типовій конструкції. Коефіцієнт вертикальної динаміки дорівнює 0,67, що вище на 4,5 % ніж у конструкції вагона-хопера з металевим дахом.

Унаслідок зменшення тари отримані показники динаміки вищі за ті, що виникають у несучій конструкції вагона-прототипу. А це сприяє збільшенню корисного об'єму кузова вагона-хопера підвищенню ефективності його експлуатації.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

2. Проведено розрахунок на міцність даху за основних режимів навантаження. Установлено, що максимальні еквівалентні напруження в даху за всіх розглянутих схем навантаження не перевищують допустимих значень, тобто міцність даху забезпечується.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бектуров К. Б., Зарипов Р. Ю., Медведев А., Каербекоев Д. Перспективы применения композиционных материалов в грузовом вагоностроении. *Наука и Техника Казахстана*. 2017. № 1–2. С. 25–33.
2. Вагон-хopper бункерного типа для перевозки зерна. Модель 19-6869. *Руководство по эксплуатации*. ОАО “ЗМК”. Москва, 2015. 75 с.
3. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. [Действителен от 2016-07-01]. Москва, 2016. 54 с.
4. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). [Чинний від 2015-07-01]. Київ, 2015. 250 с.
5. Дьомін Ю. В., Черняк Г. Ю. Основы динамики вагонів : навч. посіб. Київ : КУЕГТ, 2003. 269 с.
6. Каракаев А. К., Зарипов Р. Ю. Композитные материалы в грузовом вагоностроении. *Наука и Техника Казахстана*. 2016. № 1–2. С. 39–47.
7. Fomin O., Gerlici J., Gorbunov M., Vatulia G., Lovska A., Kravchenko K. Research into the Strength of an Open Wagon with Double Sidewalls Filled with Aluminium Foam. *Materials*. 2021. Vol. 14. Iss. 12. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14123420>
8. Fomin O., Gorbunov M., Lovska A., Gerlici J., Kravchenko K. Dynamics and strength of circular tube open wagons with aluminum foam filled center sills. *Materials*. 2021. Vol. 14. Iss. 8. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14081915>
9. 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. Iss. 7 (108). P. 21–29. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217162>
10. Kosobudzki M., Jamroziak K., Bocian M., Kotowski P., Zajac P. The analysis of structure of the repaired freight wagon. *AIP Conference Proceedings*. 2018. Vol. 2029. Iss. 1. P. 020030-0–020030-6. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5066492>
11. Liu Y., Guan M. Selected physical, mechanical, and insulation properties of carbon fiber fabric-reinforced composite plywood for carriage floors. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2019. Vol. 77. P. 995–1007. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01467-y>
12. Patrascu A. I., Hadar A., Pastrama S. D. Structural Analysis of a Freight Wagon with Composite Walls. *Materiale plastic*. 2019. Vol. 57. Iss. 2. P. 140–151. DOI: <https://doi.org/10.37358/mp.20.2.5360>
13. Płaczek M., Wróbel A., Olesiejuk M. Modelling and arrangement of composite panels in modernized freight cars. *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 112. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711206022>
14. Street G. E., Mistry P. J., Johnson M. S. Impact Resistance of Fibre Reinforced Composite Railway Freight Tank Wagons. *Journal of Composites Science*. 2021. Vol. 5. Iss. 6. P. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcs5060152>
15. Zaynitdinov O. I., Rahimov R. V., Waail M. L., Ruzmetov Y. O. Development of new polymer composite materials for the flooring of rail carriage. *International Journal of Engineering & Technology*. 2020. Vol. 9. Iss. 2. P. 378–381. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v9i2.30519>

O. V. FOMIN¹, A. O. LOVSKA^{2*}, A. M. FOMINA³, S. S. SOVA⁴

¹Dep. «Cars and Carriage Facilities», State University of Infrastructure and Technologies, Kyrylivska St., 9, Kyiv, Ukraine, 03049, tel. +380 (44) 591 51 26, e-mail fomin1985@ukr.net, ORCID 0000-0003-2387-9946

^{2*}Dep. «Wagon Engineering and Product Quality», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61500, tel. +38 (057) 730 10 35, e-mail alyonalovskaya.vagons@gmail.com, ORCID 0000-0002-8604-1764

³Dep. «Railway, Road Transport and Handling Machines», Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Tsentralnyi Ave., 59a, Severodonetsk, Ukraine, 93400, tel. (06452) 403 42, e-mail anyta220885@gmail.com, ORCID 0000-0002-9810-8997

⁴Dep. «Railway, Road Transport and Handling Machines», Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Tsentralnyi Ave., 59a, Severodonetsk, Ukraine, 93400, tel. (06452) 403 42, e-mail gorbunov0255@gmail.com, ORCID 0000-0003-3380-7604

Loading Research of Load-Bearing Structure of Hopper Car with Composite Roof

Purpose. The work is aimed to investigate the loading of load-bearing structure with composite material roof. This will allow reducing the dead weight of the hopper car and will contribute to the possibility of increasing its carrying capacity. **Methodology.** Investigations were performed using the example of hopper car for grain transporting, model 19-6869, manufactured by Karpaty Experimental Mechanical Plant. It is important to say that the use of composite material reduces the roof weight by up to 40% in comparison with the metal design. That is why mathematical modeling of dynamic loading of the hopper car with composite roof was carried out. Differential equations were solved by Runge-Kutta method in MathCad software package. Initial conditions were assumed to be zero. During the calculations, the spring suspension parameters of the 18-100 bogie models were taken into account. The obtained results of calculations were used when determining the main indicators of the roof strength. The spatial model of the hopper car roof was created in SolidWorks software complex. Calculation was performed by the finite element method, which is implemented in the SolidWorks Simulation (CosmosWorks) software complex. When constructing the finite element model of the hopper car, the isoparametric tetrahedra were used. The optimum number of the model elements was determined by the grapho-analytical method. **Findings.** The basic indices of load-bearing structure dynamics of hopper car with composite roof were obtained. Acceleration of the body in the mass center was $5,0 \text{ m/s}^2$. Coefficient of vertical dynamics is equal to 0.67. It was found that the maximum equivalent stresses in the roof for all the considered loading schemes do not exceed the admissible values, that is, the roof strength is ensured. **Originality.** The mathematical modeling of dynamic loading of the load-bearing structure of the hopper car with composite roof was carried out. The acceleration values as the components of dynamic loading acting on it during operation as well as vertical dynamics coefficient were determined. The strength indicators of the composite roof under the main operational loading modes have been found out. **Practical value.** The conducted research will contribute to the creation of guidelines for the design of innovative structures of the rolling stock, as well as increase the efficiency of its operation.

Keywords: transport mechanics; hopper car; load-bearing structure; composite roof; dynamic loading, strength

REFERENCES

1. Bekturov, K. B., Zaripov, R. Yu., Medvedev, A., & Kaerbekov, D. (2017). Perspektivy primeneniya kompozitsionnykh materialov v gruzovom vagonostroenii. *Science and Technology of Kazakhstan*, 1-2, 25-33. (in Russian)
2. *Vagon-khopper bunkernogo tipa dlya perevozki zerna. Model 19-6869. Rukovodstvo po ekspluatatsii.* (2015). OAO «ZMK». Moscow. (in Russian)
3. *Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam, 54 GOST 33211-2014* (2016). (in Russian)
4. *Vagoni vantazhni. Zagalni vimogi do rozrahunkiv ta proektuvannya novih i modernizovanih vagoniv koliyi 1520 mm (nasamohidnih), 250 DSTU 7598:2014* (2015). (in Ukrainian)
5. Domin, Yu. V., & Chernyak, G. Yu. (2003). *Osnovi dinamiki vagoniv: navch. posib.* Kyiv: KUETT. (in Ukrainian)
6. Karakaev, A. K., & Zaripov, R. Yu. (2016). Kompozitnye materialy v gruzovom vagonostroenii. *Science and Technology of Kazakhstan*, 1-2, 39-47. (in Russian)
7. Fomin, O., Gerlici, J., Gorbunov, M., Vatulia, G., Lovska, A., & Kravchenko, K. (2021). Research into the Strength of an Open Wagon with Double Sidewalls Filled with Aluminium Foam. *Materials*, 14(12), 1-10. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14123420> (in English)
8. Fomin, O., Gorbunov, M., Lovska, A., Gerlici, J., & Kravchenko, K. (2021). Dynamics and strength of circular tube open wagons with aluminum foam filled center sills. *Materials*, 14(8), 1-12. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14081915> (in English)
9. Fomin, O., & Lovska, A. (2020). Establishing patterns in determining the dynamics and strength of a covered freight car, which exhausted its resource. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(7(108)), 21–29. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217162> (in English)
10. Kosobudzki, M., Jamroziak, K., Bocian, M., Kotowski, P., & Zajac, P. (2018). The analysis of structure of the repaired freight wagon. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2029, Iss. 1, pp. 020030-0–020030-6). DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5066492> (in English)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

11. Liu, Y., & Guan, M. (2019). Selected physical, mechanical, and insulation properties of carbon fiber fabric-reinforced composite plywood for carriage floors. *European Journal of Wood and Wood Products*, 77, 995-1007. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01467-y> (in English)
12. Patrascu, A. I., Hadar, A., & Pastrama, S. D. (2019). Structural Analysis of a Freight Wagon with Composite Walls. *Materiale plastic*, 57(2), 140-151. DOI: <https://doi.org/10.37358/mp.20.2.5360> (in English)
13. Płaczek, M., Wróbel, A., & Olesiejuk, M. (2017). Modelling and arrangement of composite panels in modernized freight cars. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 112, pp. 1-6). DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711206022> (in English)
14. Street, G. E., Mistry, P. J., & Johnson, M. S. (2021). Impact Resistance of Fibre Reinforced Composite Railway Freight Tank Wagons. *Journal of Composites Science*, 5(6), 1-22. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcs5060152> (in English)
15. Zaynitdinov, O. I., Rahimov, R. V., Waail, M. L., & Ruzmetov, Y. O. (2020). Development of new polymer composite materials for the flooring of rail carriage. *International Journal of Engineering & Technology*, 9(2), 378-381. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v9i2.30519> (in English)

Надійшла до редколегії: 16.11.2021

Прийнята до друку: 18.03.2022