

Фомін О. В., Ловська А. О., Сова С. С., Литвиненко А. С.

ВИЗНАЧЕННЯ НАВАНТАЖЕНОСТІ НЕСУЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ ВАГОНА-ХОПЕРА З ДВОТРУБНОЮ ХРЕБТОВОЮ БАЛКОЮ ТА КОМПОЗИТНИМИ СКЛАДОВИМИ

В статті запропоновано заходи щодо удосконалення несучої конструкції вагона-хопера для перевезення окатишів та гарячого агломерату. Дане удосконалення полягає у виготовленні хребтової балки з двох прямокутних труб, замкненого перерізу, а горбиля та об'язування верхнього – з композитного термостійкого матеріалу. Геометричні параметри хребтової балки визначені методом оптимізації за резервами міцності. Запропоноване удосконалення сприяє зменшенню тари несучої конструкції вагона-хопера на 2,7% у порівнянні з типовою конструкцією.

Для визначення динамічної навантаженості вагона-хопера з урахуванням запропонованих рішень проведено математичне моделювання. Враховано наявність трьох ступенів вільності вагона: повздовжні переміщення, які виникають при маневровому співударянні, галопування та підскакування. Розв'язок диференціальних рівнянь руху здійснений в програмному комплексі MathCad за методом Рунге-Кутта. Результати проведених розрахунків показали, що максимальні прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-хопера дорівнюють $37,6 \text{ м/с}^2$ (0,37g).

Отриману величину прискорення враховано при розрахунках на міцність несучої конструкції вагона-хопера. При цьому використано метод скінчених елементів, який реалізовано в програмному комплексі SolidWorks Simulation. При складанні розрахункової схеми враховано температурний вплив від перевозимого вантажу на внутрішні поверхні несучої конструкції вагона-хопера. Результати розрахунків встановили, що максимальні еквівалентні напруження зосереджені в зоні взаємодії хребтової балки зі шворневими та складають 329,6 МПа. Отримана величина напружень на 3,1% нижча ніж у типовій конструкції.

Проведені дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування сучасних конструкцій вантажних вагонів з покращеними техніко-економічними показниками.

Ключові слова: транспортна механіка, вагон-хопер, несуча конструкція, міцність, навантаженість кузова, температурний вплив.

Актуальність дослідження. Забезпечення конкурентоспроможності залізничного транспорту викликає необхідність оновлення вантажного рухомого складу. При створенні нових конструкцій вагонів необхідним є урахування заходів щодо покращення їх техніко-економічних показників. У зв'язку з цим актуальним постає питання впровадження нових рішень при проектуванні несучих конструкцій вантажних вагонів. Це сприятиме підвищенню ефективності їх використання шляхом скорочення витрат на утримання.

Постановка проблеми. Для перевезення насипних вантажів залізницею з можливістю використання гравітаційних властивостей при їх розвантаженні використовуються вагони-хопери. Особливістю таких вагонів є те, що торцеві стіни розміщуються під деяким ухилом. На даний час існує велика різноманітність за конструкційними особливостями та призначенням вагонів-хоперів.

Одним з найбільш навантажених типів вагонів-хоперів є ті, що призначені для перевезення окатишів та гарячого агломерату. Значних навантажень при експлуатаційних режимах випробовує несуча конструкція вагона-хопера. Внаслідок дії експлуатаційних навантажень на неї може мати місце поява таких пошкоджень як тріщини, деформації тощо. Така обставина зумовлює значну загрозу безпеці експлуатації вагона-хопера у складі поїзда. Тому для забезпечення міцності несучої конструкції вагона-хопера, безпеки руху, зменшення витрат на утримання, підвищення ефективності експлуатації важливим є впровадження заходів щодо удосконалення їх конструкцій.

Теоретичний аналіз дослідження. Особливості оптимізації несучих конструкцій вантажних вагонів розглянуті у публікації [1]. Розроблений алгоритм сумісної структурної та параметричної оптимізації бокової стіни та рами вагона. Однак питанню удосконалення несучої конструкції вагона-хопера для перевезення окатишів та гарячого агломерату з метою зменшення її навантаженості в даній роботі уваги не приділено.

У роботі [2] висвітлюються результати щодо удосконалення конструкції вагона-хопера. При оптимізації несучої конструкції вагона-хопера враховано досвід експлуатації окремих складових кузова з подальшою інтеграцією у нову конструкцію.

Удосконалення несучих конструкцій вагонів для зменшення їх навантаженості в експлуатації проводиться в роботі [3]. Зазначена мета досягається шляхом застосування в несучій конструкції вагона алюмінієвих панелей по типу "сандвіч". Наведено обґрунтування запропонованого удосконалення вагона. При цьому не приділяється уваги зменшенню навантаженості рами вагона.

Викликає цікавість робота [4], де висвітлено особливості уніфікованої концепції ударної міцності транспортних засобів. Несуча конструкція розглянута у вигляді жорсткої рамної, а задача оптимізації проводилася за критерієм мінімуму матеріалоемності. Однак авторами не враховувалися можливості зменшення навантаженості несучої конструкції транспортного засобу при його оптимізації.

В роботі [5] запропоновано заходи щодо модернізації кузовів вантажних вагонів з метою подовження строку їх експлуатації. Також у роботі запропоновано удосконалення системи діагностики технічного стану

модернізованих вагонів. Разом з цим запропонована модернізація не сприяє зменшенню навантаженості несучої конструкції вагона при експлуатаційних режимах.

Заходи щодо зменшення динамічної навантаженості та міцності несучих конструкцій вагонів запропоновані у роботах [6, 7]. Авторами пропонується використання податливих зв'язків в несучих конструкціях вагонів, а також в вузлах їх взаємодії з засобами комбінованих перевезень. При цьому питанню зменшення навантаженості несучої конструкції вагона-хопера уваги не приділялося.

Аналіз літературних джерел [1 – 7] дозволяє зробити висновок, що доцільним є проведення досліджень щодо удосконалення несучої конструкції вагона-хопера з метою зменшення навантаженості при експлуатаційних режимах.

Мета статті. Метою статті є висвітлення результатів визначення навантаженості несучої конструкції вагона-хопера з двотрубною хребтовою балкою та композитними складовими.

Задачі дослідження. Для досягнення поставленої мети визначені такі завдання:

- визначити динамічну навантаженість несучої конструкції вагона-хопера з урахуванням заходів щодо удосконалення;

- визначити основні показники міцності несучої конструкції вагона-хопера.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для забезпечення міцності несучої конструкції вагона-хопера при експлуатаційних навантаженнях запропоновано заходи щодо його удосконалення. Попередні розрахунки на міцність, проведені авторами статті показали, що одними з найбільш навантажених складових несучої конструкції вагона-хопера є хребтова балка, горбиля та обв'язування верхнє. З метою покращення їх міцності запропоновано виготовлення хребтової балки з двох прямокутних труб, замкненого перерізу (рис. 1), а горбиля та обв'язування верхнього – з композитного термостійкого матеріалу. Дослідження проведені стосовно вагона-хопера для перевезення окатишів та гарячого агломерату моделі 20-9749, побудови ДП "Укрспецвагон".

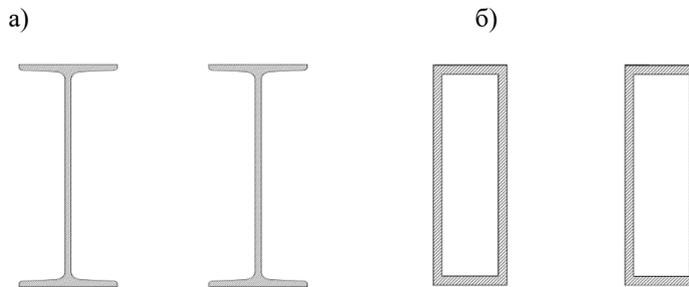


Рисунок 1 – Переріз хребтової балки вагона-хопера

а) типова конструкція; б) удосконалена конструкція

Геометричні параметри хребтової балки визначені методом оптимізації за резервами міцності [8, 9]. Запропоноване удосконалення сприяє зменшенню тари несучої конструкції вагона-хопера на 2,7% у порівнянні з типовою конструкцією. Просторову модель удосконаленої конструкції рами вагона-хопера наведено на рис. 2.

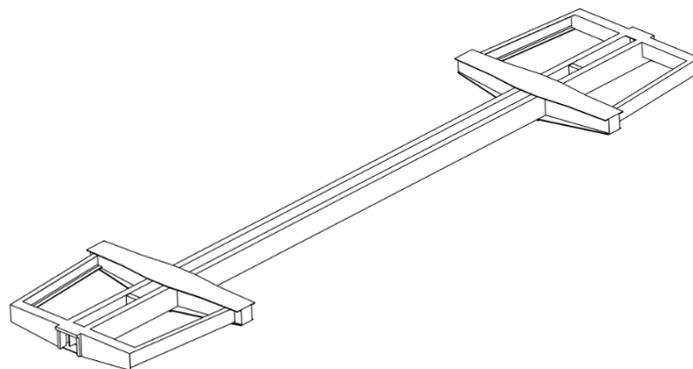


Рисунок 2 – Удосконалена конструкція рами вагона-хопера

З метою визначення динамічної навантаженості вагона-хопера з урахуванням запропонованих рішень проведено математичне моделювання. При цьому використано математичну модель, розроблену проф. Богомазом Г. І. [10]. В рамках даного дослідження модель адаптовано до визначення динамічної навантаженості вагона-хопера. Також в моделі враховано сили тертя, які виникають між п'ятниками кузова та підп'ятниками візків.

Розрахункову схему вагона-хопера наведено на рис. 3.

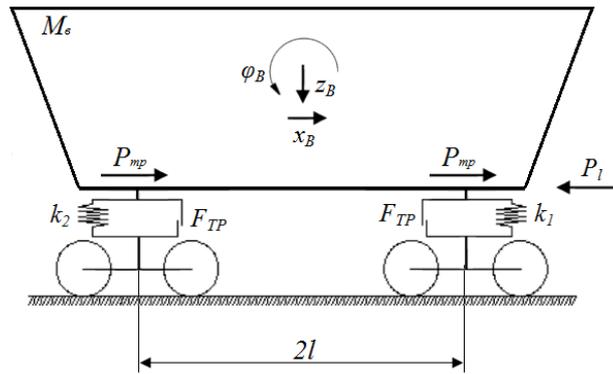


Рисунок 3 – Розрахункова схема вагона-хопера

Рівняння руху розрахункової моделі мають вигляд:

$$\begin{cases} M_{\text{оп}} \cdot x'' + (M_B \cdot h) \cdot \varphi'' = P_n - 2P_{\text{мп}}, \\ I_B \cdot \varphi'' + (M_B \cdot h) \cdot x'' - g \cdot \varphi \cdot (M_B \cdot h) = l \cdot F_{\text{тп}} \left(\text{sign}(z - l \cdot \varphi)' - \text{sign}(z + l \cdot \varphi)' \right) + \\ + l \left(k_1 \cdot (z - l \cdot \varphi) - k_2 \cdot (z + l \cdot \varphi)' \right), \\ M_B \cdot z'' = k_1 \cdot (z - l \cdot \varphi) + k_2 \cdot (z + l \cdot \varphi) - F_{\text{тп}} \left(\text{sign}(z - l \cdot \varphi)' - \text{sign}(z + l \cdot \varphi)' \right), \end{cases} \quad (1)$$

де $M_{\text{оп}}$ – маса брутто вагона-хопера;
 M_B – маса несучої конструкції вагона-хопера;
 I_B – момент інерції вагона-хопера;
 P_n – величина повздовжньої сили на задній упор автозчепу, яка прийнята рівною 3,5 МН [11, 12];
 $P_{\text{мп}}$ – сили тертя, які виникають між п'ятниками рами та підп'ятниками візків;
 l – половина бази вагона-хопера;
 $F_{\text{тп}}$ – значення сили сухого тертя у ресорному комплекті;
 k_1, k_2 – жорсткість пружин ресорного підвішування візків вагона-хопера;
 x, φ, z – координати, що відповідають, відповідно, повздовжньому, кутовому навколо поперечної осі та вертикальному переміщенню вагона-хопера.

Розв'язок системи диференціальних рівнянь руху (1) здійснений за методом Рунге-Кутта в програмному комплексі MathCad. Початкові переміщення та швидкості прийняті рівними нулю.

Результати проведених розрахунків показали, що максимальні прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-хопера дорівнюють $37,6 \text{ м/с}^2$ ($0,37g$). Отриману величину прискорення враховано при розрахунках на міцність несучої конструкції вагона-хопера. При цьому використано метод скінчених елементів, який реалізовано в програмному комплексі SolidWorks Simulation.

Оптимальна кількість елементів скінчено-елементної моделі несучої конструкції вагона-хопера визначена з використанням графоаналітичного методу [13, 14]. В якості скінчених елементів застосовані ізопараметричні тетраедри. Кількість вузлів сітки складала 57746, а елементів – 169187. При цьому максимальний розмір елемента дорівнює 100 мм, мінімальний – 20 мм. Кількість елементів в колі дорівнює 9. Співвідношення збільшення розміру елемента складало 1,7.

При складанні розрахункової схеми враховані такі навантаження: вертикальне статичне навантаження P_s^{cm} , тиск розпору насипного вантажу P_p , а також повздовжнє навантаження P_n , що діє на раму від автозчепного пристрою (рис. 4). До внутрішніх поверхонь кузова також прикладалося температурне навантаження, яке прийнято рівним 700°C .

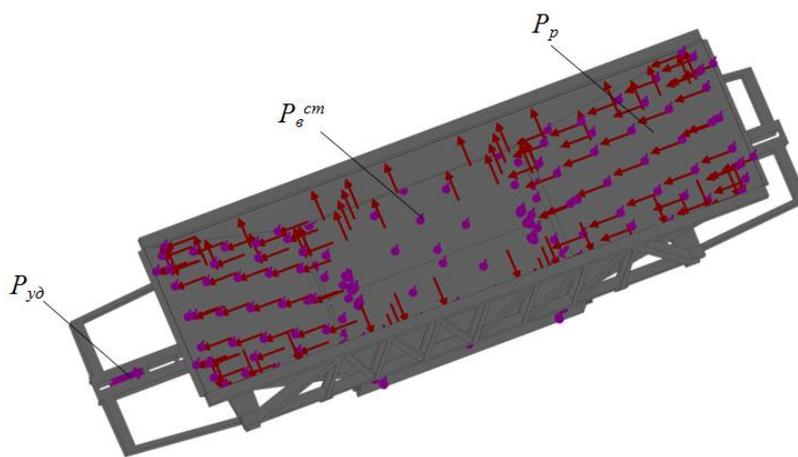


Рисунок 4 – Розрахункова схема несучої конструкції вагона-хопера

Закріплення моделі здійснювалося в зонах обпирання кузова на ходові частини. Матеріал несучої конструкції – сталь марки 09Г2С, а горбиля та верхнього обв'язування – композит з межею міцності 1500 МПа та щільністю 2200 кг/м³. Оскільки сталь є ізотропним матеріалом, а композит – анізотропним, то розрахунок здійснений за двома критеріями – Мізеса та максимальних нормальних напружень

Результати розрахунку наведені на рис. 5.

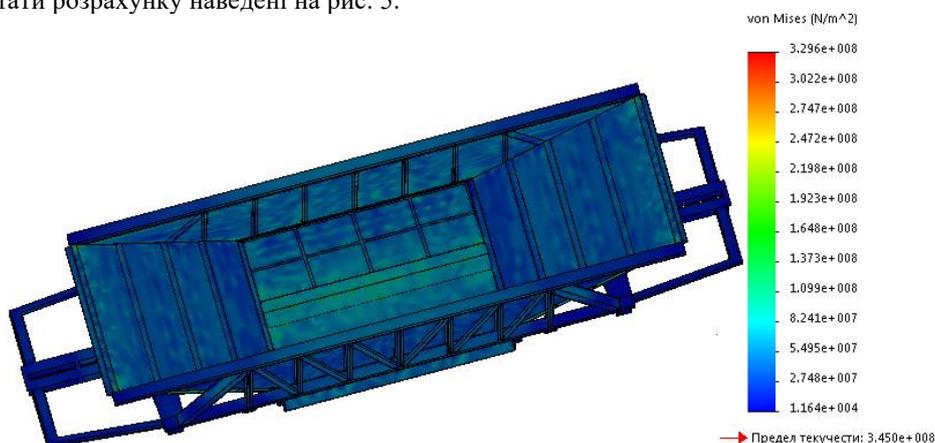


Рис. 5. Напружений стан несучої конструкції вагона-хопера

При цьому максимальні еквівалентні напруження зосереджені в зоні взаємодії хребтової балки зі шворневими та складають 329,6 МПа. Отримана величина напружень на 3,1% нижча ніж у типовій конструкції. В горбилі максимальні еквівалентні напруження склали 322,6 МПа, а в обв'язуванні верхньому 318,4 МПа, що нижче за допустимі значення [11, 12].

Висновки:

1. Визначено динамічну навантаженість несучої конструкції вагона-хопера з урахуванням заходів щодо удосконалення. Результати проведених розрахунків показали, що максимальні прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-хопера дорівнюють 37,6 м/с² (0,37g).

2. Визначено основні показники міцності несучої конструкції вагона-хопера. Встановлено, що максимальні еквівалентні напруження складають 329,6 МПа та зосереджені в зоні взаємодії хребтової балки зі шворневими. При цьому отримана величина напружень на 3,1% нижча ніж у типовій конструкції.

Проведені дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування сучасних конструкцій вантажних вагонів з покращеними техніко-економічними показниками.

Література

1. Бейн Д. Г. Анализ напряженного состояния несущего настила пола четырехосного полувагона с глухим кузовом. Вестник Брянского государственного технического университета. 2011. №1 (29). С. 47 – 51.
2. Кебал Ю. В. Удосконалення конструкції вагона-хопера для перевезення зерна. Кебал Ю. В., Шатов В. А., Тьокотев О. М., Мурашова Н. Г. Збірник наукових праць ДЕГУТ. Серія “Транспортні системи і технології”. 2017. Вип. 30. С. 113–122.
3. Hyun-Ah Lee. Structural-optimization-based design process for the body of a railway vehicle made from extruded aluminum panels. Hyun-Ah Lee, Seong-Beom Jung, Hwan-Hak Jang, Dae-Hwan Shin, Jang Uk Lee, Kwang Woo Kim and Gyung-Jin Park. Journal of Rail and rapid transit. 2016, No. 11.

4. Mrzyglod M. Uniform crashworthiness optimization of car body for high-speed trains. Mrzyglod M., Kuczek T. *Structural and Multidisciplinary Optimization* . 2014. Vol. 49. P. 327 – 336.
5. 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). doi:10.1088/1757-899X/161/1/012107.
6. Fomin O. Dynamics and strength of circular tube open wagons with aluminum foam filled center sills. Fomin O., Gorbunov M., Lovska A., Gerlici J., Kravchenko K. *Materials*. 2021. Vol. 14(8). 1915. <https://doi.org/10.3390/ma14081915>
7. Lovska Alyona. A new fastener to ensure the reliability of a passenger coach car body on a railway ferry. Lovska Alyona, Fomin Oleksij. *Acta Polytechnica*. 2020. Vol. 60. Issue 6. P. 478 – 485.
8. Фомін О. В. Дослідження доцільності застосування круглих труб в якості елементів несучих систем залізничних вагонів-платформ. Фомін О. В., Ловська А. О. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля*. 2015. №1(218). С. 38 – 45.
9. O. Fomin. Substantiating the optimization of the loadbearing structure of a hopper car for transporting pellets and hot agglomerate. O. Fomin, A. Lovska, I. Skliarenko, Yu. Klochkov. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. № 1/7 (103). P. 65 – 74. doi: 10.15587/1729-4061.2020.193408
10. Богомаз Г. И. Нагруженность контейнеров-цистерн, расположенных на железнодорожной платформе, при ударах в автосцепку. Богомаз Г. И., Мехов Д. Д., Пилипченко О. П., Черномашенцева Ю. Г. 36. *наук. праць “Динаміка та керування рухом механічних систем”*. 1992. С. 87 – 95.
11. DSTU 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних).
12. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам.
13. G.L. Vatulia. 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. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/664/1/012014>.
14. G. Vatulia. Optimization of the truss beam. Verification of the calculation results. G. Vatulia, S. Komagorova, M. Pavliuchenkov. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 230. 02037. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823002037>.

References

- 1 Bejn D. G. (2011). Analiz napryazhennogo sostoyaniya nesushchego nastila pola chetyrekhosnogo poluvagona s gluhim kuzovom / Bejn D.G. // *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. – №1 (29). S. 47 – 51.
- 2 Kebal Yu. V. (2017). Udoskonalennya konstrukcii vagona-hopera dlya perevezennya zerna / Kebal Yu. V., Shatov V. A., T'okotev O. M., Murashova N. G. // *Zbirnik naukovih prac DETUT. Seriya “Transportni sistemi i tekhnologii”*. – Vip. 30. S. 113–122.
- 3 Hyun-Ah Lee. (2016). Structural-optimization-based design process for the body of a railway vehicle made from extruded aluminum panels / Hyun-Ah Lee, Seong-Beom Jung, Hwan-Hak Jang, Dae-Hwan Shin, Jang Uk Lee, Kwang Woo Kim and Gyung-Jin Park // *Journal of Rail and rapid transit*. – No. 11.
- 4 Mrzyglod M. (2014). Uniform crashworthiness optimization of car body for high-speed trains / Mrzyglod M., Kuczek T. // *Structural and Multidisciplinary Optimization* . – Vol. 49. P. 327 – 336.
- 5 M. Płaczek. (2016). A concept of technology for freight wagons modernization / M. Płaczek, A. Wróbel, A. Buchacz // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – No. 161 (2016). doi:10.1088/1757-899X/161/1/012107.
- 6 Fomin O. (2021). Dynamics and strength of circular tube open wagons with aluminum foam filled center sills / Fomin O., Gorbunov M., Lovska A., Gerlici J., Kravchenko K. // *Materials*. – Vol. 14(8). 1915. <https://doi.org/10.3390/ma14081915>
- 7 Lovska Alyona. (2020). A new fastener to ensure the reliability of a passenger coach car body on a railway ferry / Lovska Alyona, Fomin Oleksij // *Acta Polytechnica*. – Vol. 60. Issue 6. P. 478 – 485.
- 8 Fomin O. V. (2015). Doslidzhennya docilnosti zastosuvannya kruglih trub v yakosti elementiv nesuchih sistem zaliznichnih vagoniv-platform / Fomin O. V., Lovska A. O. // *Visnik Skhidnoukrainskogo nacionalnogo universitetu imeni V. Dalya*. – №1(218). S. 38 – 45.
- 9 O. Fomin. (2020). Substantiating the optimization of the loadbearing structure of a hopper car for transporting pellets and hot agglomerate / O. Fomin, A. Lovska, I. Skliarenko, Yu. Klochkov // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – № 1/7 (103). P. 65 – 74. doi: 10.15587/1729-4061.2020.193408
- 10 Bogomaz G. I. (1992). Nagruzhennost kontejnerov-cistern, raspolozhennyh na zheleznodorozhnoj platforme, pri udarah v avtoscepku / Bogomaz G. I., Mekhov D. D., Pilipchenko O. P., Chernomashenceva Yu. G. // *Zb. nauk. prac “Dinamika ta keruvannya ruhom mekhanichnih sistem”*. S. 87 – 95.
- 11 DSTU 7598:2014. Vagoni vantazhni. Zagal'ni vimogi do rozrahunkiv ta proektuvannya novih i modernizovanih vagoniv kolii 1520 mm (nesamohidnih).
- 12 GOST 33211-2014. Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam.
- 13 G.L. Vatulia. (2019). 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*. – Vol. 664. 012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/664/1/012014>.
- 14 G. Vatulia. (2018). Optimization of the truss beam. Verification of the calculation results / G. Vatulia, S. Komagorova, M. Pavliuchenkov // *MATEC Web of Conferences*. – Vol. 230. 02037. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823002037>.

The paper proposes measures to improve the load-bearing structure of hopper car for pellets and hot sinter transportation. This improvement consists in making a ridge beam out of two rectangular tubes, closed cross-section, and canopy and strapping of the upper one – out of composite heat-resistant material. Geometric parameters of the ridge beam are determined by strength reserve optimization method. Offered improvement promotes to decrease load-bearing structure tare of hopper car by 2.7% in comparison with typical design.

Mathematical modelling is done to define dynamic load of hopper car taking into account offered solutions. Three degrees of freedom are accounted for: longitudinal movements arising during shunting collision, galloping and bouncing. The differential equations of motion were solved using MathCad program complex by Runge-Kutta method. The results of the calculations showed that the maximum acceleration acting on the hopper load-bearing structure was 37.6 m/s^2 ($0.37g$).

Received value of acceleration is taken into consideration at calculation of strength of hopper car load-bearing structure. At that the method of finite elements, realized in the program complex SolidWorks Simulation, was used. Temperature influence of freight being transported on the internal surfaces of the hopper load-car load-car bearing structure is taken into consideration while making calculation diagram. Calculation results showed that maximum equivalent stresses are concentrated in the area of cross-brace and kingpin interaction and amount to 329.6 MPa . The obtained value of stresses is 3.1% lower than in the typical design.

The conducted research will help to create the groundwork for design of modern freight car designs with improved technical and economical indexes.

Key words: *transport mechanics, hopper car, load-bearing structure, strength, body load, temperature effect.*

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

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

Сова С. С. – аспірант кафедри “Залізничний, автомобільний транспорт та підйомно-транспортні машини” Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля

Литвиненко А. С. – аспірант кафедри “Залізничний, автомобільний транспорт та підйомно-транспортні машини” Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля