

Ловська А. О.

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МІЦНОСТІ НЕСУЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ ВАГОНА-ХОПЕРА ДВОХСЕКЦІЙНОГО

Для підвищення ефективності експлуатації вагона-хопера запропоновано удосконалення його конструкції шляхом розділення кузова на дві окремі секції, що взаємодіють між собою посередництвом вертикальної стінки та горизонтальних з'єднувальних поясів. Для підвищення жорсткості рами в зонах обтірання секцій на її центральну частину встановлено середню балку. При цьому у якості прототипу обрано вагон-хопер моделі 20-9749, побудови ДП "Укрспецвагон" (Україна). Корисний об'єм секцій вагона-хопера з урахуванням заходів щодо удосконалення складає 41 м³.

Для визначення міцності несучої конструкції вагона-хопера двохсекційного проведено розрахунок за методом скінчених елементів в програмному комплексі SolidWorks Simulation. Скінчено-елементна модель несучої конструкції вагона-хопера утворена ізопараметричними тетраедрами. Оптимальна кількість тетраедрів розрахована за графоаналітичним методом. Результати розрахунків показали, що максимальна навантаженість несучої конструкції вагона-хопера простежується при I розрахунковому режимі (удар). При цьому максимальні еквівалентні напруження виникають в зоні взаємодії хребтової балки зі шворневою та складають 238,1 МПа, що нижче за допустимі.

Також в рамках дослідження проведено термічний розрахунок несучої конструкції вагона-хопера з урахуванням перевезення в ньому вантажу з температурою 700°C. При цьому максимальні еквівалентні напруження зафіксовано в зоні розміщення горбиля і складають близько 304 МПа. Отже міцність запропонованої конструкції вагона забезпечується.

Проведені дослідження сприятимуть підвищенню ефективності експлуатації залізничного транспорту. Також результати проведених досліджень можуть бути корисними напрацюваннями при створенні інноваційних конструкцій рухомого складу, в тому числі для міжнародного сполучення.

Ключові слова: транспортна механіка, вагон-хопер, несуча конструкція, навантаженість конструкції, напружений стан, термічний розрахунок.

Актуальність дослідження. Розвиток конкурентного середовища між транспортними галузями зумовлює необхідність створення інноваційного рухомого складу для утримання провідних позицій залізничного транспорту. При цьому істотна увага повинна приділятися несучим конструкціям вагонів, оскільки вони складають більшу частину їх тари.

Постановка проблеми. Для перевезення гарячих окатишів та агломерату в умовах виробничих підприємств знайшли застосування вагони-хопери. Особливістю таких вагонів є те, що обшивка не приварюється до каркаса кузова, а навішується на нього. Торцеві стіни вагона розташовані під деяким кутом, що дозволяє здійснювати його розвантаження з використанням гравітаційних властивостей вантажу. Даний вагон також може використовуватися для перевезень вантажів, які не потребують захисту від атмосферних опадів. Однак при цьому здійснюється перевезення однотипних вантажів у одному вагоні, що скорочує рентабельність перевезень.

У зв'язку з нестачею вантажних вагонів для перевезень завданої номенклатури вантажів актуальним постає питання модернізації або проектування конструкцій вагонів, адаптованих до одночасних перевезень різнотипних вантажів. Впровадження таких вагонів сприятиме підвищенню ефективності експлуатації залізничного транспорту. Тому удосконалення несучих конструкцій вагонів-хоперів є досить актуальним та перспективним питанням.

Теоретичний аналіз дослідження. Особливості інноваційної конструкції вагона-хопера, розробки "The Greenbrier Companies" (США), висвітлено у роботі [1]. Розвантаження кузова запропонованого вагону здійснюється за 30 секунд із використанням автоматичної системи. Передбачено можливість регулювання швидкості витікання вантажу. Однак даний вагон не пристосований до перевезень високотемпературних вантажів залізницею.

Створенню перспективних конструкцій вантажних вагонів присвячено роботи [2, 3]. Авторами наводяться просторові моделі несучих конструкцій вагонів та результати розрахунку на міцність. Разом з цим дані конструкції вагонів пристосовані для перевезень завданої номенклатури вантажів, що скорочує їх затребуваність на ринку транспортних перевезень.

Особливості створення конструкції кузова вантажного вагона з композитних панелей висвітлюються у публікації [4]. Для зменшення корозійного зношування складових кузова вагона пропонується здійснювати їх покриття антикорозійними матеріалами. Разом з цим викликає цікавість застосування запропонованої модернізації і щодо вагона-хопера для перевезень гарячих окатишів та агломерату.

В публікації [5] запропоновано удосконалення кузова вагона-хопера шляхом використання труб круглого перерізу у якості основних несучих елементів конструкції. Проведено математичне моделювання динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-хопера. Наведено результати розрахунків на міцність. Однак запропонована конструкція вагона-хопера не дозволяє здійснювати одночасне перевезення різнотипних вантажів у ньому.

Обґрунтування впровадження в експлуатацію вагона-хопера зчленованого типу з несучими елементами у вигляді труб круглого перерізу проводиться в роботі [6]. Результати визначення навантаженості несучої конструкції вагона-хопера підтвердили доцільність прийнятих при його проектуванні рішень. Разом з цим запропонована конструкція вагона також не дозволяє здійснювати одночасне перевезення різнотипних вантажів у одній секції.

Аналіз літературних джерел [1 – 6] дозволяє зробити висновок, що питання удосконалень несучих конструкцій вагонів-хоперів є досить актуальними, однак потребують подальшого розвитку для підвищення ефективності їх експлуатації.

Мета статті. Метою статі є висвітлення результатів комп'ютерного моделювання міцності несучої конструкції вагона-хопера двохсекційного при основних експлуатаційних режимах навантаження.

Задачі дослідження. Для досягнення поставленої мети визначені такі завдання:

- провести розрахунок на міцність несучої конструкції вагона-хопера двохсекційного при основних експлуатаційних режимах навантаження;
- провести термічний розрахунок несучої конструкції вагона-хопера двохсекційного.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для підвищення ефективності експлуатації вагона-хопера пропонується удосконалення його конструкції. Особливістю удосконалення є те, що кузов розділений на дві окремі секції, що взаємодіють між собою посередництвом вертикальної стінки та горизонтальних з'єднувальних поясів (рис. 1).

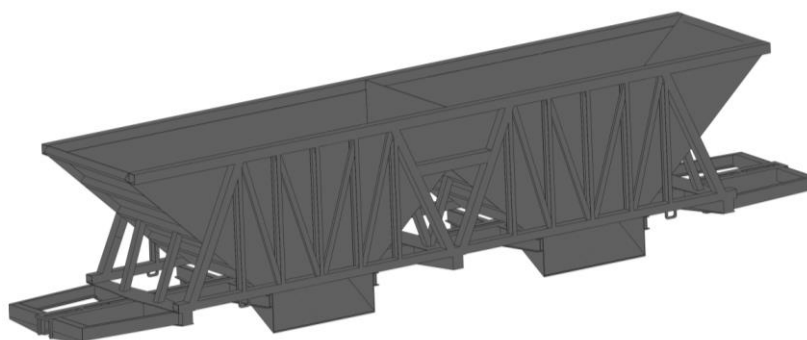


Рисунок 1 – Несуча конструкція вагона-хопера двохсекційного

Для підвищення жорсткості рами (рис. 2) в зонах обпирання секцій на її центральну частину встановлена середня балка коробчастого перерізу, заповнена матеріалом з енергопоглинальними властивостями.

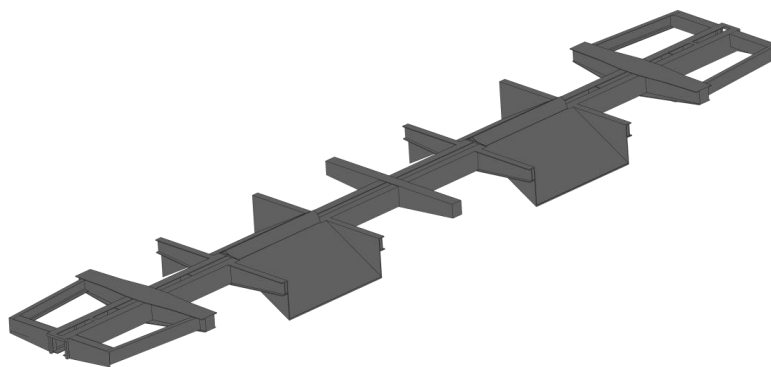


Рисунок 2 – Рама вагона-хопера двохсекційного

При цьому у якості прототипу обрано вагон-хопер моделі 20-9749 (рис. 3), побудови ДП "Укрспецвагон" (Україна). Корисний об'єм секцій удосконаленого вагона-хопера складає 41 м³.

Для визначення міцності несучої конструкції вагона-хопера двохсекційного проведено розрахунок за методом скінчених елементів в програмному комплексі SolidWorks Simulation [7, 8]. На першопочатковому етапі дослідження розрахунок здійснено для I режиму (удар). Скінчено-елементна модель несучої конструкції вагона-хопера утворена ізопараметричними тетраедрами. Оптимальна кількість тетраедрів розрахована за графоаналітичним методом [9 – 11]. Кількість елементів сітки склала 107748, вузлів – 36629. Максимальний розмір елементу сітки дорівнює 180 мм, мінімальний – 36 мм. Кількість елементів в колі склала 9. Співвідношення збільшення розміру елементів – 1,7.



Рисунок 3 – Вагон-хопер моделі 20-9749

Розрахункова схема несучої конструкції вагона-хопера наведена на рис. 4. При її складанні враховані такі навантаження: вертикальне статичне навантаження P_{ϵ}^{cm} , обумовлене вагою вантажу, тиск розпору від насипного вантажу P_p та ударне навантаження $P_{y\delta}$, чисельне значення якого відповідно до нормативних документів становить 3,5 МН [12]. Розрахунок здійснено за критерієм Мізеса (IV теорія міцності). При цьому оцінка міцності здійснювалася за максимальними еквівалентними напруженнями [7, 8]:

$$\sigma_{екв} = \sqrt{\frac{(\sigma_x^k - \sigma_y^k)^2 + (\sigma_y^k - \sigma_z^k)^2 + (\sigma_z^k - \sigma_x^k)^2}{2}}, \quad (1)$$

де $\sigma_x^k, \sigma_y^k, \sigma_z^k$ – головні напруження, які виникають в несучій конструкції вагона-хопера.

Активний тиск розпору насипного вантажу визначено за формулою [12]

$$P_a = \gamma \cdot g \cdot H \cdot tg^2 \cdot \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right), \quad (2)$$

де γ – щільність насипного вантажу, т/м³;
 H – висота бокової стіни, м;
 φ – кут природнього відкосу вантажу, рад;
 g – прискорення вільного падіння, м/с².

Закріплення моделі здійснювалося в зонах обпирання кузова на ходові частини. Матеріал конструкції – сталь марки 09Г2С. У якості енергопоглинального матеріалу, розміщеного у середній балці, враховано піноалюміній. Результати розрахунку наведено на рис. 5, 6. При цьому максимальні еквівалентні напруження виникають в зоні взаємодії хребтової балки зі шворневою та складають 238,1 МПа, що нижче за допустимі. У якості допустимих враховано напруження 310,5 МПа. Максимальні переміщення в вузлах конструкції виникають в розвантажувальних бункерах та дорівнюють 2,7 мм.

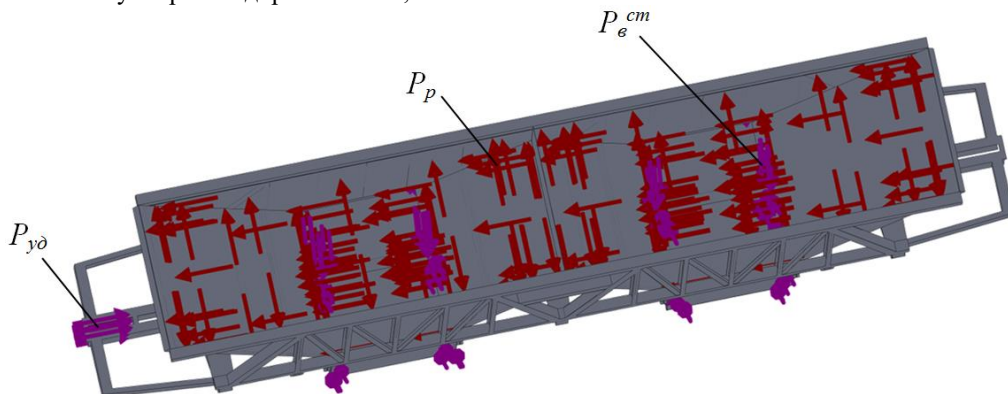


Рисунок 4 – Розрахункова схема несучої конструкції вагона-хопера

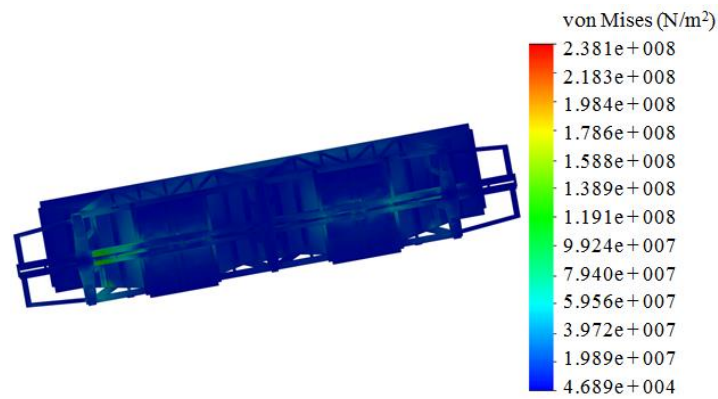


Рисунок 5 – Напружений стан несучої конструкції вагона-хопера

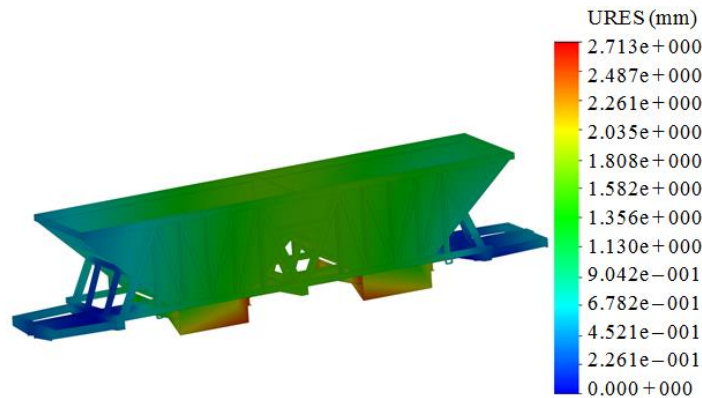


Рисунок 6 – Переміщення в вузлах несучої конструкції вагона-хопера

Розрахунок проведений і стосовно інших розрахункових режимів. Проведені розрахунки дозволили зробити висновок, що міцність несучої конструкції вагона-хопера при основних експлуатаційних режимах забезпечується.

Також в рамках дослідження проведено термічний розрахунок несучої конструкції вагона-хопера з урахуванням перевезення в ньому вантажу з температурою 700°C [5]. При цьому використано розрахункову схему, наведену на рис. 4, але при розрахунку не враховувалося повздовжнє навантаження на автотцеп. До внутрішніх поверхонь секцій також прикладалося температурне навантаження P_T (рис. 7).

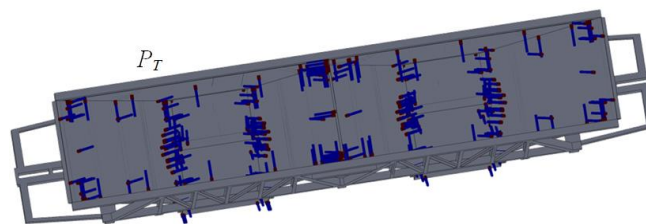


Рисунок 7 – Схема прикладення температурного навантаження до несучої конструкції вагона-хопера

Результати розрахунків наведено на рис. 8.

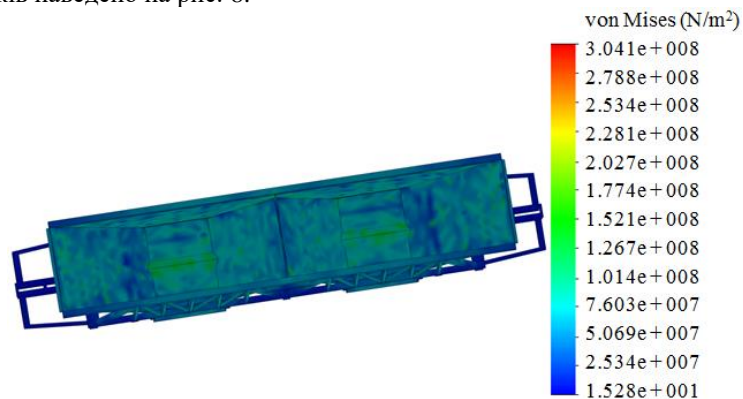


Рисунок 8 – Напружений стан несучої конструкції вагона-хопера

При цьому максимальні еквівалентні напруження виникають в зоні розміщення горбиля і складають близько 304 МПа. Максимальні переміщення в несучій конструкції вагона-хопера склали близько 3,0 мм. Отже міцність запропонованої конструкції вагона-хопера забезпечується [12].

Висновки:

1. Проведено розрахунок на міцність несучої конструкції вагона-хопера двохсекційного при основних експлуатаційних режимах навантаження. Максимальні еквівалентні напруження в несучій конструкції вагона-хопера виникають при I розрахунковому режимі (удар) та складають 238,1 МПа, що нижче за допустимі. Максимальні переміщення в вузлах конструкції виникають в розвантажувальних бункерах та дорівнюють 2,7 мм. При інших розрахункових режимах експлуатації міцність несучої конструкції вагона-хопера також забезпечується.

2. Проведено термічний розрахунок несучої конструкції вагона-хопера двохсекційного з урахуванням перевезення в ньому вантажу з температурою 700°C. Результати розрахунків показали, що максимальні еквівалентні напруження виникають в зоні розміщення горбиля і складають близько 304 МПа. Максимальні переміщення в несучій конструкції вагона-хопера склали близько 3,0 мм. Отже міцність запропонованої конструкції вагона забезпечується.

Проведені дослідження сприятимуть підвищенню ефективності експлуатації залізничного транспорту. Також результати проведених досліджень можуть бути корисними напрацюваннями при створенні інноваційних конструкцій рухомого складу, в тому числі для міжнародного сполучення.

Література

1. Tsunami Gate wagon to make a splash at Railway Interchange. Railway gazette. 11 September 2019.
2. Y.Q. Yuan. Analysis of C80B Wagons Load-Stress Transfer Relation. Y.Q. Yuan, Q. Li, K. Ran. Applied Mechanics and Materials. 2012. Vol. 148–149. P. 331 – 335.
3. S. C. Yoon. Evaluation of Structural Strength in Body Structure of Freight Car. Sung Cheol Yoon, Jeongguk Kim Jeongguk, Kim Chang Sung, Jeon Kang Youn Choe. Key Engineering Materials. 2010. Vol. 417–418. P. 181 – 184.
4. Placzek M. A concept of technology for freight wagons modernization. Placzek M., Wróbel A., Buchacz A. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 161: 012107.
5. 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. Vol. 1/7 (103). P. 65 – 74.
6. Oleksij Fomin. Formation of flash-concept for a resource-saving articulated hopper car to transport hot pellets and agglomerate. Oleksij Fomin, Glib Vatulja, Alyona Lovska. E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 166. 07002 (2020). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016607002>
7. Козяр М. М. Комп'ютерна графіка: SolidWorks / Козяр М. М., Фещук Ю. В., Парфенюк О. В. – Херсон: Олді-плюс, 2018. – 252 с.
8. Bethune J. D. Engineering Design and Graphics with SolidWorks 2016 / J. D. Bethune. – Peachpit Press. 2016. – 784 p.
9. Vatulja G. Regression equations for circular CFST columns carrying capacity evaluation. Vatulja G., Rezenenko M., Orel Y., Petrenko D. MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 107. 00051.
10. Vatulja G. Optimization of the truss beam. Verification of the calculation results. Vatulja G., Komagorova S., Pavliuchenkov M. MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 230. 02037. doi: 10.1051/matecconf/201823002037
11. Sergii Panchenko. The Analysis of the Loading and the Strength of the FLAT RACK Removable Module with Viscoelastic Bonds in the Fittings. Sergii Panchenko, Juraj Gerlici, Glib Vatulja, Alyona Lovska, Mykhailo Pavliuchenkov, Kateryna Kravchenko. Applied Sciences. 2023. Vol. 13(1). 79. <https://doi.org/10.3390/app13010079>
12. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних).

References

- 1 (2019). Tsunami Gate wagon to make a splash at Railway Interchange // Railway gazette. 11 September.
- 2 Y.Q. Yuan. (2012). Analysis of C80B Wagons Load-Stress Transfer Relation / Y.Q. Yuan, Q. Li, K. Ran // Applied Mechanics and Materials. – Vol. 148–149. P. 331 – 335.
- 3 S. C. Yoon. (2010). Evaluation of Structural Strength in Body Structure of Freight Car / Sung Cheol Yoon, Jeongguk Kim Jeongguk, Kim Chang Sung, Jeon Kang Youn Choe // Key Engineering Materials. – Vol. 417–418. P. 181 – 184.
- 4 Placzek M. (2016). A concept of technology for freight wagons modernization / Placzek M., Wróbel A., Buchacz A. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Vol. 161: 012107.
- 5 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. – Vol. 1/7 (103). P. 65 – 74.
- 6 Oleksij Fomin. (2020). Formation of flash-concept for a resource-saving articulated hopper car to transport hot pellets and agglomerate / Oleksij Fomin, Glib Vatulja, Alyona Lovska // E3S Web of Conferences. – Vol. 166. 07002 (2020). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016607002>
- 7 Kozyar M. M., Feshuk Yu. V., Parfenyuk O. V. Komp'yuterna grafika: SolidWorks. – Herson: Oldi-plyus, 2018. – 252 s.
- 8 Bethune J. D. Engineering Design and Graphics with SolidWorks 2016. – Peachpit Press. 2016. – 784 p.
- 9 Vatulja G. (2017). Regression equations for circular CFST columns carrying capacity evaluation / Vatulja G., Rezenenko M., Orel Y., Petrenko D. // MATEC Web of Conferences. – Vol. 107. 00051.
- 10 Vatulja G. (2018). Optimization of the truss beam. Verification of the calculation results / Vatulja G., Komagorova S., Pavliuchenkov M. // MATEC Web of Conferences. – Vol. 230. 02037. doi: 10.1051/matecconf/201823002037

- 11 Sergii Panchenko. (2023). The Analysis of the Loading and the Strength of the FLAT RACK Removable Module with Viscoelastic Bonds in the Fittings / Sergii Panchenko, Juraj Gerlici, Glib Vatulia, Alyona Lovska, Mykhailo Pavliuchenkov, Kateryna Kravchenko // Applied Sciences. – Vol. 13(1). 79. <https://doi.org/10.3390/app13010079>
- 12 DSTU 7598:2014. Vagoni vantazhni. Zagal'ni vimogi do rozrahunkiv ta proektuvannya novih i modernizovanih vagoniv kolii 1520 mm (nesamohidnih).

In order to increase efficiency of operating the hopper car, the design of the car has been improved by dividing the body into two separate sections, which interact with each other through the middle of the vertical wall and horizontal connecting belts. To increase the frame stiffness in the crimping areas of the sections, a middle beam is installed in the central part of the frame. At that as a prototype was used hopper car model 20-9749, made by the State Enterprise "Ukrspetsvagon" (Ukraine). Critical volume of the sections of the hopper wagon taking into account measures for improvement is 41 m³.

To determine load-carrying capacity of double-section hopper car design was carried out by the method of joined elements in the SolidWorks Simulation program complex. The lumped-element model of the load-bearing structure of the car-operator is created by isoparametric tetrahedrons. Optimal number of tetrahedrons is calculated by graphoanalytical method. The results of calculations showed that the maximum load-carrying capacity of the opera-car load-carrying structure is achieved in the II calculation mode (impact). In this case, the maximum equivalent loads are recorded in the area of interaction with the backbone beam with the kingpin and is 238.1 MPa, which is lower than the allowable.

Also as part of the study carried out thermal design load-bearing structure of the car-operator based on the carriage in it of the cargo at a temperature of 700°C. In this case, the maximum equivalent loads are recorded in the area of placement of the hump and amount to nearly 304 MPa. Therefore, the strength of the proposed structure of the car is ensured.

The conducted research will contribute to increasing the efficiency of the railway transport operation. Also the results of the conducted research can be useful guidelines for the creation of innovative structures of the rolling stock, including for international co-operation.

Key words: *transport mechanics, hopper car, load-bearing structure, structural load, stressed state, thermal design.*

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