

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 629.463.65

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2023.2-17.01>

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ КУЗОВА НАПІВВАГОНА З УДОСКОНАЛЕНОЮ ОБШИВКОЮ ТОРЦЕВИХ СТІН

А.О. Ловська

д.т.н., доцент, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції,
Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-8604-1764

Анотація

Вступ. Залізничний транспорт є невід'ємною складовою успішного функціонування економіки європейських країн. Для забезпечення його подальшого розвитку важливим є впровадження в експлуатацію сучасних конструкцій рухомого складу з покращеними технічними та експлуатаційними показниками.

Мета. Наукове обґрунтування застосування гофрованих листів в обшивці торцевих стін кузова напіввагона.

Результати. Для покращення міцності торцевих стін напіввагонів пропонується посилювати їх нижню частину, за висотою $1/3$ від нижнього обв'язування, горизонтальними гофрами. Визначення геометричних параметрів гофр здійснено за моментом опору листа. Для цього у програмному комплексі SolidWorks було побудовано просторову модель типового листа та за допомогою вбудованих опцій визначався момент його інерції. Після цього розраховувався момент опору листа. З урахуванням визначеного моменту опору типового листа здійснено підбір відповідного діаметру гофр удосконаленого листа обшивки при яких момент опору має значення, що перевищує те, яке має типовий лист.

Для визначення міцності кузова напіввагона з урахуванням запропонованих рішень проведено його розрахунок. У якості прототипу обрано універсальний напіввагон моделі 12-295. Розрахунок на міцність реалізовано у SolidWorks Simulation за методом скінчених елементів. Встановлено, що максимальні напруження в торцевій стіні виникають в зонах взаємодії горизонтальних поясів з кутовими стійками і складають близько 180 МПа. В нижній частині листа обшивки напруження знизилися до 132 МПа, що менше ніж в типовій на 5,3%. Максимальні переміщення в торцевій стіні виникають у верхньому обв'язуванні і складають близько 3 мм.

Висновки. Результати проведених досліджень сприятимуть створенню рекомендацій щодо проектування сучасних конструкцій напіввагонів та підвищенню ефективності їх експлуатації.

Ключові слова: універсальний напіввагон, кузов напіввагона, обшивка стін напіввагона, навантаженість напіввагона, міцність кузова.

RESEARCH OF THE STRENGTH OF AN OPEN WAGON BODY
WITH IMPROVED END WALL CLADDING

A.O. Lovska

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Professor of Department of Wagon Engineering and Product Quality,
Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-8604-1764

Summary

Introduction. Rail transport is an integral part of the successful functioning of the European economy. To ensure its further development, it is important to introduce modern rolling stock designs with improved technical and operational performance.

Purpose. Scientific substantiation of the use of corrugated sheets in the cladding of the end walls of the open wagon body.

Results. To improve the strength of the end walls of an open wagons, it is proposed to reinforce their lower part, 1/3 of the height of the lower strapping, with horizontal corrugations. The geometric parameters of the corrugations were determined by the moment of resistance of the sheet. To do this, a spatial model of a typical sheet was built in SolidWorks and its moment of inertia was determined using built-in options. The moment of resistance of the sheet was then calculated. Taking into account the determined moment of resistance of the standard sheet, the appropriate corrugation diameter of the improved skin sheet was selected, at which the moment of resistance has a value that exceeds that of the standard sheet.

To determine the strength of the open wagon, taking into account the proposed solutions, its calculation was carried out. A universal open wagon model 12-295 was chosen as a prototype. The strength calculation was carried out in SolidWorks Simulation using the finite element method. It was found that the maximum stresses in the end wall occur in the areas of interaction between the horizontal belts and the corner posts and amount to about 180 MPa. In the lower part of the cladding sheet, the stresses decreased to 132 MPa, which is 5.3% less than in a typical one. The maximum displacements in the end wall occur in the upper strapping and amount to about 3 mm.

Conclusions. The results of the research will contribute to the creation of recommendations for the design of modern open wagon structures and increase the efficiency of their operation.

Key words: universal open wagon, open wagon body, open wagon wall cladding, open wagon load, open wagon strength.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Розвиток рухомого складу є одним з найважливіших напрямків національної транспортної стратегії України. Для забезпечення конкурентоспроможності залізничної галузі важливим є впровадження в експлуатацію сучасних конструкцій рухомого складу з покращеними технічними та експлуатаційними показниками [1, 2].

На даний час привальований відсоток вантажного парку вагонів сформовано переважно напіввагонами. Дослідження статистичних даних пошкоджень

напіввагонів за останні роки дозволили зробити висновок, що одним з найбільш вразливих елементів конструкції є кузови. До найбільш частих їх пошкоджень можна віднести деформації складових конструкції, тріщини, обриви елементів тощо. Здебільшого ці пошкодження обумовлені вантажно-розвантажувальними роботами, а також експлуатаційними режимами, наприклад, переміщення вантажу в кузові при дії інерційних навантажень. Така обставина викликає пошкодження торцевих стін або дверей напіввагонів.

У зв'язку з цим для зменшення витрат на утримання напіввагонів в експлуатації доцільним є впровадження заходів щодо покращення їх міцності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання цієї проблеми, і виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Для покращення міцності кузовів напіввагонів в роботі [3] запропоновано виготовлення їх обшивки із сталей марок 16Г2АФ та 18Г2АФпс. Використання такого матеріалу для виготовлення обшивки сприятиме зменшенню власної ваги кузова та підвищенню вантажопідйомності. Наведено результати чисельних експериментів за оптимізацією товщин складових кузова, а також випробування оптимізованої конструкції на міцність.

Подібне рішення запропоновано в роботі [4], де обґрунтовано доцільність використання магнієвих сплавів в несучих конструкціях транспортних засобів. Дане рішення сприятиме зменшенню тари вагонів у порівнянні з конструкціями прототипів при забезпеченні достатньої експлуатаційної міцності.

Разом з цим, запропоновані в роботах [3, 4] рішення вимагають додаткових капітальних вкладень на стадії виготовлення або модернізації вагонів.

Для покращення міцності обшивки бокових стін вантажного вагона авторами роботи [5] запропоновано впровадження ламінованих композитних матеріалів для її виготовлення. Наведено результати визначення оптимальної товщини стін кузова вагона за умови забезпечення його міцності. Однак такий матеріал є досить високоартістним, що стримує його широке застосування у вагонобудуванні.

Обґрунтування використання полімерних композитних матеріалів у конструкціях вагонів проводиться в статті [6]. Дослідження здійснено на прикладі настилу підлоги вагона. Висвітлені результати експериментальних досліджень за методом пресування композиту у формі. Важливо сказати, що можливість використання даного матеріалу при виготовленні обшивки стін кузовів авторами не розглянута.

Обґрунтування застосування композитних панелей в конструкціях вантажних вагонів проведено в публікації [7]. Таке рішення сприятиме зменшенню пошкоджень складових кузовів в експлуатації. Наведені результати розрахунку на міцність несучої конструкції вагона. Запропоновано спосіб розміщення композитних панелей у внутрішньому просторі кузова. Треба сказати, що така реалізація досить ускладнить процес технічного обслуговування та ремонтів вагонів в експлуатації.

Для зменшення пошкоджень обшивки бокових та торцевих стін напіввагонів авторами роботи [8] запропоновано їх виготовлення з зчленованих оболонки, заповнених енергопоглинальним матеріалом. Результати розрахунків встановили, що з урахуванням запропонованого удосконалення є можливим покращити міцність несучої конструкції напіввагона на 8%. Однак дана реалізація є досить складною з технічної точки зору, а також з точки зору вартості.

Проведений аналіз літературних джерел дозволяє зробити висновок, що питання удосконалень кузовів напіввагонів є досить актуальними та важливими. Разом з цим вони потребують подальшого розвитку з метою підвищення ефективності функціонування напіввагонів.

Формулювання мети статті, постановка завдання.

Метою дослідження є наукове обґрунтування застосування гофрованих листів в обшивці торцевих стін кузова напіввагона. Для досягнення зазначеної мети визначені такі завдання:

1. Обґрунтувати конструкційні особливості обшивки торцевих стін кузова напіввагона;
2. Визначити міцність кузова напіввагона при повздовжній навантаженості його конструкції.

Об'єктом дослідження є несуча конструкція напіввагона.

Предмет дослідження – навантаженість несучої конструкції напіввагона.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Для покращення міцності торцевих стін напіввагонів пропонується посилювати їх нижню частину, за висотою 1/3 від нижнього об'язування, горизонтальними гофрами (рис. 1).

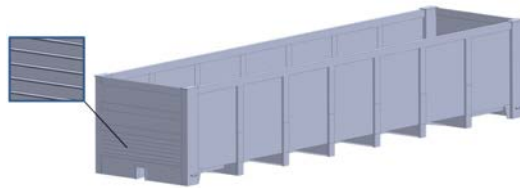


Рис. 1. Просторова модель кузова напіввагона

Для визначення геометричних параметрів гофр нижню частину листа обшивки розглянуто як тонкостінну плиту. При цьому у якості визначального параметру використано момент опору листа. Для цього у програмному комплексі SolidWorks було побудовано просторову модель типового листа (рис. 2) та за допомогою вбудованих опцій визначався момент його інерції. Після цього за відомою залежністю [30, 31] визначався момент опору листа [9]

$$W = \frac{I}{z}, \quad (1)$$

де z – відстань від геометричного центру ваги перетину до відповідної осі.

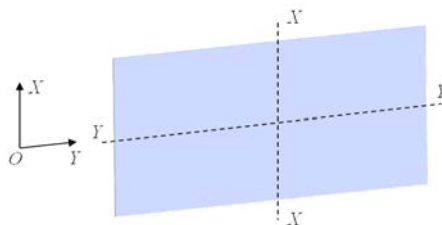


Рис. 2. Просторова модель типового листа

Встановлено, що момент інерції перерізу типового листа дорівнює $19148,5 \text{ см}^4$, а момент опору – $76593,92 \text{ см}^3$. З урахуванням визначеного моменту опору здійснено підбір відповідного діаметру гофр листа при яких він має значення, що перевищує визначене вище. Товщина листа прийнята рівною 4 мм. На підставі проведених розрахунків момент інерції листа склав $20521,4 \text{ см}^4$, а момент опору – $81987,8 \text{ см}^3$. Маса листа на 6,6% нижча за масу типового листа. Просторову модель удосконаленого листа наведено на рис. 3.

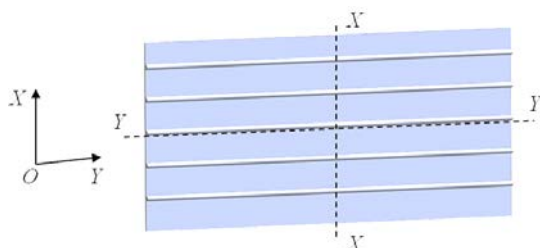


Рис. 3. Просторова модель удосконаленого листа

Для визначення міцності кузова напіввагона з урахуванням запропонованих рішень проведено його розрахунок. У якості прототипу обрано напіввагон моделі 12-295. Побудову просторової моделі здійснено в програмному комплексі SolidWorks [10, 11]. Розрахунок на міцність реалізовано у SolidWorks Simulation за методом скінчених елементів. При складанні розрахункової схеми кузова напіввагона враховано, що на нього діє вертикальне навантаження P_v , тиск розпору насипного вантажу P_p , а також повздовжнє навантаження P_n (рис. 4).

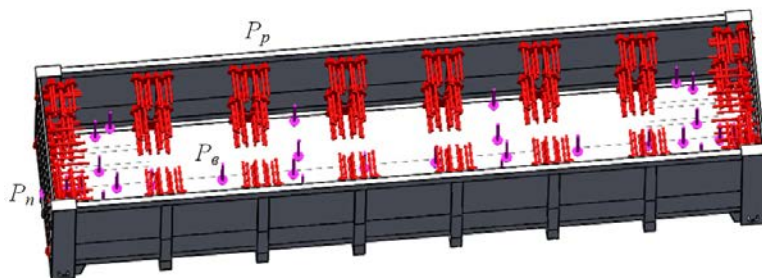


Рис. 4. Розрахункова схема кузова напіввагона

Активний тиск розпору насипного вантажу (кам'яне вугілля) визначено за формулою [12, 13]

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

де γ – щільність насипного вантажу, т/м^3 ; H – висота бокової стіни, м; φ – кут природнього відкосу вантажу, рад; g – прискорення вільного падіння, м/с^2 .

При визначенні тиску розпору вантажу на торцеві стіни до уваги також приймався пасивний тиск. Величину пасивного тиску визначено за формулою (2), в якій

квадрат тангенса різності двох кутів замінено квадратом тангенса їх суми та з урахуванням коефіцієнту вертикальної динаміки, а також кута природного відкосу.

Закріплення моделі відбувалося за п'ятники. При складанні скінчено-елементної моделі застосовано ізопараметричні тетраедри. Чисельність вузлів моделі склала 104307, елементів – 312116. Максимальний розмір елемента – 80 мм, мінімальний – 16 мм. У якості матеріалу конструкції застосовано сталь марки 09Г2С, яка є типовою для виготовлення кузовів. Результати розрахунків наведено на рис. 5 та 6. На підставі проведених розрахунків можна зробити висновок, що максимальні напруження в торцевій стіні виникають в зонах взаємодії горизонтальних поясів з кутовими стійками і складають близько 180 МПа.

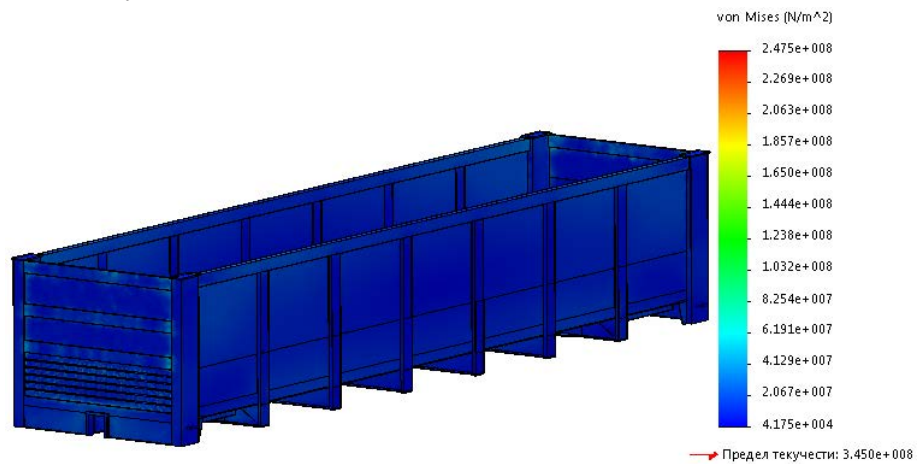


Рис. 5. Напружений стан кузова напіввагона

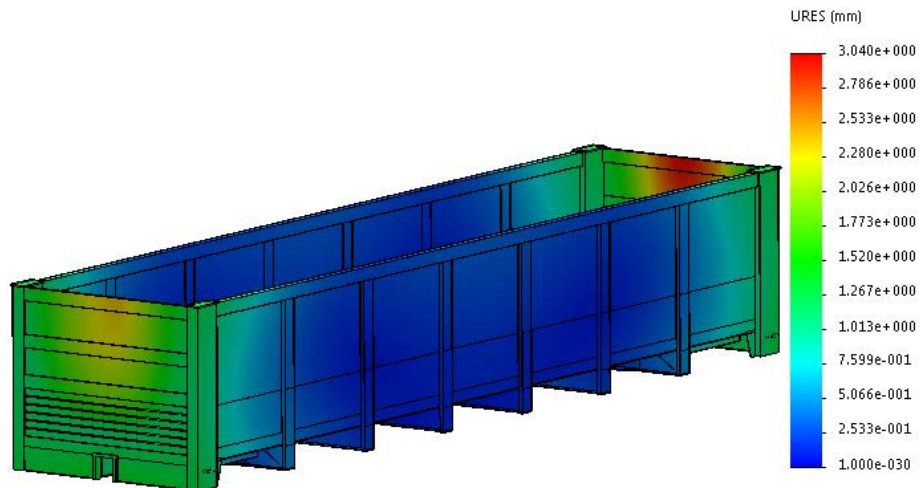


Рис. 6. Переміщення в вузлах кузова напіввагона

В нижній частині листа обшивки напруження знизилися до 132 МПа, що нижче ніж в типовій на 5,3%. Максимальні переміщення в торцевій стіні виникають

у верхньому обв'язуванні і складають близько 3 мм. Отже міцність кузова забезпечується [13].

Висновки і перспектива подальшої роботи в цьому напрямі.

1. Обґрунтовано конструкційні особливості обшивки торцевих стін кузова напіввагона. При цьому пропонується посилювати їх нижню частину, за висотою 1/3 від нижнього обв'язування, горизонтальними гофрами. На підставі проведених розрахунків момент інерції листа склав 20521,4 см⁴, а момент опору – 81987,8 см³. Маса листа на 6,6% нижча за масу типового листа.

2. Визначено міцність кузова напіввагона при повздовжній навантаженості його конструкції. Встановлено, що з урахуванням запропонованого удосконалення максимальні напруження в нижній частині листа обшивки торцевої стіни зменшуються на 5,3% у порівнянні з типовою конструкцією і складають 132 МПа. При цьому максимальні переміщення виникають у верхньому обв'язуванні торцевої стіни і складають близько 3 мм.

Подальшим напрямком даних досліджень є визначення втомної міцності кузова напіввагона з урахуванням запропонованого удосконалення.

Результати проведених досліджень сприятимуть створенню рекомендацій щодо проектування сучасних конструкцій напіввагонів та підвищенню ефективності їх експлуатації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Harak S. S., Sharma S. C., Harsha S. P. Structural Dynamic Analysis of Freight Railway Wagon Using Finite Element Method. *Procedia Materials Science*. 2014. Vol. 6. P. 1891 – 1898.
2. Lovskaya Alyona. Assessment of dynamic efforts to bodies of wagons at transportation with railway ferries. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. Vol. 3, Issue 4. P. 36–41. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.24997>
3. Farida Galimova, Yaxyo Khurmatov, Mirzo Abdulloev, Bobur Jumabekov, Doston Sultonaliyev, Dilorom Ergeshova. Modern Gondola with Lightweight Body. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021. Vol. 247. P. 1043 – 1050. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1_94
4. Woo Geun Lee, Jung-Seok Kim, Seung-Ju Sun, Jae-Yong Lim. The next generation material for lightweight railway car body structures: Magnesium alloys. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2018. Vol. 232. Issue 1. P. 25 – 42.
5. Alexandru Ionut Patrascu, Anton Hadar, Stefan Dan Pastrama. Structural Analysis of a Freight Wagon with Composite Walls. *MATERIALE PLASTICE*. 2020. Vol. 57 (2). P. 140 – 151. <https://doi.org/10.37358/MP.20.2.5360>
6. Zaynitdinov Olmos Irikovich, Ruzmetov Yadgor Ozodovich, Rustam Rahimov, Waail Mahmod Lafta. Development of new polymer composite materials for the flooring of rail carriage. *International Journal of Engineering and Technology*. 2020. Vol. 9(2). P. 378 – 381.
7. Andrzej Buchacz, Andrzej Baier, Krzysztof Herbuś, Krzysztof, Michał Majzner, Piotr Ociepka. Examination of a Cargo Space of a Freight Wagon

- Modified with Composite Panels. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 809-810. P. 944 – 949. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.809-810.944>
8. 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 (12), 3420. <https://doi.org/10.3390/ma14123420>
 9. Шваб'юк В. І. Опір матеріалів: Підручник. Київ: Знання, 2016. 400 с.
 10. Пустюльга С. І., Самостян В. Р., Клак Ю. В. Інженерна графіка в SolidWorks: Навчальний посібник. Луцьк: Вежа, 2018. 172 с.
 11. Козяр М. М., Фещук Ю. В., Парфенюк О. В. Комп'ютерна графіка: SolidWorks: Навчальний посібник. Херсон: Олді-плюс, 2018. 252 с.
 12. O. Fomin, A. Lovska, O. Daki, V. Bohomia, O. Tymoshchuk, V. Tkachenko. Determining the dynamic loading on an open-top wagon with a two-pipe girder beam. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 3/7 (99). P. 18 – 25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.166329>
 13. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Київ, 2015. 162 с.

REFERENCES

1. Harak, S. S., Sharma, S. C., Harsha, S. P. (2014). Structural Dynamic Analysis of Freight Railway Wagon Using Finite Element Method. *Procedia Materials Science*. Vol. 6. P. 1891 – 1898.
2. Lovskaya Alyona. (2014). Assessment of dynamic efforts to bodies of wagons at transportation with railway ferries. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 3, Issue 4. P. 36–41. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.24997>
3. Farida Galimova, Yaxyo Khurmatov, Mirzo Abdulloev, Bobur Jumabekov, Doston Sultonaliyev, Dilorom Ergeshova. (2021). Modern Gondola with Lightweight Body. *Lecture Notes in Networks and Systems*. Vol. 247. P. 1043–1050. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1_94
4. Woo Geun Lee, Jung-Seok Kim, Seung-Ju Sun, Jae-Yong Lim. (2018). The next generation material for lightweight railway car body structures: Magnesium alloys. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. Vol. 232. Issue 1. P. 25 – 42.
5. Alexandru Ionut Patrascu, Anton Hadar, Stefan Dan Pastrama. (2020). Structural Analysis of a Freight Wagon with Composite Walls. *MATERIALE PLASTICE*. Vol. 57 (2). P. 140 – 151. <https://doi.org/10.37358/MP.20.2.5360>
6. Zaynitdinov Olmos Irikovich, Ruzmetov Yadgor Ozodovich, Rustam Rahimov, Waail Mahmud Lafta. (2020). Development of new polymer composite materials for the flooring of rail carriage. *International Journal of Engineering and Technology*. Vol. 9(2). P. 378 – 381.

7. Andrzej Buchacz, Andrzej Baier, Krzysztof Herbuś, Krzysztof, Michał Majzner, Piotr Ociepka. (2015). Examination of a Cargo Space of a Freight Wagon Modified with Composite Panels. *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 809-810. P. 944 – 949. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.809-810.944>
8. Fomin, O., Gerlici, J., Gorbunov, M., Vatulia, G., Lovska, A., Kravchenko, K. (2021). Research into the Strength of an OpenWagon with Double Sidewalls Filled with Aluminium Foam. *Materials*. Vol. 14 (12), 3420. <https://doi.org/10.3390/ma14123420>
9. Shvab'yuk, V. I. (2016). *Opir materialiv: Pidruchnik*. Kiyiv: Znannya. 400 s. [in Ukrainian]
10. Pustyulga, S. I., Samostyan, V. R., Klak, Yu. V. (2018). *Inzhenerna grafika v SolidWorks: Navchalnij posibnik*. Luck: Vezha. 172 s. [in Ukrainian]
11. Kozyar, M. M., Feshuk, Yu. V., Parfenyuk, O. V. (2018). *Komp'yuterna grafika: SolidWorks: Navchalnij posibnik*. Herson: Oldi-plyus. 252 s. [in Ukrainian]
12. O. Fomin, A. Lovska, O. Daki, V. Bohomia, O. Tymoshchuk, V. Tkachenko. (2019). Determining the dynamic loading on an open-top wagon with a two-pipe girder beam. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 3/7 (99). P. 18 – 25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.166329>
13. DSTU 7598:2014. *Vagoni vantazhni. Zagalni vimogi do rozrahunkiv ta proektuvannya novih i modernizovanih vagoniv koliyi 1520 mm (nesamohidnih)*. Kiyiv, 2015. 162 s. [in Ukrainian]