

УДК 629.463.65  
DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/38>

**Ловська А.О.**

Український державний університет залізничного транспорту

**Фомін О.В.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Рибін А.В.**

Український державний університет залізничного транспорту

**Лебідь Г.О.**

Національний університет «Запорізька політехніка»

## ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ НАПІВВАГОНА ІЗ ЗАМКНЕНОЮ ХРЕБТОВОЮ БАЛКОЮ, ЗАПОВНЕНОЮ НАПОВНЮВАЧЕМ

*Забезпечення безперебійної роботи транспортної галузі можливе за надійної та злагодженої експлуатації окремих її складових частин. Відомо, що однією з найважливіших серед таких складових частин є залізничний транспорт. Для підвищення ефективності експлуатації залізничного транспорту важливим є впровадження інноваційного рухомого складу.*

*З метою забезпечення міцності несучих конструкцій напіввагонів в експлуатації запропоновано їх удосконалення. Таке вдосконалення полягає у використанні замість типової конструкції хребтової балки як основного несучого елемента рами конструкції замкненої конфігурації, яка складається з двох профілів, що утворюють замкнений переріз. Таке рішення сприяє зменшенню маси рами майже на 4% в порівнянні з типовою конструкцією. Для зменшення динамічної навантаженості пропонується використання наповнювача в хребтовій балці. Як наповнювач може бути застосований матеріал, який має пружні, в'язкі або пружно-в'язкі властивості. Розміщення матеріалу передбачається за довжиною хребтової балки між задніми упорами автотягів.*

*Для визначення навантаженості несучої конструкції напіввагона з урахуванням заходів щодо вдосконалення здійснене математичне моделювання.*

*Установлено, що використання як наповнювача матеріалу з пружними властивостями сприяє зменшенню динамічної навантаженості напіввагона на 2,6% в порівнянні з конструкцією без наповнювача. Водночас жорсткість матеріалу, яким заповнена хребтова балка, повинна мати значення близько 100 кН/м.*

*З урахуванням використання як наповнювача матеріалу з в'язкими властивостями динамічна навантаженість напіввагона зменшується на 4% в порівнянні з конструкцією без наповнювача. Водночас коефіцієнт в'язкого опору матеріалу, яким заповнена хребтова балка, повинен мати значення близько 118 кН·с/м.*

*Проведені дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проєктування інноваційних конструкцій рухомого складу й підвищенню ефективності його функціонування.*

**Ключові слова:** транспортна механіка, напіввагон, несуча конструкція, динамічна навантаженість, моделювання динаміки, прискорення конструкції.

**Постановка проблеми.** Дотримання стратегічного плану розвитку залізничного транспорту й утримання його лідерських позицій у перевізному процесі зумовлюють необхідність впровадження в експлуатацію рухомого складу нового покоління з покращеними техніко-економічними, експлуатаційними та екологічними показниками.

Відомо, що однією з головних проблем залишається забезпечення міцності, в тому числі, втомної

міцності, несучих конструкцій вагонів в експлуатації. Періодична дія знакозмінних навантажень сприяє пошкодженню несучих конструкцій вагонів, необхідності проведення позапланових видів ремонту та додаткових витрат на їх експлуатацію.

Тому для підвищення ефективності експлуатації вагонів важливим є використання нових нетривіальних технічних рішень під час їх проєктування, які сприятимуть зменшенню динамічної

навантаженості в експлуатації, покращенню міцності, надійності та забезпеченню безпеки руху.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Особливості застосування теорії оптимального проектування несучої конструкції кузова глухондонного напіввагона висвітлюються в роботі [1]. Результати проведених досліджень дозволили визначити оптимальну конфігурацію розвантажувальних бункерів напіввагона. Важливо сказати, що під час оптимізації несучої конструкції напіввагона не враховано заходів щодо зменшення динамічної навантаженості в експлуатації.

В роботі [2] проведено обґрунтування удосконалення конструкції вузла защемлення проміжної стійки й поперечної балки кузова напіввагона. Наведені результати розрахунку на міцність несучої конструкції напіввагону, які підтвердили доцільність запропонованих рішень. Важливо сказати, що така модернізація не сприяє зменшенню динамічної навантаженості несучої конструкції напіввагона та не вирішує повною мірою питання забезпечення його міцності в експлуатації.

Удосконалення методики розрахунку на міцність верхнього обв'язування бокових стін кузова напіввагону наведено в публікації [3]. Запропоновано уточнені розрахункові схеми, які враховують розвантаження змерзлого вантажу з напіввагона на вагоноперекидачі. Наведені результати розрахунку кузова напіввагона. Однак в роботі не зазначено перспектив щодо удосконалення несучої конструкції напіввагона для забезпечення його міцності в експлуатації.

Вибір конструктивних рішень елементів вагонів з малою масою тари проводиться у [4]. Як методика використана порівняльна оцінка показників міцності, витривалості та стійкості несучої конструкції мінімальної маси, виготовленої з різних матеріалів.

Обґрунтування вибору нового профілю для хребтової балки вантажного вагона проводиться в [5]. У роботі наведений ряд конструктивних рішень рам вантажних вагонів різного типу. Наведені результати розрахунку на міцність несучих конструкцій вагонів з урахуванням запропонованих рішень.

Однак у роботах не запропоновано заходів щодо зменшення навантаженості несучих конструкцій вагонів за умови експлуатаційних режимів.

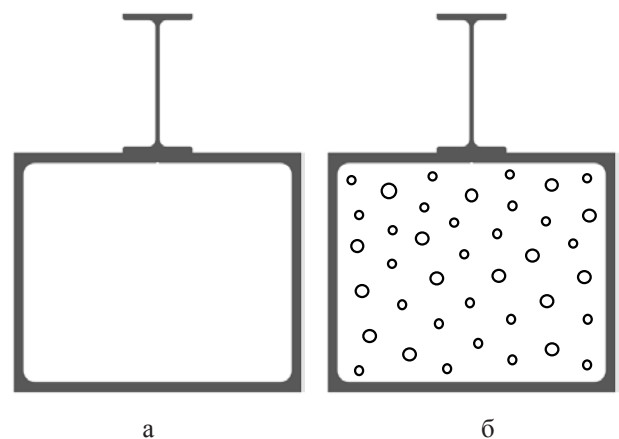
Особливості удосконалення несучих конструкцій вагонів для зменшення їх динамічної навантаженості висвітлюється у роботах [6; 7]. Запропоновані заходи щодо удосконалення підтверджені шляхом математичного моделювання динамічної навантаженості та міцності. Разом з цим запропо-

новані заходи щодо удосконалення спрямовані на зменшення динамічної навантаженості несучих конструкцій вагонів у вертикальній площині. Тобто визначення динамічної навантаженості вагонів у повздовжній площині в роботах не проводиться.

Аналіз літературних джерел [1–7] дозволяє зробити висновок, що досі питання покращення міцності несучих конструкцій вагонів шляхом удосконалення основних несучих елементів кузовів і використанням наповнювачів в їх складових не висвітлювалися. Це зумовлює необхідність здійснення відповідних досліджень та напрацювань у зазначеному напрямі.

**Постановка завдання.** Визначення динамічної навантаженості напіввагона з замкненою хребтовою балкою, заповненою наповнювачем шляхом математичного моделювання.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** З метою зменшення динамічної навантаженості несучої конструкції напіввагона за умов експлуатаційних режимів запропоновано удосконалення його рами, як основного несучого елемента кузова. Таке удосконалення полягає в використанні замість типової конструкції хребтової балки замкненої, яка складається з двох профілів, що утворюють замкнений переріз (рис. 1, а). Це сприяє зменшенню маси рами майже на 4% в порівнянні з типовою конструкцією. Водночас є можливим використання наповнювача в хребтовій балці (рис. 1, б). Як наповнювач може бути застосований матеріал, який має пружні або в'язкі властивості. Розміщення матеріалу передбачається за довжиною хребтової балки між задніми упорами автозчепів.



**Рис. 1. Переріз замкненої конструкції хребтової балки напіввагона: а) без наповнювача; б) з наповнювачем**

Для визначення навантаженості несучої конструкції напіввагона з урахуванням заходів щодо удосконалення здійснене математичне моделю-

вання. Розрахункова схема напіввагона наведена на рис. 2.

Для цього використано математичну модель, наведену в роботі [8], яка описує динамічне навантаження несучої конструкції вагона-платформи з контейнерами-цистернами. Тому модель було доопрацьовано шляхом урахування переміщень несучої конструкції напіввагону в повздовжній площині.

На першопочатковому етапі дослідження проведено математичне моделювання динамічної навантаженості несучої конструкції напіввагона з наповнювачем у хребтовій балці, який має пружні властивості.

$$M_{\text{оп}} \cdot \ddot{x} + (M_B \cdot h) \cdot \ddot{\varphi} = P_n - (2P_{\text{мп}} + c \cdot x), \quad (1)$$

$$I_B \cdot \ddot{\varphi} + (M_B \cdot h) \cdot \ddot{x} - g \cdot \varphi \cdot (M_B \cdot h) = \\ = l \cdot F_{\text{ТР}} (\text{sign} \Delta_1 - \text{sign} \Delta_2) + l (k_1 \cdot \Delta_1 - k_2 \cdot \Delta_2), \quad (2)$$

$$M_B \cdot \ddot{z} = k_1 \cdot \Delta_1 + k_2 \cdot \Delta_2 - F_{\text{ТР}} (\text{sign} \Delta_1 - \text{sign} \Delta_2), \quad (3)$$

де

$$\Delta_1 = z - l \cdot \varphi; ;$$

$M_{\text{оп}}$  – маса бруто вагона;  $M_B$  – маса несучої конструкції вагона;  $I_B$  – момент інерції вагона;  $P_n$  – величина повздовжньої сили на задній упор автотягача;  $P_{\text{мп}}$  – сили тертя, які виникають між п'ятниками рами й підп'ятниками візків;  $c$  – жорсткість матеріалу, яким заповнені елементи несучої конструкції вагону;  $l$  – половина бази вагона;  $F_{\text{ТР}}$  – абсолютне значення сили сухого тертя в ресорному комплекті;  $k_1, k_2$  – жорсткість пружин ресорного підвішування візків вагона;  $x, \varphi, z$  – координати, що відповідають, відповідно, повздовжньому, кутовому навколо поперечної осі та вертикальному переміщенню вагона.

Крім того, під час доопрацювання моделі враховано силу тертя, яка виникає між п'ятниками й підп'ятниками й зумовлену дією повздовжньої сили на задній упор автотягача.

Чисельне значення повздовжньої сили на несучу конструкцію напіввагона прийнято рівним 3,5 МН [9; 10]. Як прототип обраний напіввагон моделі 12-757 на типових візках 18-100.

Розв'язок диференціальних рівнянь (1)–(3) здійснений за методом Рунге-Кутта в програмному комплексі MathCad у вигляді

$$F(t, y) = \begin{bmatrix} y_2 \\ y_4 \\ y_6 \\ \frac{P_n - (2P_{\text{мп}} + c \cdot y_1) - (M_B \cdot h) \cdot y_4}{M_{\text{оп}}} \\ l \cdot F_{\text{ТР}} (\text{sign} \Delta_1 - \text{sign} \Delta_2) + l (k_1 \cdot \Delta_1 - k_2 \cdot \Delta_2) - (M_B \cdot h) \cdot y_2 + \\ + g \cdot y_3 \cdot (M_B \cdot h) \\ \frac{I_B}{M_B} \\ \frac{k_1 \cdot \Delta_1 + k_2 \cdot \Delta_2 - F_{\text{ТР}} (\text{sign} \Delta_1 - \text{sign} \Delta_2)}{M_B} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$Z = \text{rkfixed}(Y0, tn, tk, n, F).$$

Водночас  $y_1=q_1, y_3=q_3, y_5=q_5, y_2=y_2, y_4=y_3, y_6=y_5,$

Початкові умови прийняті рівними нулю [11–13]. Проведені розрахунки показали, що максимальні прискорення, які діють на несучу конструкцію напіввагона складають  $37,8 \text{ м/с}^2$  (рис. 3). Така величина прискорення на 2,6% нижча за ту, що отримана для несучої конструкції без наповнювача. За такої умови жорсткість матеріалу, яким заповнена хребтова балка повинна мати значення близько 100 кН/м.

Також розрахунок здійснений з урахуванням використання наповнювача з в'язкими властивостями. Диференціальні рівняння руху напіввагона водночас мають вигляд:

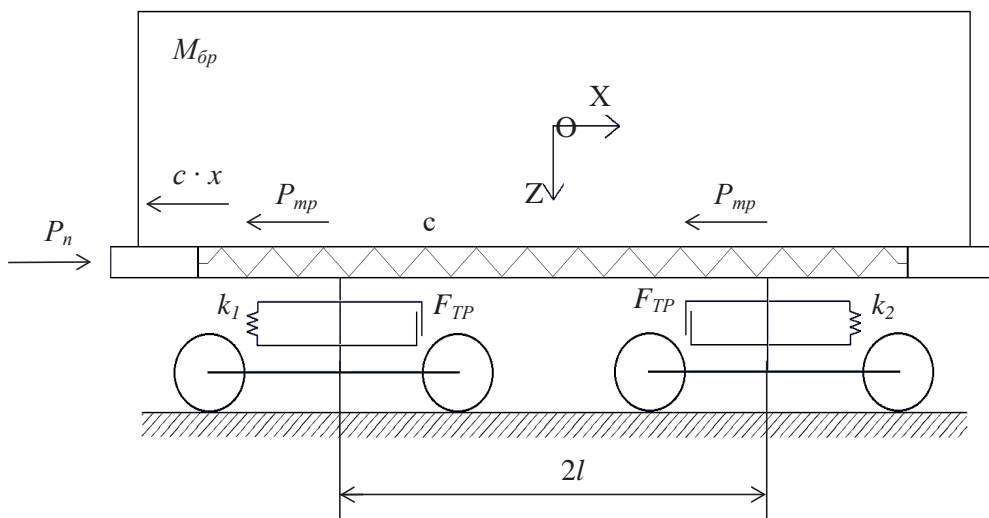


Рис. 2. Розрахункова схема напіввагона

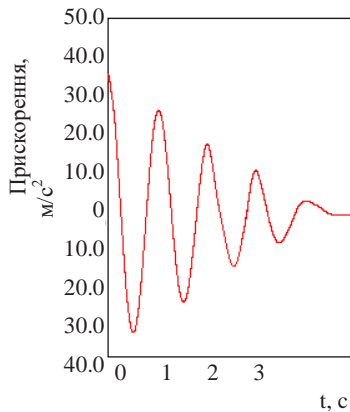


Рис. 3. Прискорення несучої конструкції напіввагона з урахуванням використання пружного наповнювача в хребтовій балці

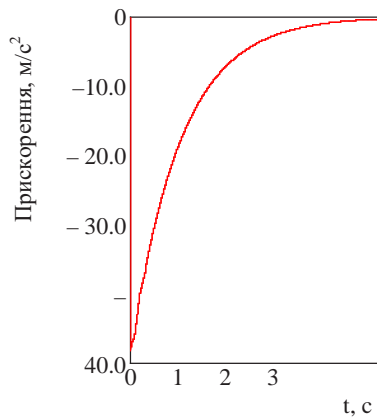


Рис. 4. Прискорення несучої конструкції напіввагона з урахуванням використання в'язкого наповнювача в хребтовій балці

$$M_{op} \cdot \ddot{x} + (M_B \cdot h) \cdot \ddot{\phi} = P_n - 2P_{mp} - \beta \cdot \dot{x}, \quad (5)$$

$$I_B \cdot \ddot{\phi} + (M_B \cdot h) \cdot \ddot{x} - g \cdot \phi \cdot (M_B \cdot h) = l \cdot F_{TP} (\text{sign}\dot{\Delta}_1 - \text{sign}\dot{\Delta}_2) + l(k_1 \cdot \Delta_1 - k_2 \cdot \Delta_2), \quad (6)$$

$$M_B \cdot \ddot{z} = k_1 \cdot \Delta_1 + k_2 \cdot \Delta_2 - F_{TP} (\text{sign}\dot{\Delta}_1 - \text{sign}\dot{\Delta}_2), \quad (7)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт в'язкого опору матеріалу, яким заповнена хребтова балка.

Розв'язок математичної моделі (5)–(7) у програмному комплексі MathCad здійснювався у вигляді:

$$F(t, y) = \begin{pmatrix} y_2 \\ y_4 \\ y_6 \\ \frac{P_n - 2P_{mp} - \beta \cdot y_2 - (M_B \cdot h) \cdot \dot{y}_4}{M_{op}} \\ l \cdot F_{TP} (\text{sign}\dot{\Delta}_1 - \text{sign}\dot{\Delta}_2) + l(k_1 \cdot \Delta_1 - k_2 \cdot \Delta_2) - (M_B \cdot h) \cdot \dot{y}_2 + g \cdot y_3 \cdot (M_B \cdot h) \\ \frac{I_B}{k_1 \cdot \Delta_1 + k_2 \cdot \Delta_2 - F_{TP} (\text{sign}\dot{\Delta}_1 - \text{sign}\dot{\Delta}_2)} \\ \frac{I_B}{M_B} \end{pmatrix} \cdot (8)$$

$$Z = \text{rkfixed}(Y0, tn, tk, n, F).$$

Водночас  $y_1=q_1, y_3=q_3, y_5=q_5, y_2=y_1, y_4=y_3, y_6=y_5$ ,

Результати проведених розрахунків показали, що максимальні прискорення, які діють на несучу конструкцію напіввагона складають 36,8 м/с<sup>2</sup> (рис. 4).

Така величина прискорення на 4% нижча за ту, що отримана для несучої конструкції без наповнювача. За такої умови коефіцієнт в'язкого опору матеріалу, яким заповнена хребтова балка повинен мати значення близько 118 кН·с/м.

**Висновки.** Для зменшення динамічної навантаженості напіввагона в експлуатації запропоновано удосконалення його несучої конструкції та використання в ній наповнювачів з пружними або в'язкими властивостями. Водночас забезпечується зменшення матеріалоемності рами напіввагона майже на 4% в порівнянні з типовою конструкцією.

Визначено динамічну навантаженість напіввагона з урахуванням використання як наповнювача хребтової балки матеріалу з пружними властивостями. Встановлено, що максимальні прискорення, які діють на несучу конструкцію напіввагона складають 37,8 м/с<sup>2</sup>, що на 2,6% нижче за прискорення, що діє на несучу конструкцію без наповнювача. За такої умови жорсткість матеріалу, яким заповнена хребтова балка повинна мати значення близько 100 кН/м.

Визначено динамічну навантаженість напіввагона з урахуванням використання як наповнювача хребтової балки матеріалу з в'язкими властивостями. Встановлено, що максимальні прискорення, які діють на несучу конструкцію напіввагона складають 36,8 м/с<sup>2</sup>, що на 4% нижче за прискорення, що діє на несучу конструкцію без наповнювача. Водночас коефіцієнт в'язкого опору матеріалу, яким заповнена хребтова балка повинен мати значення близько 118 кН·с/м.

Результати проведених досліджень сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування інноваційних конструкцій рухомого складу й підвищенню ефективності його функціонування.

### Список літератури:

1. Чепурченко І.В., Носырев Д.Я., Коркіна С.В. Использование теории оптимального проектирования для усовершенствования конструкции кузова глухонного полувагона. *Вестник транспорта Поволжья*. 2018. № 3 (69). С. 28–32.
2. Візняк Р.І., Гудко А.В. Удосконалення конструкції вузла заділки проміжного стояка та балки кузова напіввагона з метою забезпечення міцності в експлуатації. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2014, Вип. 147. С. 18–22.
3. Булычев М.А., Антипин Д.Я. Совершенствование методики расчета на прочность верхних обвязок боковых стен полувагонов. *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2019. № 3 (76). С. 58–64.

4. Бороненко Ю.П., Филипова И.О. Выбор конструктивных решений элементов вагонов с малой массой тары. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2017. № 3 (69). С. 121–129. DOI: 10.15802/stp2017/104546.
5. Соколов А.М., Савушкина Ю.В., Новоселов А.Ю., Коротков Д.С. Универсальный профиль для хребтовой балки вагонов. *Транспорт Российской Федерации*. 2019 № 1 (80). С. 50–55.
6. 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). P. 30–37.
7. Фомін О.В., Ловська А.О. Визначення вертикальних прискорень несучої конструкції вагона-платформи з в'язкими зв'язками у повздовжніх балках. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2021. Том 32 (71). № 1. Частина 2. С. 135–140.
8. Богомаз Г.И., Мехов Д.Д., Пилипенко О.П., Черномашенцева Ю.Г. Нагруженность контейнеров-цистерн, расположенных на железнодорожной платформе, при ударах в автосцепку. *Динаміка та керування рухом механічних систем* : збірник наукових праць. Київ : АНУ, Інститут технічної механіки, 1992. С. 87–95.
9. 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. 162 с.
10. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. [Действующий от 2016-07-01]. Москва, 2016. 54 с.
11. Vatulina G., Falendysh A., Orel Y., Pavliuchenkov M. Structural Improvements in a Tank Wagon with Modern Software Packages. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 187. P. 301–307. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.379.
12. Fomin O., Lovska A. Improvements in passenger car body for higher stability of train ferry. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. September 2020. Vol. 23. P. 1455–1465. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.08.010>.
13. Fomin O., Lovska A., Pištěk V., Kučera P. Dynamic load effect on the transportation safety of tank containers as part of combined trains on railway ferries. *VIBROENGINEERING PROCEDIA*. 2019. Vol. 29. P. 124–129.

#### **Lovska A.O., Fomin O.V., Rybin A.V., Lebid H.O. DETERMINATION OF DYNAMIC LOAD OF A WALKWAY WITH A CLOSED SPINE BEAM FILLED WITH FILLER**

*Ensuring the smooth operation of the transport industry is possible with reliable and coordinated operation of its individual components. It is known that one of the most important among such components is rail transport. To increase the efficiency of railway transport operation, it is important to introduce innovative rolling stock.*

*In order to ensure the strength of the load-bearing structures of gondola cars in operation, their improvement is proposed. This improvement is to use instead of the typical design of the spine beam, as the main supporting element of the frame, the design of a closed configuration, which consists of two profiles forming a closed section. This solution reduces the weight of the frame by almost 4% compared to a typical design. To reduce the dynamic load, it is proposed to use a filler in the spine beam. A material having elastic, viscous or elastic-viscous properties can be used as a filler. The location of this material is provided by the length of the spine beam between the rear stops of the hitches.*

*To determine the load on the load-bearing structure of the gondola, taking into account measures for improvement, mathematical modeling was performed.*

*It is established that the use of a material with elastic properties as a filler helps to reduce the dynamic load of the gondola by 2.6% compared to the design without a filler. The stiffness of the substance with which the spine beam is filled should be about 100 kN / m.*

*Due to the use of a material with viscous properties as a filler, the dynamic load of the gondola is reduced by 4% compared to the design without a filler. The coefficient of viscous resistance of the substance with which the spinal beam is filled should be about 118 kNs / m.*

*The conducted researches will promote creation of developments concerning designing of innovative designs of a rolling stock and increase of efficiency of its functioning.*

**Key words:** transport mechanics, gondola car, load-bearing structure, dynamic loading, dynamics modeling, structure acceleration.