

УДК 629.463.62

DOI: 10.15587/2706-5448.2021.225458

ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ НЕСУЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ ВАГОНА-ХОПЕРА З ФАКТИЧНИМИ РОЗМІРАМИ КОНСТРУКЦІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Фомін О. В., Ловська А. О., Скок П. О., Роговський І. Л.

Об'єктом дослідження є несуча конструкція вагона-окатишевоза з фактичними розмірами несучих елементів. Одним з найбільш проблемних місць є визначення показників динаміки та міцності несучої конструкції вагона-хопера з фактичними розмірами конструкційних елементів.

Проведено дослідження динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-хопера. При цьому визначено фактичні розміри конструкційних елементів шляхом натурних досліджень. Проведено математичне моделювання динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-хопера з фактичними розмірами конструкційних елементів шляхом математичного моделювання. Дослідження проведені в плоскій систем координат. До уваги прийнято наявність трьох ступенів вільності несучої конструкції вагона-хопера: коливання посмикування, підскакування та галопування. Розв'язання диференціальних рівнянь здійснено в програмному комплексі MathCad. При цьому вони зводилися до нормальної форми Коші, а після цього інтегрувалися за допомогою метода Рунге-Кутта. Встановлено, що максимальна величина прискорення, яке діє на несучу конструкцію вагона-хопера складає $38,5 \text{ м/с}^2$, що вище на 2,7 % за прискорення несучої конструкції з номінальними розмірами.

Проведено комп'ютерне моделювання динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-хопера. Розрахунок проведений за методом скінчених елементів в програмному комплексі SolidWorks Simulation (CosmosWorks). Встановлено, що максимальні прискорення зосереджені в середній частині несучої конструкції вагона-хопера та складають $36,2 \text{ м/с}^2$. Для верифікації розробленої моделі використаний F-критерій. Проведені розрахунки показали, що розрахункове значення критерію складає $F_p=1,09$ та є меншим за табличне значення $F_t=3,29$. Гіпотеза про адекватність не відхиляється.

Визначено власні частоти та форми коливань несучої конструкції вагона-хопера. Встановлено, що значення власних частот коливань несучої конструкції вагона-хопера з фактичними розмірами конструкційних елементів знаходяться в межах допустимих.

Проведені дослідження сприятимуть створенню відповідних напрацювань щодо подовження строку служби вагонів, які вичерпали свій нормативний ресурс, а також підвищенню ефективності експлуатації залізничного транспорту.

Ключові слова: вагон-хопер, несуча конструкція, динамічна навантаженість, ресурс експлуатації, залізничний транспорт, транспортна механіка.

1. Вступ

Залізничний транспорт є провідною галуззю транспортної системи. Для утримання його лідерських позицій на ринку перевізних послуг важливим є забезпечення транспортної галузі справним рухомим складом. Нині рівень поповнення залізничного парку є незначним. Тому для забезпечення своєчасного перевізного процесу та утримання лідерських позицій залізничної галузі актуальним є дослідження можливості подовження строку експлуатації вагонів, які вичерпали свій нормативний строк служби. У зв'язку з цим важливим є створення відповідних напрацювань для визначення уточненого строку служби вагонів з урахуванням його подовження.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єкт дослідження – несуча конструкція вагона-окатишевоза з фактичними розмірами несучих елементів. У якості прототипу розглянутий вагон-хопер моделі 20-9749 побудови філії «Панютинський вагоноремонтний завод» Акціонерного товариства «Укрзалізниця», Україна (рис. 1).



Рис. 1. Вагон-хопер для перевезення окатишів:
а – вид з торця; *б* – вид з боку

Вагон призначений для перевезення гарячих окатишів та агломерату з температурою не вище 700 °С, а також насипних матеріалів (щебінь, пісок, вугілля, керамзит), що не потребують захисту від атмосферних опадів. Розвантаження таких вагонів здійснюється на обидві сторони колії через розвантажувальні бункери. Кузов вагона – суцільнозварної конструкції, складається з каркасу та обшиви з гладких листів. Для виключення скупчування вантажу на площинах обв'язок бічних стін, на верхній обв'язці по периметру кузова встановлено куточок, нижнє обв'язування бічних стін обшите похилим листом. Для захисту консольних частин рами та розміщеного на ній обладнання на кузов вагона встановлені козирки (як на вагонах-дозаторах). Кінцеві крани системи розвантаження встановлені симетрично гальмівним кранам з лівого боку автозчепу. Розвантажувальні люки відкриваються та зачиняються за допомогою спеціального механізму, який приводиться в дію від пневматичного циліндра з дистанційним керуванням.

Забезпечення перевізного процесу вантажів залізничним транспортом вимагає його забезпечення справним рухомим складом. Нестача рухомого складу зумовлює необхідність дослідження можливості щодо подовження строку служби існуючих несучих конструкцій вагонів. Особливо це стосується вагонів, які можуть використовуватися для насипних та навалювальних вантажів. Тому важливим є дослідження можливості подовження строку експлуатації вагонів, які вичерпали свій нормативний ресурс.

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – визначення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-хопера з фактичними розмірами конструкційних елементів. Для досягнення зазначеної мети визначені такі задачі:

1. Визначити фактичні розміри конструкційних елементів несучої конструкції вагона-хопера.
2. Провести математичне та комп'ютерне моделювання динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-хопера, а також здійснити верифікацію розроблених моделей.
3. Визначити власні частоти та форми коливань несучої конструкції вагона-хопера.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Особливості визначення оцінки показників надійності несучих конструкцій вантажних вагонів із залишковим ресурсом висвітлюються в роботі [1]. Наведено алгоритм визначення граничного ресурсу вагона.

Обґрунтування заходів щодо подовження строку служби вантажних вагонів проведено в [2]. Розроблена схема технічного діагностування вантажних вагонів. Зроблено висновок про можливість продовження терміну експлуатації вантажних вагонів через виконання якісного технічного діагностування. Однак дані дослідження не мають прикладного характеру.

Подовження строку служби несучих конструкцій напіввагонів, які вичерпали свій нормативний ресурс наведено в роботі [3]. Проведено математичне моделювання динамічної навантаженості несучої конструкції вагона з фактичними розмірами. Результати моделювання враховано при визначенні показників міцності.

Викликає інтерес робота [4], яка присвячена створенню методики розрахунково-експериментального обґрунтування подовження строку служби напіввагонів. Запропонована методика враховує статистичні дані щодо технічного стану несучих конструкцій вагонів та дозволяє на підставі показників надійності призначити новий строк служби вагона. Однак питання щодо подовження строку служби вагонів-хоперів для перевезення окатишів у роботах авторів не досліджувалися.

Необхідність корегування Положення про подовження строку служби вантажних вагонів, що курсують у міжнародному сполученні розглядається в [5]. Обґрунтовано доцільність введення вимог до рухомого складу, строк експлуатації якого подовжується.

Особливості подовження строку служби вагонів для перевезення окатишів, які вичерпали свій нормативний ресурс висвітлюються в роботі [6]. Наведені результати експериментального визначення показників міцності несучих конструкцій вагонів. Однак при цьому авторами не проводилося моделювання динамічної навантаженості несучих конструкцій вагонів з урахуванням фактичних значень розмірів конструкційних елементів.

Прогнозування залишкового ресурсу вагона хопер-дозатора після тривалої експлуатації з урахуванням фактичних фізико-механічних характеристик матеріалу несучих конструкцій проводиться в [7]. Приведені результати віртуальних та експериментальних досліджень міцності несучої конструкції вагона. Однак автори обмежилися нормативними значеннями динамічних навантажень, які діють на несучу конструкцію вагона в експлуатації.

В роботі [8] представлено результати визначення напружень в контейнерах-цистернах, які знаходяться на залізничних вагонах-платформах. При цьому автори не описують фактичного стану досліджуваного вагону.

В роботах [9, 10] наведено особливості проведення та результати досліджень напружено-деформованих станів вагонів з контейнерами при їх транспортуванні морським поромом. Але такі дослідження не включали аналіз їх фактичного стану.

Таким чином, результати аналізу дозволяють зробити висновок про те, що питання щодо визначення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-хопера з фактичними розмірами конструкційних елементів є важливими для вирішення, проте їм не приділено достатньої уваги.

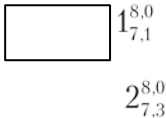
5. Методи дослідження

Для визначення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-хопера з фактичними розмірами складових елементів проведено математичне моделювання.

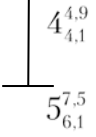

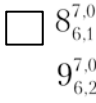
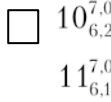
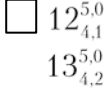


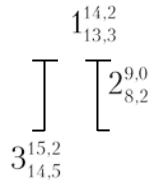

Фактичні розміри елементів несучої конструкції вагона-хопера визначені на підставі натурних досліджень та наведені в табл. 1. При цьому верхній індекс порядкового номера елемента конструкції характеризує номінальне значення товщини, а нижній – дійсне, зафіксоване під час натурних досліджень.

Таблиця 1

Фактичні розміри елементів несучої конструкції вагона-хопера

Назва конструкційного елемента	Розмір, мм
1	2
Кузов	
Обв'язування нижнє	

Продовження таблиці 1

1	2	
Кузов		
Стійка		
Проміжний розкос стіни бокової		
Розкос стіни бокової		
Обв'язування верхнє		
Підкоси		
Пояс торцевої стіни (1 та 2 зверху)		
Пояс торцевої стіни (3 та 4 зверху)		
Рама		
Балка хребтова		
Балка шворнева		

Закінчення таблиці 1

1	2
Рама	
Балка кінцева	$9_{6,3}^{7,0}$ \lrcorner $8_{6,4}^{7,0}$ \lrcorner $20_{6,3}^{7,0}$ \lrcorner $19_{6,4}^{7,0}$
Балка поперечна	$10_{9,1}^{10,0}$ \lrcorner $11_{9,2}^{10,0}$ \lrcorner $13_{9,1}^{10,0}$ \lrcorner $14_{9,2}^{10,0}$
Горбиль	$12_{8,1}^{10,0}$ \wedge

Встановлено, що маса несучої конструкції вагона-хопера з урахуванням найбільшої величини зносів елементів, зафіксованих під час натурних досліджень, менша на 9,3 % у порівнянні з несучою конструкцією вагона-хопера, який має номінальні розміри.

З метою визначення динамічних навантажень, які діють на несучі конструкції вагонів з фактичними розмірами при дії повздовжньої сили (маневровому співударянні) використано математичну модель, наведену в [8]. Розрахункова схема вагона наведена на рис. 2.

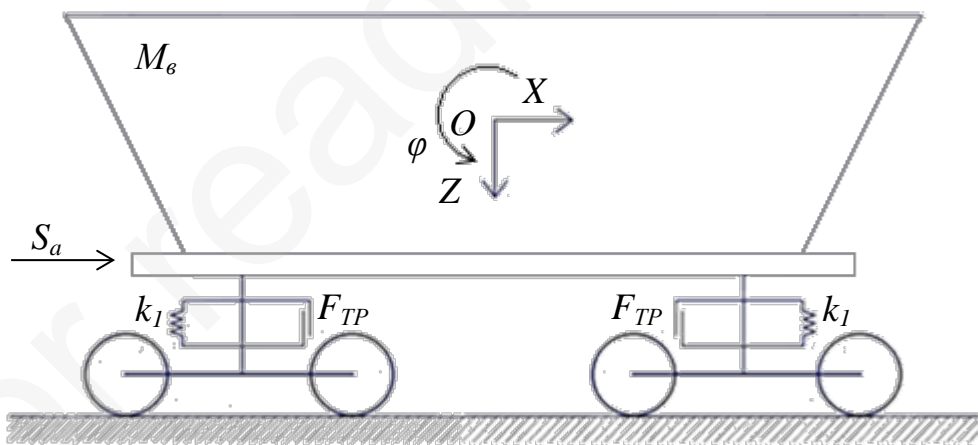


Рис. 2. Розрахункова схема вагона-хопера

$$\left(M_B + 2 \cdot m_T + \frac{n \cdot I_{KII}}{r^2} \right) \cdot \ddot{x}_B + (M_B \cdot h) \cdot \ddot{\varphi}_B = S_a, \quad (1)$$

$$I_B \cdot \ddot{\varphi}_B + M' \cdot \ddot{x}_B - g \cdot \varphi_B \cdot M' = l \cdot F_{TP} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2) + l (k_1 \cdot \Delta_1 - k_2 \cdot \Delta_2), \quad (2)$$

$$M_B \cdot \ddot{z}_B = k_1 \cdot \Delta_1 + k_2 \cdot \Delta_2 - F_{TP} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2), \quad (3)$$

де

$$\Delta_1 = z_B - l \cdot \phi_B; \quad \Delta_2 = z_B + l \cdot \phi_B,$$

M_B – маса несучої конструкції вагона; I_B – момент інерції вагона відносно повздовжньої вісі; S_a – величина повздовжньої сили удару в автозчеп; m_T – маса візка; $I_{КП}$ – момент інерції колісної пари; r – радіус середнезношеного колеса; n – кількість вісей візка; l – половина бази вагона; F_{TP} – абсолютне значення сили сухого тертя в ресорному комплекті; k_1, k_2 – жорсткість пружин ресорного підвішування візків вагона; x_B, ϕ_B, z_B – координати, що відповідають, відповідно, повздовжньому, кутовому навколо поперечної вісі та вертикальному переміщенню вагона.

Розв'язання диференціальних рівнянь здійснено в програмному комплексі MathCad. При цьому вони зводилися до нормальної форми Коші, а після цього інтегрувалися за допомогою метода Рунге-Кутта [11, 12].

Початкові переміщення та швидкості завдані рівними нулю. Вхідними параметрами математичної моделі є технічні характеристики несучих конструкцій вагонів, параметри ресорного підвішування, а також значення сили повздовжнього удару в автозчеп.

6. Результати дослідження

6.1. Результати математичного моделювання

При визначенні динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-хопера враховано, що параметри ресорного підвішування, дорівнюють тим, що характерні для типових вантажних візків моделі 18-100. Повздовжня сила удару, яка діє на вертикальну поверхню заднього упору автозчепу прийнята рівною 3,5 МН [13, 14].

На підставі проведених розрахунків отримано прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-хопера (рис. 3). При цьому максимальна величина прискорення склала $38,5 \text{ м/с}^2$. Отже, прискорення, яке діє на несучу конструкцію вагона-хопера з фактичними розмірами перевищують ті, що отримані при номінальних на 2,7 %.

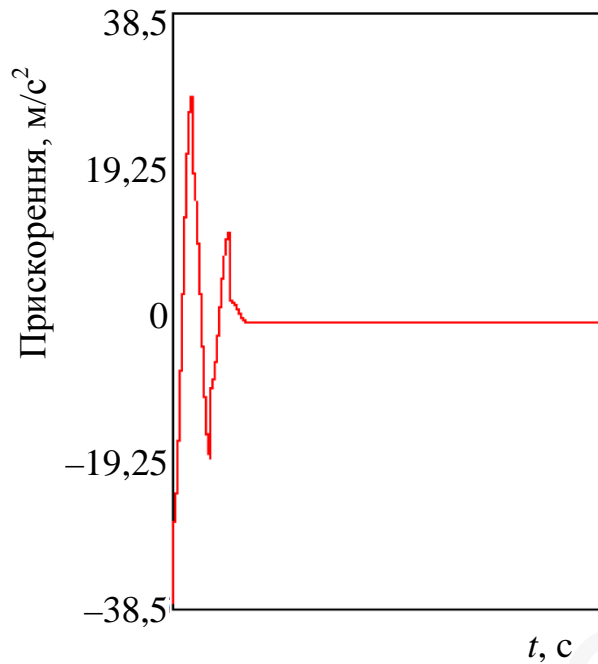


Рис. 3. Прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-хопера

6.2. Результати комп'ютерного моделювання

Для визначення полів розподілення прискорень відносно несучої конструкції вагона-хопера проведено комп'ютерне моделювання його динамічної навантаженості. Розрахунок здійснений в програмному комплексі SolidWorks Simulation (CosmosWorks). Графічні роботи проводилися в програмі SolidWorks [9, 10, 15]. Для цього за альбомом креслень створено просторову модель несучої конструкції вагона-хопера (рис. 4).

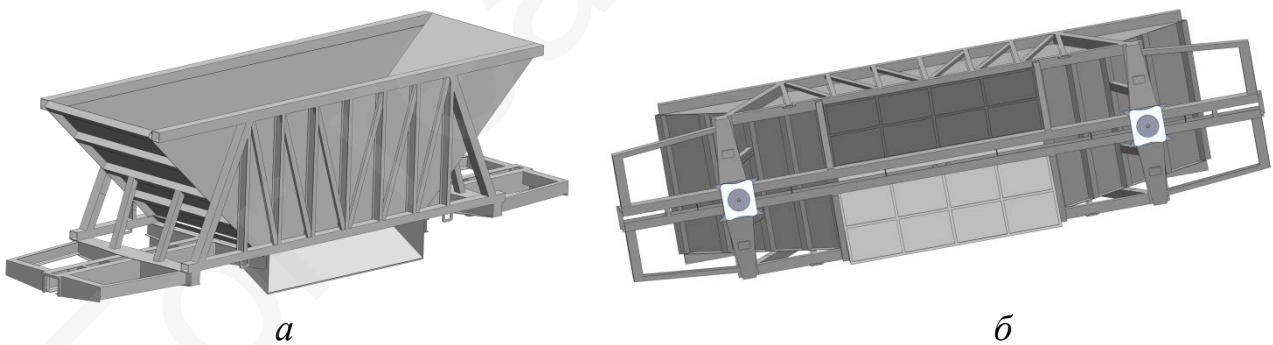


Рис. 4. Просторова модель несучої конструкції вагона-хопера:
а – вид збоку; *б* – вид знизу

При складанні скінчено-елементної моделі використані ізопараметричні тетраедри (рис. 5). Оптимальна кількість елементів моделі визначена за графоаналітичним методом [16–18]. Кількість елементів сітки склала 374143, вузлів – 125817, максимальне співвідношення сторін – 432,78, відсоток елементів з співвідношенням боків менше 3 – 7,71, більше десяти – 32,9.

При складанні розрахункової схеми несучої конструкції вагона-хопера враховано, що на нього діє вертикальне статичне навантаження P_{ϵ}^{cm} , зусилля розпору насипного вантажу P_p , а також ударне навантаження $P_{y\delta}$ на задній упор автозчепу.

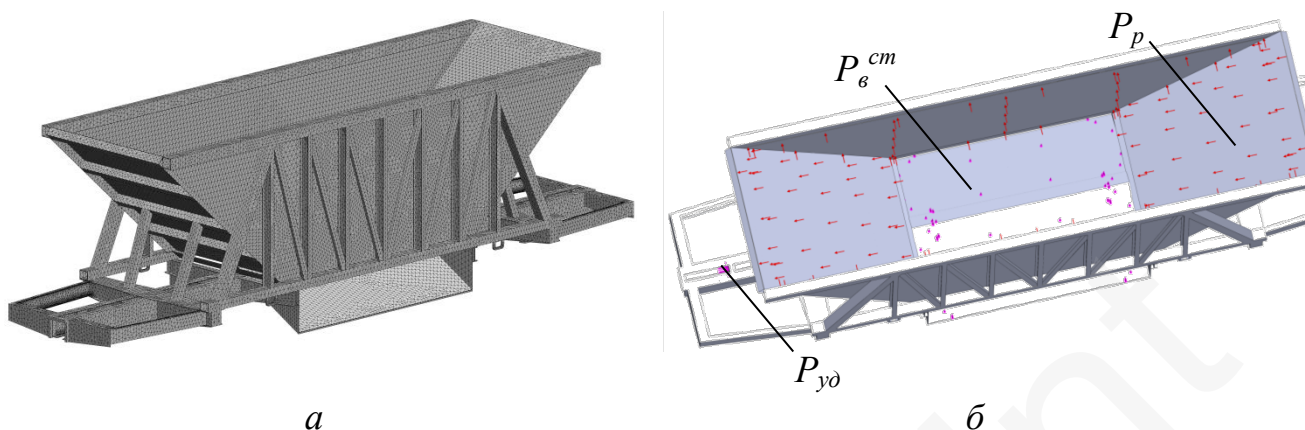


Рис. 5. Особливості розрахунку на міцність несучої конструкції вагона-хопера: *a* – скінчено-елементна модель; *б* – розрахункова схема

Закріплення моделі здійснено в зонах обпирання несучої конструкції на ходові частини. Матеріал конструкції – сталь мари 09Г2С. Результати розрахунку наведені на рис. 6.

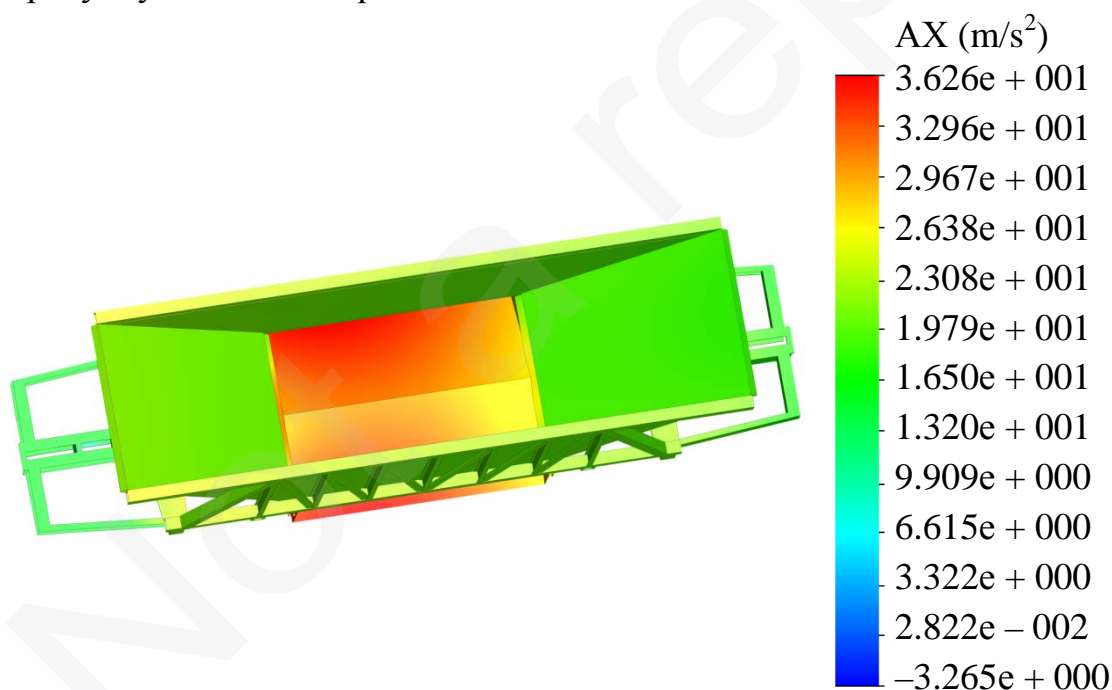


Рис. 6. Прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-хопера

Максимальні прискорення зосереджені в середній частині несучої конструкції вагона-хопера та склали 36,2 м/с².

6.3. Верифікація розроблених моделей

Для верифікації розробленої моделі використаний F -критерій [19, 20]. У якості варіаційного параметру прийнято силу удару в автозчеп. Результати розрахунку наведені на рис. 7.

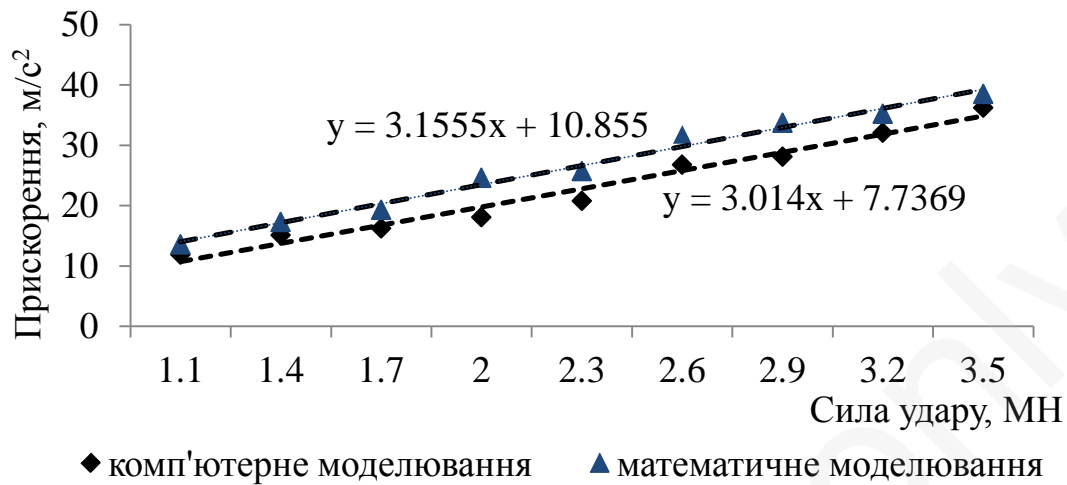


Рис. 7. Результати моделювання динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-хопера

Проведені розрахунки показали, що розрахункове значення критерію складає $F_p=1,09$, що менше за табличне значення $F_r=3,29$. Отже, гіпотеза про адекватність не відхиляється.

За розрахунковою схемою, наведеною на рис. 5, б, також визначені власні форми коливань несучої конструкції вагона-хопера. Деякі з них наведені на рис. 8.

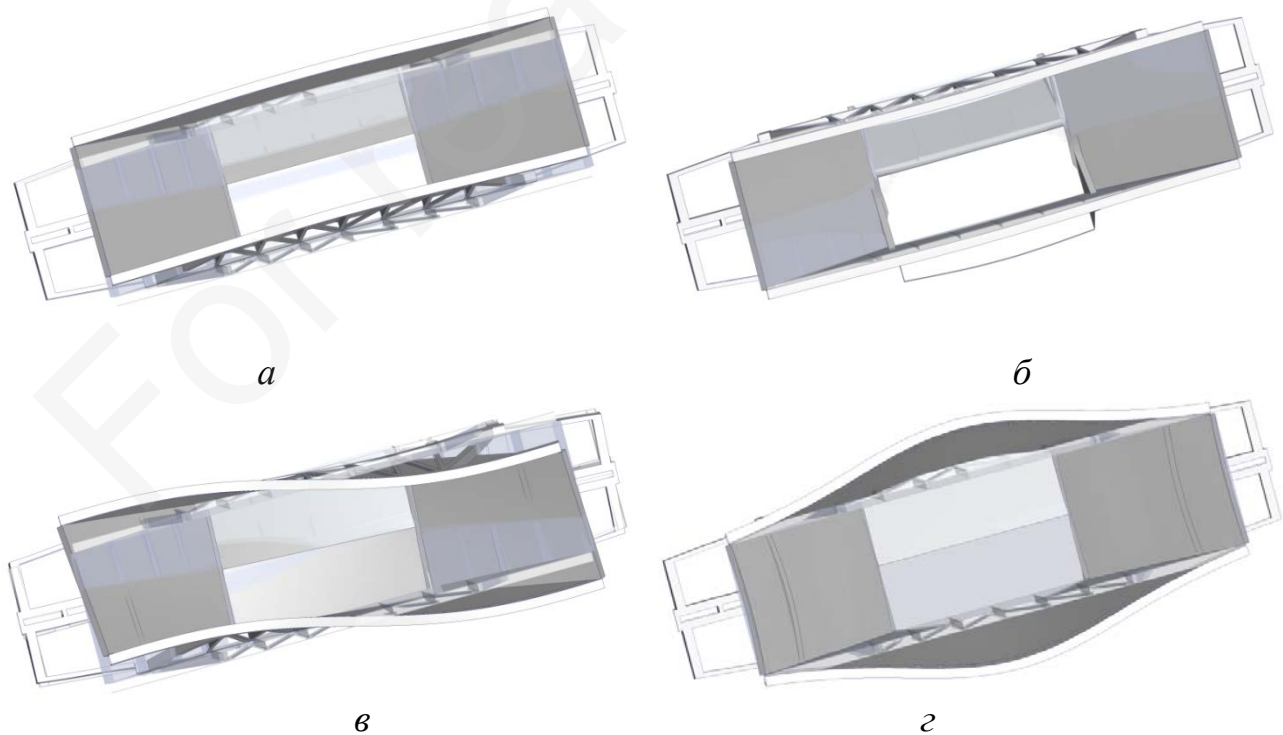


Рис. 8. Форми коливань несучої конструкції вагона-хопера (масштаб деформацій 30:1): а – перша форма; б – друга форма; в – третя форма; г – четверта форма

Значення власних частот коливань несучої конструкції вагона-хопера наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Значення власних частот коливань несучої конструкції вагона-хопера

Форма коливань	Частота, Гц	Форма коливань	Частота, Гц
1	10,8	6	35,9
2	24,5	7	42,4
3	25,5	8	43,1
4	30,5	9	50,9
5	34,2	10	54,4

З табл. 2 видно, що значення власних частот коливань знаходяться в межах допустимих [13, 14].

Отримані результати будуть враховані при обґрунтуванні подовження строку служби несучої конструкції вагона-хопера, який вичерпав свій нормативний ресурс.

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Strengths. В результаті проведення досліджень визначено фактичні розміри складових елементів несучої конструкції вагона-хопера. При цьому при визначенні полів розподілення прискорень відносно несучої конструкції вагона-хопера проведено комп'ютерне моделювання його динамічної навантаженості. Розрахунок здійснений в програмному комплексі SolidWorks Simulation (CosmosWorks). Використання отриманих результатів дозволять фахівцям, які займаються експлуатацією, випробуваннями та дослідженнями несучої конструкції вагона-хопера більш точно прогнозувати їх фактичний технічний стан. Це у свою чергу дозволить скоротити витрати на його утримання та експлуатацію.

Weaknesses. Для подальшого проведення науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт із зазначеного в дослідженні напрямку обов'язковим є проведення натурних експериментальних досліджень. А саме визначення міцності несучих конструкційних елементів вагона-хопера сучасними методами натурних випробувань.

Opportunities. Серед додаткових можливостей використання отриманих результатів можна виділити доцільність їх застосування ще при проектних процедурах. Тобто використання отриманих результатів дозволять проектувальнику нових вагонів побачити сильні та слабкі сторони конструкції, які виникнуть після тривалої експлуатації.

Вантажний вагон є конструкцією важкого транспортного машинобудування. Тому отримані результати будуть корисними для вивчення фахівцям з різних напрямків транспортного машинобудування.

Threats. Даний рівень досліджень не потребує додаткових витрат при впровадженні результатів.

8. Висновки

1. Визначено фактичні розміри конструкційних елементів несучої конструкції вагона-хопера. Дослідження проведені стосовно вагона-хопера моделі 20-9749 побудови філії «Панютинський вагоноремонтний завод» Акціонерного товариства «Укрзалізниця», Україна. Встановлено, що маса несучої конструкції вагона-хопера з урахуванням найбільшої величини зносів елементів, зафіксованих під час натурних досліджень, менша на 9,3 % у порівнянні з несучою конструкцією вагона-хопера, який має номінальні розміри.

2. Проведено математичне та комп'ютерне моделювання динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-хопера, а також здійснено верифікацію розроблених моделей. Результати математичного моделювання показали, що максимальна величина прискорення склала $38,5 \text{ м/с}^2$.

Для визначення полів розподілення прискорень відносно несучої конструкції вагона-хопера проведено комп'ютерне моделювання його динамічної навантаженості. Розрахунок здійснений в програмному комплексі SolidWorks Simulation (CosmosWorks). При цьому максимальні прискорення зосереджені в середній частині несучої конструкції вагона-хопера та склали $36,2 \text{ м/с}^2$.

Для верифікації розробленої моделі використаний F -критерій. Проведені розрахунки показали, що розрахункове значення критерію складає $F_p=1,09$ та є меншим за табличне значення $F_r=3,29$. Отже, гіпотеза про адекватність не відхиляється.

3. Визначено власні частоти та форми коливань несучої конструкції вагона-хопера. Результати проведених досліджень показали, що значення власних частот коливань несучої конструкції вагона-хопера з фактичними розмірами конструкційних елементів знаходяться в межах допустимих. При цьому значення першої власної частоти коливань складає 10,8 Гц.

Подяка

Ця публікація виконана в рамках проекту: «Розроблення концептуальних засад для відновлення ефективного функціонування застарілих вантажних вагонів (Development of conceptual frameworks for restoring the efficient operation of obsolete freight cars)». Реєстраційний номер проекту: 2020.02/0122, фінансування якого здійснюється Національним фондом досліджень України за кошти державного бюджету.

Література

1. Буліч, Д. І., Сапронова, С. Ю., Кошель, О. О., Ткаченко, В. П. (2019). Оцінка показників надійності несучих конструкцій вантажних вагонів із залишковим ресурсом. *Логістичне управління та безпека руху на транспорті*, 17–19.
2. Сапронова, С. Ю., Буліч, Д. І., Ткаченко, В. П. (2017). Продовження терміну експлуатації вантажних вагонів. *Вісник Східноукраїнського Національного університету імені Володимира Даля*, 3 (233), 179–182.
3. Okorokov, A., Fomin, O., Lovska, A., Vernigora, R., Zhuravel, I., Fomin, V. (2018). Research into a possibility to prolong the time of operation of universal open top wagon bodies that have exhausted their standard resource. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (7 (93)), 20–26. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.131309>
4. Афанасьев, А. Е. (2008). Разработка методики расчетно-экспериментального

обоснования продления срока службы полувагонов. *Известия ПГУПС*, 2, 125–135.

5. Бороненко, Ю. П., Третьяков, А. В., Жарова, Е. А. (2012). О корректировке Положения о продлении срока службы грузовых вагонов, курсирующих в международном сообщении. *Евразия вестник Москва*, 10, 13–14.

6. Анофриев, В. Г., Рейдемейстер, А. Г., Калашник, В. А., Кулешов, В. П. (2016). К вопросу продления полезного срока службы вагонов для перевозки окатышей. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*, 3 (63), 148–160. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2016/74749>

7. Пулято, А. В., Коновалов, Е. Н., Афанаськов, П. М. (2016). Прогнозирование остаточного ресурса вагона хоппер-дозатора после длительной эксплуатации с учетом фактических физико-механических характеристик материала несущей конструкции. *Механика машин, механизмов и материалов*, 1 (34), 26–35.

8. Богомаз, Г. И., Мехов, Д. Д., Пилипченко, О. П., Черномашенцева, Ю. Г. (1992). Нагруженность контейнеров-цистерн, расположенных на железнодорожной платформе, при ударах в автосцепку. *Динаміка та керування рухом механічних систем*, 87–95.

9. Fomin, O., Lovska, A., Radkevych, V., Horban, A., Skliarenko, I., Gurenkova, O. (2019). The dynamic loading analysis of containers placed on a flat wagon during shunting collisions. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 14 (21), 3747–3752.

10. Fomin, O., Lovska, A., Pistek, V., Kucera, P. (2020). Research of stability of containers in the combined trains during transportation by railroad ferry. *MM Science Journal*, 2020 (1), 3728–3733. doi: http://doi.org/10.17973/mmsj.2020_03_2019043

11. Кирьянов, Д. В. (2006). *Mathcad 13*. Санкт-Петербург: БХВ. Петербург, 608.

12. Дьяконов, В. (2000). *MATHCAD 8/2000: специальный справочник*. Санкт-Петербург: Питер, 592.

13. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних) (2015). Київ, 162.

14. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам (2016). Москва: Стандартинформ, 54.

15. Fomin, O., Lovska, A., Píštěk, V., Kučera, P. (2019). Dynamic load effect on the transportation safety of tank containers as part of combined trains on railway ferries. *Vibroengineering PROCEDIA*, 29, 124–129. doi: <http://doi.org/10.21595/vp.2019.21138>

16. Vatulia, G. L., Lobiak, O. V., Deryzemlia, S. V., Verevicheva, M. A., Orel, Y. F. (2019). Rationalization of cross-sections of the composite reinforced concrete span structure of bridges with a monolithic reinforced concrete roadway slab. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 664, 012014. doi: <http://doi.org/10.1088/1757-899x/664/1/012014>

17. Vatulia, G., Komagorova, S., Pavliuchenkov, M. (2018). Optimization of the truss beam. Verification of the calculation results. *MATEC Web of Conferences*, 230, 02037. doi: <http://doi.org/10.1051/matecconf/201823002037>

18. Kondratiev, A. V., Gaidachuk, V. E., Kharchenko, M. E. (2019). Relationships Between the Ultimate Strengths of Polymer Composites in Static Bending, Compression, and Tension. *Mechanics of Composite Materials*, 55 (2), 259–266. doi: <http://doi.org/10.1007/s11029-019-09808-x>

19. Ивченко, Г. И., Медведев, Ю. И. (2014). *Математическая статистика*. Москва: Либриком, 352.

20. Руденко, В. М. (2012). *Математична статистика*. Київ: Центр учбової літератури, 304.