

УДК 629.463.62

Олексій Фомін¹, Альона Ловська²

¹Професор кафедри “Вагони та вагонне господарство”, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

²Доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейербаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8604-1764>

* Автор, відповідальний за листування: alyonalovskaya.vagons@gmail.com

ВИЗНАЧЕННЯ НАВАНТАЖЕНОСТІ НЕСУЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ ВАГОНА-ПЛАТФОРМИ З ЕНЕРГОПОГЛИНАЛЬНИМИ БАЛКАМИ

Для зменшення навантаженості несучої конструкції вагона-платформи при експлуатаційних режимах, зокрема маневрових співударяннях, запропоновано впровадження в її складові енергопоглинального матеріалу. Дане рішення реалізується шляхом створення замкненої конструкції хребтової та основних повздожніх балок, заповнених наповнювачем з пружно-в'язкими властивостями. Дослідження проведені стосовно вагона-платформи моделі 13-401. Для обґрунтування запропонованого рішення здійснено математичне моделювання динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи, звантаженого двома контейнерами-цистернами типорозміру ІСС при маневровому співударянні. Розв'язок математичної моделі проведений за методом Рунге – Кутта в програмному комплексі MathCad. Встановлено, що динамічна навантаженість несучої конструкції вагона-платформи з урахуванням запропонованих рішень зменшується на 3,2% у порівнянні з несучої конструкції без наповнювача.

Проведено розрахунок на міцність несучої конструкції вагона-платформи за методом скінчених елементів, який реалізовано в програмному комплексі SolidWorks Simulation. Результати розрахунків показали, що максимальні еквівалентні напруження не перевищують допустимих значень та на 14% нижче за ті, що виникають у типовій конструкції вагона-платформи. Проведені дослідження сприятимуть створенню інноваційних конструкцій вантажних вагонів та підвищенню ефективності використання залізничного транспорту.

Ключові слова: транспортна механіка, вагон-платформа, несуча конструкція, динамічна навантаженість, міцність.

Вступ. Перспективи інтеграції залізничного транспорту в систему міжнародних коридорів зумовлюють необхідність створення і впровадження в експлуатацію інноваційних конструкцій вагонів з покращеними техніко-економічними показниками. Найбільш поширеним типом вагона у міжнародному сполученні є вагони-платформи, це обумовлено можливістю перевезень на них мобільних транспортних засобів.

Основним несучим елементом вагона-платформи є рама. В умовах експлуатаційних режимів вона випробовує знакозмінні напруження. Це обумовлює пошкодження рами та необхідність здійснення позапланових видів ремонту. У зв'язку з цим виникає необхідність проведення досліджень щодо можливості зменшення навантаженості рами вагона-платформи в експлуатації шляхом урахування принципів мультифункціональності при проектуванні.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. В публікації [1] проведено аналіз конструкції вантажного вагона для інтермодальних перевезень. Вагон призначений для перевезення вантажних автомобілів залізницею.

Аналіз конструкції вагона для перевезень великовагових вантажів наведений у роботі [2]. Висвітлені особливості розрахунку на міцність несучої конструкції вагона, які підтвердили доцільність запропонованих при проектуванні рішень.

Важливо сказати, що запропоновані конструкції вагонів-платформ не передбачають можливості зменшення їх динамічної навантаженості в експлуатації.

Заходи щодо модернізації рухомого складу для підвищення ефективності використання розглянуті у роботі [3]. Виконано оцінку міцності несучої конструкції платформи на підставі комплексу розрахункових і експериментальних досліджень.

Визначення показників міцності довгобазної конструкції вагона-платформи проводиться у роботі [4]. Розрахунок здійснений для двох варіантів завантаження, при яких було отримано найбільші згинальні моменти. Визначення максимальних еквівалентних напружень у основних несучих елементах рами здійснено за методом скінчених елементів.

Однак при цьому не розглянуті питання можливості зменшення навантаженості несучих конструкцій вагонів-платформ в експлуатації.

Питання щодо можливості застосування методів теоретичних і експериментальних досліджень міцності основних несучих елементів конструкцій довгобазних вагонів-платформ розглянуті у публікації [5]. Наведено результати розрахунку несучих елементів конструкції на втому з використанням обчислювального комплексу, що реалізує метод скінчених елементів стандарту IBM-PC.

Особливості проектування залізничного вагона для інтермодальних перевезень з адаптованою завантажувальною платформою розглянуті у роботі [6]. Прийняті конструкційні рішення обґрунтовані статичними та динамічними дослідженнями в програмних комплексах ANSYS та ADAMS/Rail.

Важливо сказати, що в даних роботах не розглянуті питання покращення міцності несучих конструкцій вагонів-платформ шляхом зменшення їх динамічної навантаженості в експлуатації.

В роботах [7 – 9] проводиться визначення навантаженості несучих конструкцій вантажних вагонів з наповнювачами в їх складових. Результати проведених розрахунків підтвердили доцільність запропонованого рішення. Однак авторами не приділялося уваги визначенню навантаженості несучої конструкції вагона-платформи з наповнювачем в її складових, завантаженого контейнерами-цистернами.

Аналіз літературних джерел [1 – 9] дозволяє зробити висновок, що питання покращення показників міцності несучих конструкцій вагонів-платформ шляхом зменшення навантаженості при експлуатаційних режимах є актуальними та потребують дослідження і розвитку.

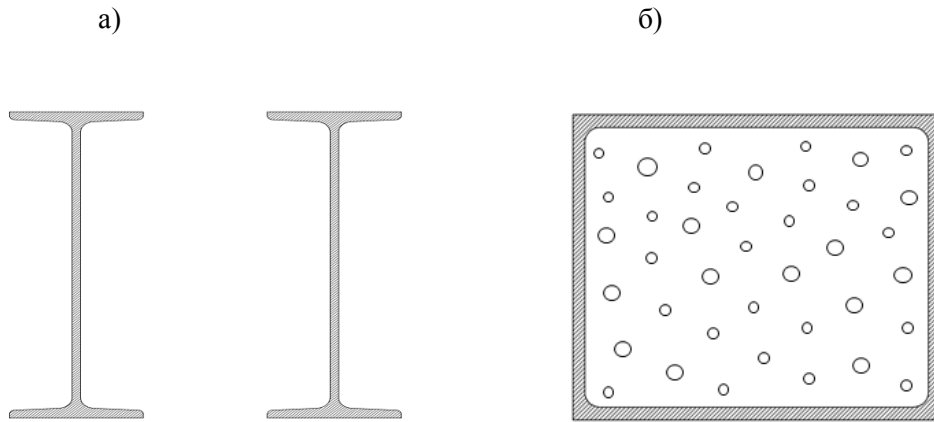
Мета і завдання дослідження. Метою статті є висвітлення результатів визначення навантаженості несучої конструкції вагона-платформи з енергопоглинальними балками. Для досягнення зазначеної мети визначені такі завдання:

провести математичне моделювання динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи з енергопоглинальними балками при маневровому співударянні;

провести розрахунок на міцність несучої конструкції вагона-платформи з енергопоглинальними балками при маневровому співударянні.

Матеріали та методи дослідження. Для зменшення навантаженості несучої конструкції вагона-платформи при експлуатаційних режимах, зокрема маневрових співударяннях, запропоновано впровадження в її складові енергопоглинального матеріалу. Дане рішення реалізується шляхом створення замкненої конструкції хребтової та основних повздовжніх балок, заповнених наповнювачем з пружно-в'язкими властивостями (рис. 1, 2). Як прототип обрано вагон-платформу моделі 13-401 з урахуванням модернізації відповідно до проекту НВЦ

«Вагони шляхом постановки на несучу конструкцію фітингових упорів для можливості перевезення контейнерів.



*Рис. 1. Переріз хребтової балки рами вагона-платформи
а) типова; б) удосконалена*

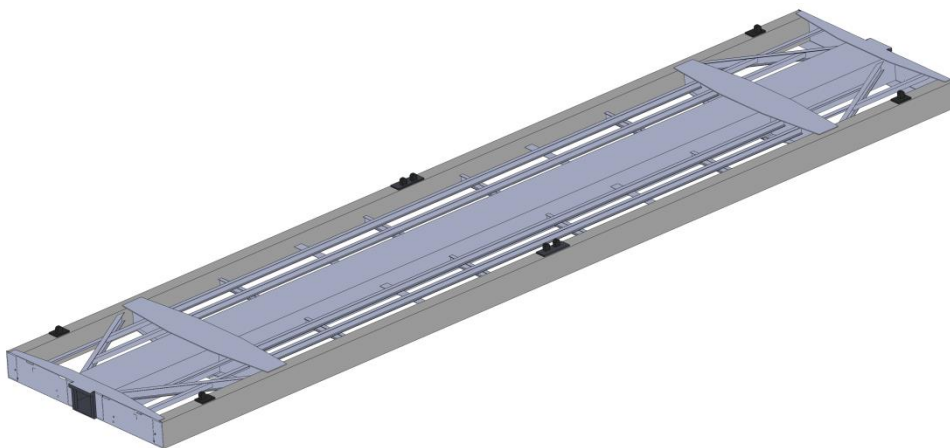


Рис. 2. Просторова модель несучої конструкції вагона-платформи

Визначення оптимальних параметрів профілю хребтової та повздовжніх балок здійснено за резервами міцності типової конструкції рами. З урахуванням запропонованого удосконалення стає можливим зменшення тари несучої конструкції на 3% у порівнянні з вагоном-прототипом.

З метою обґрунтування запропонованих рішень проведено визначення динамічної навантаженості вагона-платформи у повздовжній площині. Для цього використано математичну модель, розроблену проф. Богомазом Г. І., яка описує динамічну навантаженість довгобазного вагона-платформи, завантаженого чотирма контейнерами-цистернами при дії повздовжньої сили на задній упор автотягача [10]. Однак у рамках даного дослідження модель доопрацьовано шляхом врахування пружно-в'язких зв'язків в рамі. Розрахункова схема наведена на рис. 3.

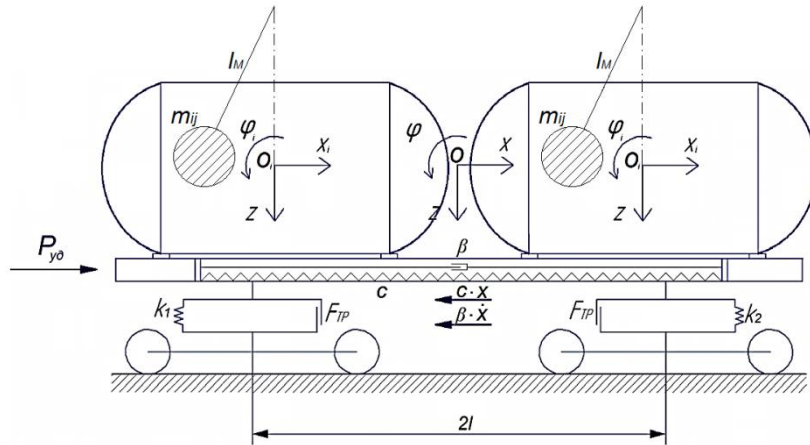


Рис. 3. Розрахункова схема вагона-платформи, завантаженого контейнерами-цистернами

Враховано, що вагон-платформа завантажений двома контейнерами-цистернами, типорозміру 1СС. Рух наливного вантажу в котлі описувався сукупністю математичних маятників [10]. Визначення гідродинамічних характеристик наливного вантажу здійснювалося за методикою, наведеною у [11]. Як наливний вантаж прийнятий бензин. На підставі проведених розрахунків для випадку максимально-допустимої завантаженості котла контейнера-цистерни у відповідності з [12], отримано значення $m_{ij} \approx 6,8$ т, $I_{ij} \approx 250$ т · м².

$$M'_{\Pi\Pi} \cdot \ddot{x}_{\Pi\Pi} + M_{\Pi\Pi} \cdot h \cdot \ddot{\varphi}_{\Pi\Pi} = S_a - \sum_{i=1}^2 S_i - \beta \cdot \dot{x} - c \cdot x, \quad (1)$$

$$I_{\Pi\Pi} \cdot \ddot{\varphi}_{\Pi\Pi} + M_{\Pi\Pi} \cdot h \cdot \ddot{x}_{\Pi\Pi} - g \cdot \varphi_{\Pi\Pi} \cdot M_{\Pi\Pi} \cdot h = l \cdot F_{TP} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2) + l(k_1 \cdot \Delta_1 - k_2 \cdot \Delta_2), \quad (2)$$

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

$$\left(m_i + \sum_{j=1}^k m_{ij} \right) \cdot (\ddot{x}_{\Pi\Pi} - \ddot{x}_i) + \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \right) \cdot (\ddot{\varphi}_{\Pi\Pi} - \ddot{\varphi}_i) - \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij} = S_i, \quad (4)$$

$$\left(I_{\alpha} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij}^2 \right) \cdot (\ddot{\varphi}_{\Pi\Pi} - \ddot{\varphi}_i) + \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \right) \cdot (\ddot{x}_{\Pi\Pi} - \ddot{x}_i) + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij} - g \cdot \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \right) \cdot (\varphi_{\Pi\Pi} - \varphi_i) = 0, \quad (5)$$

$$\left(m_i + \sum_{j=1}^k m_{ij} \right) \cdot \ddot{z}_{\Pi\Pi} = 0, \quad (6)$$

$$I_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij} - m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{x}_{ij} - m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\varphi}_i + g \cdot m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij} = 0, \quad (7)$$

де

$$M'_{\text{ПЛ}} = M_{\text{ПЛ}} + 2 \cdot m_T + \frac{n \cdot I}{r^2}; \Delta_1 = z_{\text{ПЛ}} - l \cdot \varphi_{\text{ПЛ}}; \Delta_2 = z_{\text{ПЛ}} + l \cdot \varphi_{\text{ПЛ}}$$

$$S_i = f_{mp} \cdot \text{sign} \cdot (x_{\text{ПЛ}} - x_i)'$$

$M_{\text{ПЛ}}$ – маса несучої конструкції вагона-платформи; $I_{\text{ПЛ}}$ – момент інерції вагона-платформи відносно повздовжньої осі; S_a – величина повздовжньої сили удару в автозчеп; f_{mp} – амплітудне значення сили сухого тертя; m_T – маса візка; I – момент інерції колісної пари; r – радіус середнезношеного колеса; n – кількість осей візка; l – половина бази вагона-платформи; F_{TP} – абсолютне значення сили сухого тертя у ресорному комплекті; k_1, k_2 – жорсткість пружин ресорного підвішування візків вагона-платформи; k – кількість тонів коливань наливного вантажу; m_i – маса тіла, яке еквівалентне i -му контейнеру-цистерні з частиною наливного вантажу, що не приймає участі у переміщенні відносно котла; m_{ij} – маса j -го маятника у i -му контейнері-цистерні; z_{ci} – висота центру ваги контейнера-цистерни; c_{ij} – відстань від площини $z_i = 0$ до точки закріплення j -го маятника у i -му контейнері-цистерні; l_{ij} – довжина j -го маятника; I_{θ} – приведений момент інерції i -го контейнера-цистерни та наливного вантажу, що не приймає участі у русі відносно котла; I_{ij} – момент інерції маятника; x, φ, z – координати, що відповідають, відповідно, повздовжньому, кутовому навколо повздовжньої осі та вертикальному переміщенню вагона-платформи; x_i, φ_i – координати, що відповідають, відповідно, повздовжньому та кутовому навколо повздовжньої осі переміщенню контейнера-цистерни; ξ_{ij} – кут відхилення j -го маятника від вертикалі.

При цьому $x_i < 30$ мм [10, 13], якщо $x_i \geq 30$ мм, тоді $x_i = x$. Вертикальні переміщення контейнера-цистерни відносно рами не враховувалися. Величина сили повздовжнього удару, що діє на вагон-платформу, прийнята рівною 3,5 МН.

При проведенні розрахунків враховано, що несуча конструкція вагона-платформи спирається на візки моделі 18-100. Розв'язання диференціальних рівнянь руху здійснено за методом Рунге-Кутта в програмному комплексі MathCad [14, 15]. Початкові переміщення та швидкості прийняті рівними нулю [16, 17]. Враховано, що жорсткість енергопоглинального матеріалу, яким заповнена хребтова балка складає 78 кН/м, а коефіцієнт в'язкого опору – 105 кН·с/м. Максимальні прискорення склали 38,7 м/с² та виникають в момент удару (рис. 4).

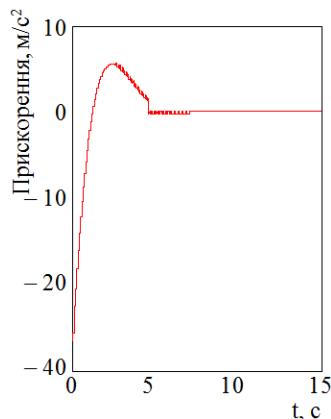


Рис. 4. Прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи при ударі

Далі величина прискорення має додатне значення та після невеликого стрибка затухає. Отримане прискорення на 3,2% нижче за те, що отримане для несучої конструкції вагона-платформи без наповнювача в рамі.

На наступному етапі дослідження проведено розрахунок на міцність несучої конструкції вагона-платформи. В якості розрахункового використаний метод скінчених елементів, який реалізовано в програмному комплексі SolidWorks Simulation.

Скінчено-елементна модель несучої конструкції вагона-платформи утворена ізопараметричними тетраедрами. Оптимальна кількість тетраедрів розрахована за графоаналітичним методом [18, 19]. Кількість елементів сітки склала 395117, вузлів – 131579. Максимальний розмір елементу сітки дорівнює 100 мм, мінімальний – 20 мм, максимальне співвідношення боків елементів – 719,38, відсоток елементів з співвідношенням боків менше трьох – 11,1, більше десяти – 18,8. Кількість елементів в колі склала 9. Співвідношення збільшення розміру елементів – 1,7.

При складанні розрахункової схеми враховано, що на несучу конструкцію вагона-платформи діє вертикальне статичне навантаження P_v , яке прикладалося до фітингових упорів у вигляді дистанційного з урахуванням висоти центру ваги контейнерів-цистерн, а також повздовжнє навантаження P_n на задній упор автотягача (рис. 5).

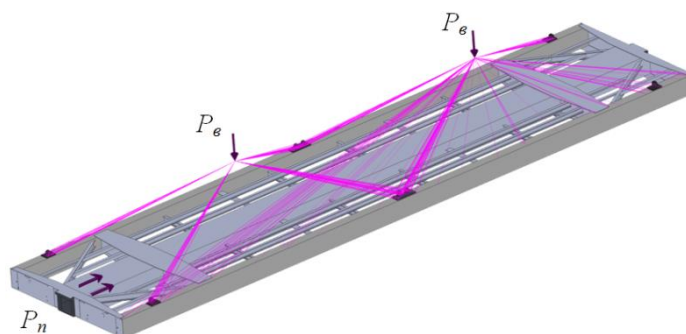


Рис. 5. Розрахункова схема несучої конструкції вагона-платформи

Матеріал металоконструкції – сталь марки 09Г2С. Закріплення моделі здійснювалося в зонах опирання рами на візки. Наявність пружно-в'язкого матеріалу в рамі моделювалася постановкою зв'язків з відповідними характеристиками за допомогою опцій програмного комплексу SolidWorks Simulation. Результати розрахунку наведені на рис. 6.

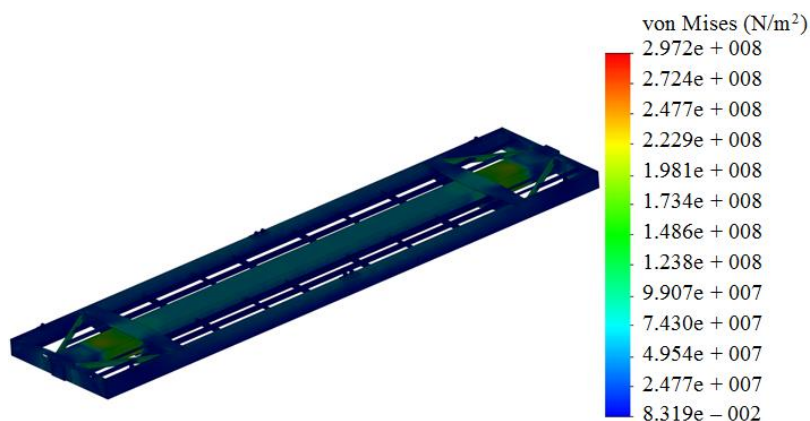


Рис. 6. Напружений стан несучої конструкції вагона-платформи

Максимальні еквівалентні напруження при цьому зафіксовані в зоні взаємодії шворневої балки з хребтовою та склали 297,2 МПа. Отримана величина напружень не перевищує допустимі та на 14% нижче за ті, що виникають у типовій конструкції [20].

Висновки. 1. Проведено математичне моделювання динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи з енергопоглинальними балками при маневровому співударянні. Максимальні прискорення склали $38,7 \text{ м/с}^2$ та виникають в момент удару. Отримана величина прискорення на 3,2% нижче за ту, що розрахована для несучої конструкції вагона-платформи без наповнювача в рамі.

2. Проведено розрахунок на міцність несучої конструкції вагона-платформи з енергопоглинальними балками при маневровому співударянні. При цьому максимальні еквівалентні напруження зафіксовані в зоні взаємодії шворневої балки з хребтовою та склали 297,2 МПа. Розрахована величина напружень не перевищує допустимі та на 14% нижче за ті, що виникають у типовій конструкції

Проведені дослідження сприятимуть створенню інноваційних конструкцій вантажних вагонів та підвищенню ефективності використання залізничного транспорту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Krasoń Wiesław, Niezgoda Tadeusz, Stankiewicz Michał. Innovative Project of Prototype Railway Wagon and Intermodal Transport System. *Transportation Research Procedia*. 2016. Vol. 14. P. 615 – 624.
2. Divya Priya G., A. Swarnakumari. Modeling and analysis of twenty tonne heavy duty trolley. *Intern. J. of Innovative Technology and Research*. 2014. Vol. 2. Issue 6. P. 1568 – 1580.
3. О. Н. Reidemeister, V. O. Kalashnyk, O. A. Shykunov. Modernization as a way to improve the use of universal cars. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2016. № 2 (62). С. 148 – 156.
4. Кельріх М. Б., Федосов-Ніконов Д. В. Дослідження на міцність конструкції довгобазної платформи. *Вісник Східноукраїнського Національного університету імені Володимира Даля*. 2016. № 1 (225). С. 90 – 94.
5. Донченко А. В., Федосов-Ніконов Д. В. Методика розрахунково-експериментальних досліджень конструкції довгобазної платформи. *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія : Транспортні системи і технології*. 2016. Вип. 28. С. 53 – 60.
6. Pavol Šfastniak, Pavol Kurčík, Alfréd Pavlík. Design of a new railway wagon for intermodal transport with the adaptable loading platform. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 235(2): 00030.
7. Ловська А. О., Фомін О. В., Рибін А. В., Лебідь Г. О. Визначення динамічної навантаженості напіввагона з замкненою хребтовою балкою, заповненою наповнювачем. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 32 (71). № 4, 2021. С. 255 – 259.*
8. Ловська А. О., Фомін О. В., Рибін А. В. Дослідження динамічної навантаженості несучої конструкції напіввагона з пружно-в'язким наповнювачем в хребтовій балці. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2021. №3 (93). С. 59 – 66. doi: <https://doi.org/10.15802/stp2021/242038>
9. Фомін О. В., Ловська А. О., Рибін А. В. Дослідження повздовжньої навантаженості вагона-платформи з наповнювачем в несучій конструкції. *Наукові вісті Даліського університету*. 2021. №21. doi: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21-17>
10. Богомаз Г. И., Мехов Д. Д., Пилипченко О. П., Черномашенцева Ю. Г. Нагруженность контейнеров-цистерн, расположенных на железнодорожной платформе, при ударах в автосцепку. *Зб. наук. праць “Динаміка та керування рухом механічних систем” – Київ: АНУ, Інститут технічної механіки, 1992. С. 87 – 95.*
11. Кривовязюк Ю. П. Оценка эквивалентной нагруженности четырехосных железнодорожных цистерн с жидкими грузами различной плотности при продольных ударах: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.22.07 “Подвижной состав железных дорог и тяга поездов” / Ю. П. Кривовязюк. Днепропетровск, 1986. 157 с.
12. Правила перевозок опасных грузов. К соглашению о международном железнодорожном грузовом сообщении. Том 3. ОСЖД, 2011. 531 с.
13. Правила размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах при перевозках их по железным дорогам колеи 1520 мм стран-участниц СМГС. Ч. 1. Общие положения. ОСЖД, 2012. 681 с.
14. Дьомні Ю. В., Черняк Г. Ю. Основи динаміки вагонів: навч. посіб. Київ: КУЕТТ, 2003. 269 с.
15. Кирьянов Д. В. Mathcad 13. Петербург: БХВ, 2006. 608 с.
16. Шишацький А. В., Лютов В. В., Жук О. Г., Животовський Р. М. Удосконалена методика оцінювання параметрів сигналів з цифровими видами модуляції. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2016. №4(25). С. 117 – 121.

17. Шишацький А. В., Ольшанський В. В., Животовський Р. М. Алгоритм вибору робочих частот для засобів військового радіозв'язку в умовах впливу навмисних завад. Системи озброєння і військова техніка. 2016. № 2. С. 62 – 66.
18. Vatulia 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.
19. Kitov Y., Verevicheva M., Vatulia G., Orel Y., Deryzemlia S. Design solutions for structures with optimal internal stress distribution. *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 133(1–3). 03001.
20. 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. 250 с.

REFERENCES

1. Krasoń Wiesław, Niezgodą Tadeusz, Stankiewicz Michał. (2016). Innovative Project of Prototype Railway Wagon and Intermodal Transport System. *Transportation Research Procedia*, 14. 615 – 624. (in English).
2. Divya Priya G., A. Swarnakumari. (2014). Modeling and analysis of twenty tonne heavy duty trolley. *Intern. J. of Innovative Technology and Research*, 2. 6. 1568 – 1580. (in English).
3. O. H. Reidemeister, V. O. Kalashnyk, O. A. Shykunov. (2016). Modernization as a way to improve the use of universal cars. *Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zaliznichnogo transportu*, 2 (62). 148 – 156. (in English).
4. Kel'rih, M. B., Fedosov-Nikonov, D. V. (2016). Doslidzhennya na micnist' konstrukcii dov gobaznoї platformi [Research on the strength of the long-base platform]. *Visnik Skhidnoukrains'kogo Nacional'nogo universitetu imeni Volodimira Dalya*, 1 (225). 90 – 94. (in Ukrainian).
5. Donchenko A. V., Fedosov-Nikonov D. V. (2016). Metodika rozrahunkovo-eksperimental'nih doslidzen' konstrukcii dov gobaznoї platformi [Methods of computational and experimental studies of the design of long-base platform]. *Zbirnik naukovih prac' Derzhavnogo ekonomiko-tehnologichnogo universitetu transportu. Seriya: Transportni sistemi i tekhnologii*, 28. 53 – 60. (in Ukrainian).
6. Pavol Šťastniak, Pavol Kurčík, Alfréd Pavlík. (2018). Design of a new railway wagon for intermodal transport with the adaptable loading platform. *MATEC Web of Conferences*, 235(2): 00030. (in English).
7. Lovska A. O., Fomin O. V., Ribin A. V., Lebid G. O. (2021). Vznachennya dinamichnoi navantazhenosti napivvagona z zamknenoyu hrebtovoyu balkoyu, zapovnenoyu napovnyuvachem [Determination of dynamic load of a gondola car with a closed ridge beam filled with filler]. *Vcheni zapiski Tavrijs'kogo nacional'nogo universitetu imeni V.I. Vernads'kogo. Seriya: Tekhnichni nauki*, 32 (71). 4. 255 – 259. (in Ukrainian).
8. Lovska A. O., Fomin O. V., Ribin A. V. (2021). Doslidzhennya dinamichnoi navantazhenosti nesuchoi konstrukcii napivvagona z pruzhno-v'yazkim napovnyuvachem v hrebtovij balci [Investigation of the dynamic load of the load-bearing structure of a gondola car with an elastic-viscous filler in the spine beam]. *Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zaliznichnogo transportu imeni akademika V. Lazaryana*, (93). 59 – 66. doi: <https://doi.org/10.15802/stp2021/242038> (in Ukrainian).
9. Fomin O. V., Lovska A. O., Ribin A. V. (2021). Doslidzhennya povzdovzhn'oi navantazhenosti vagona-platformi z napovnyuvachem v nesuchij konstrukcii [Investigation of the longitudinal load of a car-platform with a filler in the load-bearing structure]. *Naukovi visti Dalivs'kogo universitetu*, 21. doi: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21-17> (in Ukrainian).
10. Bogomaz G. I., Mehov D. D., Pilipchenko O. P., Chernomashenceva Yu. G. (1992). Nagruzhenost kontejnerov-cistern, raspolzhenykh na zheleznodorozhnoj platforme, pri udarah v avtoscepku [Loading of tank-containers located on the railway platform in case of impacts on the coupler]. *Zb. nauk. prac "Dinamika ta keruvannya ruhom mehanichnih sistem"*, 87–95. (in Russian).
11. Krivovyazyuk Yu. P. (1986). Ocenka ekvivalentnoj nagruzhenosti chetyrehosnykh zheleznodorozhnykh cistern s zhidkimi gruzami razlichnoj plotnosti pri prodolnykh udarah [Estimation of the equivalent loading of four-axle railway tanks with liquid cargoes of various densities during longitudinal impacts]: dis. na soiskanie uchenoj stepeni kand. tehn. nauk: spec. 05.22.07 "Podvizhnoj sostav zheleznykh dorog i tyaga poezdov", Dnepropetrovsk, 157. (in Russian).
12. (2011). Pravila perevozok opasnykh gruziv. K soglasheniyu o mezhdunarodnom zheleznodorozhnom gruzovom soobshenii [Rules for the transport of dangerous goods. To the agreement on international rail freight traffic]. Tom 3, OSZhD, 531. (in Russian).
13. (2012). Pravila razmescheniya i krepleniya gruzov v vagonah i konteynerah pri perevozkah ih po zheleznyim dorogam kolei 1520 mm stran-uchastnits SMGS [Rules for the placement and securing of goods in wagons and containers during their transportation by 1520 mm gauge railways of the member countries of the Agreement on International Railway Freight Traffic]. Ch. 1. Obschie polozheniya. OSZhD, 681. (in Russian).
14. Domin, Yu. V., Chernyak, G. Yu. (2003). Osnovi dinamiki vagoniv [Basics of wagon dynamics]. Kyiv: KUETT, 269 s. (in Ukrainian).
15. Kiryanov, D. V. (2006). Mathcad 13. Peterburg: BHV, 608 s. (in Russian).

16. Shishackij A. V., Lyutov V. V., Zhuk O. G., Zhivotovskij R. M. (2016). Udoskonalena metodika ocinyuvannya parametriv signaliv z cifrovimi vidami modulyacii [Improved method for estimating signal parameters with digital types of modulation]. *Nauka i tekhnika Povitryanih Sil Zbrojnih Sil Ukraini*, 4(25). S. 117 – 121. (in Ukrainian).

17. Shishackij A. V., Olshanskij V. V., Zhivotovskij R. M. (2016). Algoritm vioru robochih chastot dlya zasobiv vijskovogo radiozvyazku v umovah vplivu navmisnih zavrad [Algorithm for selecting operating frequencies for military radio communications in the event of intentional interference]. *Sistemi ozbroennya i vijskova tekhnika*, 2. S. 62 – 66. (in Ukrainian).

18. Vatulia, G., Falendysh, A., Orel, Y., Pavliuchenkov, M. (2017). Structural Improvements in a Tank Wagon with Modern Software Packages. *Procedia Engineering*, 187, 301–307. (in English).

19. Kitov, Y., Verevicheva, M., Vatulia, G., Orel, Y., Deryzemlia, S. (2017). Design solutions for structures with optimal internal stress distribution. *MATEC Web of Conferences*, 133(1–3), 03001. (in English).

20. Vagony vantazhni. Zagalni vimogi do rozrahunkiv ta proektuvannya novih i modernizovanih vagoniv koliyi 1520 mm (nesamohidnih) [Freight wagons. General requirements for the calculation and design of new and upgraded 1520 mm (non-self-propelled) railcars]. 162. DSTU 7598:2014 (2015). (in Ukrainian).

Oleksij Fomin¹, Alyona Lovska²

¹Professor of Department of Cars and Carriage Facilities, State University of Infrastructure and Technologies, Kyrylivska str., 9, Kyiv, 04071, Ukraine

²Associate Professor of the Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine

DETERMINATION OF LOAD-BEARING CAPACITY OF A FLATCAR WITH ENERGY-DEPENDENT BEAMS

In order to reduce the load of the load-bearing structure of the flat wagon during operating conditions, in particular shunting operations, the use of energy-globalizing material in its composition was suggested. This solution is implemented by creating a closed design of the backbone and the main restrained beams filled with a reinforcement with pipe-in-noise properties. Investigations were carried out with regard to the flat car model 13-401. In order to substantiate the suggested solution the mathematical modeling of dynamic load-carrying capacity of the flat wagon loaded with two tank-containers of ICC size at shunting coupling was carried out. The mathematical model was developed by the Runge-Kutt method in the MathCad software. It was found that dynamic load of the flat car load-bearing structure with the suggested solutions reduced by 3.2% in comparison with the load-bearing structure without a surge suppressor.

The strength of the load-bearing structure of the flat wagon was calculated by the method of joined elements, which was implemented in the SolidWorks Simulation program complex. The results of calculations showed that the maximum equivalent loads do not exceed the permissible values and are 14% lower than those occurring in the typical flatcar design. The conducted research will contribute to the creation of innovative designs of freight cars as well as to the increase of efficiency of rail transport utilization.

Keywords: transport mechanics, flatcar, load-bearing structure, dynamic load, strength.