

Ловська А. О., Діжо Я., Рибін А. В., Рукавішников П. В.

ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ МІЦНОСТІ КУЗОВА НАПІВВАГОНА ПРИ ПЕРЕВЕЗЕННІ В НЬОМУ КОНТЕЙНЕРІВ

В матеріалах статті досліджено динамічну навантаженість та міцність несучої конструкції напіввагона при перевезенні в ньому контейнерів. Для визначення прискорень, які діють на несучу конструкцію напіввагона проведено математичне моделювання його динамічної навантаженості за умови руху у складі поїзда. При цьому прийнято до уваги наявність трьох ступенів вільності напіввагона та контейнерів, які характеризують повздовжнє, кутове навколо поперечної осі та вертикальне переміщення. В моделі враховано, що контейнери мають однакову звантаженість вантажем, не мають власного ступеня вільності та повторюють траєкторію переміщень напіввагона. Переміщення вантажу у контейнері до уваги не приймалося. Розв'язок математичної моделі здійснено в програмному комплексі MathCad, який реалізує метод Рунге – Кутти.

Отримана величина прискорення, як складова динамічного навантаження, врахована при розрахунку на міцність несучої конструкції напіввагона. При цьому застосовано метод скінчених елементів, який реалізовано у SolidWorks Simulation. Результати проведених розрахунків показали, що перевезення контейнерів з використанням зазначеної схеми закріплення є допустимим. Однак в умовах наднормованих режимів, тобто коли повздовжня сила на передні упори при “ривку” буде перевищувати 2,5 МН, дана величина напружень відповідно збільшиться. Тому при подальших дослідженнях в цьому напрямку необхідно приділити увагу даній розрахунковій схемі.

Проведені дослідження сприятимуть підвищенню ефективності експлуатації контейнерних перевезень та транспортної галузі в цілому. Також результати досліджень будуть корисними напрацьованими при проектуванні транспортних засобів модульного типу.

Ключові слова: транспортна механіка, напіввагон, динамічна навантаженість, міцність несучої конструкції напіввагона, контейнерні перевезення.

Актуальність дослідження. Розвиток перевізного процесу в напрямку міжнародних транспортних коридорів зумовлює необхідність його забезпечення транспортними засобами для перевезень відповідних типів вантажів. Відомо, що найбільш поширеними транспортними засобами у міжнародному сполученні є контейнери. Перевезення їх залізницею здійснюється здебільшого на вагонах-платформах. При цьому використовуються спеціалізовані конструкції вагонів-платформ, оснащені фітінговими упорами для кріплення контейнерів. Нестача спеціалізованих вагонів-платформ для перевезень контейнерів зумовила модернізацію їх існуючого парку, яка полягає у постановці стаціонарних або відкидних фітінгових упорів на їх раму. Разом з цим підвищені темпи вантажообігу в міжнародному сполученні викликають дефіцит вагонів-платформ. У зв'язку з цим виникає необхідність ситуаційної адаптації інших типів вагонів під перевезення контейнерів. Одним з таких вагонів можуть бути напіввагони (рис. 1).



Рисунок 1 – Розміщення контейнера у напіввагоні

Постановка проблеми. Типові конструкції напіввагонів не адаптовані до перевезень контейнерів. Це може сприяти порушенню їх міцності в експлуатації при певних режимах навантажень, а також безпеці перевезень вантажів. Тому для підвищення ефективності вантажообігу в міжнародному сполученні доцільним є дослідження можливості ситуаційної адаптації кузовів напіввагонів до перевезень контейнерів.

Теоретичний аналіз дослідження. Для забезпечення стійкості контейнерів на транспортних засобах при залізничних перевезеннях здійснюється їх закріплення. Зазвичай при цьому застосовуються фітінгові упори, які кріпляться на рамі вагонів і можуть виконуватися як стаціонарними, так і відкидними.

В роботі [1] авторами запропоновано модернізацію несучої конструкції вагона до перевезень контейнерів шляхом постановки фітінгових упорів. Наведено результати експериментальних досліджень міцності несучої конструкції вагона при найбільш неблагоприємних режимах експлуатаційних навантажень. Доведено доцільність запропонованої модернізації з точки зору забезпечення міцності несучої конструкції вагона.

Особливості модернізації вантажного вагона для перевезень контейнерів висвітлено у статті [2]. Авторами запропоновано використання зйомної рами для розміщення 20-ти та 40-футових контейнерів. Наведено результати розрахунку на міцність рами. Встановлено, що запропоновані рішення щодо її конструкції є доцільними. Необхідно сказати, що дана модернізація реалізована на прикладі вагонів-платформ. У випадку їх нестачі є доцільним розгляд використання даної модернізації і на інших типах вагонів, в тому числі і напіввагонах, як найбільш поширених типах вагонів у експлуатації.

В роботах [3, 4] для ситуаційної адаптації вагонів до перевезень різноманітних вантажів, в тому числі контейнерів, запропоновано впровадження зйомних модулів. Ці модулі працюють за принципом знімних кузовів. Обґрунтовано конструкційні особливості та проведено розрахунок на міцність запропонованих конструкцій зйомних модулів при основних експлуатаційних схемах навантажень. Разом з цим, дані модулі адаптовані до перевезень на вагонах-платформах, що звужує їх затребуваність в експлуатації.

Питання ситуаційної адаптації напіввагона до перевезень контейнерів розглянуто в публікації [5]. При цьому в роботі наведено особливості визначення динамічної навантаженості та міцності несучої конструкції напіввагона при відсутності закріплення контейнера. Встановлено, що така схема перевезень не є допустимою. Тому авторами запропоновано спеціальний пристрій для закріплення контейнерів в напіввагоні. Наведено обґрунтування запропонованого впровадження. Однак при цьому не приділялося уваги дослідженню міцності несучої конструкції напіввагона з урахуванням закріплення в ньому контейнерів через фітинги та фітингові упори.

В роботі [6] висвітлено дослідження міцності кузова напіввагона при перевезенні в ньому контейнерів. Однак при цьому автори досліджували його міцність за умови використання пружно-фрикційного зв'язку між фітингами контейнера та фітинговими упорами, встановленими в напіввагоні.

Аналіз публікацій [1 – 6] доводить, що питання досліджень динамічної навантаженості контейнерів при перевезенні залізничним транспортом є досить актуальними, однак вони потребують подальшого дослідження.

Мета статті: визначення динамічної навантаженості та міцності кузова напіввагона при перевезенні в ньому контейнерів з урахуванням відсутності переміщень фітингів відносно фітингових упорів.

Задачі дослідження. Для досягнення зазначеної мети визначені такі задачі:

- визначити динамічну навантаженість несучої конструкції напіввагона при перевезенні контейнерів;
- розрахувати міцність несучої конструкції напіввагона при перевезенні контейнерів.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для визначення навантаженості кузова напіввагона при перевезенні в ньому контейнерів проведено математичне моделювання. При цьому застосовано математичну модель, наведену у роботі [7]. Однак дану модель було доопрацьовано, оскільки у зазначеній роботі досліджувалося динамічну навантаженість вагона-платформи, завантаженого контейнерами-цистернами, які мають податливість наливного вантажу у середині котла.

Враховано, що у напіввагоні знаходяться два контейнери типорозміру 1СС. Розрахункову схему наведено на рис. 2.

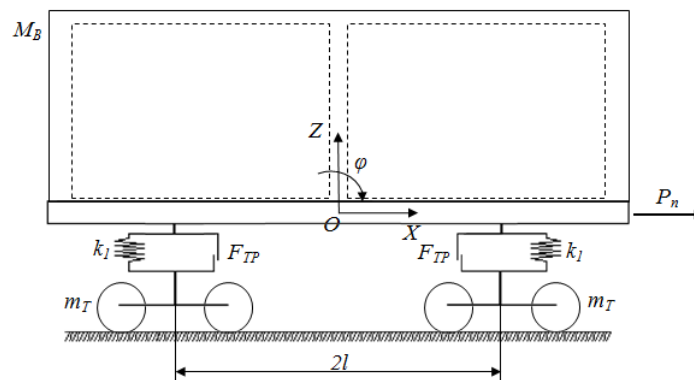


Рисунок 2 – Розрахункова схема напіввагона, завантаженого контейнерами

При складанні розрахункової схеми розглянуто випадок руху напіввагона у складі залізничного поїзда (III розрахунковий режим) [8]. При цьому прийнято до уваги наявність трьох ступенів вільності напіввагона та контейнерів, які характеризують повздовжнє, кутове навколо поперечної осі та вертикальне переміщення. В моделі враховано, що контейнери мають однакову завантаженість вантажем, не мають власного ступеня вільності та повторюють траєкторію переміщень напіввагона. Переміщення вантажу у контейнері до уваги не приймалося.

Тоді математична модель, яка описує рух напіввагона з контейнерами матиме вигляд:

$$M'_B \cdot \ddot{x}_B + M' \cdot \ddot{\varphi}_B = P_1, \quad (1)$$

$$I_B \cdot \ddot{\varphi}_B + M' \cdot \ddot{x}_B - g \cdot \varphi_B \cdot M' = l \cdot F_{TP} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2) + l(C_1 - C_2), \quad (2)$$

$$M_B \cdot \ddot{z}_B = C_1 + C_2 - F_{TP} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2), \quad (3)$$

тут

$$M'_B = M_B + 2 \cdot m_T + \frac{n \cdot I_{КП}}{r^2}; \quad M' = M_B \cdot h;$$

$$C_1 = k_1 \cdot \Delta_1; \quad C_2 = k_2 \cdot \Delta_2;$$

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

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

Розв'язок математичної моделі (1) – (3) здійснено в програмному комплексі MathCad [9, 10], який реалізує метод Рунге – Кутта [11, 12]. Стартові умови покладені близькими до нуля. Результати розрахунків показали, що максимальні прискорення, які діють на напіввагон складають близько 34 м/с^2 (рис. 3).

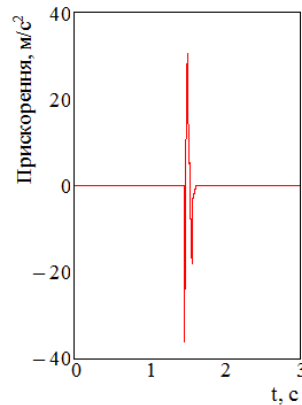
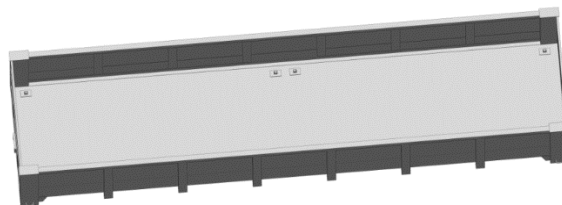


Рисунок 3 – Прискорення, які діють на напіввагон з контейнерами

Отриману величину прискорення враховано при розрахунках на міцність несучої конструкції напіввагона. Розрахунок реалізовано за методом скінчених елементів в програмному комплексі SolidWorks Simulation [13, 14]. Для цього на підставі відповідних креслень створено просторову модель несучої конструкції напіввагона (рис. 4). В якості прототипу обрано напіввагон з глухим кузовом моделі 12-295.

а)



б)

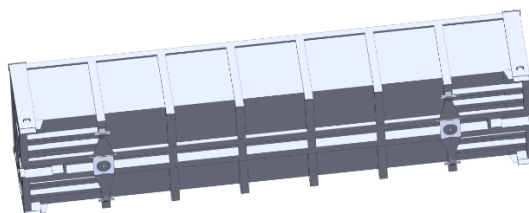


Рисунок 4 – Просторова модель несучої конструкції напіввагона а) вид зверху; б) вид знизу

При складанні розрахункової схеми кузова враховано, що він сприймає вертикальне навантаження від ваги контейнерів, розміщених у ньому P_e (рис. 5). Також до уваги приймалося повздовжнє динамічне навантаження, яке діє на фітинговий упор від фітинга P_n . До передніх упорів автозчепу прикладалося повздовжнє навантаження P_{yn} . Величина повздовжнього навантаження P_{yn} приймалося рівною 2,5 МН, тобто імітувався режим руху напіввагона у складі поїзда – “ривок”.

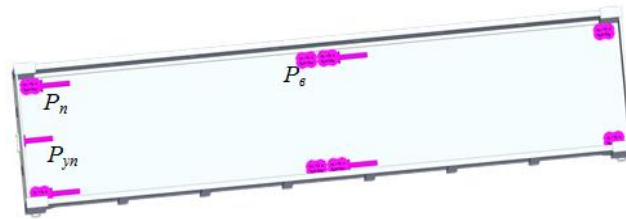


Рисунок 5 – Розрахункова схема кузова напіввагона

Скінчено-елементна модель кузова вагона утворена тетраедрами. Найбільший розмір тетраедра склав 80 мм, а найменший – 16 мм. Модель налічує 93163 вузлів та 280205 елементів. Розрахунок проведено за умови виготовлення кузова зі сталі 09Г2С. Закріплення моделі кузова здійснювалося за п’ятники. Сили тертя між п’ятниками та підп’ятниками не враховувалися.

При проведенні розрахунків використано критерій Мізеса. Результати розрахунків наведено на рис. 6, 7. Максимальні напруження виникають у фітингових упорах і дорівнюють 142 МПа (рис. 6). Дані напруження не перевищують допустимі для сталі марки 09Г2С [8]. Максимальні переміщення виникають в зонах розміщення фітингових упорів за центром кузова і складають 4,2 мм (рис. 7).

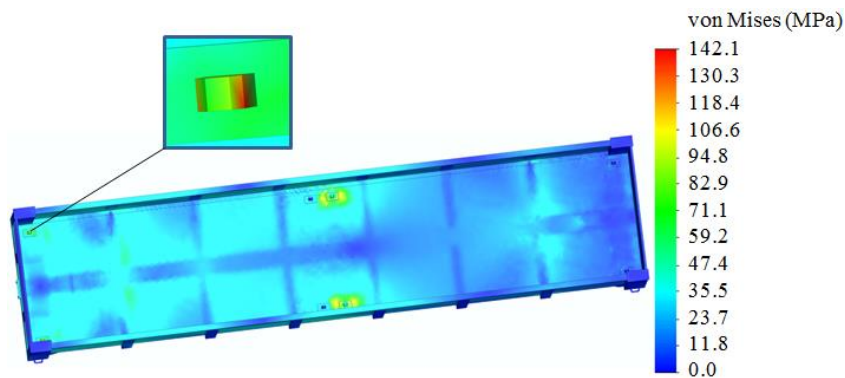


Рисунок 6 – Напружений стан кузова напіввагона

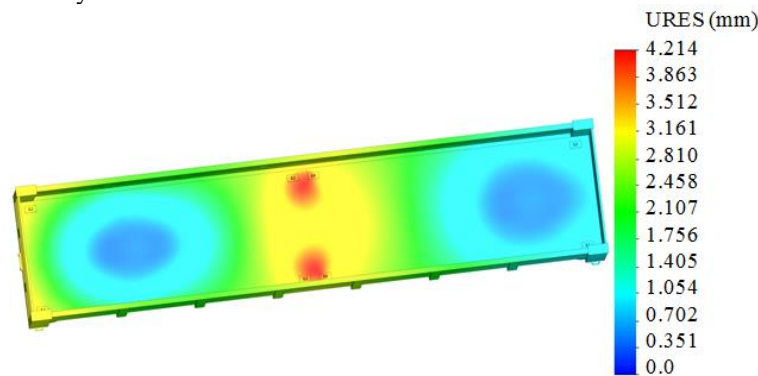


Рисунок 7 – Переміщення в кузові

Проведені розрахунки доводять, що перевезення контейнерів з використанням зазначеної схеми закріплення є допустимим. Однак в умовах наднормованих режимів, тобто коли повздовжня сила на передні упори при “ривку” буде перевищувати 2,5 МН дана величина напружень відповідно збільшиться. Тому при подальших дослідженнях в цьому напрямку необхідно врахувати цей момент.

Висновки:

1. Визначено динамічну навантаженість несучої конструкції напіввагона при перевезенні контейнерів. До уваги прийнято режим руху напіввагона у складі поїзда. Результати розрахунків показали, що максимальні прискорення, які діють на напіввагон складають близько 34 м/с².

2. Розраховано міцність несучої конструкції напіввагона при перевезенні контейнерів. Максимальні напруження при цьому виникають у фітингових упорах і дорівнюють 142 МПа. Дані напруження не перевищують

допустимі. Максимальні переміщення виникають в зонах розміщення фітінгових упорів за центром кузова і складають 4,2 мм.

Проведені дослідження сприятимуть підвищенню ефективності експлуатації контейнерних перевезень та транспортної галузі в цілому. Також результати досліджень будуть корисними напрацюваннями при проектуванні транспортних засобів модульного типу.

Література

1. Рейдемейстер А. Г., Калашник В. А., Шикунов А. А. Модернизация как способ улучшения использования универсальных вагонов. Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. 2016. № 2 (62). <https://doi.org/10.15802/stp2016/67334>
2. Shaposhnyk V., Shykunov O., Reidemeister A., Leontii M., Potapenko O. Determining the possibility of using removable equipment for transporting 20- and 40-foot-long containers on an universal platform wagon. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Vol. 1(7 (109)). P. 14–21. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225090>
3. Panchenko Sergii, Gerlici Juraj, Vatulia Glib, Lovska Alyona, Pavliuchenkov Mykhailo, Kravchenko Kateryna. The Analysis of the Loading and the Strength of the FLAT RACK Removable Module with Viscoelastic Bonds in the Fittings. Applied Sciences. 2023. Vol. 13(1). 79. <https://doi.org/10.3390/app13010079>
4. Vatulia Glib, Lovska Alyona, Pavliuchenkov Mykhailo, Nerubatskyi Volodymyr, Okorokov Andrii, Hordiienko Denys, Vernigora Roman, Zhuravel Irina. Determining patterns of vertical load on the prototype of a removable module for long-size cargoes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. №6/7 (120). P. 21 – 29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266855>
5. Gerlici Juraj, Lovska Alyona, Vatulia Glib, Pavliuchenkov Mykhailo, Kravchenko Oleksandr, Solcansky Sebastian. Situational adaptation of the open wagon body to container transportation. Applied Sciences. 2023. Vol. 13(15), 8605. <https://doi.org/10.3390/app13158605>
6. Gerlici J.; Vatulia G., Lovska A., Skurikhin D., Harušinec J., Suchánek A., Ishchuk V. The Strength of the Open Wagon Body when Transporting Containers. Proceedings of 27th International Scientific Conference. Transport Means 2023, Part I, 2023, October 4 – 6, Kaunas, Lithuania. P. 440 – 445.
7. 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.
8. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних).
9. Богач І. В., Краковецький О. Ю., Килик Л. В. Чисельні методи розв’язання диференціальних рівнянь засобами MathCad: Навчальний посібник. – Вінниця, 2020. 106 с.
10. Соболенко О. В., Петречук Л. М., Іващенко Ю. С., Єгорцева Є. Є. Методи рішення математичних задач у середовищі Mathcad: Навчальний посібник з дисципліни “Інформатика і системологія”. – Дніпро, 2020. 60 с.
11. Дьомін Ю. В., Черняк Г. Ю. Основи динаміки вагонів: навч. посіб. – Київ, 2003. 269 с.
12. 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>
13. Козяр М. М., Фещук Ю. В., Парфенюк О. В. Комп’ютерна графіка: SolidWorks: Навчальний посібник. – Херсон, 2018. 252 с.
14. Пустольга С. І., Самостян В. Р., Клак Ю. В. Інженерна графіка в SolidWorks: Навчальний посібник. – Луцьк, 2018. 172 с.

References

1. Rejdemejster A. G. (2016). Modernizaciya kak sposob uluchsheniya ispolzovaniya universal-nyh vagonov. Nauka ta progres transportu / Rejdemejster A. G., Kalashnik V. A., Shikunov A. A. // Visnik Dnipropetrovskogo nacionalnogo universitetu zaliznizhnogo transportu. – № 2 (62). <https://doi.org/10.15802/stp2016/67334>
2. Shaposhnyk V. (2021). Determining the possibility of using removable equipment for transporting 20- and 40-foot-long containers on an universal platform wagon / Shaposhnyk V., Shykunov O., Reidemeister A., Leontii M., Potapenko O. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Vol. 1(7 (109)). P. 14–21. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225090>
3. Panchenko Sergii. (2023). The Analysis of the Loading and the Strength of the FLAT RACK Removable Module with Viscoelastic Bonds in the Fittings / Panchenko Sergii, Gerlici Juraj, Vatulia Glib, Lovska Alyona, Pavliuchenkov Mykhailo, Kravchenko Kateryna // Applied Sciences. – Vol. 13(1). 79. <https://doi.org/10.3390/app13010079>
4. Vatulia Glib. Determining patterns of vertical load on the prototype of a removable module for long-size cargoes / Vatulia Glib, Lovska Alyona, Pavliuchenkov Mykhailo, Nerubatskyi Volodymyr, Okorokov Andrii, Hordiienko Denys, Vernigora Roman, Zhuravel Irina // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – №6/7 (120). P. 21 – 29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266855>
5. Gerlici Juraj. (2023). Situational adaptation of the open wagon body to container transportation / Gerlici Juraj, Lovska Alyona, Vatulia Glib, Pavliuchenkov Mykhailo, Kravchenko Oleksandr, Solcansky Sebastian // Applied Sciences. – Vol. 13(15), 8605. <https://doi.org/10.3390/app13158605>
6. Gerlici J. (2023). The Strength of the Open Wagon Body when Transporting Containers / Gerlici J.; Vatulia G., Lovska A., Skurikhin D., Harušinec J., Suchánek A., Ishchuk V. // Proceedings of 27th International Scientific Conference. Transport Means 2023, Part I, 2023, October 4 – 6, Kaunas, Lithuania. P. 440 – 445.
7. Bogomaz G. I. (1992). Nagruzhenost kontejnerov-cistern, raspo-lozhennyh na zheleznodorozhnoj platforme, pri udarah v avtoscepku / Bogomaz G. I., Mehov, D. D., Pilipchenko O. P., Chernomashenceva Yu. G. // Zb. nauk. prac “Dinamika ta keruvannya ruhom mehanichnih sistem”. Kiyiv: ANU, Institut tehnicnoyi mehaniki. S. 87–95.
8. DSTU 7598:2014. Vagoni vantazhni. Zagal’ni vimogi do rozrahunkiv ta proektuvannya novih i modernizovanih vagoniv kolii 1520 mm (nesamohidnih).
9. Bogach I. V., Krakoveckij O. Yu., Kilik L. V. Chiselni metodi rozv’yazannya diferencialnih rivnyan zasobami MathCad: Navchalnij posibnik. – Vinnicya, 2020. 106 s.

- 10 Sobolenko O. V., Petrechuk L. M., Ivashenko Yu. S., Yegorceva Ye. Ye. Metodi rishennya matematichnih zadach u seredovishi Mathcad: Navchalnij posibnik z disciplini "Informatika i sistemologiya". – Dnipro, 2020. 60 s.
- 11 Domin Yu. V., Chernyak G. Yu. Osnovi dinamiki vagoniv: navch. posib. – Kiyiv, 2003. 269 s.
- 12 Lovskaya Alyona. (2014). Assessment of dynamic efforts to bodies of wagons at transportation with railway ferries / Lovskaya Alyona // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Vol. 3. Issue 4. P. 36–41. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.24997>
- 13 Kozyar M. M., Feshuk Yu. V., Parfenyuk O. V. Komp'yuterna grafika: SolidWorks: Navchalnij posibnik. – Herson, 2018. 252 s.
- 14 Pustulga S. I., Samostyan V. R., Klak Yu. V. Inzhenerna grafika v SolidWorks: Navchalnij posibnik. – Luck, 2018. 172 s.

In the materials of the article, the dynamic load and strength of the load-bearing structure of the open wagon when transporting containers in it are investigated. To determine the accelerations that act on the supporting structure of the open wagon, mathematical modeling of its dynamic load under the conditions of movement as part of the train was carried out. At the same time, the presence of three degrees of freedom of the open wagon and containers is taken into account, which characterize the longitudinal, angular around the transverse axis and vertical movement. The model takes into account that the containers have the same load, do not have their own degree of freedom, and repeat the trajectory of the open wagon. The movement of the cargo in the container was not taken into account. The mathematical model was solved in the MathCad software complex, which implements the Runge-Kutta method.

The obtained acceleration value, as a component of the dynamic load, is taken into account when calculating the strength of the supporting structure of the open wagon. At the same time, the finite element method, which is implemented in SolidWorks Simulation, is used. The results of the calculations showed that the transportation of containers using the specified fastening scheme is permissible. However, in conditions of over-normal conditions, i.e. when the longitudinal force on the front stops during a "jerk" will exceed 2.5 MN, this amount of stress will increase accordingly. Therefore, in further research in this direction, it is necessary to pay attention to this calculation scheme.

The conducted research will contribute to the improvement of the efficiency of the operation of container transportation and the transport industry as a whole. Also, the research results will be useful for designing modular vehicles.

Key words: transport mechanics, open wagon, dynamic loading, strength of the supporting structure of the open wagon, container transportation.

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

Діжо Я. – PhD, доцент кафедри транспорту та підйомно-транспортної техніки Жилінського університету в Жиліні.

Рибін А. В. – к.т.н., доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту.

Рукавішников П. В. – старший викладач кафедри теплотехніки, теплових двигунів та енергетичного менеджменту Українського державного університету залізничного транспорту.