

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.869.888

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2025.2-25.03>

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ КАРКАСА КОНТЕЙНЕРА УДОСКОНАЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ПРИ ВАНТАЖНО-РОЗВАНТАЖУВАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЯХ

А.О. Ловська¹, М.В. Павлюченков², А.О. Мурад'ян³, О.В. Демидюков⁴

¹доктор технічних наук, професор,
професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції,
Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-8604-1764

²кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Теоретична і будівельна механіка»,
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова,
Харків, Україна,
доцент кафедри будівельних конструкцій,
Сумський національний аграрний університет, Суми, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-8168-7224

³кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри
«Експлуатація портів і технологія вантажних робіт»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6488-6627>

⁴аспірант кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-4791-3830

Анотація

Вступ. Для підвищення об'ємів перевезень вантажів у міжнародному сполученні дістали поширення контейнерні перевезення. Це зумовлено можливістю перевезень контейнерів майже всіма видами транспорту, що значно пришвидшує транспортування вантажів від відправника до отримувача. Разом із цим у процесі експлуатації має місце пошкодження контейнерів, яке зумовлює необхідність здійснення позапланових видів їх ремонтів, а відповідно, і додаткових витрат на утримання в експлуатації. **Мета.** Дослідження міцності каркаса контейнера удосконаленої конструкції при вантажно-розвантажувальних операціях. **Результати.** Для забезпечення збереження контейнерів в експлуатації запропоновано удосконалення конструкції їх каркаса впровадженням розкосів та горизонтальних поясів. З метою визначення внутрішніх силових факторів, які виникають у каркасі контейнера при його підйомі за верхні фітинги проведено розрахунок у ПК «Ліра – САПР». Дослідження проведено на прикладі універсального контейнера типорозміру ІСС. При цьому каркас контейнера розглянуто у вигляді стрижневої конструкції, яка закріплена за верхні фітинги та сприймає вертикальне навантаження, зумовлене власною вагою та вагою вантажу. За

отриманими значеннями силових факторів визначено профіль виконання розкосів та горизонтальних поясів каркасу контейнера. З урахуванням обраного профілю виконання розкосів та горизонтальних поясів побудовано просторову модель каркаса та проведено його розрахунок на міцність. При цьому застосовано метод скінчених елементів, який реалізовано в SolidWorks Simulation. Встановлено, що запропоноване удосконалення є доцільним. При цьому стає можливим знизити максимальні напруження в каркасі контейнера на 7% порівняно з типовою конструкцією. **Висновки.** Результати проведених досліджень сприятимуть створенню рекомендацій щодо проєктування сучасних конструкцій контейнерів із покращеними техніко-економічними та експлуатаційними характеристиками. Це, своєю чергою, дозволить підвищити ефективність експлуатації контейнерних перевезень, у тому числі в міжнародному сполученні.

Ключові слова: каркас контейнера, удосконалення конструкції, навантаженість каркаса, міцність каркаса, вантажно-розвантажувальні операції.

RESEARCH ON THE STRENGTH OF THE CONTAINER FRAME OF AN IMPROVED DESIGN DURING LOADING AND UNLOADING OPERATIONS

A.O. Lovska¹, M.V. Pavliuchenkov², A.O. Muradian³, O.V. Demydiakov⁴

¹Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Wagon Engineering and Product Quality,
Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-8604-1764

²PhD, Associate Professor, Associate Professor, Department of Theoretical
and Structural Mechanics,
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine,
Associate Professor of the Department of Building Constructions
Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-8168-7224

³PhD, Associate Professor
Associate Professor of Department of Port Operation and Cargo Handling Technology,
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6488-6627>

⁴Graduate student
Department of port operation and cargo handling technology,
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-4791-3830

Summary

Introduction. To increase the volume of cargo transportation in international traffic, container transportation has become widespread. This is due to the possibility of transporting containers by almost all modes of transport, which significantly speeds up the transportation of goods from the sender to the recipient. At the same time, containers are damaged during operation, which necessitates the implementation of unscheduled types of their repairs, and, accordingly, additional costs for maintenance in operation. **Purpose.** Research into the strength of a container frame of improved design during loading and unloading operations. **Results.** To ensure the safety of containers in operation, it is proposed to improve the design of their frame by introducing braces and horizontal belts. In order to determine the internal force factors that arise in the container frame when

*it is lifted by the upper fittings, a calculation was performed in the PC "Lira – SAPR". The study was conducted on the example of a universal container of standard size 1 CC. In this case, the container frame was considered as a rod structure, which is fixed to the upper fittings and perceives the vertical load caused by its own weight and the weight of the cargo. Based on the obtained values of the force factors, the profile of the braces and horizontal belts of the container frame was determined. Taking into account the selected profile of the braces and horizontal belts, a spatial model of the frame was built and its strength was calculated. In this case, the finite element method, which is implemented in SolidWorks Simulation, was applied. It was found that the proposed improvement is expedient. This makes it possible to reduce the maximum stresses in the container frame by 7% compared to a typical design. **Conclusions.** The results of the research will contribute to the creation of recommendations for the design of modern container structures with improved technical, economic and operational characteristics. This, in turn, will allow to increase the efficiency of container transportation, including in international traffic.*

Key words: container frame, design improvement, frame loading, frame strength, loading and unloading operations.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Підвищення ефективності експлуатації вантажоперевезень у міжнародному сполученні є одним із можливих напрямів розвитку економіки європейських країн. Досягти цього можливо розвитком контейнерних перевезень [1; 2]. Перевезення вантажів у контейнерах є одним із найбільш перспективних видів перевезень. Це пояснюється відсутністю необхідності перевантаження вантажу, а також можливістю перевезень контейнера різними транспортними засобами. Разом із цим умовах експлуатації на конструкцію контейнера діють різні за величиною та природою походження силові фактори. Вони можуть сприяти пошкодженню контейнера. Одним із найбільш несприятливих серед них є пошкодження бокових стін. Унаслідок подібних пошкоджень виникає необхідність позапланових видів ремонту контейнерів, а відповідно, і додаткових витрат на їх утримання в експлуатації. Це зумовлює необхідність створення науково-технічних рішень, спрямованих на покращення міцності бокових стін контейнерів в експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання цієї проблеми, і виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми

Для покращення міцності контейнера авторами публікації [3] пропонується підвищення жорсткості його конструкції. Дане рішення обґрунтовано не тільки теоретичними розрахунками, а й експериментальними дослідженнями. Але таке впровадження не сприяє покращенню міцності бокових стін контейнера.

Покращення міцності контейнера можливо досягти і шляхом впровадження в його конструкцію нових матеріалів. Так, наприклад, у публікації [4] запропоновано використання вуглепластикових матеріалів у конструкції контейнера. Таке рішення, безумовно, має ряд переваг порівняно зі сталлю, яка є типовим матеріалом виготовлення контейнерів, але і вимагає відповідних капітальних вкладень на його впровадження.

Питання покращення міцності бокових стін контейнера висвітлено у публікації [5]. Авторами пропонується впровадження у якості їх обшивки сендвіч-панелей. При цьому покращення міцності бокових стін досягається зменшенням їх навантаженості. У статті наведено відповідне обґрунтування такого рішення.

У публікації [6] для покращення міцності контейнера також запропоновано впровадження в його конструкцію сендвіч-панелей. Дане удосконалення обґрунтовано на прикладі настилу підлоги контейнера.

Важливо сказати, що зазначені у публікаціях [5; 6] рішення є досить вартісним з точки зору їх впровадження, що стримує серійність виготовлення таких контейнерів.

Для покращення міцності контейнера в роботі [7] запропоновано у якості складових каркасу використання квадратних труб. Висвітлено особливості розрахунку на міцність такого каркаса та доведено доцільність запропонованого удосконалення. Разом із цим авторами не досліджувалися питання покращення міцності бокових стін контейнера.

У публікації [8] запропоновано нову конструкцію контейнера та наведено результати його розрахунку на міцність при основних режимах навантажень. Однак поза увагою авторів залишилися питання покращення міцності конструкції контейнера.

Проведений огляд літературних джерел доводить, що питання покращення міцності бокових стін контейнерів є актуальним та потребує подальшого дослідження.

Формулювання мети статті, постановка завдання. Метою статті є висвітлення результатів дослідження міцності каркаса контейнера удосконаленої конструкції при вантажно-розвантажувальних операціях. Досягнення зазначеної мети здійснено з урахуванням розв'язку таких завдань:

- дослідити силові фактори, що мають місце в каркасі контейнера при вантажно-розвантажувальних операціях;
- провести розрахунок на міцність каркаса контейнера.

Об'єктом дослідження є каркас контейнера типорозміру 1СС.

Предмет дослідження – навантаженість каркасу контейнера при вантажно-розвантажувальних операціях.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

Для забезпечення міцності бокових стін контейнера в експлуатації пропонується посилення каркаса додатковими елементами – розкосами та горизонтальним поясом (рис. 1). Таке рішення сприяє збільшенню жорсткості каркаса, а відповідно, і покращенню його міцності не тільки при сприйнятті бокових навантажень, а і при вантажно-розвантажувальних операціях.

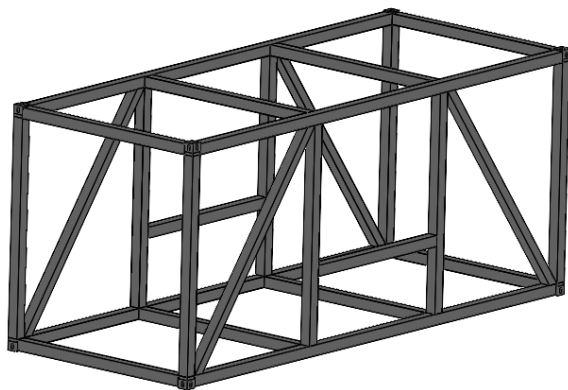


Рис. 1. Каркас контейнера

Для визначення внутрішніх силових факторів, які виникають у каркасі контейнера при його підйомі за верхні фітинги, проведено розрахунок у ПК «Ліра – САПР» [9]. Дослідження проведено на прикладі контейнера типорозміру 1СС. При цьому каркас контейнера розглянуто у вигляді стрижневої конструкції, яка закріплена за верхні фітинги та сприймає вертикальне навантаження, зумовлене власною вагою та вагою вантажу (рис. 2). Враховано, що вага бруто контейнера становить 240 кН. Вантаж розглянуто як умовний при використанні повної вантажопідйомності контейнера.

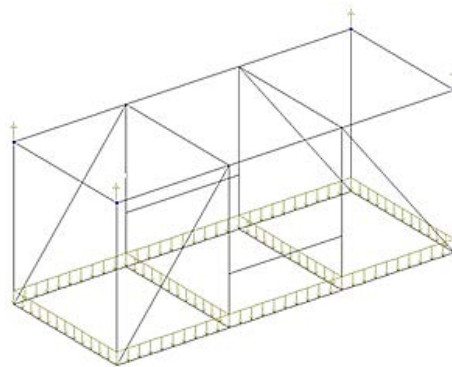


Рис. 2. Розрахункова схема каркаса контейнера

Із використанням опцій програмного комплексу отримано епюри внутрішніх силових факторів, що виникають у каркасі контейнера (рис. 3–5). Синім кольором показано від’ємне значення силових факторів, а помаранчевим – додатне. Максимальні повздовжні сили в каркасі контейнера мають місце у вертикальних стійках і дорівнюють 5,87 т (рис. 3). У розкосах значення повздовжніх сил має меншу величину і становить 4,44 т.

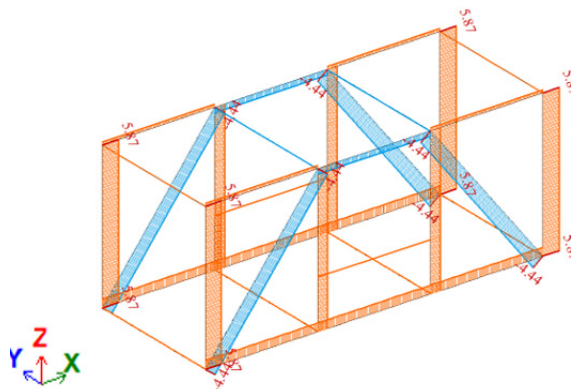


Рис. 3. Епюра повздовжніх сил (т)

На рис. 4 наведено епюру поперечних сил, які виникають у каркасі. Ці сили розподілені за законом трикутника і мають знакозмінне значення. Максимальне значення поперечних сил дорівнює 1,34 т.

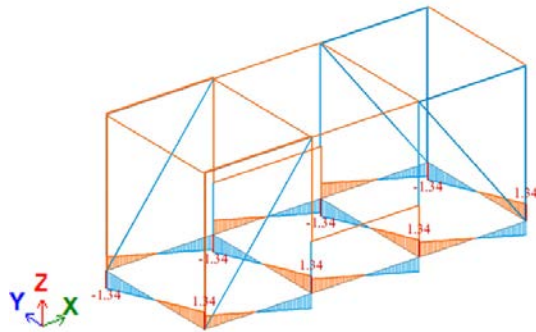


Рис. 4. Еюра поперечних сил (m)

У поперечних балках каркаса виникають згинальні моменти (рис. 5). Максимальне значення згинального моменту становить $0,523 \text{ т} \cdot \text{м}$ і виникає в середній частині поперечних балок.

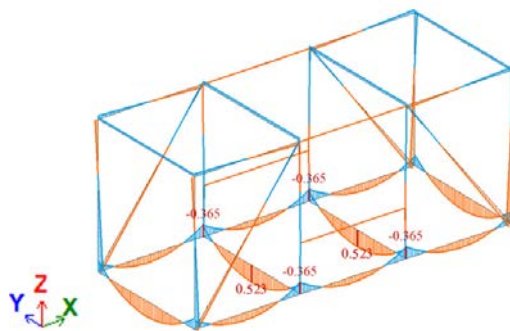


Рис. 5. Еюра згинальних моментів ($\text{т} \cdot \text{м}$)

Максимальні деформації в каркасі також мають місце в поперечних балках рами (рис. 5). Це можна пояснити розрахунковою схемою каркаса (схемою закріплення та прикладення навантажень).

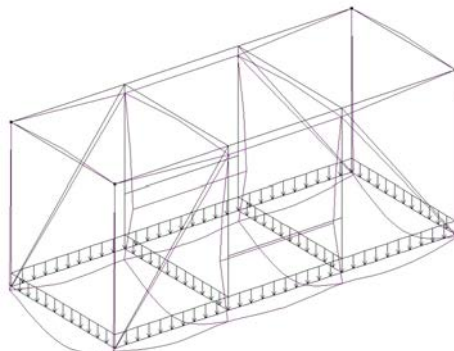


Рис. 6. Схема деформацій каркасу (масштаб збільшення 27:1)

За значенням максимальної повздовжньої сили, яка виникає в розкосах, здійснено підбір їх профілю виконання. Для цього застосовано класичну формулу опору матеріалів:

$$\sigma = \frac{P}{A}, \quad (1)$$

де P – максимальне значення сили, яка діє в розкосі каркаса; A – площа поперечного перерізу розкосу.

Звідси, якщо прийняти припущення, що розрахункові напруження σ в розкосі дорівнюють допустимим напруженням матеріалу його виконання, можна записати:

$$A = \frac{P}{\sigma}. \quad (2)$$

Будемо вважати, що матеріалом розкосів є сталь марки 09Г2С. Тоді допустимі напруження становлять 210 МПа [10]. З урахуванням цього площа поперечного перерізу розкоса повинна становити не менше 207,4 см². За сортаментом профілів у якості профілю виконання розкосів каркаса пропонується використання квадратної труби 80х80 з товщиною стінки 11 мм та площею поперечного перерізу 27,21 см².

Для дослідження міцності каркаса з урахуванням обраного профілю виконання його розкосів проведено розрахунок на міцність за методом скінчених елементів. Його реалізацію здійснено у SolidWorks Simulation [11, 12]. Розрахункову схему каркаса наведено на рис. 6.

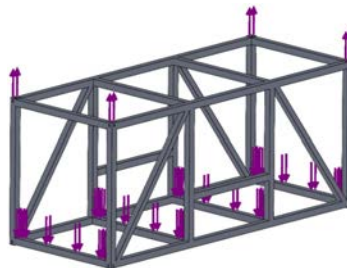


Рис. 7. Розрахункова схема каркаса

При складанні скінчено-елементної моделі використовувалися тетраедри [13; 14]. Скінчено-елементну модель наведено на рис. 7. Модель налічує 51069 елементів та 16551 вузлів.

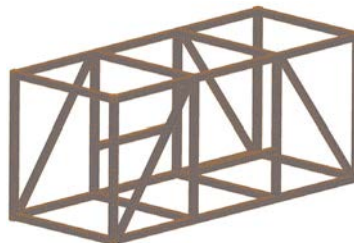


Рис. 8. Скінчено-елементна модель каркаса

Результати розрахунку наведено на рис. 8, 9. Максимальні напруження в каркасі виникають у вертикальних стійках і становлять 189,1 МПа (рис. 8), що нижче за допустимі [10].

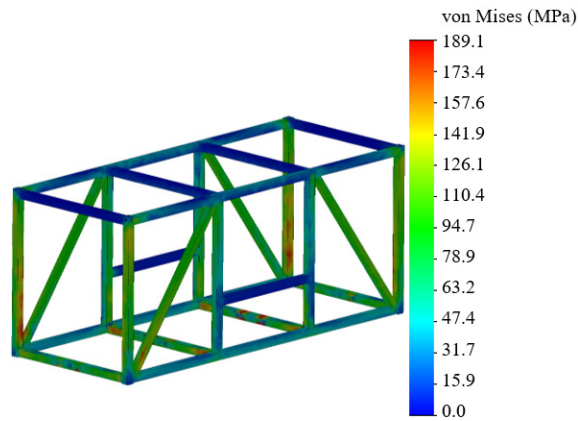


Рис. 9. Напружений стан каркаса

Максимальні переміщення в каркасі виникають у середніх частинах поперечних балок і становлять 3,39 мм (рис. 9).

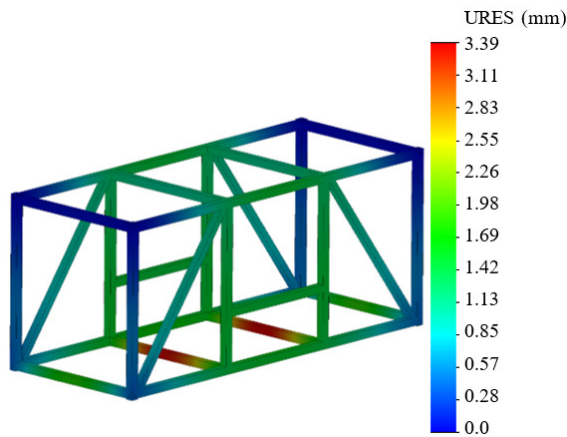


Рис. 10. Переміщення в вузлах каркаса

Аналізуючи отримані результати, можна зробити висновок, що запропоноване удосконалення є доцільним. При цьому стає можливим знизити максимальні напруження в каркасі на 7 % у порівняно з типовою конструкцією.

Висновки і перспектива подальшої роботи в цьому напрямі

1. Досліджено силові фактори, що мають місце в каркасі контейнера при вантажно-розвантажувальних операціях. Встановлено, що максимальні повздовжні сили в каркасі контейнера мають місце у вертикальних стійках і дорівнюють 5,87 т. У розкосах значення повздовжніх сил має меншу величину і становить 4,44 т. Максимальне значення поперечних сил у каркасі дорівнює 1,34 т. У поперечних

балках каркаса виникають згинальні моменти. Максимальне значення згинального моменту становить $0,523 \text{ т} \cdot \text{м}$ і виникає в середній частині поперечних балок.

За отриманими значеннями силових факторів визначено профіль виконання розкосів та горизонтальних поясів каркасу контейнера – квадратна труба 80×80 з товщиною стінки 11 мм та площею поперечного перерізу $27,21 \text{ см}^2$.

2. Проведено розрахунок на міцність каркаса контейнера. Максимальні напруження в каркасі виникають у вертикальних стійках і становлять 189,1 МПа, що нижче за допустимі. Максимальні переміщення в каркасі виникають у середніх частинах поперечних балок і становлять 3,39 мм.

Результати проведених досліджень сприятимуть створенню рекомендацій щодо проєктування сучасних конструкцій контейнерів із покращеними техніко-економічними та експлуатаційними характеристиками. Це, своєю чергою, дозволить підвищити ефективність експлуатації контейнерних перевезень, у тому числі в міжнародному сполученні. При цьому такі контейнери доцільно використовувати й у складі поїздів комбінованого транспорту, які перевозяться залізничними поромами. Адже кути крену залізничного порому зумовлюють додатковий тиск вантажу, що перевозиться, на стіни контейнера, а використання розкосів у каркасі бокових стін сприятиме покращенню їхньої міцності.

Подальшим розвитком даного дослідження є визначення міцності каркаса контейнера при інших експлуатаційних режимах навантажень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ловська А. О., Діжо Я., Рибін А. В., Рукавішников П. В. Особливості визначення показників міцності кузова напіввагона при перевезенні в ньому контейнерів. *Наукові вісті Дніпровського університету*. 2024. № 26. DOI: 10.33216/2222-3428-2024-26-9
2. Reidemeister O. H., Kalashnyk V. O., Shykunov O. A.. Modernization as a way to improve the use of universal cars. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2016. № 2 (62). DOI: 10.15802/stp2016/67334
3. Xiaoxiong Zha and Yang Zuo. Theoretical and experimental studies on in-plane stiffness of container structure with holes. *Advances in Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 8(6). P. 1–17. DOI: 10.1088/10.1177/1687814016651372
4. Turkay Yildiz. Design and Analysis of a Lightweight Composite Shipping Container Made of Carbon Fiber Laminates. *Logistics*. 2019. Vol 3. No. 18. DOI: 10.1088/10.3390/logistics3030018
5. Vatulia G. L., Lovska A. O., Krasnokutskyi Ye. S. Research into the transverse loading of the container with sandwich-panel walls when transported by rail. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1254. 012140. DOI: 10.1088/1755-1315/1254/1/012140
6. Lovska A., Stanovska I., Kyrillova V., Okorokov A., Vernigora R. Determining the vertical load on a container with a floor made of sandwich panels transported by a flat wagon. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. № 6/7 (132). P. 6–14. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.311324

7. Gerlici Ju., Lovska A., Pavliuchenkov M., Krachenko O. Peculiarities of designing the frame of a universal container made of rectangular pipes. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*. 2024. Vol. 26, Issue 2. P. B72–B79. DOI: 10.26552/com.C.2024.016
8. Cheng K. J., Lees C. H., Peng C. C. Design and structural analysis of high payload C1 container. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. Vol. 2878. 012012. DOI: 10.1088/1742-6596/2878/1/012012
9. Барабаш М. С., Сорока М. М., Сур'янінов М. Г. Нелінійна будівельна механіка з ПК Ліра-Сапр. Одеса : Екологія, 2018. 248 с.
10. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проєктування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Київ, 2015. 250 с.
11. Пустюльга С. І., Самостян В. Р., Клак Ю. В. Інженерна графіка в SolidWorks : навчальний посібник. Луцьк : Вежа, 2018. 172 с.
12. Козяр М. М., Фещук Ю. В., Парфенюк О. В. Комп'ютерна графіка: SolidWorks : навчальний посібник. Херсон : Олді-плюс, 2018. 252 с.
13. Juraj Gerlici, Alyona Lovska, Glib Vatulia, Mykhailo Pavliuchenkov, Oleksandr Kravchenko, Sebastian Solcansky. Situational adaptation of the open wagon body to container transportation. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13(15). 8605 p. DOI: 10.3390/app13158605
14. Philip Chie Hui Ling, Cher Siang Tan. Numerical Simulation of ISO Freight Container Using Finite Element Modelling. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2019. Vol 53. P. 463–469. DOI: 10.1007/978-3-030-32816-0_31

REFERENCES

1. Lovska A. O., Dizo Ya., Rybin A. V. & Rukavishnikov P. V. (2024). Peculiarities of determining the strength indicators of the semi-wagon body when transporting containers in it [Osoblyvosti vyznachennia pokaznykiv mitsnosti kuzova napivvahona pry transportuvanni v nomu konteineriv]. *Naukovi visti Dalivskoho universytetu*, 26. DOI: 10.33216/2222-3428-2024-26-9 [in Ukrainian].
2. O. H. Reidemeister, V. O. Kalashnyk & O. A. Shykunov. (2016). Modernization as a way to improve the use of universal cars. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu*, 2 (62). DOI: 10.15802/stp2016/67334
3. Xiaoxiong Zha and Yang Zuo. (2016). Theoretical and experimental studies on in-plane stiffness of container structure with holes. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(6). 1–17. DOI: 10.1088/10.1177/1687814016651372
4. Turkey Yildiz (2019). Design and Analysis of a Lightweight Composite Shipping Container Made of Carbon Fiber Laminates. *Logistics*. 3. 18. DOI: 10.1088/10.3390/logistics3030018
5. G. L. Vatulia, A. O. Lovska, Ye. S. Krasnokutskyi. (2023). Research into the transverse loading of the container with sandwich-panel walls when transported by rail. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 1254. 012140. DOI: 10.1088/1755-1315/1254/1/012140

6. Alyona Lovska, Iraida Stanovska, Valeriia Kyrylova, Andrii Okorokov, Roman Vernigora. (2024). Determining the vertical load on a container with a floor made of sandwich panels transported by a flat wagon. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 6/7 (132). 6–14. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.311324
7. Gerlici Juraj, Lovska Alyona, Pavliuchenkov Mykhailo, Kravchenko Oleksandr. (2024). Peculiarities of designing the frame of a universal container made of rectangular pipes. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*. 26. 2. B72–B79. DOI: 10.26552/com.C.2024.016
8. Cheng K. J., Lees C. H., Peng C. C. (2024). Design and structural analysis of high payload C1 container. *Journal of Physics: Conference Series*. 2878. 012012. DOI: 10.1088/1742-6596/2878/1/012012
9. Barabash, M. S., Soroka, M. M. & Suryaninov, M. G. (2018). Nonlinear structural mechanics with PC Lira-Sap. [Нелінійна будівельна механіка з ПК Ліра-Сап]. Odesa: Ecology, 248 p. [in Ukrainian].
10. DSTU 7598:2014. Freight wagons. General requirements for calculations and design of new and modernized 1520 mm gauge wagons (non-self-propelled) [Важонь вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проєктів нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамокхідних)]. (2015) Kyiv. 2015. 250 p. [in Ukrainian].
11. Pustylga, S. I., Samostyan, V. R. & Klak, Y. V. (2018). Engineering graphics in SolidWorks: a tutorial. [Інженерна графіка в SolidWorks: навчальні посібники]. Lutsk: Tower, 172 p. [in Ukrainian].
12. Kozyar, M. M., Feshchuk, Yu. V. & Parfenyuk O. V. (2018). Computer graphics: SolidWorks: Study guide. [Комп'ютерна графіка: SolidWorks: Навчальні посібники]. Kherson: Oldi-plus, 252 p. [in Ukrainian].
13. Juraj Gerlici, Alyona Lovska, Glib Vatulia, Mykhailo Pavliuchenkov, Oleksandr Kravchenko, Sebastian Solcansky. (2023). Situational adaptation of the open wagon body to container transportation. *Applied Sciences*. 13(15), 8605. DOI: 10.3390/app13158605
14. Philip Chie Hui Ling, Cher Siang Tan. (2019). Numerical Simulation of ISO Freight Container Using Finite Element Modelling. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 53, 463–469. DOI: 10.1007/978-3-030-32816-0_31