

Ловська А.О.

Український державний університет залізничного транспорту

Павлюченко М.В.

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

Гарбуз А.О.

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

Опанасенко О.В.

Український державний університет залізничного транспорту

ДОСЛІДЖЕННЯ НАВАНТАЖЕНОСТІ ВАГОНА-ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ДОВГОМІРНИХ ВАНТАЖІВ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕЖИМАХ

В статті висвітлено результати досліджень навантаженості модернізованої несучої конструкції вагона-платформи при експлуатаційних режимах. Особливість модернізації вагона-платформи полягає у постановці на повздовжні балки рами вертикальних стійок. Таке рішення дозволяє адаптувати його конструкцію до перевезень довгомірних вантажів. Дослідження проведено на прикладі вагона-платформи моделі ІЗ–401. Визначення параметрів профілів виконання вертикальних стійок здійснено за моментом опору їх перерізу. Проведено визначення міцності несучої конструкції вагона-платформи при найбільш несприятливих режимах експлуатаційних навантажень, зокрема, при перевезенні залізничним поромом.

Для визначення динамічних навантажень, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи проведено математичне. До уваги прийнято бортову хитавицю залізничного порому, оскільки даний вид коливань здійснює найбільший вплив на стійкість вагона-платформи відносно палуби. Розв'язок математичної моделі проведено із використанням програмного комплексу MathCad, який реалізує метод Рунге – Кутта. Результати розв'язку математичної моделі дозволили визначити прискорення, що діють на несучу конструкцію вагона-платформи та врахувати їх при розрахунках на міцність. Для цього сформовано просторову модель несучої конструкції вагона-платформи. До уваги прийнято елементи конструкції, які жорстко взаємодіють між собою. Графічні роботи зі створення просторової моделі відтворено у SolidWorks. Розрахунок на міцність проведено із використанням методу скінчених елементів у програмному комплексі SolidWorks Simulation. Встановлено, що напруження в несучій конструкції вагона-платформи не перевищують допустимих значень, отже його міцність забезпечується.

Результати проведених досліджень сприятимуть підвищенню ефективності експлуатації вагонів-платформ та створенню рекомендацій щодо їх експлуатації у залізнично-поромному сполученні.

Ключові слова: залізничний транспорт, вагон-платформа, несуча конструкція вагона-платформи, модернізація вагона-платформи, міцність конструкції, залізнично-поромні перевезення.

Постановка проблеми. Залізничний транспорт є провідною галуззю народного господарства від ефективності роботи якої залежить економічний розвиток багатьох європейських країн [1]. Наразі залізницею перевозиться досить широка номенклатура вантажів [2]. Одним із таких вантажів є довгомірні: ліс у хлистах, будівельні матеріали, труби тощо. Перевезення довгомірних вантажів залізницею здійснюється на спеціалізованих вагонах-платформах, які обладнані вертикальними стійками для утримання

вантажів від перекидання. Разом із цим чисельність таких вагонів є обмеженою та не забезпечує повною мірою попиту на перевезення довгомірних вантажів. Це обумовило використання інших типів вагонів під такі перевезення: універсальні вагони-платформи чи напіввагони.

Для можливості перевезень довгомірних вантажів на універсальних вагонах-платформах на їх повздовжніх балках встановлюються дерев'яні стійки. Ці стійки кріпляться в лісових скобах, які приварені до вертикальних частин двотаврів, що

утворюють повздовжні балки рами. Треба сказати, що в умовах експлуатації дерев'яні стійки можуть мати пошкодження. Це сприяє розвалюванню вантажу та може призвести до порушення безпеки його перевезень. При перевезенні вагонів-платформ на залізничних поромках внаслідок впливу на несучу конструкцію підвищених динамічних навантажень зростає загроза виникнення подібних ситуацій. Така обставина зумовлює необхідність модернізації вагонів-платформ з метою безпечного перевезення довгомірних вантажів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням створення, удосконалень та підвищення ефективності експлуатації вагонів-платформ присвячено чимало наукових робіт. Наприклад, в статті [3] для адаптації вагона-платформи до перевезень довгомірних вантажів пропонується застосування знімного модуля. Особливістю модуля є наявність пружно-фрикційних зв'язків в конструкції, що сприяє зменшенню його динамічної навантаженості в експлуатації. Однак використання знімного модуля потребує відповідної системи технічного обслуговування та ремонту, що стримує серійність його впровадження в експлуатацію. Крім того, в роботі не приділялося уваги можливості перевезень такого модуля на залізничних поромках.

Авторами роботи [4] проведено аналіз впливу динамічних навантажень на міцність несучої конструкції вагона-платформи, призначеної для перевезень довгомірних вантажів. Висвітлено особливості проведеного модального аналізу конструкції вагона-платформи. Але в роботі не наведено рішень, спрямованих на покращення ефективності перевезень довгомірних вантажів на вагонах-платформах та їх адаптацію до залізнично-поромних перевезень.

Конструкцію довгобазного вагона-платформи зі змінною довжиною вантажного простору запропоновано авторами роботи [5]. В роботі наведено обґрунтування прийнятих при проектуванні вагона-платформи рішень шляхом статичного та динамічного аналізу конструкції. Але авторами не досліджувались питання можливості залучення даної конструкції вагона-платформи до перевезень довгомірних вантажів, в тому числі, в міжнародному залізнично-поромному сполученні.

Подібний недолік має і дослідження, висвітлено в рамках публікації [6]. Авторами приділено увагу визначенню навантаженості вагона-платформи при експлуатаційних режимах, але

не розглянуто можливості його адаптування до перевезень довгомірних вантажів та залізнично-поромним перевезенням.

В статті [7] висвітлено особливості визначення навантаженості довгобазної конструкції вагона-платформи. Покращення міцності її конструкції запропоновано впровадженням нових матеріалів виконання. Разом із цим, поза увагою авторів залишилися питання залучення даної конструкції вагона-платформи до перевезень довгомірних вантажів.

Дослідженню міцності довгобазної конструкції вагона-платформи присвячено публікацію [8]. Для визначення найбільш навантажених зон конструкції вагона-платформи авторами розраховано згинальні моменти, які діють в її перерізах. Але авторами не проводилося визначення навантаженості вагона-платформи за умови перевезень довгомірних вантажів, а також при перевезенні на залізничних поромках.

Проведений огляд наукових публікацій доводить, що питання визначення навантаженості та покращення безпеки руху вагонів-платформ є актуальними. Разом із цим, для підвищення ефективності перевезень довгомірних вантажів залізницею, а також в міжнародному залізнично-поромному сполученні, дослідження, присвячені адаптації (модернізації) вагонів-платформ до таких перевезень, потребують подальшого розвитку.

Постановка завдання. Метою дослідження є визначення доцільності модернізації універсального вагона-платформи для перевезень довгомірних вантажів, в тому числі, на залізничних поромках. Досягнення поставленої мети відбувалося шляхом розв'язку таких завдань дослідження:

- визначити силові фактори в модернізованій несучій конструкції вагона-платформи;
- провести розрахунок на міцність модернізованої несучої конструкції вагона-платформи при залізнично-поромних перевезеннях.

Виклад основного матеріалу. Для можливості перевезень довгомірних вантажів на універсальному вагоні-платформі пропонується модернізація його конструкції, яка полягає у використанні вертикальних стійок для утримання вантажу від перекидання (рис. 1). Верхні частини вертикальних стійок сполучені ув'язувальними пристроями (ланцюгами або тросами). Дана модернізація передбачає виготовлення вертикальних стійок із сталі марки 09Г2С. Тобто матеріал виконання вертикальних стійок

ідентичний до матеріалу виконання несучої конструкції вагона-платформи.

Для визначення параметрів профілів виконання вертикальних стійок проведено відповідний розрахунок. Метою даного розрахунку було визначення внутрішніх силових факторів, що діють в вертикальних стійках, при сприйнятті зовнішніх навантажень.

Розрахунок несучої конструкції вагона-платформи проведено як стрижневої системи (рис. 2). При цьому застосовано проганий комплекс «Ліра – САПР» [9].

Враховано, що конструкція навантажена вагою бруто, а на вертикальні стійки діє бокове навантаження. Інтенсивність цього навантаження враховує поперечну інерційну силу ΔF_n , яка діє від штабеля та розподілене за висотою вертикальної стійки L_{cm} [3]:

$$P_c = \frac{\Delta F_n}{L_{cm}}, \quad (1)$$

при цьому

$$\Delta F_n = n \cdot (F_n + W') - F_{mp}^n, \quad (2)$$

де n – коефіцієнт, який закладається при проектуванні вагона-платформи; F_n – поперечне інерційне навантаження, яке враховує силу від штабеля та відцентрову силу; W' – вітрове навантаження; F_{mp}^n – сила тертя.

З одного боку вагона це навантаження приймалося зі знаком «+», а з іншого зі знаком «-». Закріплення вагона відбувалося за п'ятники. З урахуванням проведених розрахунків встановлено, що епюра згинальних моментів має вигляд параболи з максимумом в середній частині (рис. 3). З боку навантаження стійок значення згинального моменту складає $55,3 \text{ кН} \cdot \text{м}$, з протилежного боку чисельне значення згинального моменту є від'ємним.

Для визначення товщини стінок вертикальних стійок враховано геометрію скоби лісової стійки. Отже нижня частина стійки повинна мати ширину $b = 80 \text{ мм}$ та довжину $l = 110 \text{ мм}$. Підбір оптимальної товщини робочої частини вертикальної стійки (зона стійки, яка контактує з вантажем) здійснено за моментом опору її поперечного перерізу. Він визначався за допомогою опцій програмного комплексу SolidWorks. При цьому момент

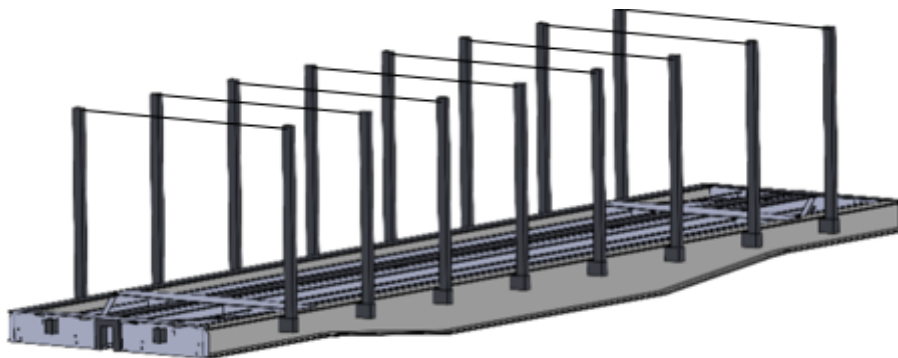


Рис. 1. Несуча конструкція вагона-платформи з урахуванням заходів щодо модернізації

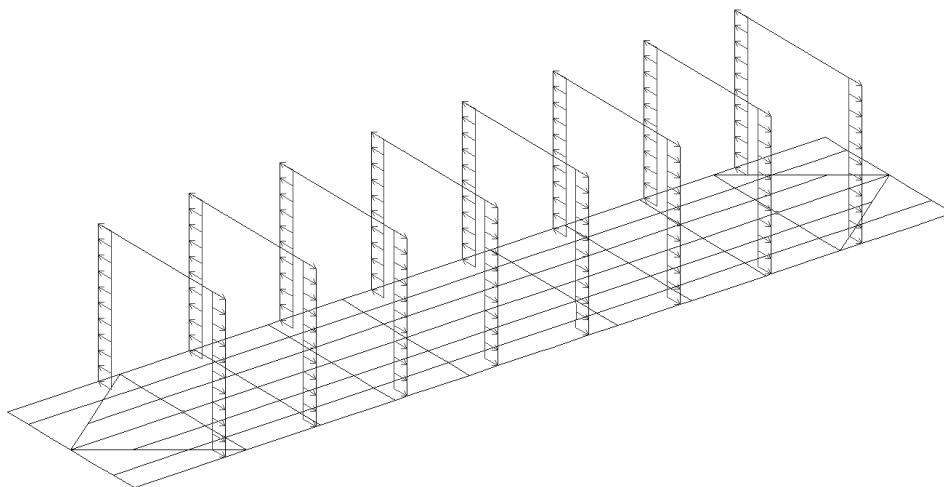


Рис. 2. Розрахункова схема несучої конструкції вагона-платформи

опору при якому буде дотримуватись міцність вертикальної стійки визначено як відношення згинального моменту M , що діє в її перетині до допустимих напружень $[\sigma]$ матеріалу виконання, тобто $W = M / [\sigma]$. Допустимі напруження $[\sigma]$ для сталі марки 09Г2С прийнято рівними 310,5 МПа у відповідності до [10]. Тоді, $W = 178 \text{ см}^3$. В програмному комплексі SolidWorks створено відповідну геометрію вертикальної стійки та відбувалось варіювання товщиною її стінки. На підставі проведених розрахунків встановлено, що при ширині робочої частини вертикальної стійки 110 мм та висоті – 140 мм, товщина її стінки повинна складати 10 мм. При цьому $W = 178 \text{ см}^3$. Маса однієї стійки складає 99 кг. Отримані результати підтверджено розрахунками на міцність несучої

конструкції вагона-платформи при основних експлуатаційних режимах навантажень.

Для можливості залучення модернізованої конструкції вагона-платформи до перевезень залізничними поромами пропонується встановлення на основних повздовжніх балках надбудов для розміщення ланцюгових стяжок (рис. 4).

Для визначення міцності несучої конструкції вагона-платформи при перевезенні на залізничному поромі проведено його розрахунок. При цьому використано метод скінчених елементів [11], який реалізовано у SolidWorks Simulation. Розрахункову схему несучої конструкції вагона-платформи наведено на рис. 5.

При складанні розрахункової схеми враховано, що на несучу конструкцію

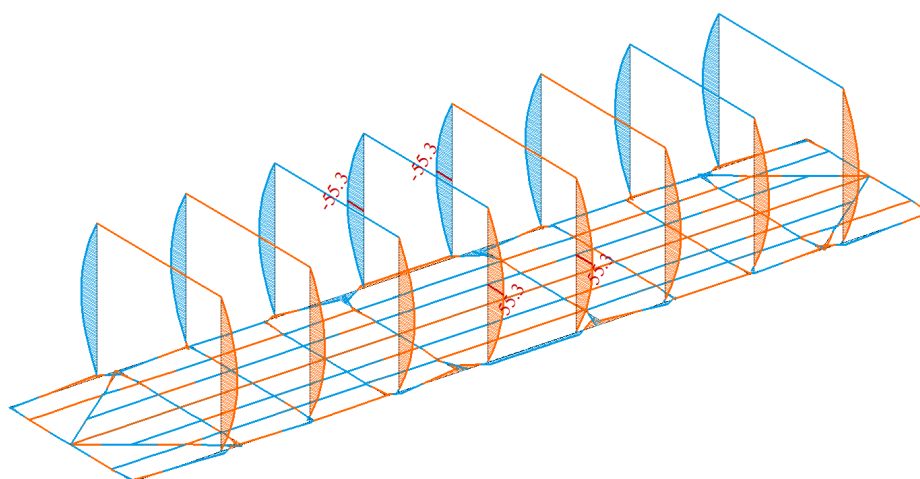


Рис. 3. Епюра згинальних моментів, що діють на несучу конструкцію вагона-платформи (кН · м)

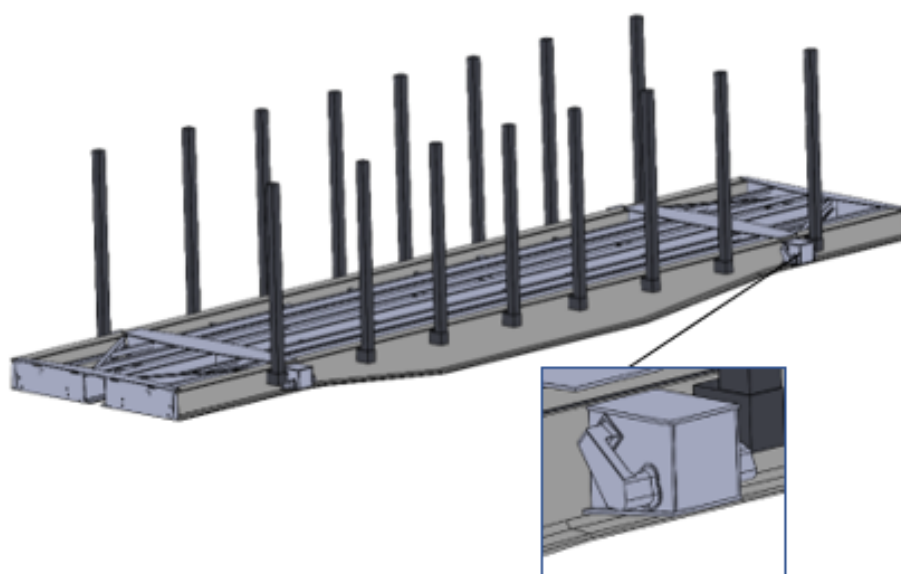


Рис. 4. Просторова модель несучої конструкції вагона-платформи з вузлами для закріплення ланцюгових стяжок

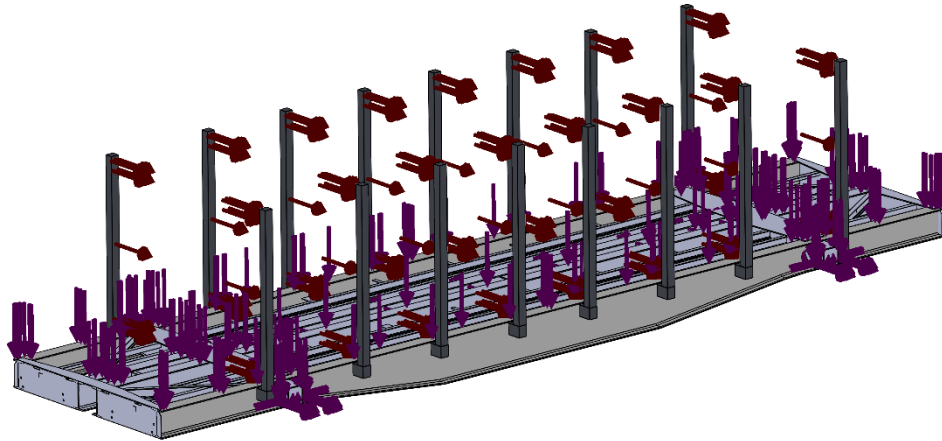


Рис. 5. Розрахункова схема несучої конструкції вагона-платформи

вагона-платформи діє вертикальне навантаження, зумовлене власною вагою та вагою перевозимого вантажу (із використанням повної вантажопідйомності), бокові навантаження на вертикальні стійки, а також навантаження від ланцюгових стяжок, прикладені до вузлів закріплення. При цьому навантаження від ланцюгових стяжок розкладалися на три складові, із урахуванням кутів їх розміщення в просторі. Ці кути прийнято рівними нормативним значенням. Дане навантаження з боку нахилу вагона-платформи враховувалося із складовою від динамічного навантаження, а з протилежного боку – враховувалося навантаження від натягнення ланцюгової стяжки (50 кН).

Для визначення бокових навантажень, а також навантажень, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи від ланцюгових стяжок проведено математичне моделювання динамічної навантаженості вагона-платформи при перевезенні залізничним поромом. До уваги прийнято бортову хитавицю залізничного порому, оскільки даний вид коливань здійснює найбільший вплив на стійкість вагона відносно палуби. Математична модель навантаженості вагона-платформи має вигляд [12]:

$$\left(\frac{D}{12 \cdot g} (B^2 + 4z_g^2) \right) \ddot{q}_1 + \left(\Lambda_\theta \cdot \frac{B}{2} \right) \dot{q}_1 = p' \cdot \frac{h}{2} + \Lambda_\theta \cdot \frac{B}{2} \cdot \dot{F}(t), \quad (3)$$

де $q=\theta$ – узагальнена координата, що відповідає кутовому переміщенню залізничного порому з вагонами навколо повздовжньої осі. Початок системи координат розміщений в центрі мас залізничного порому.

D – вагове водовитіснення; B – ширина борта; h – висота борта; Λ_θ – коефіцієнт опору коливанням; z_g – координата центру ваги; p' – вітрове навантаження; $F(t)$ – закон дії зусилля, яке збудує рух залізничного порому з вагонами, розміщеними на його палубах.

Розрахунок проведено на прикладі залізничного порому «Герой Шипки», який рухається акваторією Чорного моря. Розв'язок математичної моделі здійснено у програмному комплексі MathCad за методом Рунге – Кутта. Початкові умови покладені рівними нулю. Проведені розрахунки встановили, що прискорення, яке діє на несучу конструкцію вагона-платформи складає близько 0,2 g. Визначена величина прискорення врахована при розрахунках на міцність несучої конструкції вагона-платформи.

При створенні скінчено-елементної моделі використано тетраедри. Їх чисельність склала 147362 одиниці, а вузлів – 48860. Закріплення моделі здійснювалося за п'ятники, а також за зони взаємодії несучої конструкції вагона-платформи з упор домкратами (опорні поверхні шворневих балок). На верхніх частинах вертикальних стійок встановлювався зв'язок, який імітує їх взаємодію з ув'язувальними пристроями. Результати розрахунку наведено на рис. 6, 7.

Найбільші напруження в несучій конструкції вагона-платформи виникають в надбудовах для розміщення вузлів для закріплення ланцюгових стяжок – 288,1 МПа (рис. 6). Разом із цим, зі напруження нижчі за допустимі на 7,2%. При цьому допустимі напруження прийнято рівними 310,5 МПа [10].

Максимальні переміщення виникають у верхніх частинах вертикальних стійок, розміщених за центром повздовжньої балки. Ці переміщення склали 5,8 мм (рис. 7).

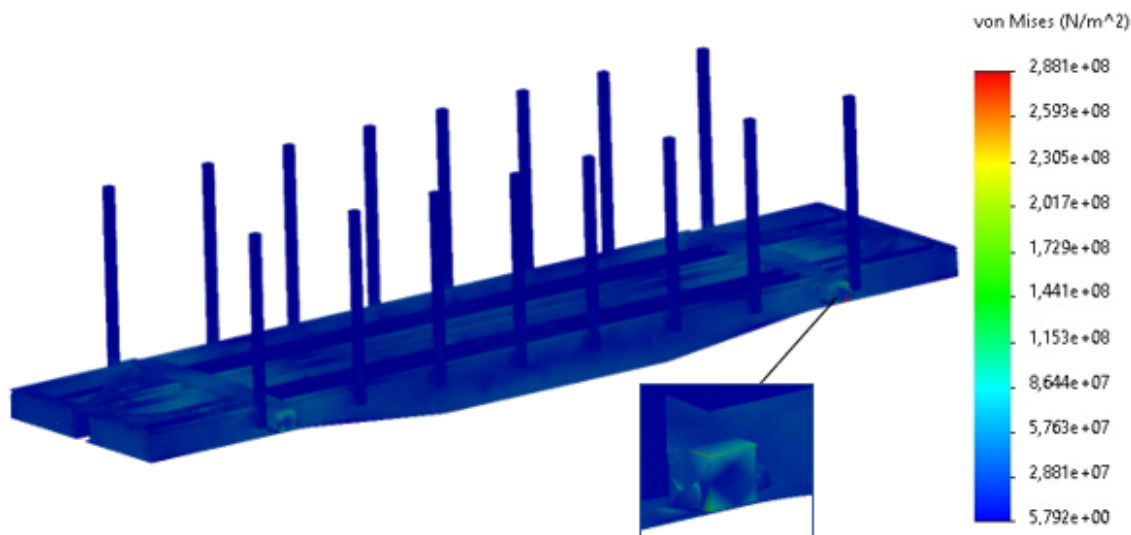


Рис. 6. Напружений стан несучої конструкції вагона-платформи

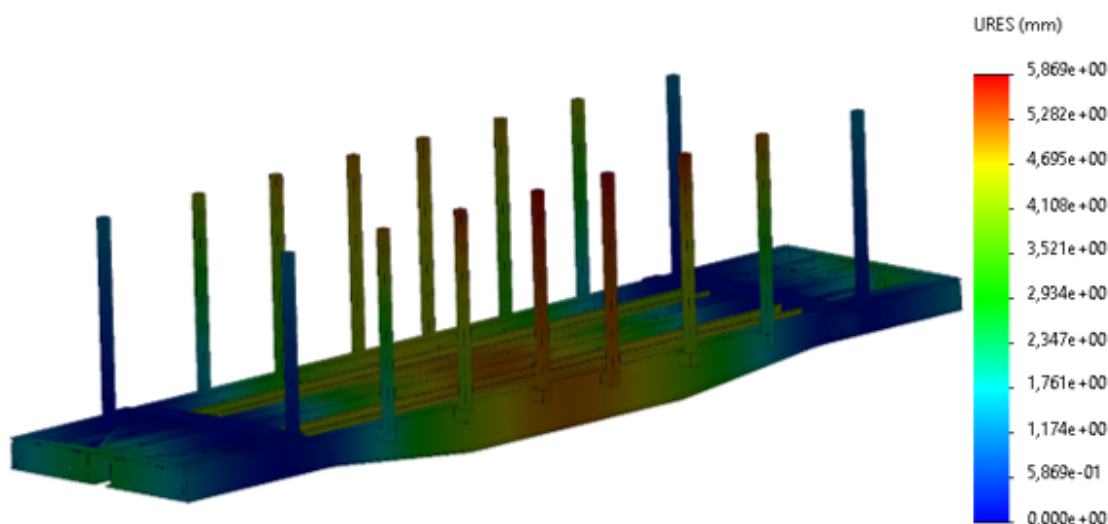


Рис. 7. Переміщення в вузлах несучої конструкції вагона-платформи

Проведені розрахунки доводять доцільність запропонованих рішень щодо модернізації несучої конструкції вагона-платформи.

Висновки. 1. Визначено силові фактори в модернізованій несучій конструкції вагона-платформи. Встановлено, що з боку навантаження вертикальних стійок значення згинального моменту складає $55,3 \text{ кН} \cdot \text{м}$, з протилежного боку чисельне значення згинального моменту є від'ємним. З урахуванням визначеного згинального моменту за моментом опору поперечного перерізу підібрано параметри профілю виконання вертикальної стійки: ширина робочої частини стійки – 110 мм, висота – 140 мм, товщина стінки – 10 мм. Маса однієї стійки складає 99 кг. З урахуванням подальшої оптимізації, яку планується робити на послідовних етапах досліджень,

прогнозується зменшення маси вертикальної стійки у порівнянні із першопочатковим. Проведено розрахунок на міцність модернізованої несучої конструкції вагона-платформи. Встановлено, що міцність її конструкції дотримується.

2. Проведено розрахунок на міцність модернізованої несучої конструкції вагона-платформи при перевезенні залізничним поромом. Встановлено, що максимальні напруження в несучій конструкції вагона-платформи складають 288,1 МПа та не перевищують допустимі. Ці напруження виникають в надбудовах для розміщення вузлів для закріплення ланцюгових стяжок. Максимальні переміщення виникають у верхніх частинах вертикальних стійок, розміщених за центром повздовжньої балки і дорівнюють 5,8 мм.

Список літератури:

1. Gerlici J., Lovska A., Kozáková K. Research into the Longitudinal Loading of an Improved Load-Bearing Structure of a Flat Car for Container Transportation. *Designs*. 2025. Vol. 9 (1) 12. <https://doi.org/10.3390/designs9010012>
2. Aliyu Kasimu, Wei Zhou, Hongkai Yan, Yazhao Wang, Chao Shen, Qiang Zhang. Evaluation of the vehicle-cargo and vehicle-trackside clearance of long and big railway freight vehicles. *Alexandria Engineering Journal*. 2025. Vol. 119. P. 22–34. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.12.113>
3. Glib Vatulia, Alyona Lovska, Mykhailo Pavliuchenkov, Volodymyr Nerubatskyi, Andrii Okorokov, Denys Hordienko, Roman Vernigora, Irina Zhuravel. 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>
4. Rúben Silva, Diogo Ribeiro, Cássio Bragança, Cristina Costa, António Arêde, Rui Calçada. Model Updating of a Freight Wagon Based on Dynamic Tests under Different Loading Scenarios. *Applied Science*. 2021. Vol. 11. 10691. <https://doi.org/10.3390/app112210691>
5. Pavol Šťastniak, 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. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823500030>
6. Apurba Das, Gopal Agarwal. Compression, tension & lifting stability on a meter gauge flat Wagon: an experimental approach. *Australian Journal of Mechanical Engineering*. 2020. June. <https://doi.org/10.1080/14484846.2020.1775007>
7. Fedosov-Nikonov D. V., Sulym A. O., Ilchyshyn V. V., Safronov O. M., Kelrikh M. B. Study of strength characteristics of the long wheelbase flatcars. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 985. 0120229. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012029>
8. Ishchenko V. M., Fedosov-Nikonov D. V. Long Wheelbase Flat Wagons: Structural Strength. *Metallurgical and Mining Industry*. 2017. No. 8. P. 26–31.
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 проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Київ, 2015.
11. Juraj Gerlici, Alyona Lovska, Mykhailo Pavliuchenkov. Study of the Dynamics and Strength of the Detachable Module for Long Cargoes under Asymmetric Loading Diagrams. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, 3211. <https://doi.org/10.3390/app14083211>
12. Lovska A., Gerlici J., Dizo J., Ishchuk V. The strength of rail vehicles transported by a ferry considering the influence of sea waves on its hull. *Sensors*. 2024. Vol. 24 (1), 183. <https://doi.org/10.3390/s24010183>

Lovska A.O., Pavliuchenkov M.V., Garbuz A.O., Opanasenko O.V. RESEARCH OF THE LOADING OF A FLAT WAGON FOR LONG CARGO IN OPERATIONAL MODES

The article highlights the results of studies of the loading of the modernized supporting structure of the flat wagon under operational modes. The peculiarity of the modernization of the flat wagon is the placement of vertical racks on the longitudinal beams of the frame. This solution allows adapting its design to the transportation of long cargo. The study was conducted on the example of the flat wagon model 13-401. The parameters of the profiles of the vertical racks were determined based on the moment of resistance of their section. The strength of the supporting structure of the flat wagon was determined under the most unfavorable operating load modes, in particular, when transporting by rail ferry.

To determine the dynamic loads acting on the supporting structure of the flat wagon, mathematical modeling was performed. The onboard sway of the railway ferry was taken into account, since this type of oscillation has the greatest impact on the stability of the flat wagon relative to the deck. The solution of the mathematical model was performed using the MathCad software package, which implements the Runge-Kutta method. The results of the mathematical model solution allowed us to determine the accelerations acting on the supporting structure of the flat wagon and to take them into account in strength calculations. For this purpose, a spatial model of the supporting structure of the flat wagon was formed. Structural elements that rigidly interact with each other were taken into account. Graphical work on creating a spatial model was reproduced in SolidWorks. Strength calculations were performed using the finite element method in the SolidWorks Simulation software package. It was established that the stresses in the supporting structure of the flat wagon do not exceed the permissible values, therefore its strength is ensured.

The results of the conducted research will contribute to increasing the efficiency of the operation of the flat wagon and creating recommendations for their operation in rail-ferry traffic.

Key words: rail transport, flat wagon, supporting structure of the flat wagon, modernization of the flat wagon, structural strength, rail-ferry transportation.