

**Ловська А.О.**

Український державний університет залізничного транспорту

**Павлюченко М.В.**

Сумський національний аграрний університет

**Тесленко А.В.**

Український державний університет залізничного транспорту

## АНАЛІЗ НАВАНТАЖЕНОСТІ НЕСУЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ НАПІВВАГОНА ПРИ ПЕРЕВЕЗЕННІ В НЬОМУ ГУСЕНИЧНОЇ ТЕХНІКИ

*В матеріалах статті проводиться дослідження можливості застосування напіввагонів для перевезень гусеничної техніки. На першопочатковому етапі авторським колективом проведено математичне моделювання повздовжньої навантаженості напіввагона при перевезенні в ньому гусеничної техніки. До уваги прийнято рух вагона у складі поїзда при розрахунковому режимі “ривок”. При цьому враховано, що на передній упор автотрени діє повздовжнє навантаження у 2,5 МН.*

*На підставі проведених розрахунків встановлено, що максимальне значення прискорення складає  $24,4 \text{ м/с}^2$ . Отримана величина прискорення врахована при визначенні міцності несучої конструкції напіввагона. Розрахунок реалізовано за методом скінчених елементів в програмному комплексі SolidWorks Simulation. Для цього створено просторову модель несучої конструкції напіввагона 12-753-01. При створенні просторової моделі враховані елементи конструкції, які жорстко взаємодіють між собою зварюванням або заклепками. Графічні роботи відтворені у SolidWorks. Створення скінчено-елементної моделі здійснено з використанням ізопараметричних просторових тетраєдрів.*

*Результати розрахунків несучої конструкції напіввагона на міцність встановили, що максимальні напруження складають  $276,3 \text{ МПа}$  та майже на 30% перевищують допустимі. Дані напруження виникають в зоні розміщення кріпильних скоб. Максимальні переміщення в несучій конструкції напіввагона склали  $5,74 \text{ мм}$ . Отже перевезення гусеничної техніки за такою схемою є недопустимим.*

*Проведені дослідження сприятимуть підвищенню ефективності експлуатації залізничного транспорту та стануть корисними напрацюваннями при проектуванні сучасних концептів транспортних засобів багатofункціонального призначення.*

**Ключові слова:** транспортна механіка, напіввагон, ситуаційна адаптація, динамічна навантаженість напіввагона, комбіновані перевезення.

**Постановка проблеми.** Перспективи техніко-економічного розвитку європейських країн, а також зміцнення їх національної безпеки та оборони зумовлюють підвищення ефективності експлуатації залізничного рухомого складу, як провідної галузі транспортної системи. При цьому потребують розв'язку питання створення спеціалізованого рухомого складу для перевезень гусеничної техніки (сільськогосподарської, військової тощо).

Поповнення вагонного парку в багатьох європейських країнах за останні роки є незначним. У зв'язку з цим виникає необхідність впровадження ефективних конструктивних рішень залізничного рухомого складу для здійснення перевезень вантажів. Одним з найбільш актуальних

варіантів серед таких є ситуаційна адаптація існуючого парку вагонів до відповідних умов експлуатації.

Відомо, що одним з найбільш поширених типів вагонів, які використовуються для перевезень гусеничної техніки є вагони-платформи. Разом з цим, нестача вагонів-платформ в експлуатації під перевезення гусеничної техніки може викликати її простій в очікуванні транспортування. Одним із варіантів вирішення цього питання є адаптація інших типів вагонів під перевезення гусеничної техніки. Тому питання ситуаційної адаптації вантажних вагонів під перевезення гусеничної техніки є актуальним.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання ситуаційної адаптації вагонів до пере-

везень завданої номенклатури вантажів є досить актуальними. Наприклад, у науковій публікації [1] запропоновано модернізацію залізничного вагона, яка сприятиме можливості перевезень контейнерів в ньому. Висвітлено конструкційні особливості запропонованої модернізації, а також результати розрахунку на міцність рами, які підтвердили ефективність її використання. Однак автори даної роботи обмежилися одним типом вагону – вагоном-платформою і не проводили досліджень щодо можливості адаптації її конструкції до перевезень гусеничної техніки.

Для адаптації напіввагона до перевезень вантажів, які мають висоту, що перевищує висоту кузова, в роботі [2] запропоновано його удосконалення. Дане удосконалення полягає у використанні висувного елемента – штанги з регульованою висотою. Зазначено, що дане удосконалення підвищить безпеку перевезень вантажів залізницею. Разом з цим, авторами не розглядалася можливість закріплення гусеничної техніки за такою схемою.

З метою можливості перевезень контейнерів в напіввагонах в публікації [3] запропоновано використання проміжного адаптера для їх закріплення в кузові. Даний адаптер являє собою зйомну раму, яка може функціонувати як модульна транспортна одиниця. В роботі наведені результати розрахунку на міцність кузова напіввагона за умови перевезень в ньому контейнерів, закріплених за допомогою адаптера. Доведено, що така схема закріплення контейнерів є доцільною. Однак автори не розглядали питань ситуаційної адаптації напіввагонів до перевезень гусеничної техніки.

Особливості конструкції залізничного вагона, призначеного для перевезень великовагових вантажів висвітлюються у статті [4]. Зазначено гіпотези та припущення прийняті при проектуванні даного вагона. Наведено результати визначення його напруженого стану при основних режимах експлуатації. Однак не зазначено можливості перевезень гусеничної техніки на даному вагоні, що підвищило б ефективність його використання.

Конструкцію вантажного вагона для перевезень колісної техніки запропоновано авторами роботи [5]. Цікавість конструкції даного вагона полягає у тому, що є можливість перевантаження автомобілів за системою ACTS. Для цього вагон має спеціальну поворотну раму. Разом з рядом переваг даної конструкції вагона, авторами не оговорено можливості перевезень на ньому гусеничної техніки.

В роботі [6] проаналізовано можливість перевезення контейнерів у напіввагоні, а також запропоновано рішення щодо ситуаційної адаптації напіввагона до контейнерних перевезень. Разом з цим, питанню дослідження можливості перевезень гусеничної техніки в напіввагонах авторами уваги не приділялося.

Проаналізовані літературні джерела дозволяють зробити висновок, що дослідження, присвячені ситуаційній адаптації напіввагонів до перевезень гусеничної техніки є актуальними та потребують розвитку.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є визначення динамічної навантаженості та міцності несучої конструкції напіввагона при перевезенні в ньому гусеничної техніки.

**Виклад основного матеріалу.** Для перевезень гусеничної техніки залізницею можливим є залучення для цих цілей напіввагонів з торцевими дверима. Таким чином завантаження гусеничної техніки може здійснюватися через відкриті торцеві двері. Разом з цим, для її кріплення в напіввагоні необхідно передбачити спеціальні кріпильні скоби (рими). Для дослідження можливості перевезень гусеничної техніки в напіввагоні проведено відповідні розрахунки. У якості прототипу розглянуто напіввагон моделі 12-753-01. Торцеві стіни даного напіввагона утворені двостувковими дверима.

У якості прикладу враховано, що гусенична транспортна одиниця (ГТО) має масу 24 т.

Для визначення динамічних навантажень, які будуть діяти на несучу конструкцію напіввагона, завантаженого гусеничною технікою проведено математичне моделювання його динамічної навантаженості у повздовжній площині. До уваги прийнято рух вагона у складі поїзда при розрахунковому режимі “ривок” [7]. Враховано, що на передній упор автозчепу діє повздовжнє навантаження у 2,5 МН. Розрахункову схему напіввагона наведено на рис. 1.

Математична модель, яка характеризує переміщення системи в повздовжній площині при “ривку” має вигляд

$$\begin{cases} M_B \cdot \ddot{q}_1 = P_n - (F_{mp} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2)), \\ M_T \cdot \ddot{q}_2 = (F_{mp} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2)), \end{cases} \quad (1)$$

де  $M_B$  – маса бруття напіввагона;

$P_n$  – сила, яка діє на передні упори автозчепу при “ривку”;

$F_{mp}$  – сила тертя між підлогою напіввагона та ГТО;

$M_T$  – маса ГТО.

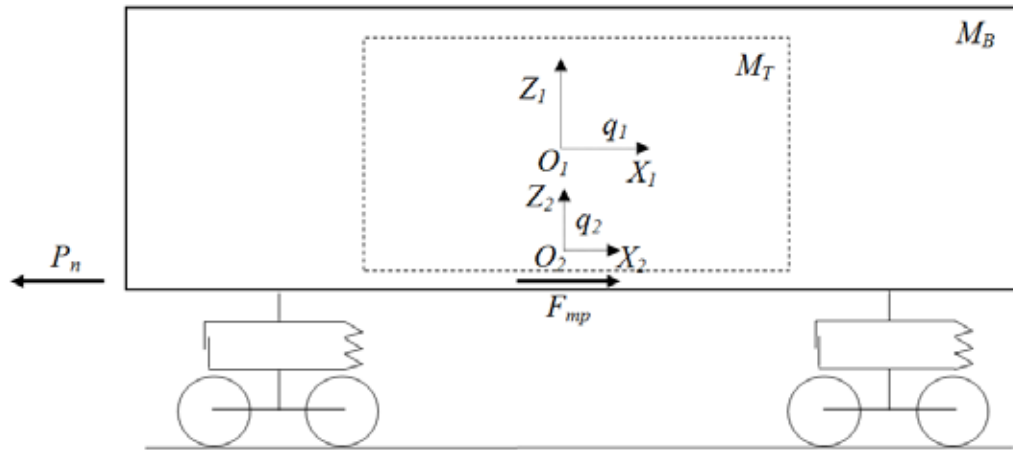


Рис. 1. Розрахункова схема напіввагона

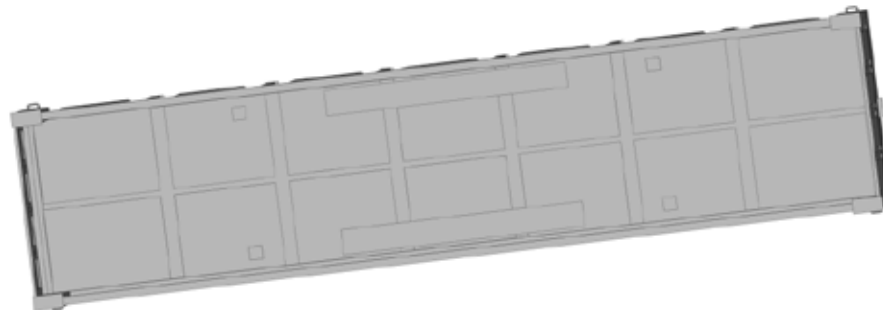


Рис. 2. Розміщення накладок в напіввагоні

Розв’язок математичної моделі здійснено в MathCad за методом покрокової ітерації Рунге-Кутта [8].

При цьому визначення узагальненого прискорення здійснено у масиві  $ddq_{j,i}$ :

$$ddq_{j,1} = \frac{P_n - (F_{FR} \cdot \text{sign}(y_2 - y_4))}{M_W}, \quad (2)$$

$$ddq_{j,2} = \frac{(F_{FR} \cdot \text{sign}(y_2 - y_4))}{M_T}, \quad (3)$$

де  $y_1 = q_1$ ;  $y_2 = \dot{q}_1$ ;  $y_3 = q_3$ ;  $y_4 = \dot{q}_3$ .

Початкові умови, переміщення та швидкості, покладені близькими до нуля [9]. На підставі проведених розрахунків отримано, прискорення, яке діє на напіввагон при “ривку”. Максимальне значення прискорення склало  $24,4 \text{ м/с}^2$ .

Розрахована величина прискорення врахована при визначенні міцності несучої конструкції напіввагона. Для цього створено просторову модель несучої конструкції напіввагона 12-753-01. Графічні роботи відтворені у SolidWorks [10, 11]. При створенні просторової моделі враховані еле-

менти конструкції, які жорстко взаємодіють між собою зварюванням або заклепками. На підлогу напіввагона встановлювалися накладки, які імітують зони взаємодії гусениць транспортної одиниці з напіввагоном (рис. 2).

При складанні розрахункової схеми (рис. 3) до цих накладок прикладалося вертикальне навантаження  $P_e$  від ваги бруто ГТО, а також сила тертя  $P_{mp}$ , що виникає між гусеницями та підлогою напіввагона.

Також на підлогу встановлювалися чотири накладки прямокутної форми, які імітують плити кріпильних скоб для фіксації стропів, що утримують ГТО від переміщень при перехідних режимах руху поїзда. До цих плит прикладалося навантаження від стропів  $P_{кр}$ , яке розкладалося на дві складові – вертикальну та горизонтальну. Кут нахилу стропа прийнято рівним  $45^\circ$ . До передніх упорів автозчепу прикладалося повздовжнє навантаження  $P_n$  у  $2,5 \text{ МН}$  [7], що імітувало режим “ривок”. З протилежного боку вагона це навантаження врівноважувалося відповідними реакціями, прикладеними до передніх упорів автозчепу.

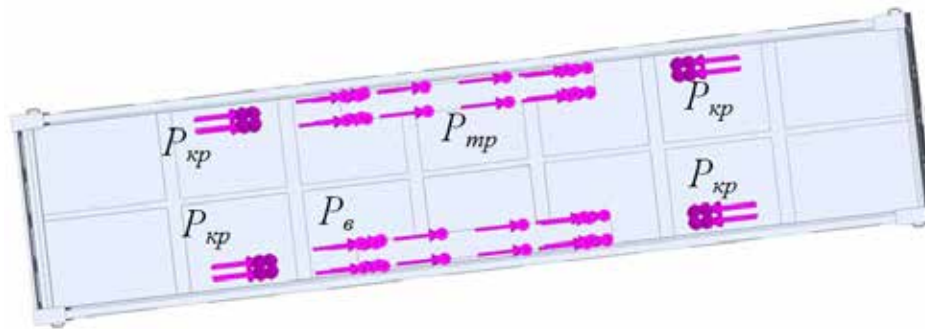


Рис. 3. Розрахункова схема несучої конструкції напіввагона

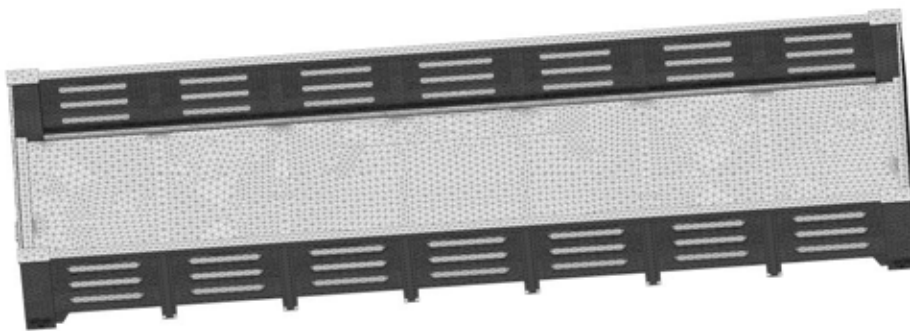


Рис. 4. Скінчено-елементна модель несучої конструкції напіввагона

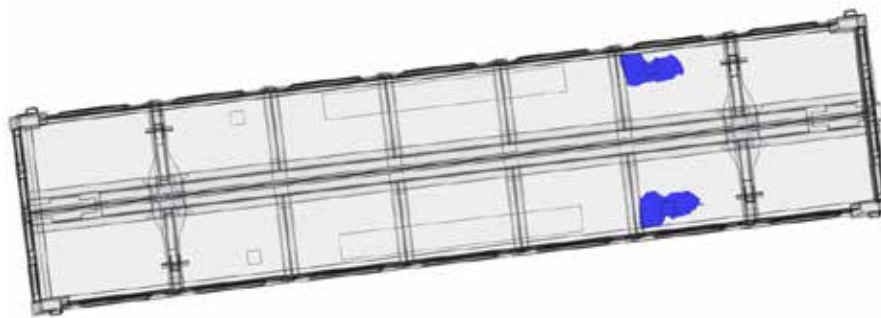


Рис. 5. Найбільш навантажені зони в несучій конструкції напіввагона

До горизонтальних поверхонь п'ятників вагона прикладалися зв'язки, які імітують його обпирання на візки. При цьому застосовувалося жорстке заземлення. Створення скінчено-елементної моделі здійснено за допомогою тетраєдрів (рис. 4). Модель утворена 390767 елементами та 127755 вузлами. Максимальний розмір елемента склав – 100 мм, а мінімальний – 20 мм. Оптимальне значення елементів моделі визначено графоаналітично.

У якості матеріалу несучої конструкції напіввагона призначено низьколеговану сталь 09Г2С [7]. Ця марка сталі є типовою для виготовлення несучих конструкцій вагонів.

За результатами проведених розрахунків встановлено, що максимальні напруження в несучій

конструкції напіввагона виникають в зонах встановлення кріпильних скоб з протилежного за ходом руху боці вагона (рис. 5).

Розрахункові значення отриманих напружень майже на 30% перевищують допустимі і складають 276,3 МПа (рис. 6).

Максимальні переміщення в несучій конструкції напіввагона зафіксовано також в зонах розміщення кріпильних скоб з протилежного за ходом руху напрямку і склали 5,74 мм (рис. 7).

На підставі проведених розрахунків можна зробити висновок, що для безпеки перевезень гусеничної техніки в напіввагонах необхідним є адаптація їх конструкції до взаємодії з засобами закріплення.

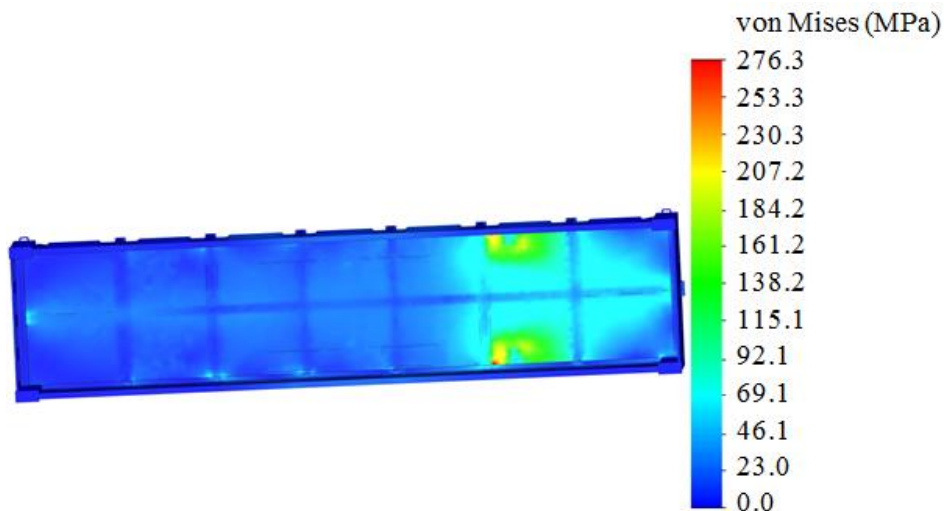


Рис. 6. Напружений стан несучої конструкції напіввагона

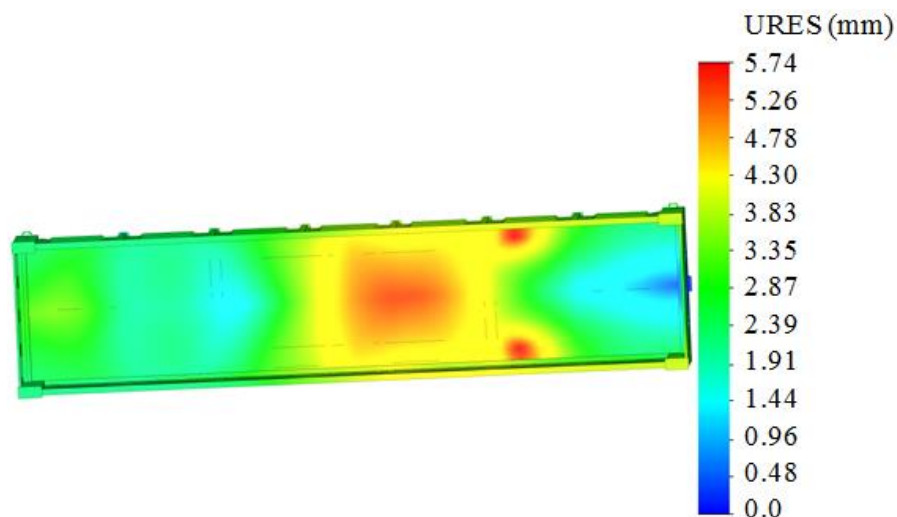


Рис. 7. Переміщення в несучій конструкції напіввагона

#### Висновки.

1. Проведено математичне моделювання повздожньої навантаженості напіввагона при перевезенні в ньому гусеничної техніки. До уваги прийнято режим руху напіввагона у складі поїзда – “ривок”. Максимальне значення прискорення, яке діє на несучу конструкцію напіввагона склало  $24,4 \text{ м/с}^2$ . Отримана величина прискорення врахована при розрахунках на міцність несучої конструкції напіввагона.

2. Результати розрахунків несучої конструкції напіввагона на міцність показали, що максимальні

напруження виникають в зонах встановлення кріпильних скоб і складають  $276,3 \text{ МПа}$ . Отримані напруження майже на 30% перевищують допустимі. Максимальні переміщення в несучій конструкції напіввагона зафіксовано також в зонах розміщення кріпильних скоб з протилежного за ходом руху напрямку і склали  $5,74 \text{ мм}$ .

Проведені дослідження сприятимуть підвищенню ефективності експлуатації залізничного транспорту та стануть корисними напрацюваннями при проектуванні сучасних концептів транспортних засобів багатофункціонального призначення.

#### Список літератури:

1. V. Shaposhnyk, O. Shykunov, A. Reidemeister, M. Leontii, O. Potapenko. 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>

2. A. Reidemeister, L. Muradian, V. Shaposhnyk, O. Shykunov, O. Kyryl'chuk, V. Kalashnyk. Improvement of the open wagon for cargoes which implyloading with a "hat" // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 985, 012034. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012034>
3. 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. <https://doi.org/10.3390/app13158605>
4. Divya Priya G., Swarnakumari A. Modeling and analysis of twenty tonne heavy duty trolley // Intern. J. of Innovative Technology and Research. 2014. Vol. 2. No. 6. P. 1568–1580.
5. Wiesław Krasoń, Tadeusz Niezgodą, Michał Stankiewicz. Innovative Project of Prototype Railway Wagon and Intermodal Transport System // Transportation Research Procedia. 2016. Vol. 14. P. 615–624.
6. J. Gerlici, G. Vatulia, A. Lovska, D. Skurikhin, J. Harušinec, A. Suchánek, V. Ishchuk. 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. ДСТУ ISO 8323:2015. Вантажні контейнери. Контейнери універсальні (інтермодальні) для повітряних і наземних перевезень. Технічні умови та методи випробувань. Київ, 2015.
8. Богач І. В., Краковецький О. Ю., Килик Л. В. Чисельні методи розв'язання диференціальних рівнянь засобами MathCad: Навчальний посібник. Вінниця, 2020. 106 с.
9. 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>
10. Козяр М. М., Фещук Ю. В., Парфенюк О. В. Комп'ютерна графіка: SolidWorks: навчальний посібник. Херсон: Олді-плюс. 2018. 252 с.
11. Пустюльга С. І., Самостян В. Р., Клак Ю. В. Інженерна графіка в SolidWorks: навчальний посібник. Луцьк: Вежа. 2018. 172 с.

#### **Lovska A.O., Pavliuchenkov M.V., Teslenko A.V. ANALYSIS OF LOADING OF THE BEARING STRUCTURE OF AN OPEN WAGON WHEN TRANSPORTING TRACKED MACHINERY**

*In the materials of the article, a study of the possibility of using open wagon for the transportation of tracked machinery is carried out. At the initial stage, the author's team carried out mathematical modeling of the longitudinal load of an open wagon when transporting tracked machinery in it. The movement of the wagon as part of the train is taken into account in the "jerk" calculation mode. At the same time, it is taken into account that a longitudinal load of 2.5 MN acts on the front stop of the auto coupling.*

*Based on the calculations, it was established that the maximum acceleration value is 24.4 m/s<sup>2</sup>. The obtained acceleration value is taken into account when determining the strength of the bearing structure of the open wagon. The calculation was implemented using the finite element method in the SolidWorks Simulation software complex. For this, a spatial model of the bearing structure of the open wagon 12-753-01 was created. When creating a spatial model, structural elements that rigidly interact with each other by welding or rivets are taken into account. Graphic works are reproduced in SolidWorks. The finite element model was created using isoparametric spatial tetrahedra.*

*The results of strength calculations of the bearing structure of the open wagon established that the maximum stresses are 276.3 MPa and almost 30% exceed the allowable ones. These stresses occur in the area where the fastening brackets are placed. The maximum displacements in the supporting structure of the open wagon amounted to 5.74 mm. Therefore, the transportation of tracked machinery according to such a scheme is inadmissible.*

*The conducted research will contribute to the improvement of the efficiency of railway transport operation and will be a useful experience in the design of modern concepts of multi-purpose vehicles.*

**Key words:** transport mechanics, open wagon, situational adaptation, dynamic loading of an open wagon, combined transportation.