

УДК 629.463.65
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.2.2/32>

Ловська А.О.

<https://orcid.org/0000-0002-8604-1764>
Український державний університет залізничного транспорту

Павлюченков М.В.

<https://orcid.org/0000-0003-0542-7284>
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

Мурад'ян А.О.

<https://orcid.org/0000-0002-6488-6627>
Одеський національний морський університет

Демидюков О.В.

<https://orcid.org/0000-0002-4791-3830>
Одеський національний морський університет

ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ВЕРТИКАЛЬНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ ТРАПЕЦЕПОДІБНОГО ЗНІМНОГО ДАХУ НАПІВВАГОНА

У статті висвітлено результати досліджень вертикальної навантаженості трапецеподібного знімного даху напіввагона. Для адаптації напіввагонів до перевезень вантажів, що потребують захисту від навколишнього середовища, запропоновано оснащувати їх знімними дахами. При цьому передбачається використання напіввагонів, підлога яких утворена кришками розвантажувальних люків. Розвантаження напіввагона буде здійснюватися самотечією із використанням гравітаційних властивостей вантажу. З метою визначення профілів виконання даху проведено дослідження силових факторів у його каркасі. До уваги прийнято дві схеми навантаження даху: вертикальне навантаження даху від снігу; вертикальне навантаження даху від снігу та двох зосереджених сил. Визначення силових факторів у каркасі даху проведено у програмному комплексі Ліра – САПР. Встановлено, що максимальний згинальний момент у каркасі даху має місце при другій схемі навантаження і склав 0,42 кН·м. За моментом опору поперечного перерізу обрано профіль виконання каркасу даху – швелер №5.

Проведено розрахунок на міцність знімного даху напіввагона із використанням методу скінчених елементів. Встановлено, що при сприйнятті дахом вертикального навантаження від снігу найбільша концентрація напружень спостерігається в середній частині поздовжньої балки каркасу, але ці напруження на 62,6% нижче за допустимі.

При сприйнятті дахом вертикального навантаження від снігу та двох зосереджених сил максимальні напруження в ньому на 8,8% нижчі за допустимі і виникають в зоні прикладення двох зосереджених сил.

Проведені дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування конструкцій залізничних транспортних засобів та підвищенню ефективності залізничних перевезень.

Ключові слова: залізничний транспорт, знімний дах напіввагона, проектування знімного даху, навантаженість знімного даху, міцність знімного даху.

Постановка проблеми. Залізничний транспорт вже тривалий час є не тільки провідною складовою транспортної галузі, а і стратегічною. На долю залізничного транспорту припадає досить різноманітний сегмент перевезень вантажів народного господарства. Вже тривалий час

Україна є провідним експортером зерна у європейські країни. Для перевезень зернових залізницею використовуються здебільшого вагони-хопери, а також контейнери. Однак в останні роки рівень поповнення інвентарного парку цими транспортними засобами є досить невеликим. Тому вини-

кає необхідність пошуку альтернативних рішень, які дозволять забезпечити ефективність процесу перевезень не тільки зернових, а і інших типів вантажів, що потребують захисту від атмосферних опадів, залізничним транспортом. Оскільки найбільш поширеним типом вагонів на сьогоднішній день є напіввагони, то доцільним є адаптація їх конструкцій до перевезень таких вантажів. При цьому найбільш раціональним рішенням є використання під такі цілі напіввагонів, підлога яких утворена кришками розвантажувальних люків. Це дозволило б спростити процес розвантаження. Однак потребує вирішення питання забезпечення схоронності вантажу від впливу навколишнього середовища. Тому необхідним є впровадження знімного даху для напіввагона. Конструкція такого даху повинна мати невелику тару щоб не значно збільшувати підресорену масу його конструкції. У зв'язку із цим, актуальним постає питання проектування даху напіввагона, модернізованого під перевезення вантажів, що потребують захисту від атмосферного впливу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Raffaele Sepe та Angela Pozzi проводили дослідження навантаженості даху вагона-рефрижератора [1]. Дане дослідження включало визначення напруженого стану даху, його стійкості та вібраційний аналіз. На підставі проведених розрахунків авторами виявлено недоліки конструкції даху та перспективи його подальшого удосконалення. Недоліком цієї конструкції даху є і те, що він не може використовуватися на напіввагоні.

Дослідження напруженого стану даху вагона при падінні на нього вантажу вагою 100 кг наведено у статті J. Cuartero, A. Miravete та R. Sanz [2]. При цьому авторами застосовано скінчено-елементний аналіз. До уваги прийнято два варіанти конструкційного виконання даху: із алюмінію та композиту. Недоліком таких конструкцій дахів є значна вартість виготовлення. Це стримує серійність їх впровадження в експлуатацію.

Сулим А. із колегами запропонували шляхи удосконалення несучих конструкцій вантажних вагонів, які сприятимуть підвищенню ефективності їх експлуатації [3]. Разом із цим, авторами не розглянуто питання модернізації напіввагонів для можливості їх залучення до перевезень вантажів, що потребують захисту від атмосферних опадів.

Фомін О. та Стецько А. провели дослідження міцності даху спеціалізованого вагона при прийнятті вертикальних навантажень [4]. Розрахунок проведено не тільки теоретичним, а і експери-

ментальним шляхом. Результати проведених розрахунків мають добру узгодженість. Разом із цим, питання удосконалення конструкції даху вагона авторами не проводилося.

Ловською А. О. із колегами запропоновано конструкцію даху залізничного вагона, яка має трикутний переріз [5]. Висвітлено особливості проектування такого даху, а також результати розрахунку на міцність при деяких схемах його навантажень в експлуатації. Однак дах спроектовано для критого вагона. Щодо конструкції даху для напіввагона подібні дослідження авторами не проводилися.

Також Ловська А. О. із колегами проводили оптимізацію параметрів вертикальних стійок вагона для перевезень зерна [6]. Проведені дослідження дозволили зменшити тару несучої конструкції вагона-хопера у порівнянні із прототипом. Разом із цим, автори не досліджували можливості оптимізації параметрів каркасу даху напіввагона для зменшення його тари.

Підсумовуючи результати аналізу наукових джерел [1 – 6] можна зробити висновок, що питання проектування знімних дахів напіввагонів для можливості їх залучення до перевезень вантажів, що потребують захисту від атмосферного впливу, вимагають подальших досліджень.

Постановка завдання. Метою статті є висвітлення особливостей визначення вертикальної навантаженості знімного даху напіввагона, модернізованого під перевезення вантажів, що потребують захисту від атмосферного впливу. Досягнення зазначеної мети реалізоване шляхом розв'язку таких завдань:

- побудувати епюри силових факторів в каркасі знімного даху напіввагона;
- провести розрахунок на міцність знімного даху напіввагона.

Виклад основного матеріалу. Для можливості використання напіввагонів під перевезення вантажів, що потребують захисту від атмосферного впливу, пропонується оснащення їх знімним дахом. Пропонований переріз каркасу даху наведено на рис. 1.

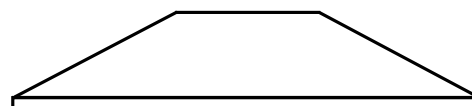


Рис. 1. Переріз даху напіввагона

Для визначення профілів виконання даху проведено дослідження силових факторів у його каркасі. До уваги прийнято дві схеми навантаження даху:

- вертикальне навантаження даху від снігу;
- вертикальне навантаження даху від снігу та двох зосереджених сил по 1 кН кожна, розподілених на майданчику 0,25x0,25 м та доданих на відстані 0,5 м одна від одної.

Визначення силових факторів у каркасі даху проведено у програмному комплексі Ліра – САПР. Дах розглянуто як стрижневу систему, яка кріпиться за периметром. Така схема закріплення моделює схему кріплення даху до верхнього об'язування кузова напіввагона. Геометричні параметри даху було визначено виходячи із геометричних параметрів кузова. У якості прототипу обрано напіввагон 12-757.

Розрахункові схеми каркаса даху при сприйнятті ним вертикального навантаження P_v від снігу наведено на рис. 2, а). На рис. 2, б) наведено розрахункову схему каркаса даху при сприйнятті ним вертикального навантаження P_v від снігу, а також двох зосереджених сил P_c .

При цьому вертикальне навантаження P_v , яке діє на дах, враховує вертикальну статичну та динамічну складову. Динамічна складова визначалась за методикою, наведеною у нормативному документі [7].

На підставі проведених розрахунків отримано епюри силових факторів у даху при розглянутих розрахункових схемах його навантажень (рис. 3).

Аналізуючи дані епюри можна зробити висновок, що максимальний згинальний момент в каркасі даху від вертикального навантаження склав 0,359 кН·м. Цей згинальний момент є додатнім та виникає у похилому поясі.

Максимальний згинальний момент у каркасі даху при сприйнятті вертикального навантаження від снігу та двох зосереджених сил склав 0,42 кН·м, має від'ємне значення та зосереджений у горизонтальному поясі.

За отриманим значенням згинального моменту M визначено момент опору W поперечного перерізу даху

$$W = \frac{M}{\sigma}, \quad (1)$$

де σ – напруження в каркасі даху, кПа.

При цьому, за умови того, що матеріалом виготовлення каркасу даху є сталь марки 09Г2С, тоді $[\sigma] = 210$ МПа [7].

З урахуванням цього $W \approx 2,0$ см³. За визначеним значенням моменту опору, використовуючи сортамент прокатних сталей, обрано профіль

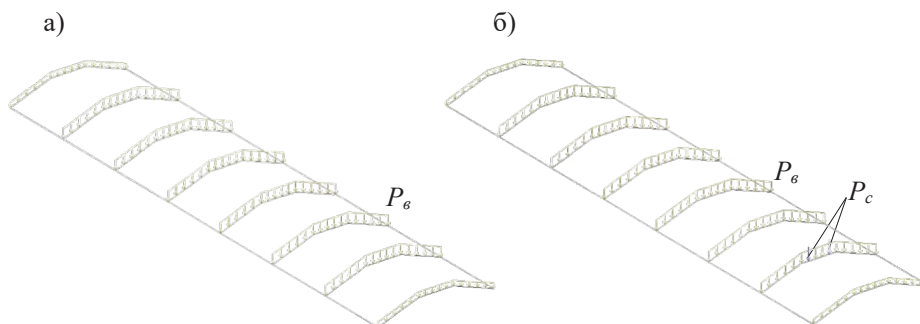


Рис. 2. Розрахункова схема каркасу даху
а) при сприйнятті вертикального навантаження від снігу; б) при сприйнятті вертикального навантаження від снігу та двох зосереджених сил

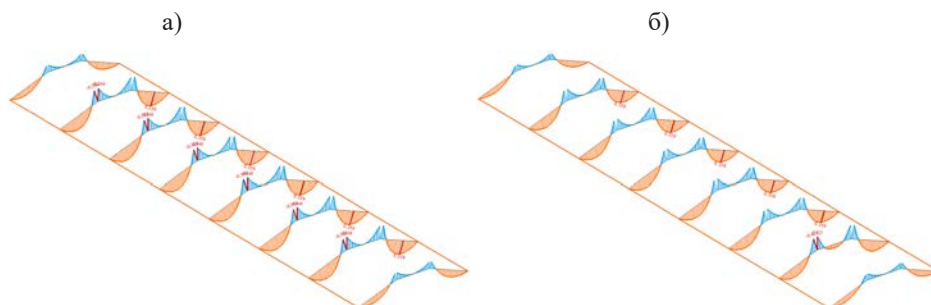


Рис. 3. Епюри згинальних моментів у каркасі даху (кН·м)
а) при сприйнятті вертикального навантаження від снігу; б) при сприйнятті вертикального навантаження від снігу та двох зосереджених сил

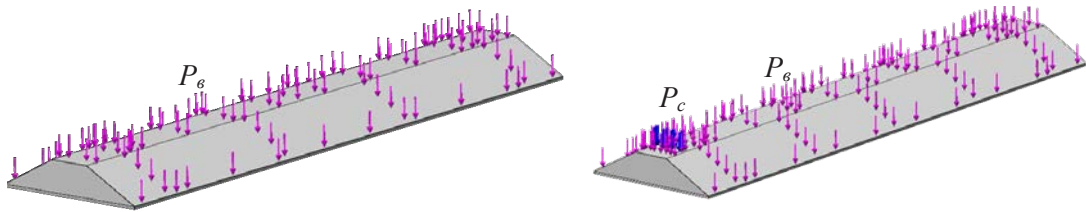


Рис. 4. Розрахункова схема даху напіввагона а) вертикальне навантаження від снігу; б) вертикальне навантаження від снігу та двох зосереджених сил

виконання каркасу даху – швелер №5, який має момент опору поперечного перерізу $W=2,75 \text{ см}^3$.

Для дослідження міцності даху з каркасом запропонованої конструкції проведено його розрахунок за методом скінчених елементів. При цьому застосовано програмний комплекс SolidWorks Simulation. Розрахунковим критерієм обрано критерій фон Мізеса [8].

Враховано, що обшивка даху має товщину 1,5 мм, як і в конструкції прототипу. Розрахункові схеми даху наведено на рис. 4. На рис. 4, а) наведено розрахункову схему даху при сприйнятті вертикального навантаження P_s . А на рис. 4, б) – розрахункову схему даху при сприйнятті вертикального навантаження P_s (фіолетовий колір), а також двох зосереджених сил P_c (синій колір), по 1 кН кожна.

Скінчено-елементну модель даху утворено тетраедральними елементами. Їх оптимальну чисельність визначено графоаналітичним способом. Модель налічує 39183 елемент та 77655 вузлів.

Закріплення даху здійснювалось за периметром, в зонах його контакту з обв’язуванням верхнім кузовом напіввагона. При цьому застосовано жорсткий зв’язок. На підставі проведених розрахунків встановлено, що найбільша концентрація напружень спостерігається в середній частині поперечної балки каркасу і кутових частинах даху (рис. 5). Ці напруження склали 78,6 МПа (рис. 8), що нижче за допустимі на 62,6%.

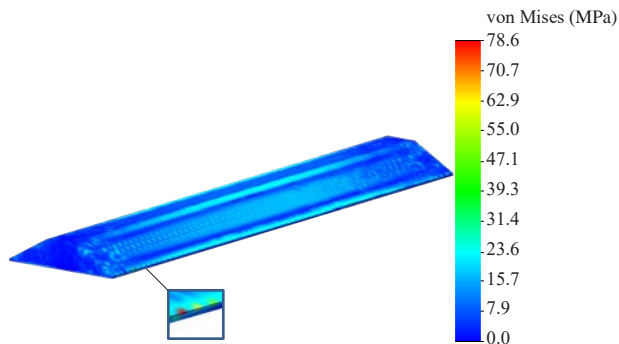


Рис. 5. Напружений стан даху напіввагона

Найбільші переміщення в даху зосереджені в його середній частині і склали близько 1,8 мм (рис. 6).

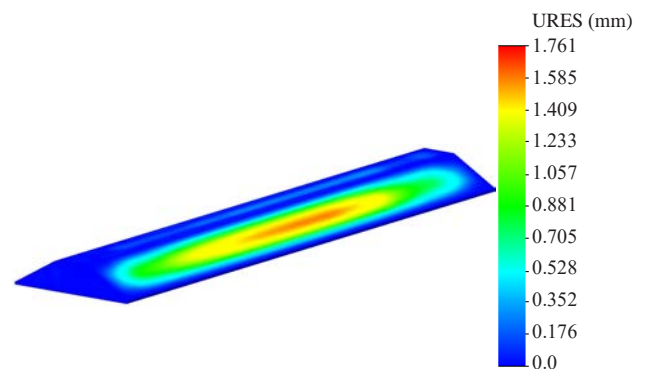


Рис. 6. Переміщення в вузлах даху напіввагона

Рис. 6. Переміщення в вузлах даху напіввагона

При розрахунку на міцність даху за умови сприйняття вертикального навантаження від снігу та двох зосереджених сил максимальні напруження зафіксовано в зоні прикладення двох зосереджених сил (рис. 7).

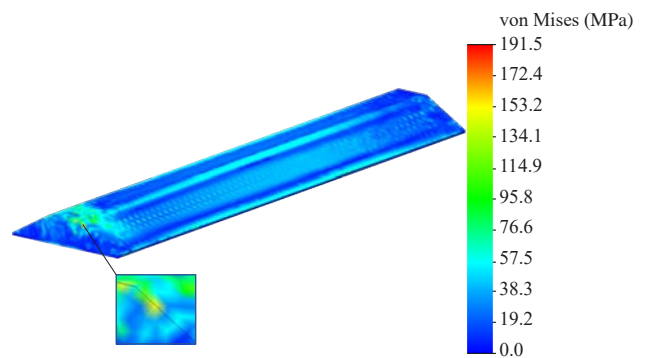


Рис. 7. Напружений стан даху напіввагона

Дані напруження склали 191,5 МПа. Отримані напруження на 8,8% нижчі за допустимі. Максимальні переміщення в даху виникають також в зоні прикладення двох зосереджених сил і складають 8,2 мм (рис. 8).

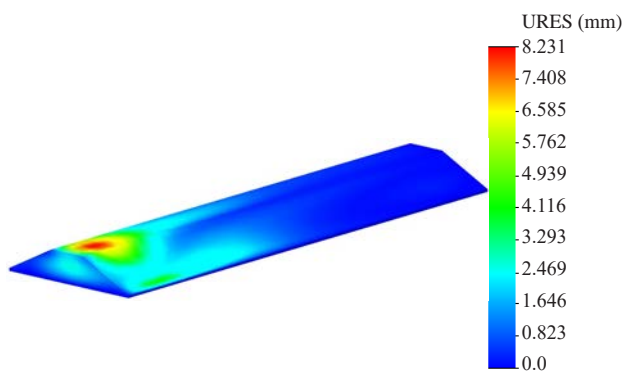


Рис. 8. Переміщення в вузлах даху напіввагона

Проведені розрахунки на міцність даху дозволяють зробити висновок, що його міцність при розглянутих розрахункових схемах дотримується.

За необхідності дах може бути обладнаний пристроями для його обслуговування: перехідний майданчик для обслуговуючого персоналу, скоби для закріплення підйомно-транспортного устаткування тощо.

Подальший розвиток даного дослідження полягає у постановці на дах завантажувальних люків. Це дозволить здійснювати завантаження кузова, а також його розвантаження через нижні розвантажувальні люки, без демонтажу даху.

Проведені дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування кон-

струкцій залізничних транспортних засобів та підвищенню ефективності експлуатації залізничного транспорту.

Висновки

1. Побудовано епюри силових факторів в каркасі знімного даху напіввагона. Встановлено, що максимальний згинальний момент у каркасі даху склав 0,42 кН·м, має від'ємне значення та зосереджений у горизонтальному поясі каркасу. За моментом опору поперечного перерізу обрано профіль виконання каркасу даху – швелер №5, який має момент опору поперечного перерізу $W=2,75 \text{ см}^3$.

2. Проведено розрахунок на міцність знімного даху напіввагона. При сприйнятті дахом вертикального навантаження від снігу найбільша концентрація напружень спостерігається в середній частині повздовжньої балки каркасу і кутових частинах даху. Напруження в цих зонах склали 78,6 МПа. Отримані напруження нижче за допустимі на 62,6%. Найбільші переміщення в даху зосереджені в його середній частині і склали близько 1,8 мм.

При сприйнятті дахом вертикального навантаження від снігу та двох зосереджених сил максимальні напруження в ньому склали 191,5 МПа. Дані напруження виникають в зоні прикладення двох зосереджених сил, однак вони на 8,8% нижчі за допустимі. Максимальні переміщення в даху виникають також в зоні прикладення двох зосереджених сил і складають 8,2 мм.

Список літератури:

1. Raffaele Sepe, Angela Pozzi. Static and modal numerical analyses for the roof structure of a railway freight refrigerated car. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2015. Vol. 33. P. 451 – 462. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.33.50
2. J. Cuartero, A. Miravete, R. Sanz. Design and calculation of a railway car composite roof under concrete cube crash. *International Journal of Crashworthiness*. 2011. Vol. 16(1). P. 41 – 47. DOI: 10.1080/13588265.2010.501163
3. Sulym Andrii, Safronov Oleksandr, Strynza Andrii, Khozia Pavlo. Ways of improving of freight car design. *Transport systems and technologies*. 2024. Vol. (43). P. 47 – 60. DOI: 10.32703/2617-9059-2024-43-4
4. Фомін О., Стецько А. Визначення засобів з протидії експлуатаційним пошкодженням несучих систем вагона-термоса моделі ТН 4-201. *Транспортні системи і технології*. 2018. Вип. 32. Т.1. С. 135 – 146.
5. Alyona Lovska, Iraidia Stanovska, Ihor Prokopovych, Ihor Sydorenko, Arsen Muradian. Determining patterns of the vertical load on a covered wagon roof with a frame in the form of a triangular arch. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. №4/7 (130). P. 6 – 13. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.308905
6. Alyona Lovska, Glib Vatulia, Mykhailo Pavliuchenkov, Parag Vichare, Tony Leslie. Optimization of the Body Strut of the Grain Hopper Wagon. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2024. Vol. 1376. 012037. DOI: 10.1088/1755-1315/1376/1/012037
7. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Київ, 2015. 162 с.
8. Пустюльга С. І., Самостян В. Р., Клак Ю. В. Інженерна графіка в SolidWorks: навч. посібник. Луцьк: Вежа, 2018. 172 с.

Lovska A.O., Pavliuchenkov M.V., Muradian A.O., Demydiakov O. V. FEATURES OF DETERMINING THE VERTICAL LOADING OF A TRAPEZOID-SHAPED REMOVABLE ROOF OF AN OPEN WAGON

The article highlights the results of research into the vertical loading of the trapezoidal removable roof of an open wagon. To adapt open wagons to the transportation of cargo requiring environmental protection, it is

proposed to equip them with removable roofs. In this case, it is planned to use open wagons, the floor of which is formed by the covers of unloading hatches. Unloading of the open wagon will be carried out by gravity using the gravitational properties of the cargo. In order to determine the profiles of the roof, a study of the force factors in its frame was conducted. Two roof load schemes were taken into account: vertical load of the roof from snow; vertical load of the roof from snow and two concentrated forces. Determination of force factors in the roof frame was carried out in the Lira – CAD software complex. It was established that the maximum bending moment in the roof frame occurs with the second load scheme and was 0.42 kN m. According to the moment of resistance of the cross section, the profile of the roof frame was selected – channel No. 5.

The strength of the removable roof of an open wagon was calculated using the finite element method. It was found that when the roof perceives a vertical load from snow, the greatest concentration of stresses is observed in the middle part of the longitudinal beam of the frame, but these stresses are 62.6% lower than the permissible ones.

When the roof perceives a vertical load from snow and two concentrated forces, the maximum stresses in it are 8.8% lower than the permissible ones and arise in the area of application of two concentrated forces.

The conducted research will contribute to the creation of developments in the design of railway vehicle structures and increasing the efficiency of railway transportation.

Keywords: *railway transport, removable roof of an open wagon, design of a removable roof, loading of a removable roof, strength of a removable roof.*

Дата першого надходження статті до видання: 18.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026