

Ватуля Г. Л., Ловська А. О., Мямлін С. С., Павлюченков М. В.

ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ ДАХУ ВАГОНА-ХОПЕРА ДЛЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ЗЕРНА

З метою підвищення ефективності експлуатації вагонів-хоперів для перевезень зерна важливим є впровадження рішень спрямованих на покращення їх техніко-економічних параметрів. Одним із таких рішень є зменшення тари вагона-хопера з метою підвищення його вантажопідйомності. Досягти цього можливо шляхом удосконалення конструкції даху, як найменш навантаженого елемента несучої конструкції вагона-хопера в експлуатації. У зв'язку з цим проведено дослідження міцності даху типової конструкції вагона-хопера для перевезень зерна моделі 19-7016. Для визначення міцності даху побудовано його просторову модель. Всі графічні роботи здійснено у програмному комплексі SolidWorks. При цьому дах розглянуто як монолітну конструкцію, тобто до уваги не приймалися зварювальні шви між окремими його складовими. Розрахунок на міцність даху реалізовано за методом скінчених елементів в програмному комплексі SolidWorks Simulation. В якості розрахункового застосовано критерій Мізеса. При цьому скінчено-елементу модель утворено просторовими тетраедрами. До уваги прийнято основні схеми навантажень даху в експлуатації: дія вертикальних навантажень при русі вагона рейковою колією; дія двох сил по 1,0 кН кожна, розподілених на площадці 0,25 м x 0,25 м і прикладених на відстані 0,5 м одна від одної в будь-якій частині даху; снігове навантаження, а також дія зовнішнього тиску у 30 кПа. Результати проведених розрахунків показали, що максимальні напруження даху мають місце при дії на нього зовнішнього тиску у 30 кПа і складають 187,4 МПа. Дані напруження зосереджені в зонах розміщення завантажувальних люків. Однак вони не перевищують допустимих значень. Запас міцності даху при цьому складає близько 1,2. Максимальні переміщення дорівнюють 7,7 мм і виникають в середній частині обшивки даху, в зоні між завантажувальними люками. У зв'язку з наявністю резерву міцності складових даху доцільним є удосконалення його конструкції з метою зменшення матеріалоємності.

Ключові слова: дах вагона-хопера, навантаженість даху, міцність даху, напружений стан даху, резерв міцності даху.

Актуальність дослідження. Транспортна галузь є генератором розвитку економіки багатьох євроазіатських країн. При цьому найбільш важливою складовою транспортної галузі, на яку припадає привальований обсяг перевезень, є залізнична. Для забезпечення ефективності роботи залізничного транспорту важливим є впровадження в експлуатацію транспортних засобів з покращеними техніко-економічними та експлуатаційними характеристиками.

Постановка проблеми. Відомо, що одним з найбільш поширених вантажів, які перевозяться залізницею є зернові. Перевезення їх здійснюється здебільшого в вагонах-хоперах (зерновозах) або контейнерах. Аналіз існуючого парку транспортних засобів для перевезень зернових дозволив виявити ряд суттєвих недоліків, які перешкоджають їх повноцінному ефективному використанню. Насамперед, це збільшена тара, недостатня міцність несучих конструкцій транспортних засобів в умовах експлуатаційних режимів, недосконалість розвантажувальних пристроїв, що відповідно збільшує час вантажно-розвантажувальних операцій, конструкційна непристосованість транспортних засобів колії 1520 мм до експлуатації на коліях 1435 мм тощо. Для зменшення тари вагона-хопера можливим є удосконалення його даху, як найменш навантаженого вузла конструкції. Це сприятиме можливості зменшення підресореної маси вагона та збільшенню його вантажопідйомності. Тому дослідження присвячені питанням удосконалення та оптимізації конструкції даху вагона-хопера є актуальними.

Теоретичний аналіз дослідження. Питання удосконалень несучих конструкцій вагонів, в тому числі їх дахів, є досить актуальними та висвітлювалися в ряді публікацій. Так, наприклад, в роботі [1] проводиться дослідження напруженого стану зйомного даху напіввагона при основних експлуатаційних режимах. При цьому до уваги прийнято один із можливих варіантів виконання такого даху. Визначено максимальні напруження, які виникають в його конструкції.

В публікації [2] для підвищення ефективності експлуатації напіввагона запропоновано удосконалену конструкцію зйомного даху. Особливістю такого даху є те, що його консольні частини виконано телескопічними, що дає змогу здійснювати адаптацію конструкції до різних моделей напіввагонів. Разом з цим в роботах [1, 2] дослідження проведені стосовно конструкцій зйомних дахів, які можуть використовуватися на напіввагонах. Щодо дахів вагонів-зерновозів, які випробовують інший спектр експлуатаційних навантажень досліджень не проводилося.

В роботі [3] проводиться дослідження навантаженості несучої конструкції вагона-хопера з дахом із композитного матеріалу. Проведено математичне моделювання динаміки вагона-хопера для визначення навантажень, які діють на нього при русі рейковою колією. Отримані навантаження враховано при розрахунках на міцність даху. Однак авторами розглянуто тільки одну схему навантаження даху – дія вертикальних навантажень, зумовлених коливаннями підсакування. Це не дозволяє провести загальну оцінку міцності даху вагона-хопера з урахуванням запропонованих рішень щодо його удосконалення.

Визначення вертикальної навантаженості критого вагона з дахом із композитного матеріалу проводиться в статті [4]. При цьому авторами визначено основні показники динаміки критого вагона з урахуванням зменшення його тари. Це досягається за рахунок впровадження композитного матеріалу для виготовлення обшивки даху. Встановлено, що показники динаміки вагона знаходяться в межах допустимих значень. Разом з цим дослідження міцності даху при основних експлуатаційних схемах його навантажень авторами не проводиться.

В статті [5] здійснюється оцінка міцності даху вантажного вагона-рефрижератора. При складанні розрахункової схеми даху використано європейські стандарти. Наведено характеристики втрати стійкості та вібрації конструкції даху. Визначено власні частоти коливань даху. Разом з цим дослідження проведено стосовно даху рефрижераторного вагону, який випробовує дещо інші схеми навантажень, аніж дах вагона-хопера для перевезень зерна.

Проектування та розрахунок даху із композитного матеріалу залізничного вагона при ударних навантаженнях проводиться в роботі [6]. До уваги прийнято випадок падіння шматка бетону вагою у 100 кг на дах з висоти 3 м. Визначено поля розподілення напружень, що виникають в даху. Проведено порівняльний аналіз напруженого стану даху із композиту та алюмінію. Однак дана задача є досить вузькоспрямованою та не висвітлює режимів навантаження даху при основних експлуатаційних схемах.

Аналіз літературних джерел [1 – 6] дозволяє зробити висновок, що питання визначення міцності даху вагона-хопера для перевезень зерна з метою подальшого удосконалення конструкції є досить актуальними.

Мета статті. Метою дослідження є визначення напруженого стану даху вагона-хопера для перевезень зерна при основних схемах його навантаження в експлуатації.

Задачі дослідження. Для досягнення поставленої мети визначені такі завдання:

- проаналізувати основні схеми навантажень даху вагона-хопера в експлуатації;
- розрахувати на міцність дах вагона-хопера.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для аналізу напруженого стану даху вагона-хопера та визначення резервів його міцності проведено відповідні розрахунки. У якості прототипу обрано вагон-хопер моделі 19-7016 (рис. 1).



Рисунок 1 – Вагон-хопер для перевезень зерна моделі 19-7016

Для визначення міцності даху побудовано його просторову модель. Всі графічні роботи здійснено у програмному комплексі SolidWorks. Просторову модель каркасу даху наведено на рис. 2.

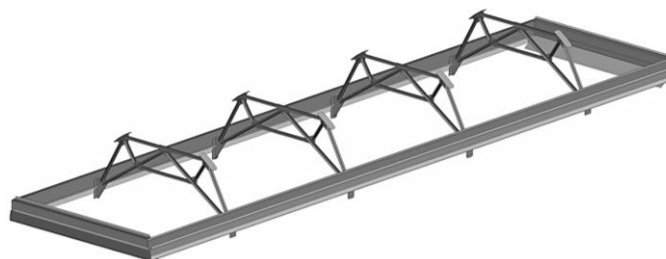


Рисунок 2 – Просторова модель каркасу даху

Обшивку даху утворює сталевий лист товщиною 3 мм. Зверху на даху передбачені п'ять завантажувальних люків овальної конфігурації (рис. 3). Торцеві частини даху закриваються фрамугами. Кріплення даху до кузова здійснюється шляхом обпирання його за периметром на верхнє обв'язування. Нижні частини проміжних арок кріпляться до вертикальних стін кузова.

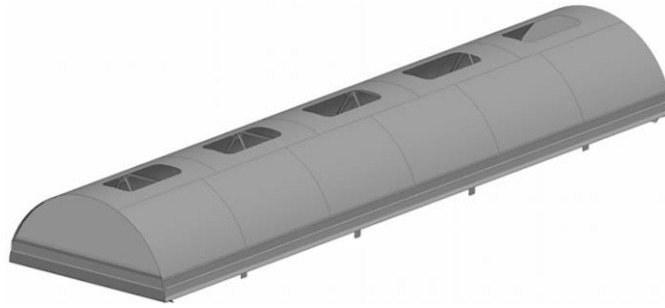


Рисунок 3 – Просторова модель даху

Для визначення напруженого стану даху при дії експлуатаційних навантажень до уваги прийнято чотири схеми його навантаження [1 – 3]:

- дія вертикальних сил на дах, які обумовлені поєднанням сили ваги даху та вертикальної динамічної сили, яка визначається множенням сили ваги даху на коефіцієнт вертикальної динаміки;
- дія двох сил по 1,0 кН кожна, розподілених на площадці 0,25 м x 0,25 м і прикладених на відстані 0,5 м одна від одної в будь-якій частині даху;
- дія снігового навантаження;
- дія зовнішнього тиску у 30 кПа. При цьому коефіцієнт запасу стійкості даху повинен бути не менше ніж 1,1.

Розрахунок на міцність даху реалізовано за методом скінчених елементів в програмному комплексі SolidWorks Simulation [7 – 9]. В якості розрахункового застосовано критерій Мізеса. Скінчено-елементна модель утворено просторовими тетраедрами. Скінчено-елементна сітка налічує 3540779 елементів з максимальним розміром – 20 мм та мінімальним – 4 мм. Кількість вузлів складає 1194269.

При складанні розрахункової схеми у відповідності до І режиму навантаження враховано, що дах сприймає власну вагу P_T (рис. 4), а вертикальне динамічне навантаження P_D розраховане за формулою [10]

$$P_D^o = P_D^{am} \cdot k_{D\sigma}, \quad (1)$$

де $k_{D\sigma}$ – коефіцієнт вертикальної динаміки, який розраховується

$$k_{D\sigma} = \frac{\bar{k}_{D\sigma}}{\beta} \cdot \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \ln \cdot \frac{1}{1 - P(k_{D\sigma})}}, \quad (2)$$

де $\bar{k}_{D\sigma}$ – математичне очікування;

β – коефіцієнт розподілу, для вантажних вагонів $\beta = 1,15$;

$P(k_{D\sigma})$ – імовірність коефіцієнта вертикальної динаміки, $P(k_{D\sigma}) = 0,97$.

$$\bar{k}_{D\sigma} = a + 3,6 \cdot 10^{-4} \cdot b \cdot \frac{V - 15}{f_{cm}}, \quad (3)$$

тут a – безрозмірний коефіцієнт, що залежить від типу вузла, $a = 0,05$;

b – коефіцієнт осності, розраховується за формулою

$$b = \frac{n + 2}{2 \cdot n}, \quad (4)$$

де n – число осей у візку або у групі візків під одним кінцем вагона, $n = 2$.

V – конструкторська швидкість, $V = 33,3$ м/с;

f_{cm} – статичний прогин ресорного підвішування, $f_{cm} = 0,0485$ м.

На підставі проведених розрахунків коефіцієнт вертикальної динаміки склав 0,34.

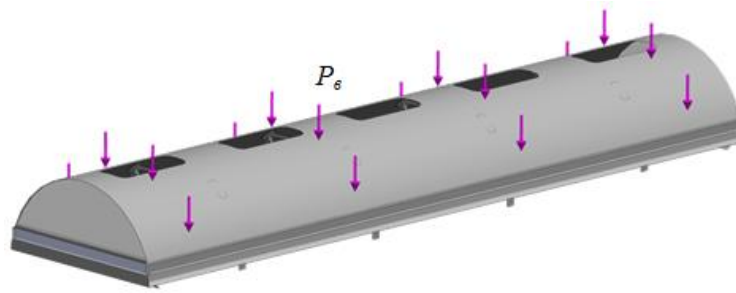


Рисунок 4 – Розрахункова схема даху (I схема навантаження)

У якості матеріалу конструкції даху застосовано сталь марки 09Г2С. При цьому допустимі напруження для даної марки сталі при зазначеному розрахунковому режимі складають 220 МПа.

Результати розрахунку наведено на рис. 5, 6. Максимальні напруження при цьому зафіксовано в зонах обпирання даху на поздовжні балки каркасу. Однак ці напруження є досить незначними – близько 10 МПа.

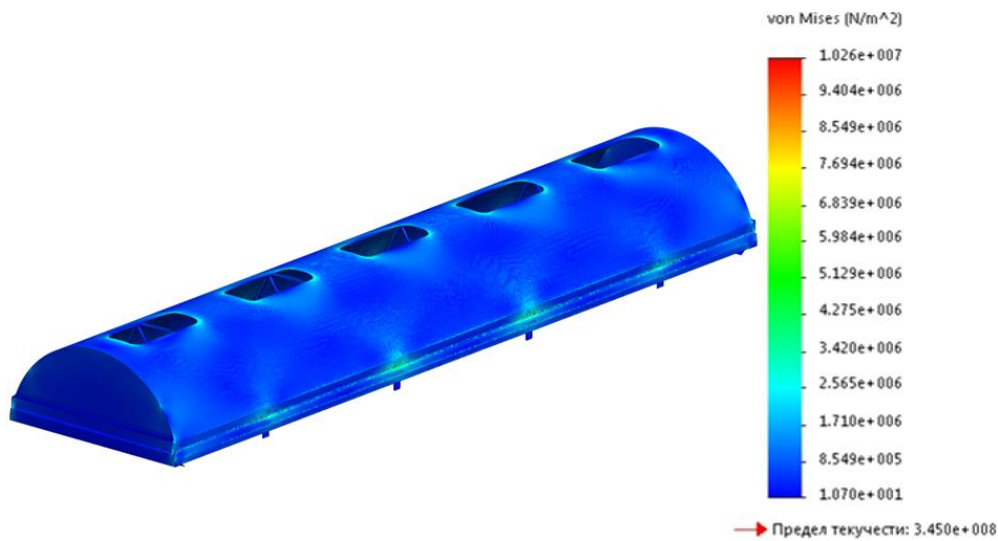


Рисунок 5 – Напружений стан даху (I схема навантаження)

Максимальні переміщення в конструкції даху виникають у зоні розміщення середнього завантажувального люка і складають 0,1 мм.

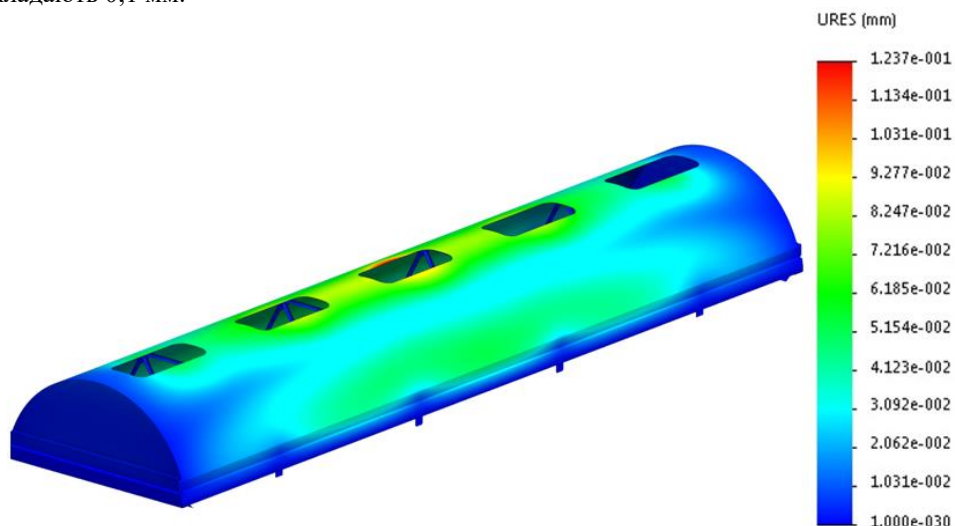


Рисунок 6 – Переміщення в конструкції даху (I схема навантаження)

На послідовному етапі дослідження здійснено визначення міцності даху при дії на нього двох сил по 1,0 кН кожна, розподілених на площадці 0,25 м x 0,25 м і прикладених на відстані 0,5 м одна від одної в будь-якій частині даху. Розрахункову схему даху наведено на рис. 7.

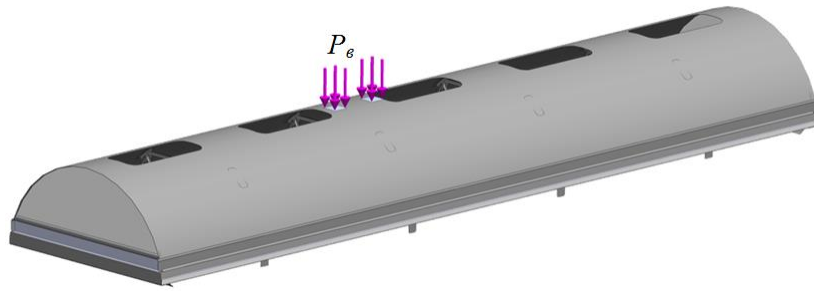


Рисунок 7 – Розрахункова схема даху (II схема навантаження)

Прикладення навантаження P_e за площею $0,25 \times 0,25$ здійснювалося шляхом постановки накладок на дах у довільному місці. На підставі проведених розрахунків встановлено, що максимальні напруження, які діють на дах складають 181 МПа (рис. 8). Максимальні переміщення виникають в зоні прикладення навантаження і становлять менше 1 мм (рис. 9)

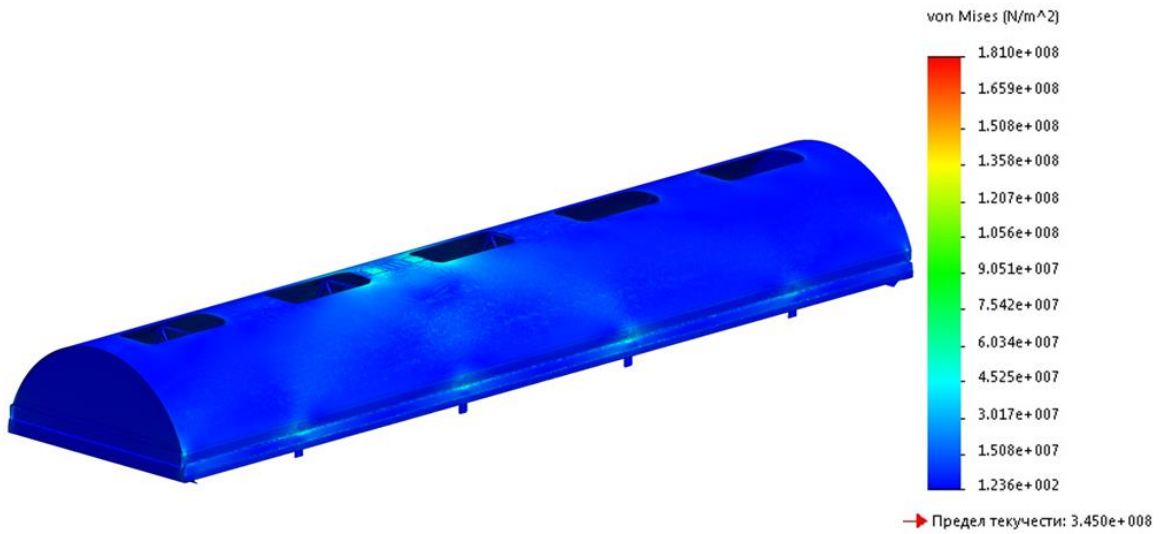


Рисунок 8 – Напружений стан даху (II схема навантаження)

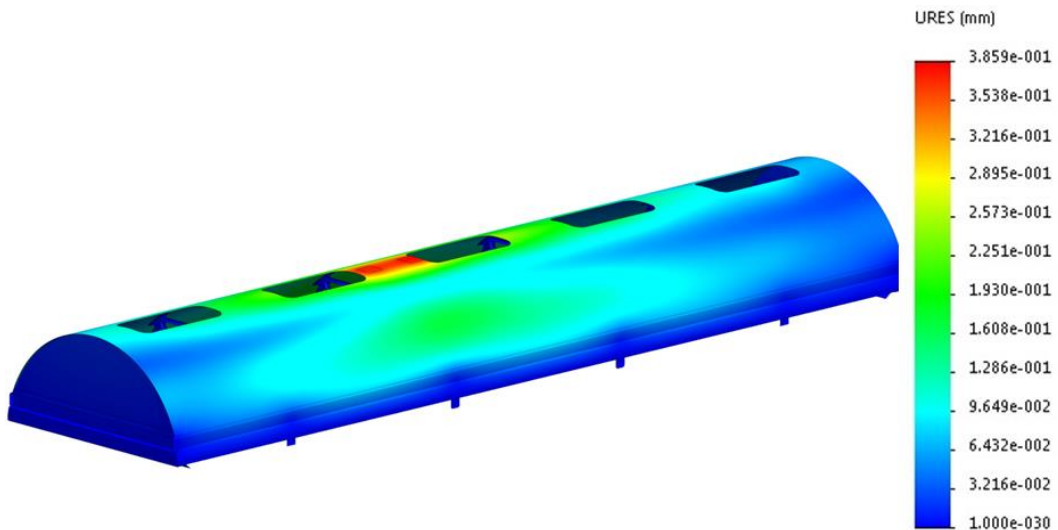


Рисунок 9 – Переміщення в конструкції даху (II схема навантаження)

Для визначення міцності даху з урахуванням дії на нього снігового навантаження, складено розрахункову схему, наведену на рис. 10.

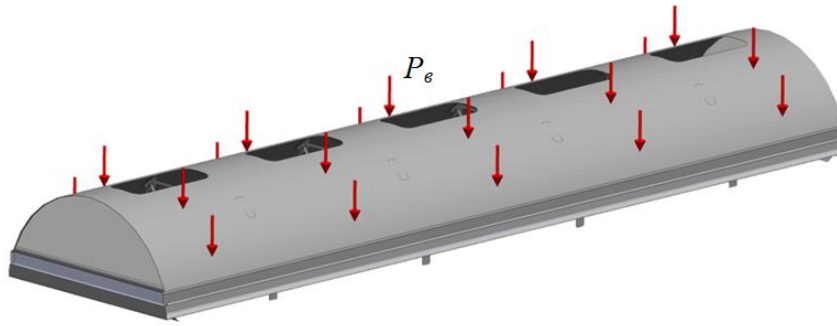


Рисунок 10 – Розрахункова схема даху (III схема навантаження)

При цьому враховано, що снігове навантаження дорівнює 1,8 кПа [1]. Результати розрахунку наведено на рис. 10 та 11. Максимальні напруження зафіксовано в зонах взаємодії обшивки з поперечними балками і складають 53,7 МПа (рис. 11). Максимальні переміщення виникають у середній частині даху. Їх величина становить близько 0,1 мм (рис. 12).

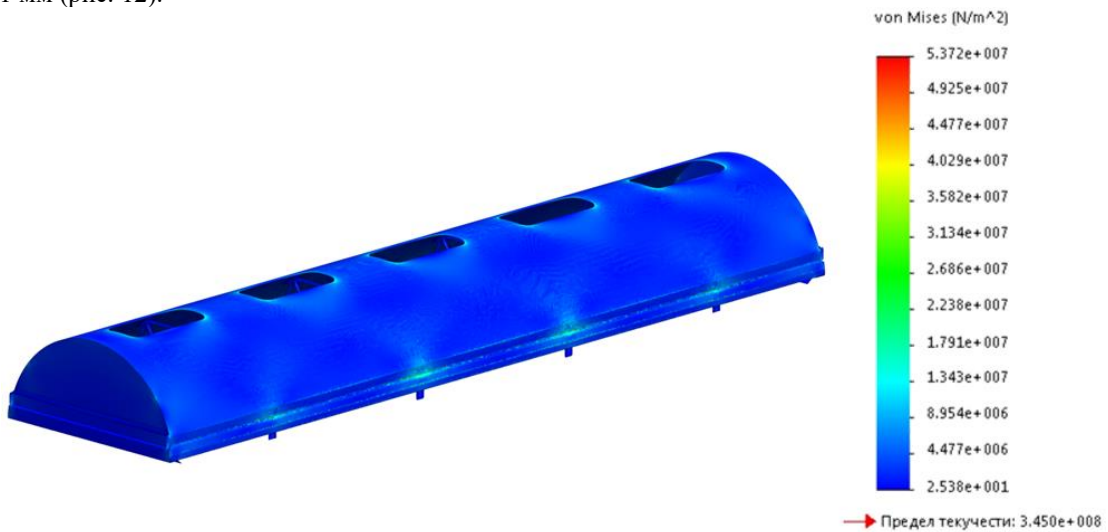


Рисунок 11 – Напружений стан даху (III схема навантаження)

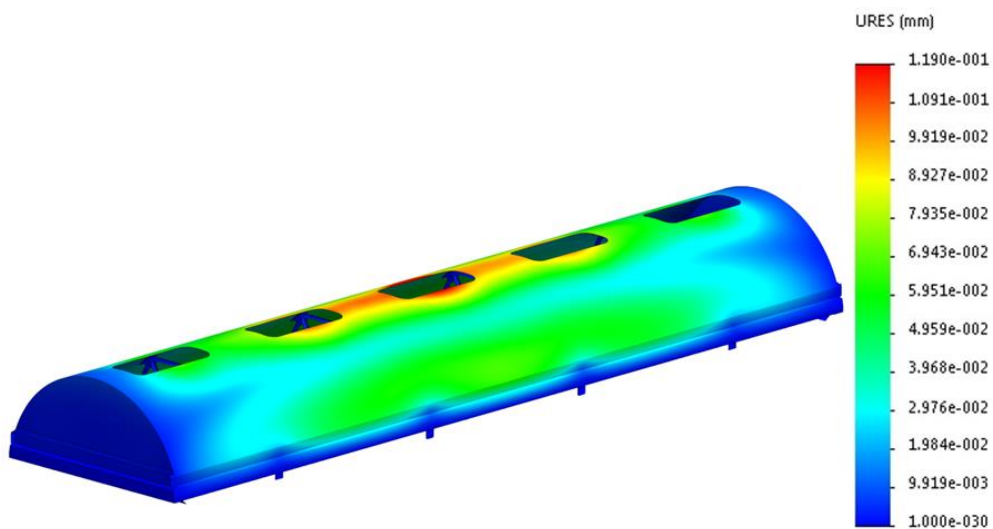


Рисунок 12 – Переміщення в конструкції даху (III схема навантаження)

Розрахункова схема даху з урахуванням дії на нього зовнішнього тиску $P_{вв}$ у 30 кПа має вигляд, наведений на рис. 13.

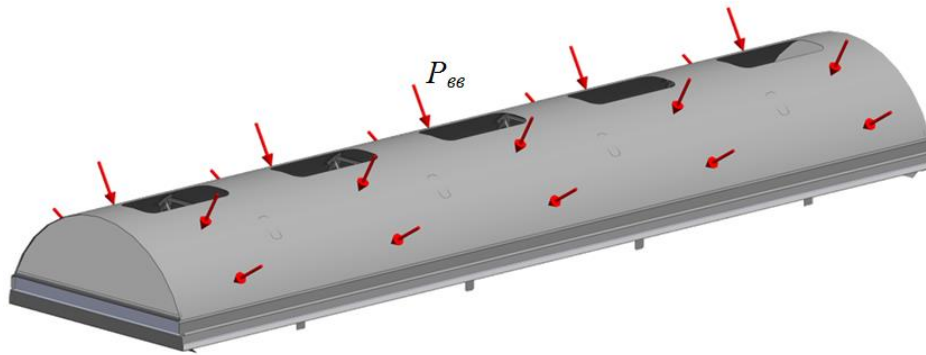


Рисунок 13 – Розрахункова схема даху (IV схема навантаження)

Напружений стан даху має вигляд, наведений на рис. 14. Максимальні напруження при цьому склали 187,4 МПа. Вони зосереджені в зонах розміщення завантажувальних люків. При цьому дотримується запас міцності близько 1,2. Максимальні переміщення дорівнюють 7,7 мм і виникають в середній частині обшивки даху, в зоні між завантажувальними люками (рис. 15).



Рисунок 14 – Напружений стан даху (IV схема навантаження)

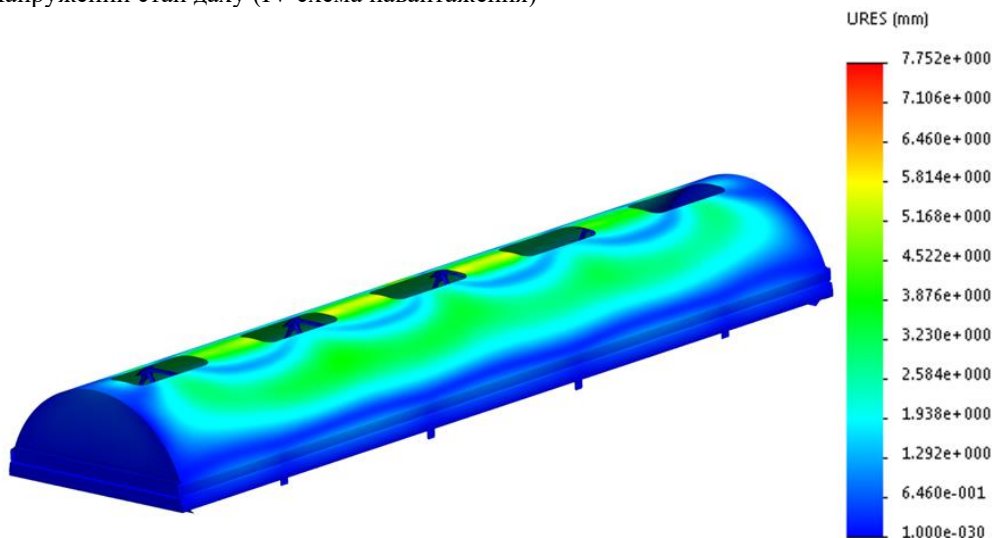


Рисунок 15 – Переміщення в конструкції даху (IV схема навантаження)

Проведені розрахунки типової конструкції даху вагона-хопера дозволяють зробити висновок, що його міцність при основних розрахункових режимах забезпечується, оскільки напруження, які виникають в ньому при жодній розрахунковій схемі не перевищують допустимі – 220 МПа. Крім того, мається резерв міцності складових даху. У зв'язку з цим для зменшення тари вагона-хопера доцільним є удосконалення конструкції його даху.

Висновки:

1. Проаналізовано основні схеми навантажень даху вагона-хопера в експлуатації. При цьому до уваги прийнято найбільш часті схеми силового впливу на нього: дія вертикальних навантажень при русі вагона рейковою колією; дія двох сил по 1,0 кН кожна, розподілених на площадці 0,25 м x 0,25 м і прикладених на відстані 0,5 м одна від одної в будь-якій частині даху; снігове навантаження, а також дія зовнішнього тиску у 30 кПа.

2. Проведено розрахунок на міцність даху вагона-хопера при основних експлуатаційних схемах. Результати проведених розрахунків показали, що максимальні напруження виникають при дії на дах зовнішнього тиску у 30 кПа. При цьому чисельні значення напружень склали 187,4 МПа. Вони зосереджені в зонах розміщення завантажувальних люків. Отже при даній розрахунковій схемі дотримується запас міцності близько 1,2. Максимальні переміщення дорівнюють 7,7 мм і виникають в середній частині обшивки даху, в зоні між завантажувальними люками.

Подяка

The authors acknowledge the funding provided by Universities UK, UK – Ukraine R&I twinning grants scheme for the Project number: 11150.

Література

1. Кирильчук О. А. Исследование прочности конструкции съёмной крыши для полувагонов. Кирильчук О. А., Шатунова Д. А. Вагонный парк. 2016. №5-6(110-111). С. 50 – 53.
2. Oleksij Fomin. Justification of the Use of Square Pipes in the Frame of the Removable Roof of the Open Wagon. Oleksij Fomin, Alyona Lovska. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. №4/7 (112). P. 18 – 25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.237157>
3. Фомін О. В. Дослідження навантаження несучої конструкції вагона-хопера з дахом із композитного матеріалу. Фомін О. В., Ловська А. О., Фоміна А. М., Сова С. С. Наука та прогрес транспорту. 2022. № 1 (97). С. 71 – 79. <https://doi.org/10.15802/stp2022/265331>
4. Фомін О. В. Визначення вертикальної навантаженості критого вагона з дахом із композитного матеріалу. Фомін О. В., Ловська А. О., Фоміна А. М., Сергієнко О. В. Наукові вісті Дніпровського університету. 2022. №23. <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2022-23-16>
5. Raffaele Sepe. Static and modal numerical analyses for the roof structure of a railway freight refrigerated car. Raffaele Sepe, Angela Pozzi. Frattura ed Integrità Strutturale. 2015. Vol. 33. P. 451 – 462. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.33.50>
6. J. Cuartero. Design and calculation of a railway car composite roof under concrete cube crash. J. Cuartero, A. Miravete, R. Sanz. International Journal of Crashworthiness. 2011. Vol. 16(1). P. 41 – 47. <https://doi.org/10.1080/13588265.2010.501163>
7. Козяр М. М. Комп'ютерна графіка: SolidWorks / Козяр М. М., Фещук Ю. В., Парфенюк О. В. – Херсон: Олді-плюс, 2018. – 252 с.
8. Пустюльга С. І. Інженерна графіка в SolidWorks / Пустюльга С. І., Самостян В. Р., Клак Ю. В. – Луцьк: Вежа, 2018. – 172 с.
9. Bethune J. D. Engineering Design and Graphics with SolidWorks 2016 / J. D. Bethune. – Peachpit Press. 2016. – 784 p.
10. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних).

References

1. Kirilchuk O. A. (2016). Issledovanie prochnosti konstrukcii semnoj kryshi dlya poluvagonov / Kirilchuk O. A., Shatunova D. A. // Vagonnyj park. – №5-6(110-111). S. 50 – 53.
2. Oleksij Fomin. (2021). Justification of the Use of Square Pipes in the Frame of the Removable Roof of the Open Wagon / Oleksij Fomin, Alyona Lovska // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – №4/7 (112). P. 18 – 25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.237157>
3. Fomin O. V. (2023). Doslidzhennya navantazhennya nesuchoyi konstrukciyi vagona-hopera z dahom iz kompozitnogo materialu / Fomin O. V., Lovska A. O., Fomina A. M., Sova S. S. // Nauka ta progres transportu. – № 1 (97). S. 71 – 79. <https://doi.org/10.15802/stp2022/265331>
4. Fomin O. V. (2022). Vznachennya vertikalnoyi navantazhenosti kritogo vagona z dahom iz kompozitnogo materialu / Fomin O. V., Lovska A. O., Fomina A. M., Sergiyenko O. V. // Naukovi visti Dalivskogo universitetu. – №23. <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2022-23-16>
5. Raffaele Sepe. (2015). Static and modal numerical analyses for the roof structure of a railway freight refrigerated car / Raffaele Sepe, Angela Pozzi // Frattura ed Integrità Strutturale. – Vol. 33. P. 451 – 462. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.33.50>
6. J. Cuartero. (2011). Design and calculation of a railway car composite roof under concrete cube crash / J. Cuartero, A. Miravete, R. Sanz. // International Journal of Crashworthiness. – Vol. 16(1). P. 41 – 47. <https://doi.org/10.1080/13588265.2010.501163>
7. Kozyar M. M., Feshuk Yu. V., Parfenyuk O. V. Komp'yuterna grafika: SolidWorks. – Herson: Oldi-plyus, 2018. – 252 s.
8. Pustulyga S. I., Samostyan V. R., Klak Yu. V. Inzhenerna grafika v SolidWorks. – Luck: Vezha, 2018. – 172 s.
9. Bethune J. D. Engineering Design and Graphics with SolidWorks 2016. – Peachpit Press. 2016. – 784 p.
10. DSTU 7598:2014. Vagoni vantazhni. Zagal'ni vimogi do rozrahunkiv ta proektuvannya novih i modernizovanih vagoniv kolii 1520 mm (nesamohidnih).

In order to increase the operating efficiency of hopper cars for grain transportation it is important to implement solutions aimed at improving their technical and economic parameters. One of such solutions is to reduce the tare of hopper car in order to increase its load-carrying capacity. This can be achieved by improving the design of the roof as the least loaded element of the hopper's load-bearing structure in operation. In this connection the roof strength of the typical grain hopper wagon design 19-7016 is researched. Spatial model of the roof is built to determine roof strength. All graphic works are made in the software complex SolidWorks. In this

case, the roof was considered as a monolithic structure, i.e. welding seams between its individual components were not taken into account. The strength calculation of the roof was performed by the finite element method in the SolidWorks Simulation software package. Mises criterion was used as a calculation criterion. In this case, the finite-element model is formed by spatial tetrahedrons. The main roof loading diagrams in operation were taken into account: the action of vertical loads during the rail track car movement; the action of two forces 1.0 kN each, distributed on the area 0.25 m x 0.25 m and applied at a distance of 0.5 m from each other in any part of the roof; snow load, and the action of external pressure of 30 kPa. The results of calculations showed that the maximum stresses on the roof take place at the action of external pressure of 30 kPa and is 187.4 MPa. These stresses are concentrated in the areas where the loading hatches are located. However, they do not exceed the permissible values. The safety margin of the roof in this case is about 1.2. The maximum displacement is 7.7 mm and occurs in the middle part of the roof sheathing, in the area between the hatches. Due to the strength reserve of the roof components, it is reasonable to improve its design in order to reduce the material capacity.

Key words: hopper roof, roof loading, roof strength, roof stressed state, roof strength reserve.

Ватуля Г. Л. – д.т.н., професор, заступник директора з наукової роботи Навчально-наукового інституту будівельної та цивільної інженерії Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова.

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

Мямлін С. С. – к.т.н., науковий співробітник кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту.

Павлюченков М. В. – к.т.н., доцент кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту.