

УДК 629.463.65

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.237157

Обґрунтування використання труб квадратного перерізу в каркасі зйомного даху напіввагона

О. В. Фомін, А. О. Ловська

Проведено визначення основних показників міцності зйомного даху напіввагона. Встановлено, що типова конструкція даху має значний запас міцності складових несучої конструкції. З метою зменшення матеріалоемності даху проведено визначення резервів його міцності та оптимізацію за критерієм мінімуму матеріалоемності. Запропоновано використання у якості складових каркасу даху труб квадратного перерізу.

З урахуванням запропонованих заходів стає можливим знизити масу каркасу зйомного даху напіввагона майже на 15 % у порівнянні з типовою конструкцією. При цьому для можливості використання даху на різних типах напіввагонів його консольні частини мають здатність переміщуватися у повздовжній площині. Передбачено можливість використання дефлекторів на зйомному даху. Кріплення даху до кузова може виконуватися типовим способом. Є можливість здійснювати закріплення за допомогою шог-з'єднань.

Для обґрунтування запропонованого рішення проведено розрахунок на міцність удосконаленої конструкції зйомного даху. Встановлено, що максимальні еквівалентні напруження в несучій конструкції зйомного даху не перевищують допустимі. Для визначення показників динаміки зйомного даху проведено дослідження його динамічної навантаженості. Розрахунок здійснений у плоскій системі координат. До уваги прийняті коливання підсакування та галопування, як найбільш поширені види коливань вагона при русі рейковою колією. Розв'язок математичної моделі динамічної навантаженості здійснений в програмному комплексі MathCad (Boston, USA). Проведені дослідження показали, що прискорення кузова в центрі мас складають 0,4g і знаходяться в допустимих межах. При цьому оцінка ходу вагона є відмінною.

Проведені дослідження сприятимуть підвищенню ефективності функціонування залізничного транспорту.

Ключові слова: транспортна механіка, напіввагон, зйомний дах, міцність даху, напружений стан, динамічна навантаженість.

1. Вступ

Прискорені темпи інтеграції євразійських держав в систему міжнародних транспортних коридорів викликають необхідність підвищення ефективності використання вагонів у міжнародному сполученні.

Для забезпечення своєчасного перевізного процесу важливим є наявність відповідного типу рухомого складу для перевезення завданої номенклатури вантажів.

Дослідження статистичних даних перевезень вантажів у міжнародному сполученні через територію євразійських держав дозволяють зробити висновок, що найбільш поширеними серед них є насипні, навалювальні та тарно-штучні. Останні потребують захисту від атмосферних опадів під час перевезень.

Ступінь поповнення вагонного парку Укрзалізниці за останні роки є незначним. Це зумовлює необхідність впровадження в експлуатацію нових технічних рішень щодо удосконалення несучих конструкцій кузовів вагонів.

Підвищення ефективності використання напіввагонів, як найбільш поширеного типу вагонів, можливе шляхом використання на них зйомного даху. Таке рішення дозволить здійснювати перевезення в них не тільки насипних та навалювальних вантажів, а і тих, які потребують захисту від атмосферних опадів.

Одна з перших конструкцій вагонів з дахом, який має можливість розкриватися для завантаження кузова вантажем була розроблена у 1955–1958 рр. Привід відкривання даху був ручним або електричним.

Пізніше у 1970 р. “Алтайським вагонобудівним заводом” також була розроблена конструкція вагона з дахом, що розкривався у поперечній площині і розширені дверні прорізи, що дозволяло робити завантаження і розвантаження вагона по всій довжині кузова. Це забезпечувало більш широкую механізацію вантажно-розвантажувальних операцій при виконанні їх як через дах, так і через дверний проріз [1].

Наявність зйомного даху збільшує тару вагона. Таким чином збільшується його підресорена маса. Це впливає на показники руху вагона та його динамічну навантаженість. Для розширення функціональних можливостей вагона при забезпеченні відповідних показників руху важливим є мінімізація тари зйомного даху.

Тому важливим є проведення відповідних досліджень в цьому напрямку з метою адаптації несучих конструкцій вагонів до перевезень вантажів, які потребують захисту від атмосферних опадів.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Заходи щодо удосконалення несучої конструкції напіввагона з метою підвищення безпеки руху при перевезенні вантажів, висота яких виходить за межі верхнього габариту, проводиться у роботі [2]. Запропоновано варіант штанги в стелажі, що висувається. Однак дана конструкція не пристосована до можливості прийняття значних навантажень, які мають місце в експлуатації.

Дослідження міцності несучої конструкції напіввагона проводиться у роботі [3]. Наведені результати визначення втомної довговічності зварної конструкції кузова. Запропоновані заходи щодо підвищення ефективності експлуатації напіввагонів.

Визначення міцності несучої конструкції вагона типу Zans проводиться у роботі [4]. Вагон має удосконалену конструкцію та покращені техніко-економічні характеристики. Розрахунок на міцність реалізований за методом скінчених елементів. Результати розрахунку підтвердили доцільність прийнятих при проектуванні рішень. Важливо сказати, що при проектуванні

даної конструкції вагона не передбачено можливості підвищення його універсальності.

В роботі [5] проводиться визначення міцності несучої конструкції вантажного вагону. Визначено поля дислокації максимальних еквівалентних напружень з урахуванням експлуатаційних навантажень. Разом з цим, конструкція даного типу вагону є спеціалізованою та не має можливості використання для перевезень широкої номенклатури вантажів.

Висвітлення особливостей оптимізації та удосконалення несучих конструкцій вагонів проводиться у роботі [6]. При цьому дані удосконалення орієнтовані на подовження строку експлуатації вагона. Авторами також запропонована нова система технічної діагностики вагона.

Комплекс теоретичних досліджень щодо оптимізації несучої конструкції вантажного вагона проводиться у роботі [7]. Розрахунок проведений за методом скінчених елементів. В якості вагона-прототипу використаний напіввагон типу "ВОХН25". Однак дані заходи не забезпечують можливості перевезення у вагонах вантажів, які потребують захисту від атмосферних опадів.

Дослідження міцності зйомного даху напіввагона проводиться у роботі [8]. До уваги прийняті основні режими навантаження даху у експлуатації. Запропоновані заходи щодо удосконалення конструкції даху. Однак при цьому не проводилося оптимізації конструкційних складових каркаса для зменшення його маси.

Удосконалення несучої конструкції вагона для підвищення ефективності експлуатації у міжнародному сполученні висвітлюється у роботі [9]. Наведені результати моделювання динамічної навантаженості та міцності несучої конструкції вагону, які підтверджують доцільність запропонованих технічних рішень.

Разом з цим, в роботі не приділено уваги питанням розширення функціональних можливостей вагону для адаптації до перевезень вантажів, що потребують захисту від навколишнього середовища.

В роботі [10] проводиться обґрунтування удосконалення несучої конструкції вагона для зменшення навантаженості в експлуатації. Наведено математичні моделі, які дозволяють визначити динамічну навантаженість несучої конструкції вагона при найбільш несприятливих експлуатаційних режимах. Однак запропоновані заходи щодо удосконалення не дозволяють забезпечити перевезення вантажів, які потребують захисту від атмосферних опадів, на даному типі вагону.

Проведений аналіз літературних джерел дозволяє зробити висновок, що доцільним є проведення дослідження, яке присвячене розширенню функціональних можливостей використання напіввагонів. Це сприятиме адаптації їх несучих конструкцій до перевезень більш широкої номенклатури вантажів. Також проведені дослідження дозволять створити рекомендації щодо підвищення ефективності використання залізничного транспорту.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є визначення особливостей удосконалення та оптимізації зйомного даху напіввагонів для підвищення ефективності їх функціонування.

Для досягнення зазначеної мети визначені такі завдання:

- визначити резерви міцності зйомного даху типової конструкції;
- розрахувати на міцність удосконалену конструкцію зйомного даху;
- визначити міцність болтового з'єднання даху з верхнім обв'язуванням кузова напіввагону;
- визначити динамічну навантаженість несучої конструкції напіввагона зі зйомним дахом.

4. Матеріали та методи дослідження міцності та динамічної навантаженості несучої конструкції напіввагона зі зйомним дахом

Для оптимізації несучої конструкції зйомного даху напіввагону використано метод оптимізації за резервами міцності. З метою визначення резервів міцності зйомного даху типової конструкції побудовано його просторову модель. При цьому використано програмний комплекс SolidWorks Simulation (Франція). Розрахунок на міцність проведений за методом скінчених елементів.

При складанні скінчено-елементної моделі зйомного даху враховані ізопараметричні тетраедри. Оптимальна кількість елементів моделі визначена за графоаналітичним методом. Кількість вузлів моделі склала 41839, елементів – 126643. Максимальний розмір елемента склав 100 мм, а мінімальний – 20 мм. Відсоток елементів з співвідношенням боків менше трьох – 0,122, більше десяти – 63,3. Мінімальна кількість елементів в колі склала 22, співвідношення збільшення розміру елементів – 1,8. Закріплення моделі відбувалося за периметром даху в зоні взаємодії з верхньою обв'язкою кузова напіввагона.

За результатами проведених розрахунків визначено оптимальний з точки зору мінімальної матеріалоемності профіль виконання зйомного даху.

Для перевірки міцності удосконаленої несучої конструкції зйомного даху напіввагона проведений розрахунок. В якості розрахункового використаний метод скінчених елементів, який реалізовано в програмному комплексі SolidWorks Simulation.

При складанні скінчено-елементної моделі враховані ізопараметричні тетраедри. Оптимальна кількість елементів моделі визначена за графоаналітичним методом. Кількість вузлів моделі склала 42534, елементів – 137547. Максимальний розмір елемента склав 100 мм, а мінімальний – 20 мм. Відсоток елементів з співвідношенням боків менше трьох – 0,138, більше десяти – 65,6. Мінімальна кількість елементів в колі склала 22, співвідношення збільшення розміру елементів – 1,8. Закріплення моделі відбувалося за периметром даху в зоні взаємодії з верхньою обв'язкою кузова напіввагона.

Для забезпечення надійності взаємодії зйомного даху з верхнім обв'язуванням кузова напіввагона здійснений розрахунок болтового з'єднання. Розрахунок болтового з'єднання проводився за класичним методом опору матеріалів.

Для визначення основних показників динаміки несучої конструкції кузова

напіввагона, обладнаного зйомним дахом проведено математичне моделювання. При цьому розв'язок диференціальних рівнянь руху здійснений шляхом зведення їх до нормальної форми Коші. Після цього відбувався розв'язок їх за методом Рунге-Кутта. При цьому використано програмний комплекс MathCad. Початкові переміщення та швидкості завдавалися рівними нулю.

5. Результати дослідження міцності та динамічної навантаженості несучої конструкції напіввагона зі зйомним дахом

5. 1. Визначення резервів міцності зйомного даху типової конструкції

Просторова модель зйомного даху напіввагона наведена на рис. 1.

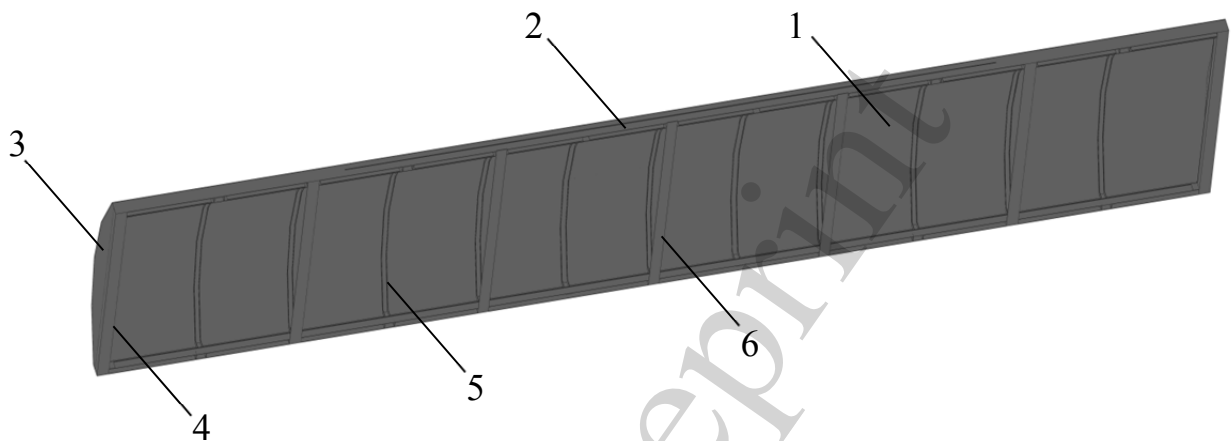


Рис. 1. Просторова модель зйомного даху: 1 – обшивка; 2 – бічна повздовжня балка; 3 – торцевий лист обшивки; 4 – торцева поперечна балка; 5 – дуга поперечна; 6 – проміжна поперечна балка

Згідно з нормативними документами, дах розраховується на міцність при дії двох сил по 1 кН кожна, розподілених на майданчику $0,25 \times 0,25$ м та доданих на відстані 0,5 м одна від одної в будь-якій частині даху. Дах додатково розраховується при III розрахунковому режимі (як найбільш небезпечному) і режимі підняття краном [11, 12].

При розрахунку за III розрахунковим режимом приймається наступне поєднання навантажень, які діють на дах:

- сила ваги даху;
- вертикальна динамічна сила, яка визначається множенням сили ваги даху на коефіцієнт вертикальної динаміки.

Також до уваги необхідно приймати оцінку міцності даху від дії снігового навантаження.

Розрахункова схема даху при дії двох сил по 1 кН кожна, розподілених на майданчику $0,25 \times 0,25$ м та доданих на відстані 0,5 м одна від одної наведена на рис. 2. Результати розрахунку даху наведені на рис. 3.

Максимальні еквівалентні напруження виникають у середній дузі даху та складають близько 80 МПа, тобто не перевищують допустимі [11, 12]. Максимальні переміщення в вузлах конструкції виникають у середній частині даху – 1,3 мм. Отже несучі елементи конструкції мають значний резерв міцності.

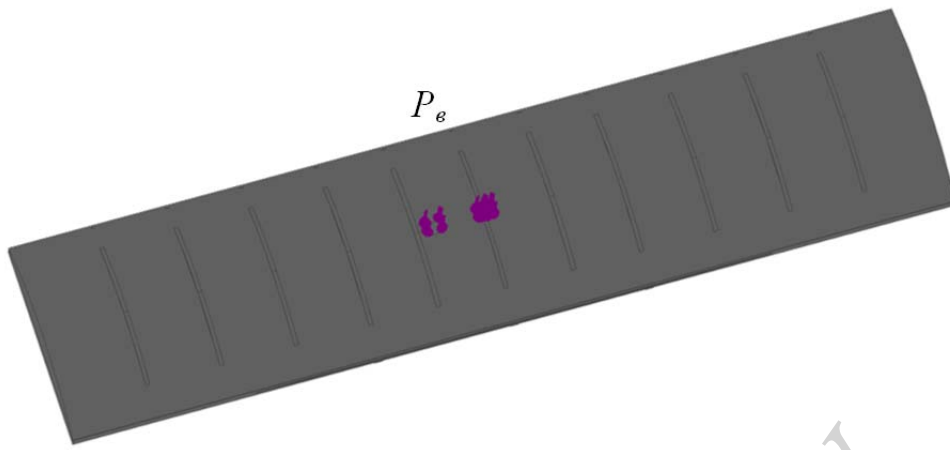


Рис. 2. Розрахункова схема зйомного даху

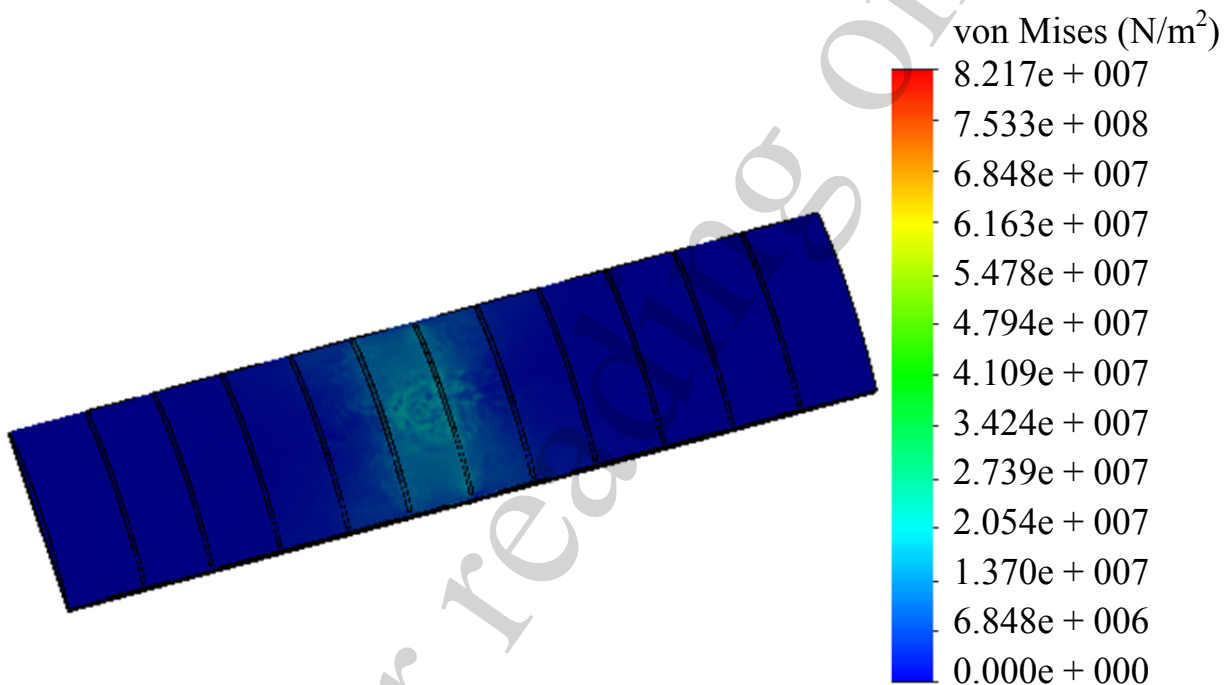


Рис. 3. Напружений стан зйомного даху

Для зменшення маси зйомного даху напіввагона проведено його оптимізацію за резервом міцності несучих елементів [13–15]. Результати розрахунків наведені в табл. 1.

Цільова функція має вигляд:

$$m_d \rightarrow \min, \tag{1}$$

де m_d – маса даху, кг.

Обмеження оптимізаційної моделі:

1. Геометричні розміри напіввагона.
2. Розрахункові напруження мають бути меншими ніж допустимі [11, 12]:

$$\sigma_{\text{екв}} < [\sigma], \quad (2)$$

де $\sigma_{\text{екв}}$ – еквівалентні напруження в конструкції, МПа; $[\sigma]$ – допустимі напруження, МПа.

Перспективним напрямком досягненням поставленої мети є впровадження в якості несучих елементів даху труб [16–18], що забезпечують зниження загальної металоємності конструкції при виконанні умов міцності (рис. 4).

Таблиця 1

Визначення оптимальних параметрів перерізів елементів зйомного даху напіввагона

Елемент каркасу даху	n	$\sigma_{\text{екв}}$, МПа	I_x , см ⁴	I_y , см ⁴	W_x , см ³	W_y , см ³	$[W_x]$, см ³	$[W_y]$, см ³	Оптимальні параметри труби			Маса 1 м труби, кг
									W , см ³	h, мм	S, мм	
Дуга	2,6	92,6	10,2	10,2	5,1	5,1	1,96	1,96	2,18	30	2,5	2,07
Бічна повздовжня балка	3,1	78,3	97,26	621,29	12,16	155,32	3,93	50,1	4,17	35	4,0	3,67
Торцева поперечна балка	3,2	75,4	97,26	621,29	12,16	155,32	3,93	50,1	4,17	35	4,0	3,67
Проміжна поперечна балка	2,8	87,3	10,2	10,2	5,1	5,1	1,96	1,96	2,18	30	2,5	2,07

На підставі проведених розрахунків побудовано просторову модель зйомного даху напіввагона (рис. 5).

З урахуванням запропонованих заходів стає можливим знизити масу каркасу зйомного даху напіввагона майже на 15 % у порівнянні з типовою конструкцією. Розміщення зйомного даху на кузові напіввагона наведено на рис. 6.

При цьому для можливості використання даху на різних типах напіввагонів його консольні частини мають здатність переміщуватися у повздовжній площині (рис. 7).

При цьому дефлектори розміщуються на нерухомих частинах даху. Кріплення даху до кузова може виконуватися типовим способом. Є можливість здійснювати закріплення за допомогою шог-з'єднань.

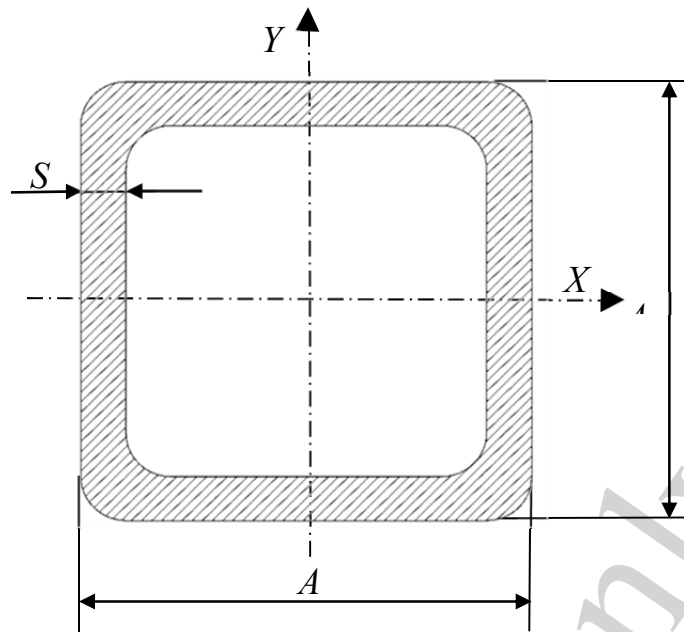


Рис. 4. Переріз квадратної труби

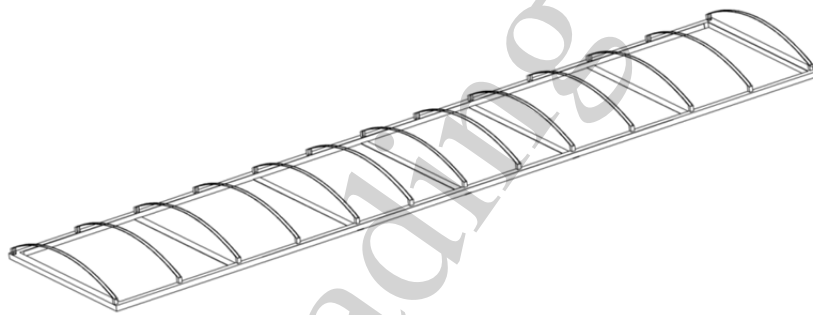


Рис. 5. Каркас оптимізованої конструкції зйомного даху

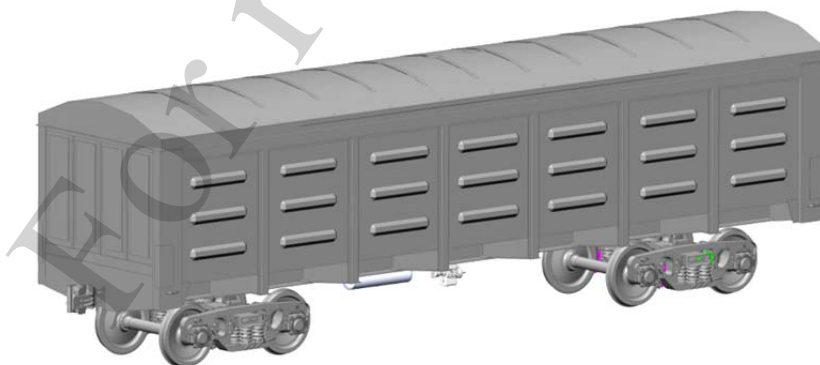


Рис. 6. Напіввагон зі зйомним дахом

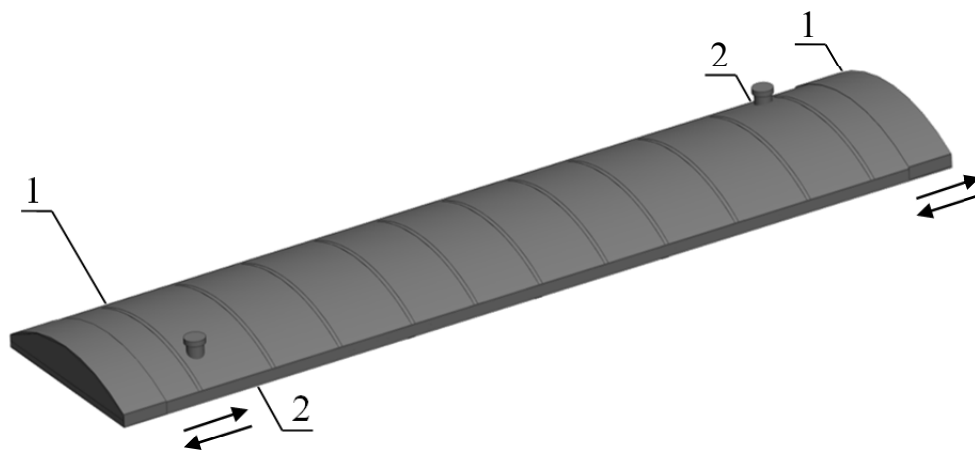


Рис. 7. Зйомний дах напіввагону удосконаленої конструкції: 1 – рухомі частини даху; 2 – дефлектори

5. 2. Розрахунок на міцність удосконаленої конструкції зйомного даху

Результати розрахунку зйомного даху на міцність наведені на рис. 8, 9. При цьому максимальні еквівалентні напруження виникають у середній частині даху та складають близько 230 МПа, тобто не перевищують допустимі [11, 12]. Максимальні переміщення в вузлах конструкції виникають у середній частині даху – 1,8 мм. Максимальні деформації склали $9,31 \cdot 10^{-6}$.

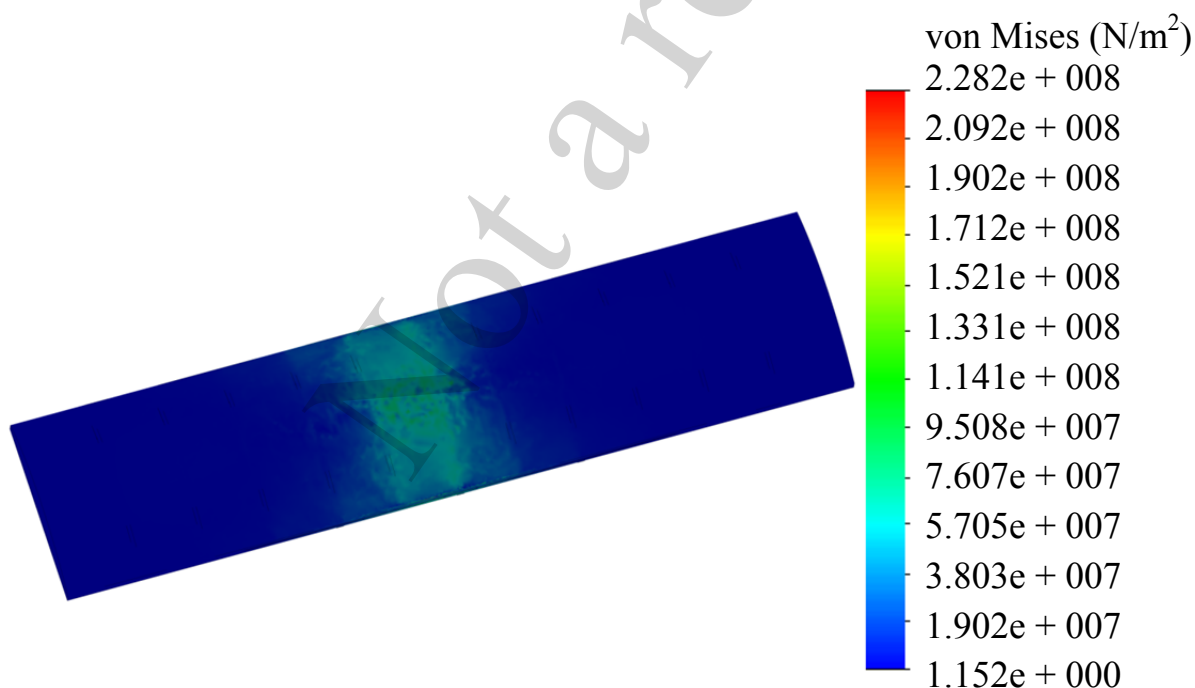


Рис. 8. Напружений стан зйомного даху

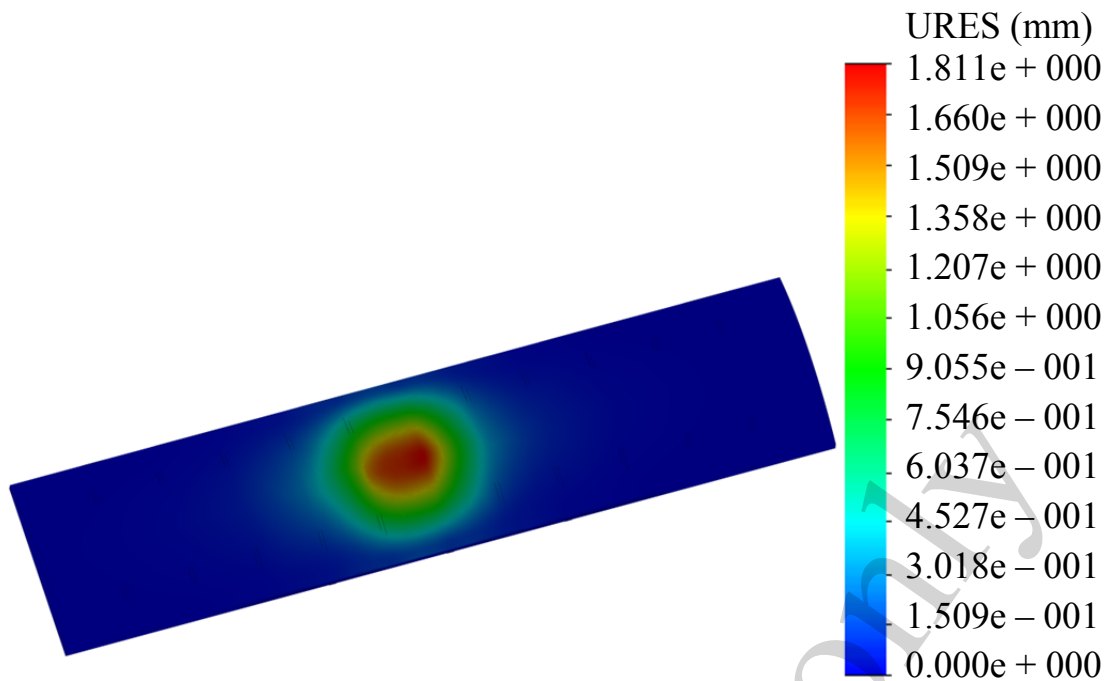


Рис. 9. Переміщення в вузлах зйомного даху

Максимальні еквівалентні напруження зйомного даху при III розрахунковому режимі виникають у його середній частині. Чисельні значення напружень склали близько 230 МПа, тобто не перевищують допустимі [11, 12]. Максимальні переміщення в вузлах конструкції виникають у середній частині даху – 1,8 мм.

Максимальні еквівалентні напруження при підйомі зйомного даху стропами виникають у зонах закріплення даху та складають близько 120 МПа, тобто не перевищують допустимі [11, 12]. Максимальні переміщення в вузлах конструкції виникають у зонах закріплення даху – 1,65 мм.

Також зйомний дах напіввагона розрахований на дію снігового навантаження. Максимальні еквівалентні напруження при цьому виникають у середній частині даху та складають близько 104,1 МПа, тобто не перевищують допустимі [11, 12]. Максимальні переміщення в вузлах конструкції виникають у середній частині даху – 1,31 мм.

Проведені розрахунки дозволяють зробити висновок, що запропоновані заходи є обґрунтованими та доцільними.

5.3. Визначення міцності болтового з'єднання даху з верхнім обв'язуванням кузова напіввагону

Для забезпечення надійності кріплення даху до кузова напіввагону здійснено розрахунок болтового з'єднання. Дах до верхнього обв'язування повздовжніх стін кріпиться болтами М12х90.

Кріплення даху до торцевої стіни здійснюється болтами М12х65. Після затягування болтового з'єднання гайку заварюють для запобігання самовідкручування.

При цьому до уваги прийнятий випадок навантаження даху повздовжнім

зусиллям, яке виникає при співударянні вагону, як випадку найбільшої навантаженості його конструкції в експлуатації. На болтове з'єднання буде діяти повздовжня сила Q , обумовлена повздовжньою силою інерції кузова вагону при співударянні та вертикальна N , зумовлена власною вагою даху (рис. 10).

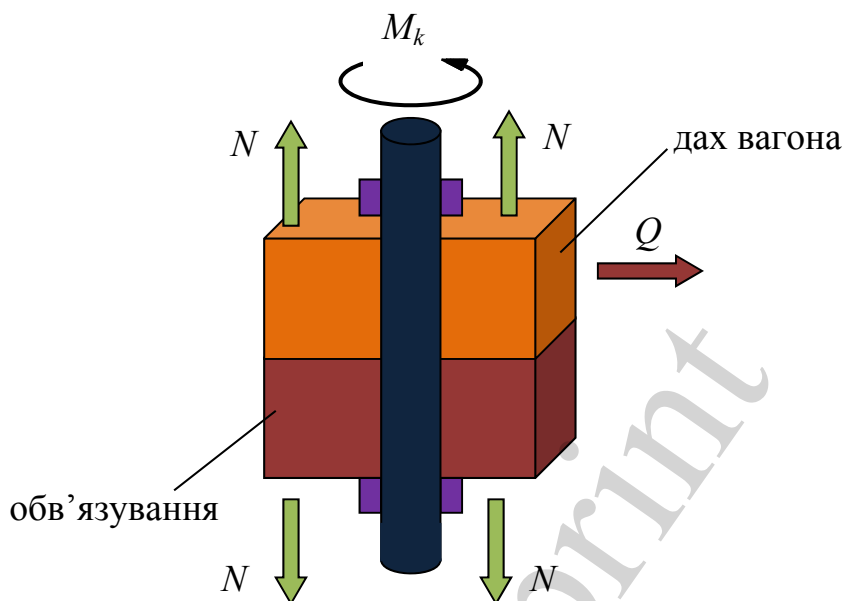


Рис. 10. Розрахункова схема болтового кріплення даху до верхнього обв'язування кузова напіввагона

Оскільки болти після прикручування заварюють, то при дії повздовжньої сили на них окрім вищеперахованих сил будуть діяти сили, що виникають від деформації кручення.

Тоді, умова міцності має вигляд [19]

$$N_{red} = \sqrt{(N_N + N_{M,max})^2 + N_Q^2} \leq N_{b,min}, \quad (3)$$

де N_N – повздовжня сила, що діє на болтове з'єднання; $N_{M,max}$ – найбільше можливе навантаження у болтовому з'єднанні; N_Q – поперечна сила, що діє на болтове з'єднання; $N_{b,min}$ – несуча здатність болта.

При дії перерізувальної сили Q спрощено вважають, що зусилля у болтах розподіляються рівномірно. Таким чином, зусилля, що діє на один болт визначається

$$N_Q = \frac{Q}{n}, \quad (4)$$

де n – кількість болтів у з'єднанні.
Силу N_N обчислюють аналогічно N_Q .

$$N_N = \frac{N}{n}. \quad (5)$$

Максимальне навантаження $N_{M,\max}$, зумовлене дією моменту M на болтове з'єднання визначається

$$N_{M,\max} = \frac{M \cdot l_{\max}}{m \sum_{i=1}^k l_i^2}, \quad (6)$$

де l_i – відстані між парами болтів, розміщеними симетрично відносно центра ваги з'єднання; l_{\max} – максимальна відстань між парами болтів; m – кількість пар болтів.

Приймаємо, що максимальна повздовжня сила інерції складає 4,0g.

Вертикальне навантаження N_N дорівнює 210,21 Н. При цьому враховано, що маса даху складає 1,2 т. Кріплення даху до верхнього обв'язування напіввагона відбувається 56 бовтами з діаметром 12 мм.

Поперечне навантаження N_Q , яке випробовують болти, що здійснюють взаємодію торцевої частини даху з верхнім обв'язуванням (найбільш навантажені при маневровому співударянні болти даху) складе 8857,14 Н.

З урахуванням того, що відстань між болтами даху складає 0,375 м, тоді $N_{M,\max}=3489,8$ Н.

Звідси з урахуванням площі поперечного перерізу болта ($S=113,04$ мм²) маємо $N_{red}=138,75$ Н/мм², при $N_{b,\min}=122$ Н/мм². Тобто умова міцності не виконується. Отже використання типових болтів, які використовуються для закріплення даху до кузова, є недоцільним.

Для забезпечення надійності кріплення даху до верхнього обв'язування кузова напіввагона пропонується використання болтів, які мають більшу несучу здатність, а саме – М12х95, кроком різьби – 1,75, класом міцності 5,8.

5. 4. Визначення динамічної навантаженості несучої конструкції напіввагона зі зйомним дахом

Для визначення прискорень, які діють на кузов напіввагона використано математичну модель, наведену у [20]. Однак вона була доопрацьована. Модель враховує переміщення несучої конструкції кузова, а не вагона в цілому. Розрахункова схема наведена на рис. 11.

Математична модель нижче. Дослідження проведені у плоскій системі координат. До уваги прийняті коливання підскакування та галопування, як найпоширеніші типи коливань вагона у експлуатації.

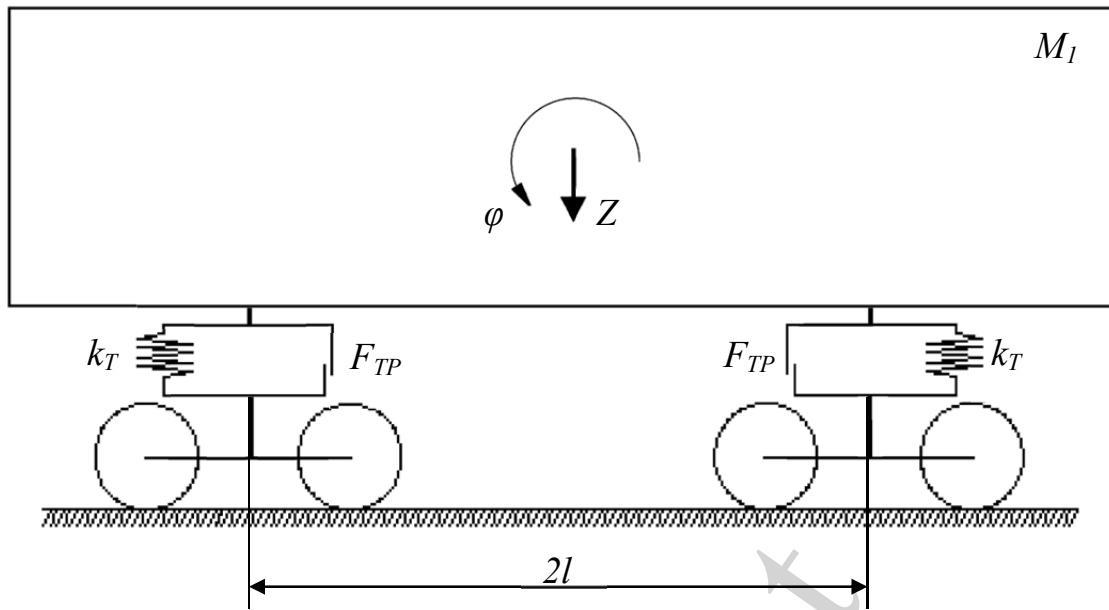


Рис. 11. Розрахункова схема напіввагона

$$\begin{cases} M_1 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_1 + C_{1,1} \cdot q_1 = \\ = -F_{TP} \cdot \left(\text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_1 \right) + \text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_2 \right) \right), \\ M_2 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_2 + C_{2,2} \cdot q_2 = \\ = F_{TP} \cdot l \cdot \left(\text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_1 \right) - \text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_2 \right) \right), \end{cases} \quad (7)$$

де M_1 , M_2 – відповідно, маса та момент інерції кузова відносно вертикальної осі; $q_{1,2}$ – узагальнені координати, які відповідають поступальному та кутовому переміщенням відносно вертикальної осі; $C_{1,1-2,2}$ – ненульові елементи матриці пружних коефіцієнтів; k_T – жорсткість ресорного підвішування; F_{TP} – сила сухого тертя, яка діє в підвішуванні візка; l – половина бази вагона; $\delta_{1,2}$ – деформації пружних елементів ресорного підвішування.

Матриця пружних коефіцієнтів має вигляд

$$C = \begin{vmatrix} 2 \cdot k_T & 0 \\ 0 & 2 \cdot l^2 \cdot k_T \end{vmatrix}. \quad (8)$$

Деформації пружних елементів ресорного підвішування (від положення рівноваги) визначалися виразами

$$\delta_1 = z - l\varphi; \quad \delta_2 = z + l\varphi. \quad (9)$$

Сила сухого тертя, яка діє в підвішуванні візка визначається

$$F_{TP} = P_T \cdot \varphi_{TP}, \quad (10)$$

де P_T – сила навантаження візка кузовом вагона;

φ_{TP} – коефіцієнт відносного тертя ресорного підвішування.

При розв'язку математичної моделі враховано масу несучої конструкції кузова з урахуванням зйомного даху.

Розв'язання системи диференціальних рівнянь (7) здійснено в програмному комплексі MathCad [21–23] у вигляді

$$Q(t, y) = \begin{pmatrix} y_3 \\ y_4 \\ \frac{-F_{TP} \cdot \left(\text{sign}\left(\frac{d}{dt}\delta_1\right) + \text{sign}\left(\frac{d}{dt}\delta_2\right) \right) - C_{1,1} \cdot y_1}{M_1} \\ \frac{F_{TP} \cdot l \cdot \left(\text{sign}\left(\frac{d}{dt}\delta_1\right) - \text{sign}\left(\frac{d}{dt}\delta_2\right) \right) - C_{2,2} \cdot y_2}{M_2} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

$$Z = rkfixed(Y0, tn, tk, n', Q).$$

При цьому $y_1 = q_1$, $y_2 = q_2$, $y_3 = \dot{q}_1$, $y_4 = \dot{q}_2$.

Початкові переміщення та швидкості покладені рівними нулю [24–26]

$$Y0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Результати розрахунку математичної моделі наведено на рис. 12.

Прискорення кузова в центрі мас в частці g дорівнює 0,4 і знаходиться в допустимих межах, згідно з [11, 12]. Оцінка ходу вагона є відмінною.

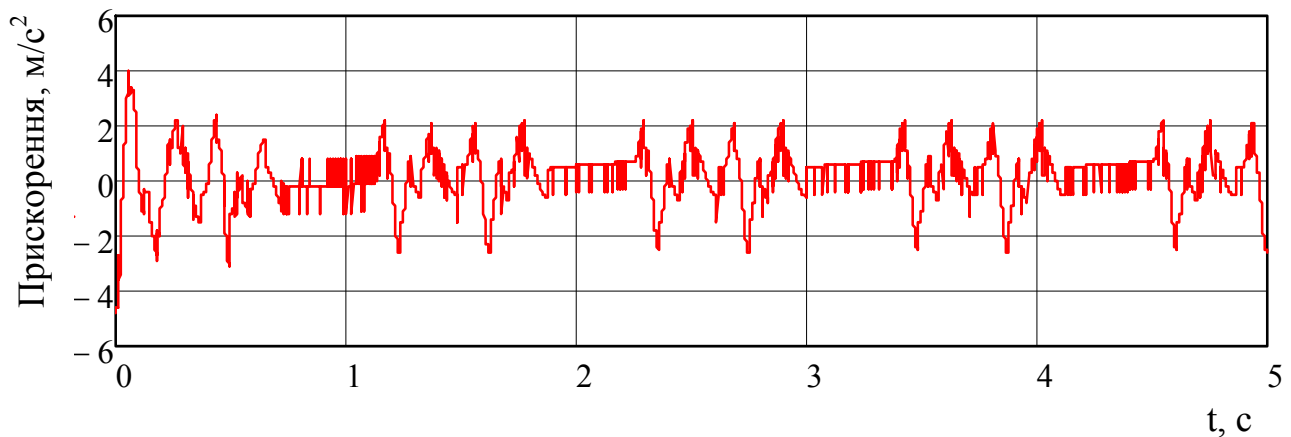


Рис. 12. Прискорення кузова напіввагона в центрі мас

6. Обговорення результатів удосконалення зйомного даху напіввагона

Для підвищення ефективності використання напіввагонів запропоновано використання зйомного даху. Таке рішення сприяє можливості здійснення перевезень вантажів, які потребують захисту від атмосферних опадів.

Проведено визначення резервів міцності типового даху вагона. Встановлено, що при основних експлуатаційних режимах навантаження мається значний невикористаний запас міцності несучих елементів каркасу (рис. 3). У зв'язку з цим запропоновано оптимізацію даху вагона за критерієм мінімуму матеріалоемності. Проведені розрахунки дозволили обрати більш оптимальний з точки зору мінімальної матеріалоемності профіль виконання складових даху.

З урахуванням запропонованих заходів стає можливим знизити масу каркасу зйомного даху напіввагона майже на 15 % у порівнянні з типовою конструкцією (рис. 5). При цьому для можливості використання даху на різних типах напіввагонів його консольні частини мають здатність переміщуватися у повздовжній площині (рис. 7). Результати розрахунку на міцність підтвердили доцільність прийнятих при проектуванні рішень. Визначено міцність болтового з'єднання даху з верхнім об'язуванням кузова напіввагона.

Для визначення динамічної навантаженості напіввагона зі зйомним дахом проведено розрахунок. Обмеженням розрахункової моделі є те, що вона враховує переміщення несучої конструкції у вертикальній площині. Проведені дослідження показали, що прискорення кузова в центрі мас складають $0,4g$ і знаходиться в допустимих межах. При цьому оцінка ходу вагона є відмінною (рис. 11).

При подальших дослідженнях в цьому напрямку важливим є проведення експериментального визначення навантаженості зйомного даху. Це можливо здійснити методом подоби з використанням електричного тензометрування.

Проведені дослідження сприятимуть підвищенню ефективності функціонування залізничного транспорту.

7. Висновки

1. Визначено резерви міцності даху типової конструкції. Встановлено, що при найбільш неблагоприємній схемі навантаження даху максимальні еквівалентні напруження виникають у середній дузі та складають близько 80 МПа. Отже мається значний невикористаний запас міцності несучих елементів каркасу. У зв'язку з цим проведено оптимізацію каркаса зйомного даху за критерієм мінімуму матеріалоемності. Запропоновано впровадження в якості несучих елементів даху труб, що забезпечують зниження загальної металоємності конструкції при виконанні умов міцності. З урахуванням запропонованих заходів стає можливим знизити масу каркасу зйомного даху напіввагона майже на 15 % у порівнянні з типовою конструкцією.

2. Розраховано на міцність удосконалену конструкцію зйомного даху. Розрахунок реалізований за методом скінчених елементів. Максимальні еквівалентні напруження при цьому виникають у середній частині даху та складають близько 230 МПа, тобто не перевищують допустимі. Максимальні переміщення в вузлах конструкції виникають у середній частині даху – 1,8 мм. Отже міцність несучої конструкції зйомного даху забезпечується.

3. Визначено міцність болтового з'єднання даху з верхнім обв'язуванням кузова напіввагона. Встановлено, що з урахуванням використання типових болтів для закріплення даху до кузова, міцність з'єднання не забезпечується.

Для забезпечення надійності кріплення даху до верхнього обв'язування кузова напіввагона пропонується використання болтів, які мають більшу несучу здатність, а саме – М12х95, кроком різьби – 1,75, класом міцності 5,8.

4. Визначено динамічну навантаженість несучої конструкції напіввагона зі зйомним дахом. Дослідження проведені у вертикальній площині. До уваги прийняті коливання підскакування вагона та галопування.

Прискорення кузова в центрі мас в частці g дорівнює 0,4 і знаходиться в допустимих межах. Оцінка ходу вагона є відмінною.

Подяка

Ця публікація виконана в рамках проекту: “Розроблення концептуальних засад для відновлення ефективного функціонування застарілих вантажних вагонів (Development of conceptual frameworks for restoring the efficient operation of obsolete freight cars)”. Реєстраційний номер проекту: 2020.02/0122, фінансування якого здійснюється Національним фондом досліджень України за кошти державного бюджету.

Література

1. Вагоны с раскрывающейся крышей. URL: <http://scaletrainsclub.com/board/viewtopic.php?t=1916>
2. Reidemeister, A., Muradian, L., Shaposhnyk, V., Shykunov, O., Kyryl'chuk, O., Kalashnyk, V. (2020). Improvement of the open wagon for cargoes which imply loading with a “hat.” IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 985, 012034. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/985/1/012034>
3. Antipin, D. Y., Racin, D. Y., Shorokhov, S. G. (2016). Justification of a

Rational Design of the Pivot Center of the Open-top Wagon Frame by means of Computer Simulation. *Procedia Engineering*, 150, 150–154. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.738>

4. Šťastniak, P., Moravčík, M., Smetanka, L. (2019). Investigation of strength conditions of the new wagon prototype type Zans. *MATEC Web of Conferences*, 254, 02037. doi: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201925402037>

5. Slavchev, S., Stoilov, V., Purgic, S. (2015). Static strength analysis of the body of a wagon, series Zans. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 21 (1), 49–57. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/STATIC-STRENGTH-ANALYSIS-OF-THE-BODY-OF-A-WAGON%2C-Stoilov-Purgi%2C%27633c5cf68afdd73c979ef9a2c4f505deb600988c>

6. Płaczek, M., Wróbel, A., Buchacz, A. (2016). A concept of technology for freight wagons modernization. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 161, 012107. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/161/1/012107>

7. Harak, S. S., Sharma, S. C., Harsha, S. P. (2014). Structural Dynamic Analysis of Freight Railway Wagon Using Finite Element Method. *Procedia Materials Science*, 6, 1891–1898. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.221>

8. Кирильчук, О. А., Шатунова, Д. А. (2016). Исследование прочности конструкции съемной крыши для полувагонов. *Вагонный парк*, 5-6 (110-111), 50–53. URL: <http://eadnurt.diit.edu.ua/jspui/handle/123456789/9413>

9. Fomin, O., Lovska, A. (2020). Improvements in passenger car body for higher stability of train ferry. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23 (6), 1455–1465. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.08.010>

10. Fomin, O. V., Lovska, A. O., Plakhtii, O. A., Nerubatskyi, V. P. (2017). The influence of implementation of circular pipes in load-bearing structures of bodies of freight cars on their physico-mechanical properties. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 6, 89–96. URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=Nvngu_2017_6_15

11. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних) (2015). Київ.

12. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам (2016). Москва.

13. Fomin, O., Kulbovsky, I., Sorochinska, E., Saprionova, S., Bambura, O. (2017). Experimental confirmation of the theory of implementation of the coupled design of center girder of the hopper wagons for iron ore pellets. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (1 (89)), 11–18. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109588>

14. Lovska, A. A. (2015). Peculiarities of computer modeling of strength of body bearing construction of gondola car during transportation by ferry-bridge. *Metallurgical and Mining Industry*, 1, 49–54. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Peculiarities-of-computer-modeling-of-strength-of-Lovska/b86e05254031bcd026118d57f8504a58686d9905>

15. Bychkov, A. S., Kondratiev, A. V. (2019). Criterion-Based Assessment of Performance Improvement for Aircraft Structural Parts with Thermal Spray Coatings. *Journal of Superhard Materials*, 41 (1), 53–59. doi: <https://doi.org/10.3103/s1063457619010088>
16. Kondratiev, A., Gaidachuk, V., Nabokina, T., Tsaritsynskiy, A. (2020). New Possibilities of Creating the Efficient Dimensionally Stable Composite Honeycomb Structures for Space Applications. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 45–59. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5_5
17. Vatulia, G. L., Lobiak, O. V., Deryzemlia, S. V., Verevicheva, M. A., Orel, Y. F. (2019). Rationalization of cross-sections of the composite reinforced concrete span structure of bridges with a monolithic reinforced concrete roadway slab. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 664, 012014. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/664/1/012014>
18. Vatulia, G., Komagorova, S., Pavliuchenkov, M. (2018). Optimization of the truss beam. Verification of the calculation results. *MATEC Web of Conferences*, 230, 02037. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823002037>
19. Семенов, В. С., Каримова, П. Х. (2008). Расчет и конструирование соединений стальных строительных конструкций. Бишкек: КPCY, 80.
20. Дьомін, Ю. В., Черняк, Г. Ю. (2003). Основи динаміки вагонів. Київ: КУЕТТ, 269.
21. Goolak, S., Gerlici, J., Tkachenko, V., Sapronova, S., Lack, T., Kravchenko, K. (2019). Determination of Parameters of Asynchronous Electric Machines with Asymmetrical Windings of Electric Locomotives. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*, 21 (2), 24–31. doi: <https://doi.org/10.26552/com.c.2019.2.24-31>
22. Goolak, S., Gubarevych, O., Yermolenko, E., Slobodyanyuk, M., Gorobchenko, O. (2020). Mathematical modeling of an induction motor for vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (2 (104)), 25–34. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.199559>
23. Kliuiev, S. (2018). Experimental study of the method of locomotive wheel-rail angle of attack control using acoustic emission. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (9 (92)), 69–75. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.122131>
24. Klimenko, I., Kalivoda, J., Neduzha, L. (2020). Influence of Parameters of Electric Locomotive on its Critical Speed. *Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure*, 531–540. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-38666-5_56
25. Fomin, O., Lovska, A., Píšťek, V., Kučera, P. (2019). Dynamic load effect on the transportation safety of tank containers as part of combined trains on railway ferries. *Vibroengineering PROCEDIA*, 29, 124–129. doi: <https://doi.org/10.21595/vp.2019.21138>
26. Vatulia, G., Lobiak, A., Chernogil, V., Novikova, M. (2019). Simulation of Performance of CFST Elements Containing Differentiated Profile Tubes Filled with Reinforced Concrete. *Materials Science Forum*, 968, 281–287. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.968.281>