

Визначення показників міцності несучої конструкції кузова критого вагону з круглих труб при перевезенні на залізничному поромі

**О. В. Фомін, А. О. Ловська, В. Г. Маслієв, А. В. Цимбалюк,
О. В. Бурлуцький**

Підвищення ефективності перевізного процесу через міжнародні транспортні коридори сприяє розвитку інтероперабельних систем. Успішне функціонування інтероперабельного транспорту можливе лише при надійній та злагодженій роботі окремих складових між собою. У зв'язку з цим необхідним є впровадження в експлуатацію рухомого складу нового покоління з покращеними техніко-економічними показниками. Розроблено несучу конструкцію критого вагона, особливістю якого є те, що елементи кузова виготовлені з труб круглого перерізу, а для надійності закріплення його відносно палуби залізничного порому на шворневих балках розміщуються вузли для закріплення ланцюгових стяжок. Для уточненого визначення показників міцності кузова критого вагона досліджено його динамічну навантаженість при найбільш несприятливій розрахунковій схемі – кутові переміщення залізничного порому навколо повздовжньої осі (еквівалент коливань бічна хитамиця в динаміці вагонів). Визначення максимальної величини прискорень здійснено шляхом математичного моделювання процесу коливань залізничного порому з вагонами, розміщеними на його палубах з використанням метода Лагранжа II роду. Розв'язання диференціального рівняння коливань залізничного порому з вагонами, розміщеними на ньому, проведено за методом Рунге-Кутта в середовищі програмного забезпечення MathCad. При визначенні загальної величини прискорення, яке діє на кузов критого вагона при перевезенні на залізничному поромі також враховано горизонтальну складову прискорення вільного падіння, яка обумовлена кутом нахилу (крен) залізничного порому. Отримане значення прискорення, як складова динамічного навантаження, враховане при дослідженні міцності несучої конструкції кузова критого вагона. Розрахунок проведений за методом скінчених елементів в програмному забезпеченні CosmosWorks. Для цього розроблено модель міцності несучої конструкції кузова критого вагону з круглих труб при перевезенні на залізничному поромі. Встановлено, що максимальні еквівалентні напруження не перевищують допустимі для марки сталі металоконструкції кузова та складають близько 280 МПа. Визначено проектний строк служби вузла для закріплення ланцюгових стяжок на кузові критого вагону при перевезенні на залізничному поромі. Результати досліджень можуть використовуватися при проектуванні вагонів нового покоління з покращеними техніко-економічними та експлуатаційними показниками

Ключові слова: критий вагон, несуча конструкція, динамічна навантаженість, залізнично-водний транспорт, залізнично-поромні перевезення

1. Вступ

Підвищення ефективності функціонування транспортної галузі зумовлює необхідність впровадження в експлуатацію інтегрованих транспортних систем. Однією з найбільш перспективних складових транспортної галузі є залізнично-поромні перевезення. Особливістю таких перевезень є можливість слідування вагонів морем на спеціально обладнаних для цього судах – залізничних поромках. Для забезпечення стійкості вагонів відносно палуб залізничних поромів відбувається закріплення несучих конструкцій за допомогою багатообертових засобів: ланцюгові стяжки, механічні упор-домкрати, гальмівні башмаки, тупікові упори.

Аналіз умов експлуатації вагонів при перевезенні на залізничних поромках акваторією Чорного моря показав, що мають місце пошкодження елементів несучої конструкції кузовів. Це обумовлено дією на них навантажень, які перевищують експлуатаційні відносно магістральних колій, а також технічною непристосованістю до надійної взаємодії з багатообертовими засобами закріплення відносно палуб.

Внаслідок відсутності у несучій конструкції вагонів спеціальних вузлів для закріплення відносно палуб взаємодія з ланцюговими стяжками здійснюється за елементи кузова, які не призначені для цього. Це спричиняє пошкодження несучої конструкції кузовів вагонів при їх перевезенні на залізничних поромках (рис. 1).



Рис. 1. Пошкодження елементів несучої конструкції кузова критого вагона:
а – деформація буксирної скоби; б – деформація обшивки кузова

Тому необхідним є проектування та впровадження в експлуатацію принципово нових конструкцій вагонів з покращеними техніко-економічними показниками та адаптованими до експлуатації в напрямку міжнародних транспортних коридорів.

2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Особливості та результати каталогізації несучих систем напіввагонів на прикладі застосування такого підходу для стіни торцевої однієї із базових моделей напіввагонів розглянуті у [1]. Результати досліджень по визначенню характеру і ступеня впливу різних вантажних візків на міцнісні якості несучих систем вагонів розглянуті у [2]. Дослідження міцності удосконалених конструкцій кузовів вантажних вагонів при перевезенні на залізничному поромі в розглянутих роботах не проводиться.

Особливості розробки технології модернізації вантажних вагонів під час періодичного ремонту розглянуті у [3]. В рамках проекту пропонується виготовлення кузова вагона з композитних панелей, а фарбове покриття здійснювати антикорозійними матеріалами. Аналіз принципово-нових конструкцій вантажних вагонів та технології виготовлення зазначені у [4]. Приводяться вимоги, яким повинні відповідати вантажні вагони на сучасному етапі розвитку.

Питання дослідження динамічної навантаженості наведених конструкцій вантажних вагонів при перевезенні на залізничних поромах в розглянутих роботах не досліджувалися.

Аналіз динамічних властивостей рухомого складу при експлуатації відносно рейкових колій проводиться у [5]. Результати досліджень показали, що найбільш чутливими інерційними властивостями є маса та вертикальний момент інерції, а найменш чутливими – повздовжні та бокові моменти інерції. Опис нового способу проходження транспортного засобу через криву дільницю колії з використанням багатофункціонального обчислювального програмного забезпечення наведено у [6].

Необхідно зазначити, що питання дослідження динаміки вагонів та безпеки їх руху при перевезенні на залізничних поромах уваги не приділяється.

Результати, а також особливості проведених теоретичних та експериментальних досліджень з впровадження стикованого виконання хребтової балки вагонів-окатишевозів, наведено у [7]. Практична реалізація запропонованих рішень дозволяє знизити собівартість виготовлення таких вагонів на 10 %. Особливості моделювання навантаженості несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу при комбінованих перевезеннях наведені у [8]. Дослідження проведені за умови експлуатації вагона-платформи відносно магістральних колій та при перевезенні на залізничному поромі.

Важливо зазначити, що комп'ютерне моделювання динамічної навантаженості несучих конструкцій вагонів при перевезенні на залізничних поромах в роботах не проводиться.

Аналіз конструкційних особливостей вагонів нового покоління приведений у [9]. Також наведені дослідження динаміки цих вагонів за умови обпирання на візки LEILA та SUSTRAIL. Розрахунок на міцність несучих конструкцій кузовів вагонів при перевезенні на залізничному поромі в статті не наведений.

Особливості застосування методу адаптивної зваженої суми для багатоцільової оптимізації розглянуті у [10]. Метод визначає рівномірно-розподілені оптимальні рішення Парето, рішення на не опуклих областях та нехтує оптимальними рішеннями, які не відносяться до Парето. Важливо зазначити, що адап-

тація зазначеного методу до задач оптимального проектування кузовів вантажних вагонів в роботі не проводиться.

Для забезпечення міцності несучих конструкцій кузовів критих вагонів необхідним є визначення уточнених величин динамічних навантажень, які діють на них при перевезенні на залізничних поромках та дослідження показників міцності несучих конструкцій. З метою безпеки перевезення вагонів на залізничних поромках необхідним є пристосування несучих конструкцій до надійної взаємодії з засобами закріплення відносно палуб.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою роботи є виявлення особливостей визначення показників міцності несучих конструкцій кузовів критих вагонів з круглих труб при перевезенні на залізничному поромі.

Для досягнення поставленої мети визначені наступні задачі:

- провести математичне моделювання динамічної навантаженості кузова критого вагона при перевезенні на залізничному поромі;
- визначити показники міцності кузова критого вагона при перевезенні на залізничному поромі;
- удосконалити несучу конструкцію кузова критого вагона для забезпечення міцності при перевезенні на залізничному поромі;
- провести комп'ютерне моделювання динамічної навантаженості кузова критого вагона удосконаленої конструкції при перевезенні на залізничному поромі;
- верифікувати моделі динамічної навантаженості кузова критого вагона;
- визначити показники міцності кузова критого вагона удосконаленої конструкції при перевезенні на залізничному поромі.

4. Математичне моделювання динамічної навантаженості кузова критого вагона при перевезенні на залізничному поромі

Для дослідження динамічної навантаженості кузова критого вагона при перевезенні на залізничному поромі використано математичну модель, наведену у [11].

До уваги прийняті кутові переміщення залізничного порому з вагонами, розміщеними на його палубах навколо повздовжньої осі (крен), як випадок найбільшої динамічної навантаженості вагонів при перевезенні морем (1).

$$I_{\theta} \cdot \ddot{q} + \left(\Lambda_{\theta} \cdot \frac{B}{2} \right) \dot{q} = p' \cdot \frac{h}{2} + \Lambda_{\theta} \cdot \frac{B}{2} \cdot \dot{F}(t), \quad (1)$$

де q – узагальнена координата, що відповідає кутовому переміщенню навколо повздовжньої осі. Початок системи координат розміщений в центрі мас залізничного порому.

I_{θ} – момент інерції залізничного порому з вагонами, розміщеними відносно його палуб; B – ширина залізничного порому; h – висота борта залізничного

порому; Λ_0 – коефіцієнт опору коливанням; p' – вітрове навантаження; $F(t)$ – закон дії зусилля, яке збурює рух залізничного порому з кузовами вагонів, розміщеними на його палубах.

Визначення коефіцієнту опору коливанням залізничного порому здійснено у відповідності до [12]

$$\Lambda_0 = \omega_0' \sqrt[8]{\frac{(I_0 + \lambda)g}{D \cdot h^2}} (1 + 2Fr + 10Fr^2), \quad (2)$$

де λ – приєднаний момент інерції маси рідини; Fr – число Фруда, що залежить від швидкості руху; ω_0' – коефіцієнт, який визначається за спеціальною номограмою та залежить від відношення B/T , де T – осадка залізничного порому, м.

При складанні моделі враховано трохоїдальний закон руху збурюючої дії (морської хвилі) на залізничний пором з кузовами вагонів, розміщеними на його палубах. Профіль такої хвилі описується рівняннями [13]

$$\begin{aligned} x &= a + Re^{kb} \sin(ka + \omega t), \\ z &= b - Re^{kb} \cos(ka + \omega t), \end{aligned} \quad (3)$$

де a та b – горизонтальна та вертикальна координати центра траєкторії, за якою обертається частинка, що має на даний час координати x та z ; R – радіус траєкторії, за якою здійснюється оберт частинки; ω – частота морської хвилі; k – частота траєкторії збурюючого зусилля.

В моделі враховано, що вагон жорстко закріплений відносно палуби і здійснює переміщення разом з нею. Ударна дія морських хвиль на корпус залізничного порому з вагонами, розміщеними на його борту до уваги не приймалася. Враховано, що залізничний пором завантажений критими вагонами з використанням їх повної вантажопідйомності.

Дослідження проведені для випадку перевезення вагонів на залізничному поромі “Герои Шипки” акваторією Чорного моря.

Розв’язання диференціального рівняння (1) здійснено в середовищі програмного забезпечення Mathcad [14, 15] за методом Рунге – Кутта.

Встановлено, що при кутовому переміщенні залізничного порому з вагонами, розміщеними на його палубах навколо повздовжньої осі максимальна величина прискорення склала близько 0,24g. Величина прискорення приведена для крайнього від фальшборта вагону, розміщеного на верхній палубі залізничного порому.

5. Визначення показників міцності кузова критого вагона при перевезенні на залізничному поромі

Для визначення показників міцності кузова критого вагона при перевезенні на залізничному поромі побудовано просторову модель в середовищі програм-

ного забезпечення SolidWorks. У якості базової конструкції обраний критий вагон моделі 11-217. При побудові моделі враховано елементи кузову, які жорстко взаємодіють між собою, тобто в моделі до уваги не приймалися пересувні самоущільнені двері.

Розрахунок на міцність проведений за методом скінчених елементів в програмному пакеті CosmosWorks.

Оптимальна кількість елементів скінчено-елементної моделі визначена з використанням графоаналітичного методу. При цьому кількість елементів сітки склала 637520, вузлів – 225092. Максимальний розмір елементу сітки дорівнює 100,0 мм, мінімальний – 20,0 мм, максимальне співвідношення боків елементів – 525,19, відсоток елементів з співвідношенням боків менше трьох – 11,1, більше десяти – 46,7. Мінімальна кількість елементів в колі – 22, співвідношення збільшення розміру елементу – 1,8, коефіцієнт спрощення моделі у зонах розміщення округлень та отворах складає 0,4.

Комп'ютерна модель міцності несучої конструкції кузова критого вагону при кутових переміщеннях залізничного порому відносно повздовжньої осі наведена на рис. 2.

При складанні моделі міцності враховано такі навантаження: вертикальне статичне $P_v^{ст}$ та динамічне навантаження, вітрове навантаження на бокову поверхню кузова вагону, а також навантаження, які діють на кузов вагона через ланцюгові стяжки $P_{лс}$. Оскільки ланцюгові стяжки мають просторове розміщення, то зусилля, які будуть передаватися на несучу конструкцію через них розкладалося на три складові, з урахуванням кутів розміщення у просторі [16]. В моделі враховано, що кузов вагона завантажений умовним вантажем з використанням повної вантажопідйомності.

Закріплення моделі здійснювалося у зонах обпирання несучої конструкції вагону на ходові частини, а також опорні поверхні механічних упор-домкратів. В якості матеріалу несучої конструкції вагону застосована сталь марки 09Г2С, зі значенням межі міцності $\sigma_B=490$ МПа та межі плинності $\sigma_T=345$ МПа.

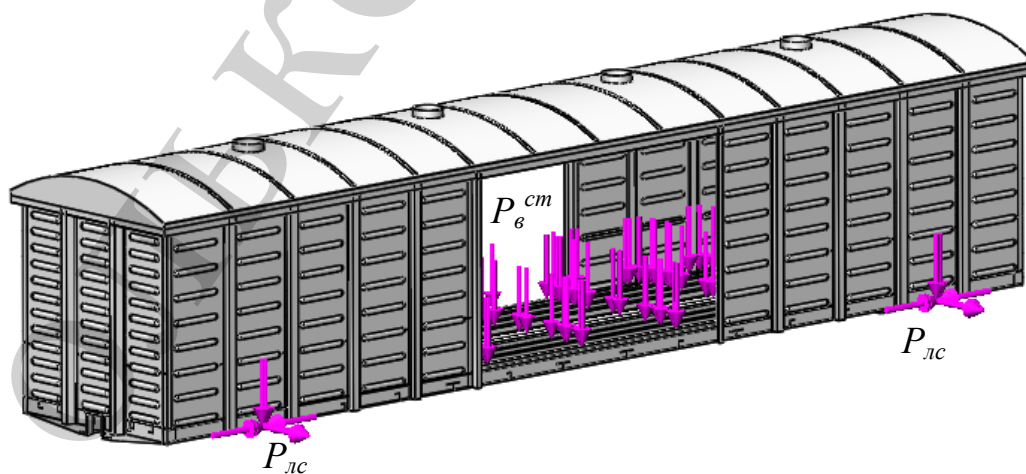


Рис. 2. Модель міцності несучої конструкції критого вагону при перевезенні на залізничному поромі

Результати розрахунку на міцність несучої конструкції критого вагона наведено на рис. 3. Максимальні еквівалентні напруження виникають у зонах взаємодії кузова (буксирні скоби) з ланцюговими стяжками та складають близько 360 МПа. Тобто перевищують допустимі для марки сталі металоконструкції [17, 18].

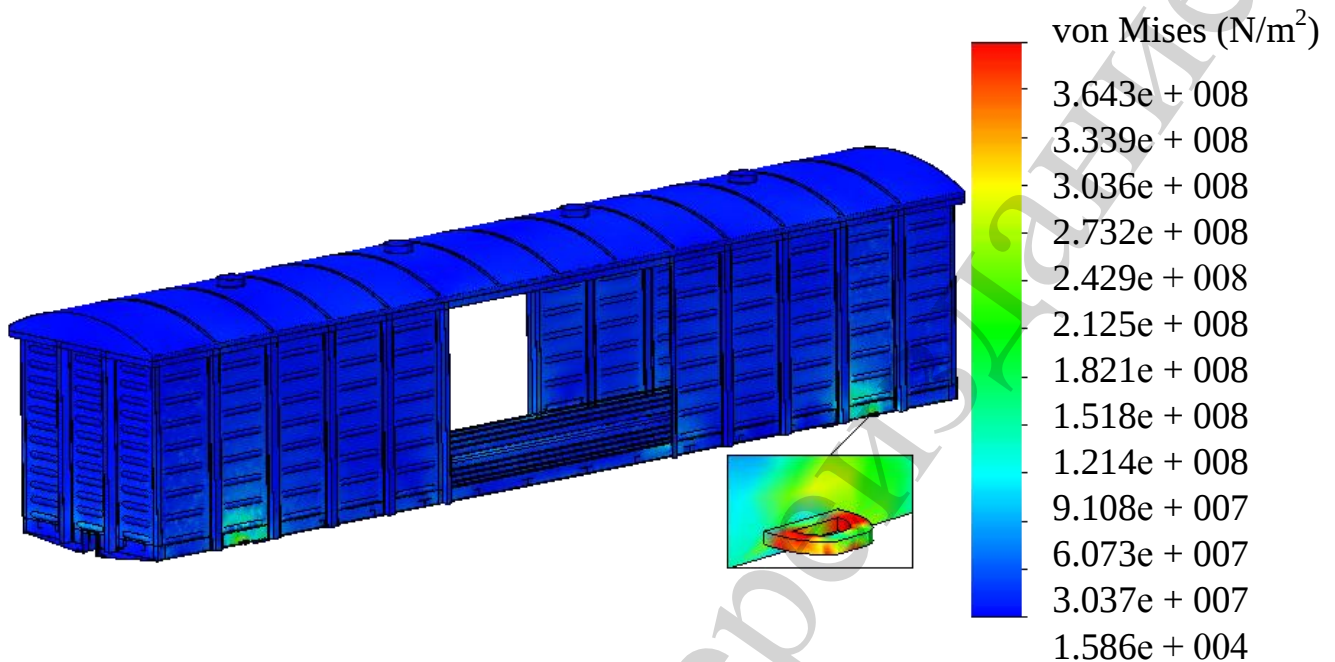


Рис. 3. Напружений стан несучої конструкції критого вагона при закріпленні відносно палуби за буксирні скоби

Максимальні переміщення склали близько 11 мм, деформації – $1,196 \cdot 10^{-2}$.

Це зумовлює необхідність удосконалення несучої конструкції кузова критого вагона для забезпечення міцності при перевезенні на залізничному поромі.

6. Удосконалення несучої конструкції кузова критого вагона для забезпечення міцності при перевезенні на залізничному поромі

Для підвищення ефективності експлуатації залізничного транспорту розроблено нову конструкцію критого вагону, особливістю якої є те, що несучі елементи виготовлені з труб круглого перетину (рис. 4). Таке технічне рішення дозволило знизити масу тари критого вагона на 4 % у порівнянні з вагоном-прототипом при забезпеченні умов міцності в умовах експлуатаційних навантажень [19]. Для можливості перевезення критого вагону на залізничному поромі пропонується встановлення на його шворневих балках вузлів для закріплення відносно палуб (рис. 5).

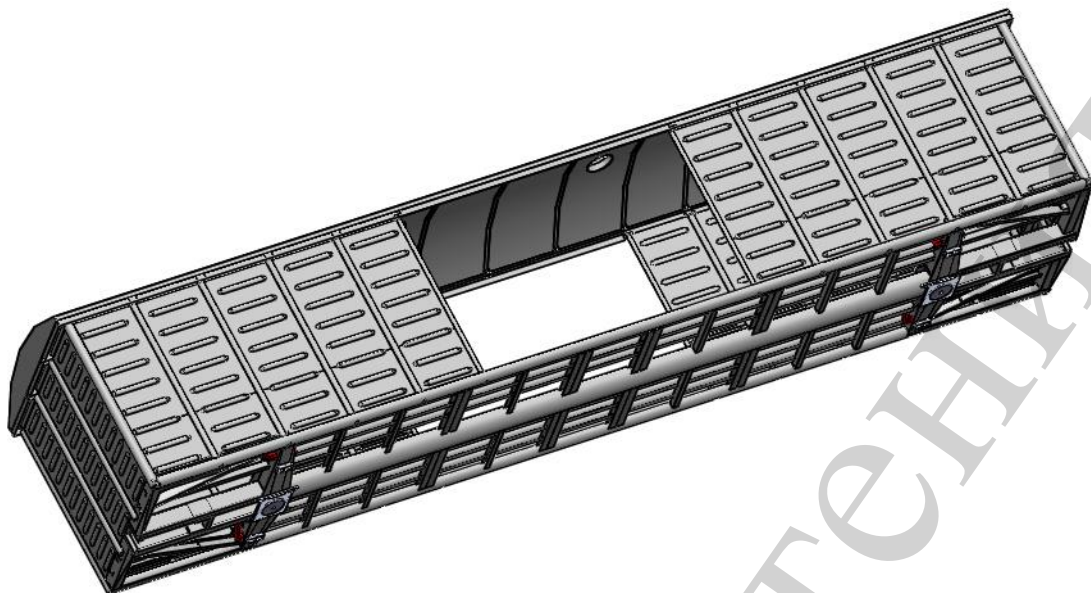


Рис. 4. Удосконалена несуча конструкція критого вагону

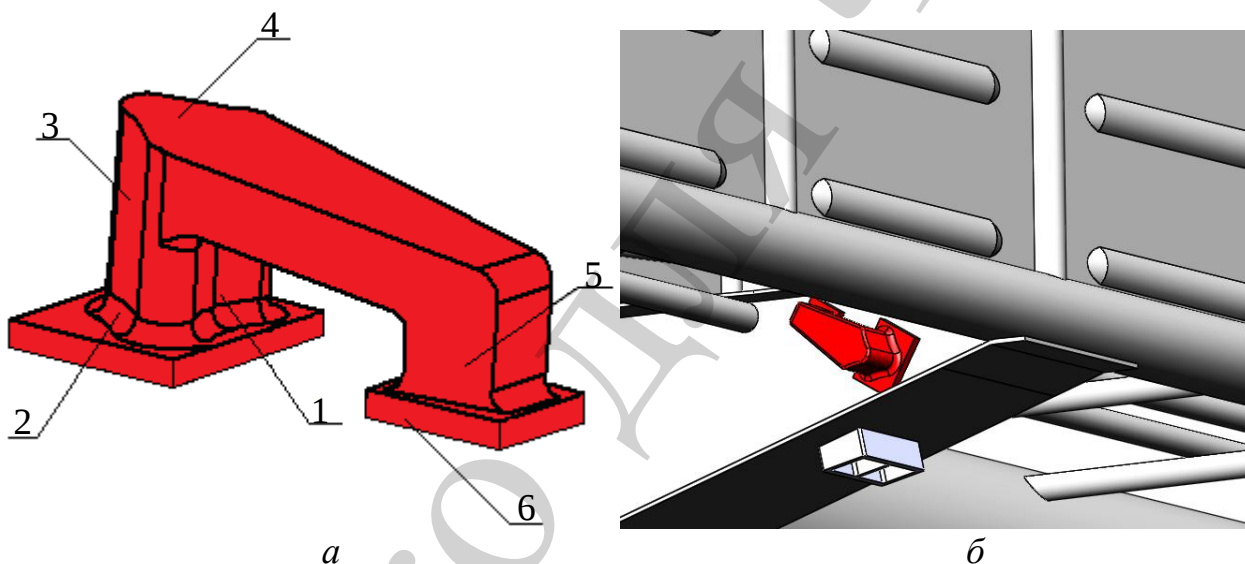


Рис. 5. Вузол для закріплення гака ланцюгової стяжки:

а – конструкційні особливості; *б* – розміщення на вагоні; 1 – напрямна гака; 2 – радіальний прилив; 3 – циліндрична частина; 4 – призматична частина; 5 – посилення; 6 – опорна частина

7. Комп'ютерне моделювання динамічної навантаженості кузова критого вагону при перевезенні на залізничному поромі

З метою апробації отриманих величин прискорень проведено комп'ютерне моделювання динаміки несучої конструкції кузова критого вагону з круглих труб при перевезенні на залізничному поромі. Дослідження проведені в середовищі програмного забезпечення CosmosWorks, версія 2015. Розрахунок виконано за допомогою методу скінчених елементів.

При складанні скінчено-елементної моделі використані просторові ізопараметричні тетраедри. У якості скінчених елементів використані ізопарамет-

ричні тетраедри, оптимальна чисельність яких визначена за графоаналітичним методом. Кількість елементів сітки склала 1723354, вузлів – 574624. Максимальний розмір елементу сітки дорівнює 80,0 мм, мінімальний – 16,0 мм, максимальне співвідношення боків елементів – 1523,8, відсоток елементів з співвідношенням боків менше трьох – 32,4, більше десяти – 21,7. Мінімальна кількість елементів в колі – 22, співвідношення збільшення розміру елементу – 1,8, коефіцієнт спрощення моделі у зонах розміщення округлень та отворах складає 0,4.

Модель міцності несучої конструкції критого вагона при кутових переміщеннях навколо повздовжньої осі наведено на рис. 6.

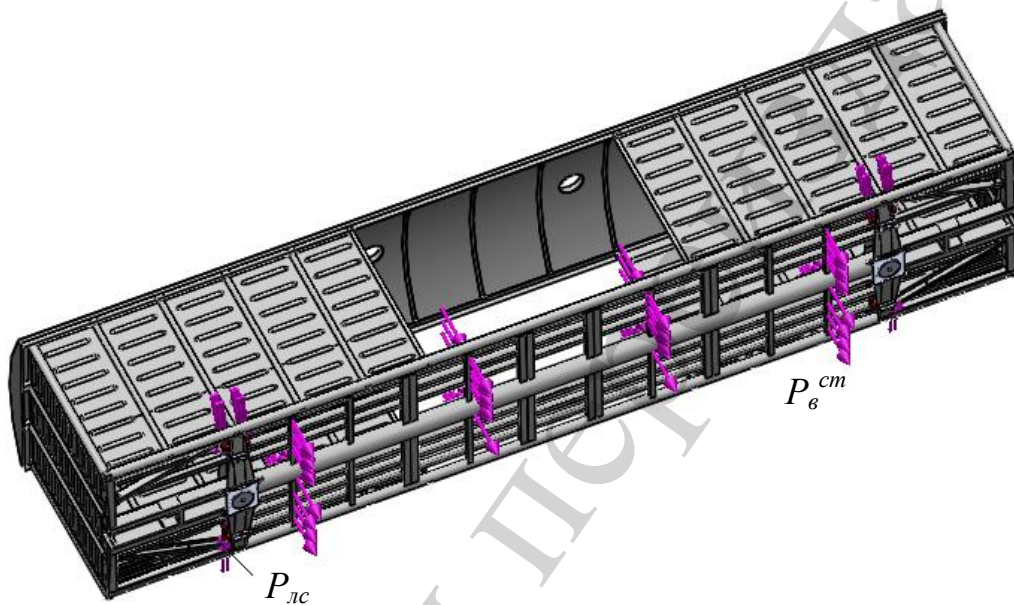


Рис. 6. Модель міцності несучої конструкції критого вагона

В моделі враховано навантаження, зазначені при розрахунку типової конструкції кузова критого вагона з відповідними чисельними значеннями.

Результати проведених досліджень показали, що максимальні прискорення кузова критого вагона виникають у середніх частинах основних повздовжніх балок рами та складають близько $0,11 \text{ м/с}^2$ (рис. 7, 8). З урахуванням складової прискорення вільного падіння максимальне прискорення, яке діє на кузов критого вагона склало $2,18 \text{ м/с}^2$ ($0,22g$).

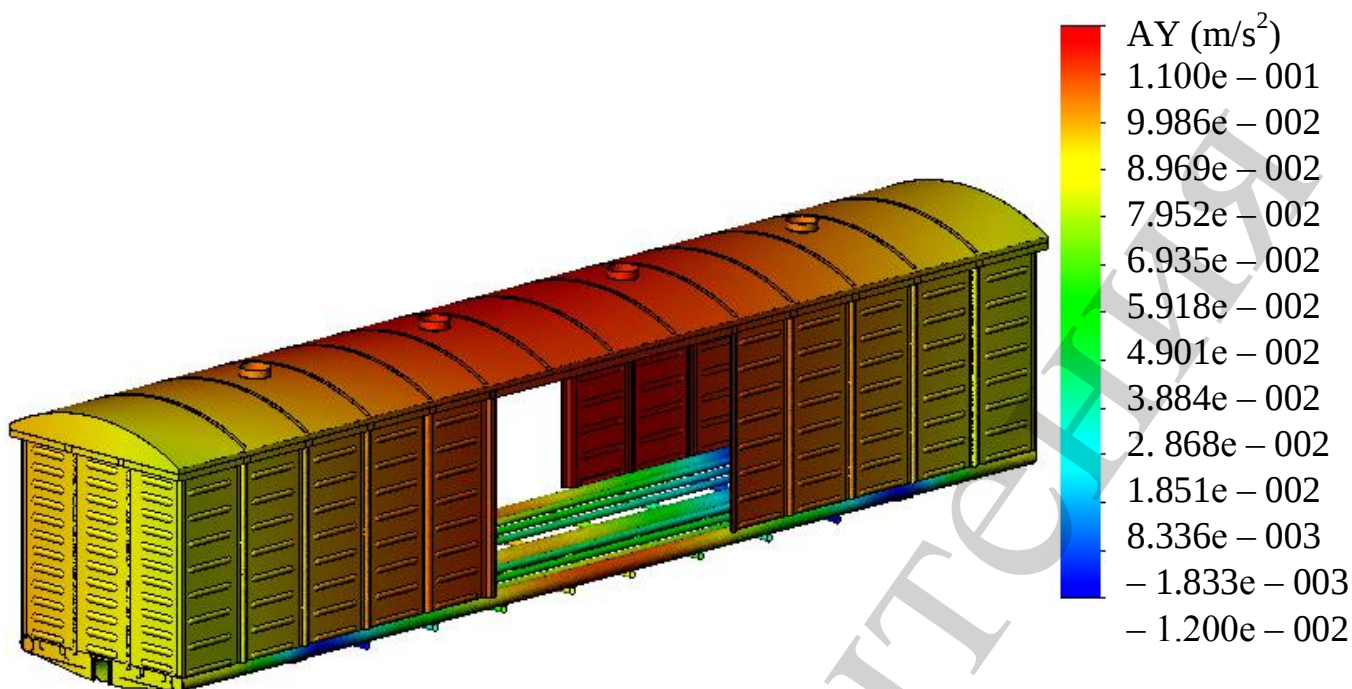


Рис. 7. Розподілення полів прискорень, які діють на несучу конструкцію кузова критого вагона з круглих труб при перевезенні на залізничному поромі (вид збоку)

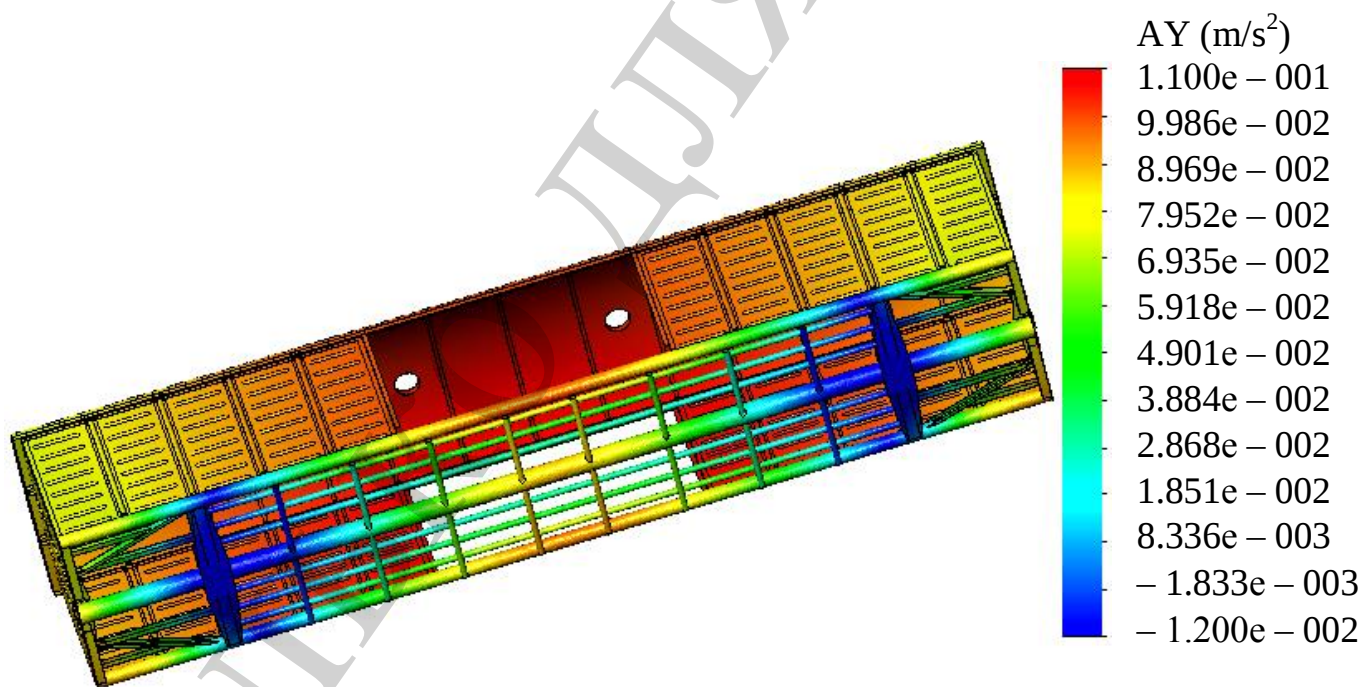


Рис. 8. Розподілення полів прискорень, які діють на несучу конструкцію кузова критого вагона з круглих труб при перевезенні на залізничному поромі (вид знизу)

В середній частині хребтової балки рами вагона прискорення складає близько $0,1 \text{ м/с}^2$. Найменша величина прискорень спостерігається в зонах обпирання несучої конструкції кузова на ходові частини.

8. Верифікація моделей динамічної навантаженості кузова критого вагона

З метою верифікації наведених моделей застосований критерій Фішера. Вхідною змінною математичної та комп'ютерної моделей динамічної навантаженості кузова критого вагона при перевезенні на залізничному поромі є кут крену у інтервалі від 5° до 20° , а вихідним – прискорення, які виникають в несучій конструкції кузова критого вагона.

Встановлено, що модель, яка розглядається, є лінійною та характеризує зміну прискорень несучої конструкції кузова критого вагона з круглих труб від кута крену залізничного порому (рис. 9).

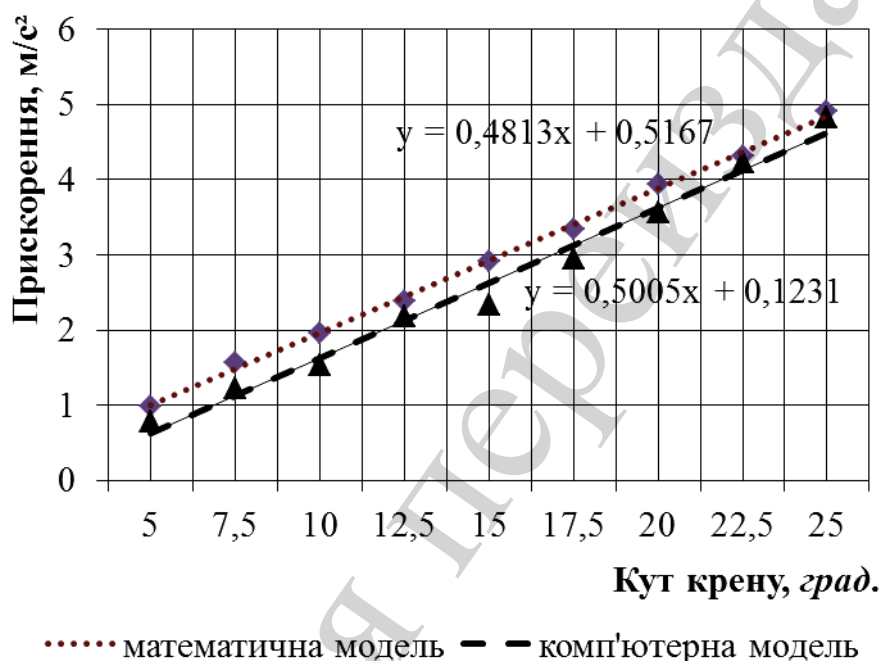


Рис. 9. Залежність прискорень, які діють на кузов критого вагона від кута крену залізничного порому

Результати визначення прискорень, які отримані шляхом моделювання динамічної навантаженості кузова критого вагона, наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Чисельні значення прискорень, які діють на несучу конструкцію кузова критого вагона при коливаннях залізничного порому

Кут крену	Величина прискорення, м/с^2	
	Математична модель	Комп'ютерна модель
5	0,98	0,78
7,5	1,57	1,23
10	1,95	1,53
12,5	2,39	2,18
15	2,92	2,34
17,5	3,34	2,95

20	3,93	3,56
22,5	4,32	4,23
25	4,91	4,83

При цьому кількість ступенів вільності при $N=9$ буде складати $f_1=7$.

Результати розрахунку показали, що при дисперсії відтворюваності $S_y=2,48$ та дисперсії адекватності $S_{ад}^2=7,94$, фактичне значення критерію Фішера $F_p=3,2$, що менше табличного значення критерію $F_t=3,29$. Отже гіпотеза про адекватність розробленої моделі не заперечується. Похибка апроксимації при цьому склала 10,6 %.

9. Визначення показників міцності кузова критого вагона при перевезенні на залізничному поромі

Для визначення показників міцності кузова критого вагона з круглих труб використаний метод скінчених елементів. Особливості побудови моделі міцності кузова зазначені вище. Результати розрахунку на міцність наведені на рис. 10, 11. Проведені дослідження дозволили зробити висновок, що максимальні еквівалентні напруження виникають у зонах взаємодії шворневих балок з хребтовою та складають близько 280 МПа, тобто не перевищують допустимі у відповідності з [17, 18].

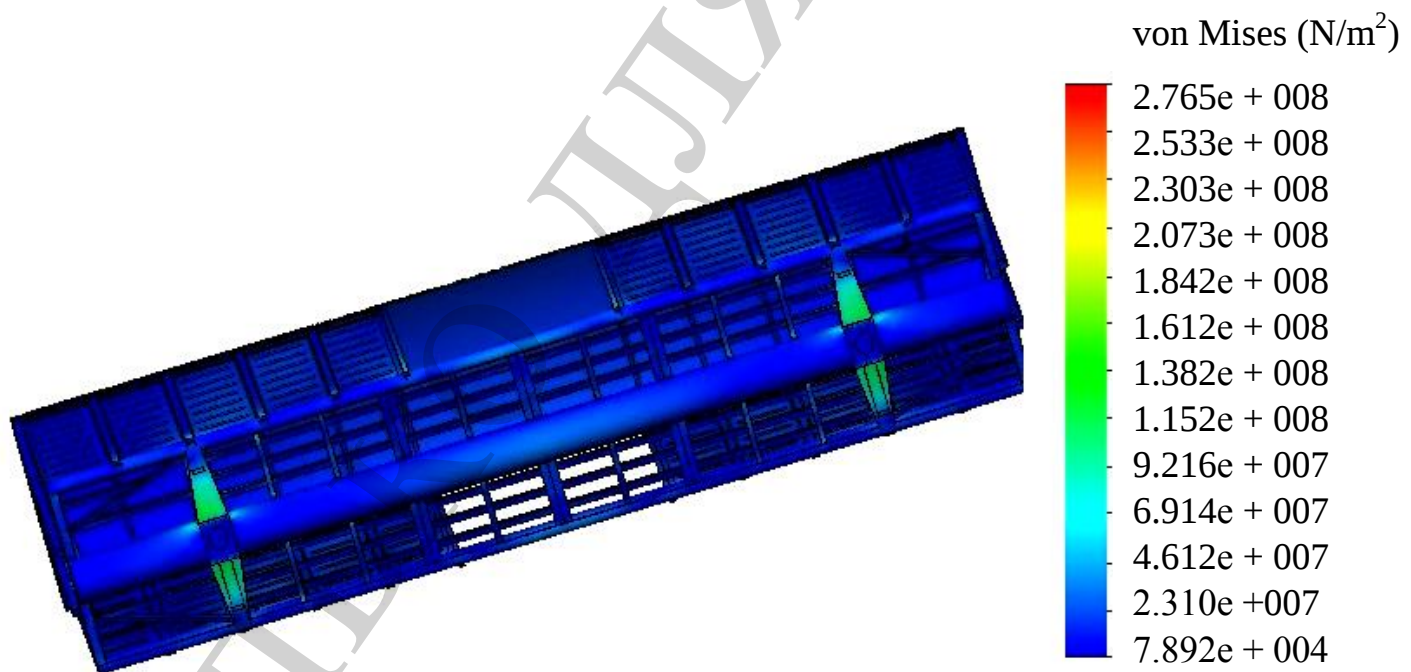


Рис. 10. Напружений стан несучої конструкції критого вагона при кутових переміщеннях навколо повздовжньої осі (вид знизу)

Максимальні переміщення виникають у середній частині основної повздовжньої балки рами з боку розміщення ланцюгових стяжок, які натягуються при кутовому переміщенні несучої конструкції вагона та складають 25,4 мм. Максимальні деформації склали $3,15 \cdot 10^{-3}$.

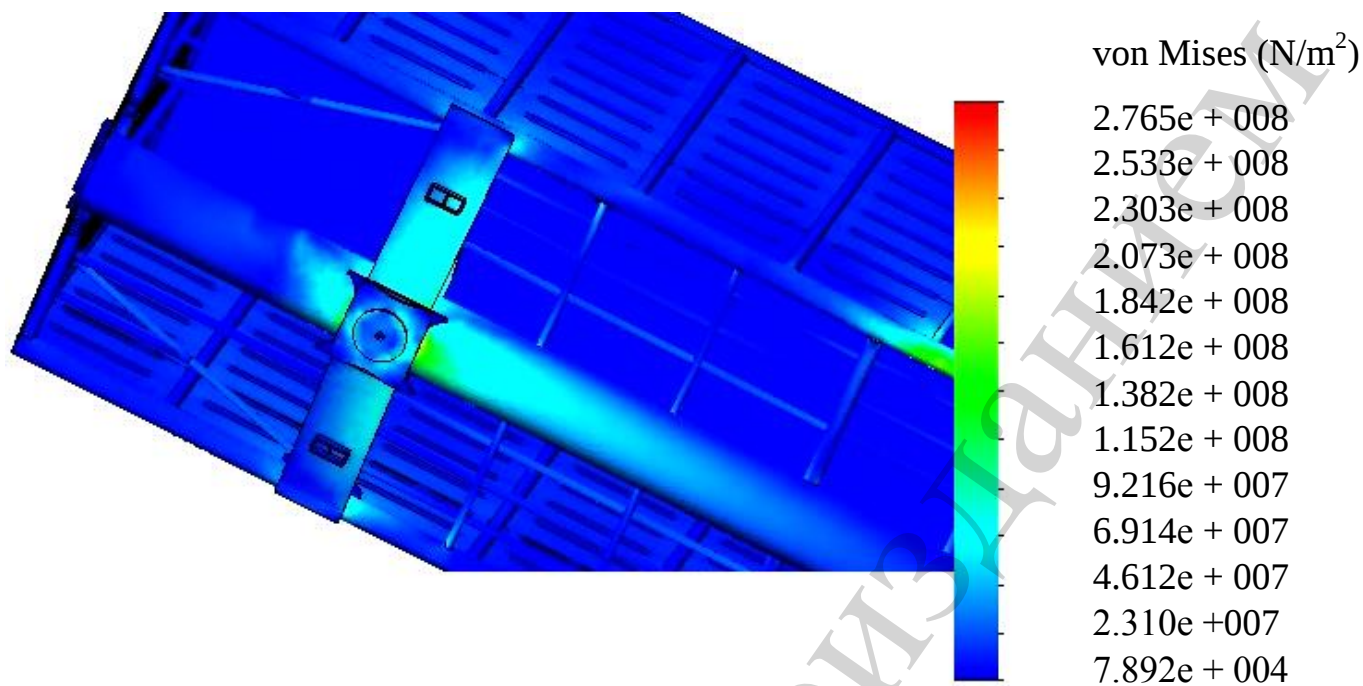


Рис. 11. Напружений стан несучої конструкції критого вагона у зоні взаємодії хребтової балки зі шворневою

З урахуванням закріплення несучої конструкції критого вагона відносно палуби за вузли для взаємодії з ланцюговими стяжками стає можливим знизити максимальні еквівалентні напруження в зонах закріплення кузова майже на 20 % у порівнянні з закріпленням за буксирні скоби (рис. 12).

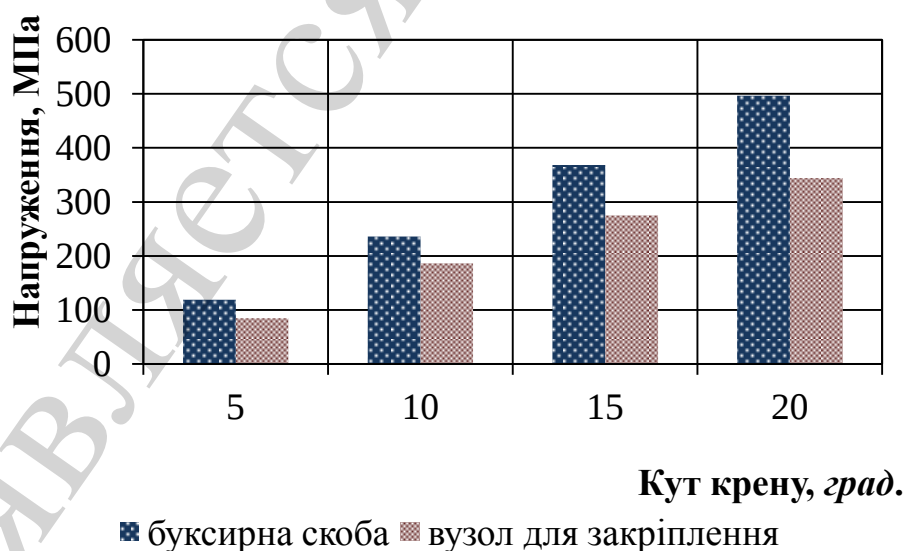


Рис. 12. Залежність максимальних еквівалентних напружень, що виникають у конструкційних елементах кузова вагона за які здійснюється закріплення відносно палуби від кута крену залізничного порому

З метою визначення проектного строку служби вузлів для закріплення ланцюгових стяжок на критому вагоні при перевезенні на залізничному поромі використана методика, наведена в [20]:

$$T_{\pi} = \frac{(\sigma_{-1Д} / [n]^m) \cdot N_0}{B \cdot f_{\text{в}} \cdot \sigma_{\text{ав}}^m}, \quad (4)$$

де $\sigma_{-1Д}$ – середнє значення границі витривалості деталі, МПа; n – допустимий коефіцієнт запасу міцності; m – показник ступеня кривої втоми; N_0 – база випробувань; B – коефіцієнт, який характеризує час безперервної роботи об'єкту в секундах; $f_{\text{в}}$ – ефективна частота динамічних напружень, с^{-1} ; $\sigma_{\text{ав}}$ – амплітуда еквівалентних динамічних напружень, МПа.

При проведенні розрахунків середнє значення границі витривалості вузла визначене як $0,5\sigma_T$ матеріалу (сталь марки 09Г2С). База випробувань склала 10^7 циклів (рекомендована база випробувань для сталі). Час безперервної роботи вузла склав $1,5 \cdot 10^6$ с. Ефективна частота динамічних напружень визначена на підставі параметрів збурюючої дії (морської хвилі) та для хвиль з періодом 9 с склала $0,1 \text{ с}^{-1}$. Допустимий коефіцієнт запасу міцності дорівнює 2. Показник ступеня кривої втоми прийнятий рівним 4. Амплітуда еквівалентних динамічних напружень визначена на підставі проведених розрахунків на міцність та склала близько 150 МПа у відповідності з [18, 19].

На підставі проведених розрахунків проектний строк служби вузла склав близько 5 років.

Необхідно зазначити, що визначений строк служби вузла для закріплення у дійсності буде мати більше значення, оскільки навантаження його здійснюватиметься за умови потрапляння залізничного порому в шторм. При нормальних умовах експлуатації (рух в штиль або невеликій бальності хвилювання моря), вузол для закріплення вагона відносно палуби буде навантажуватися тільки від зусилля натягіння ланцюгових стяжок, яке складає близько 54 кН.

З дотриманням відповідної системи технічного обслуговування та діагностування встановлений строк служби може бути збільшений.

10. Обговорення результатів визначення міцності кузова критого вагону при перевезенні на залізничному поромі

Проведені дослідження дозволили визначити уточнене значення динамічного навантаження, яке діє на несучі конструкції кузовів критих вагонів при перевезенні на залізничному поромі. Отримана величина динамічного навантаження перевищує ту, що діє на вагони при експлуатації відносно магістральних колій. Це пояснюється значним перевищенням параметрів збурюючої дії (морської хвилі) на кузова вагонів при перевезенні на залізничному поромі над експлуатаційними відносно рейок.

Розвиток конкурентного середовища на ринку транспортних послуг зумовлює необхідність впровадження в експлуатацію високоефективного рухомого складу, який може експлуатуватися при інтероперабельних перевезеннях. При

цьому рухомий склад, який експлуатується у міжнародному залізнично-водному сполученні, як важливому сегменту інтероперабельних перевезень, не адаптований до завданих експлуатаційних режимів навантажень. Це зумовлює пошкодження його несучих конструкцій та необхідність проведення внепланових видів ремонту. Тому на стадії проектування вагонів необхідно брати до уваги навантаження та схеми прикладення, які притаманні не тільки основним експлуатаційним режимам навантаження, а і при перевезенні на залізничних поромках. Крім того, для забезпечення безпеки експлуатації інтероперабельного рухомого складу важливим є його адаптація до надійної взаємодії з засобами закріплення відносно палуб залізничних поромів.

У зв'язку з цим проведено математичне моделювання динамічної навантаженості несучої конструкції кузова критого вагона з круглих труб при перевезенні на залізничному поромі. Особливістю використаної математичної моделі є можливість визначення динамічних навантажень, які діють на рухомий склад при перевезенні його різними за технічними характеристиками залізничними поромками. Також модель дозволяє враховувати різні гідрометеорологічні характеристики акваторії плавання залізничних поромів та курсові кути хвилі по відношенню до його корпусу.

Важливо зазначити, що наведена математична модель не враховує можливих власних переміщень несучих конструкцій кузовів вагонів відносно палуб. Тому в перспективі необхідним є проведення відповідних досліджень та уточнень. Також важливим етапом розвитку досліджень в даному напрямку є урахування гідрометеорологічних характеристик інших акваторій руху залізничних поромів, а також їх параметрів.

Проведені дослідження сприятимуть покращенню енергоефективності виготовлення критих вагонів в умовах вагонобудівних підприємств, зменшенню витрат на експлуатацію та ремонт, а також підвищенню ефективності функціонування критих вагонів у міжнародному сполученні.

11. Висновки

1. Розроблено удосконалену несучу конструкцію критого вагона. Особливістю вагона є те, що несучі елементи кузова виготовлені з труб круглого перерізу, що дозволило знизити масу тари критого вагона на 4 %. Для можливості перевезення вагона на залізничному поромі на ньому передбачені вузли для закріплення ланцюгових стяжок.

Визначено максимальну величину прискорення, яке діє на несучу конструкцію кузова критого вагона при перевезенні на залізничному поромі. Встановлено, що при кутовому переміщенні залізничного порому з вагонами на його борту навколо повздовжньої осі, як випадку найбільшої навантаженості конструкції, для крайнього від фальшборта вагону, розміщеного на верхній палубі, величина прискорення склала $2,4 \text{ м/с}^2$ ($0,24g$).

2. Визначено максимальні еквівалентні прискорення, які діють на несучу конструкцію кузова критого вагона шляхом комп'ютерного моделювання. Встановлено, що максимальні прискорення кузова критого вагона виникають у середніх частинах основних повздовжніх балок рами та складають близько

0,11 м/с² (0,01g), а з урахуванням складової прискорення вільного падіння – 2,18 м/с² (0,22g).

3. Проведено верифікацію розроблених моделей з використанням критерію Фішера. Результати розрахунку показали, що при дисперсії відтворюваності $S_y^2=2,48$ та дисперсії адекватності $S_{ад}^2=7,94$, фактичне значення критерію Фішера $F_p=3,2$. Отже гіпотеза про адекватність розробленої моделі не заперечується. Похибка апроксимації при цьому склала 10,6 %.

4. Визначено максимальні еквівалентні напруження, які виникають у несучій конструкції кузова критого вагона при перевезенні на залізничному поромі. Встановлено, що чисельне значення напружень не перевищує допустимі та складає близько 280 МПа. Максимальна величина переміщень в вузлах несучої конструкції кузова вагона склала 25,4 мм, деформації – $3,15 \cdot 10^{-3}$. Встановлено, що з урахуванням закріплення несучої конструкції критого вагона відносно палуби за вузли для взаємодії з ланцюговими стяжками стає можливим знизити максимальні еквівалентні напруження в зонах закріплення кузова майже на 20 % у порівнянні з закріпленням за буксирні скоби.

Література

1. Fomin O. V., Burlutsky O. V., Fomina Yu. V. Development and application of cataloging in structural design of freight car building // Metallurgical and Mining Industry. 2015. Issue 2. P. 250–256.
2. Determination of the dynamic characteristics of freight wagons with various bogie / Myamlin S., Lingaitis L. P., Dailydka S., Vaičiūnas G., Bogdevičius M., Bureika G. // TRANSPORT. 2015. Vol. 30, Issue 1. P. 88–92. doi: <https://doi.org/10.3846/16484142.2015.1020565>
3. Płaczek M., Wróbel A., Buchacz A. A concept of technology for freight wagons modernization // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 161. P. 012107. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/161/1/012107>
4. New Principle Schemes of Freight Cars Bogies / Gorbunov M., Gerlici J., Kara S., Nozhenko O., Chernyak G., Kravchenko K., Lack T. // Manufacturing Technology. 2018. Vol. 18, Issue 2. P. 233–238. doi: <https://doi.org/10.21062/ujep/83.2018/a/1213-2489/mt/18/2/233>
5. Sensitivity analysis to assess the influence of the inertial properties of railway vehicle bodies on the vehicle's dynamic behaviour / Suarez B., Felez J., Maroto J., Rodriguez P. // Vehicle System Dynamics. 2013. Vol. 51, Issue 2. P. 251–279. doi: <https://doi.org/10.1080/00423114.2012.725851>
6. Car body and bogie connection modification for track curves passability improvement / Hauser V., Nozhenko O. S., Kravchenko K. O., Loulová M., Gerlici J., Lack T. // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 157. P. 03009. doi: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201815703009>
7. Experimental confirmation of the theory of implementation of the coupled design of center girder of the hopper wagons for iron ore pellets / Fomin O., Kulbovsky I., Sorochinska E., Sapronova S., Bambura O. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 5, Issue 1 (89). P. 11–18. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109588>

8. Lovska A. Simulation of loads on the carrying structure of an articulated flat car in combined transportation // International Journal of Engineering & Technology. 2018. Vol. 7, Issue 4.3. P. 140–146
9. Dynamics of railway freight vehicles / Iwnicki S. D., Stichel S., Orlova A., Hecht M. // Vehicle System Dynamics. 2015. Vol. 53, Issue 7. P. 995–1033. doi: <https://doi.org/10.1080/00423114.2015.1037773>
10. Kim I. Y., de Weck O. L. Adaptive weighted sum method for multi-objective optimization: a new method for Pareto front // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2005. Vol. 31, Issue 2. P. 105–116. doi: <https://doi.org/10.1007/s00158-005-0557-6>
11. Lovska A. O. Computer simulation of wagon body bearing structure dynamics during transportation by train ferry // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2015. Vol. 3, Issue 7 (75). P. 9–14. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.43749>
12. Благовещенский С. Н., Холодилин А. Н. Справочник по статике и динамике корабля. Т. 2. Динамика (качка) корабля. Ленинград: Судостроение, 1976.
13. Луговский В. В. Динамика моря: избранные вопросы, связанные с изучением мореходности корабля. Ленинград: Судостроение, 1976. 199 с.
14. Дьяконов В. MATHCAD 8/2000: специальный справочник. СПб.: Питер, 2000. 592 с.
15. Кирьянов Д. В. Mathcad 13. СПб.: БХВ. Петербург, 2006. 608 с.
16. Наставление по креплению генеральных грузов при морской перевозке для т/х “Герои Шипки”. Cargo securing manual for m/v “Geroi Shipky” № 2512.02. Одесса, 1997. 51 с.
17. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). Москва, 1996. 319 с.
18. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. М.: Стандартинформ, 2016. 54 с.
19. The influence of implementation of circular pipes in load-bearing structures of bodies of freight cars on their physico-mechanical properties / Fomin O. V., Lovska A. O., Plakhtii O. A., Nerubatskyi V. P. // Scientific Bulletin of National Mining University. 2017. Issue 6. P. 89–96.
20. Устич П. А., Карпыч В. А., Овечников М. Н. Надежность рельсового нетягового подвижного состава. Москва, 1999. 415 с.