

Дослідження міцності контейнера-цистерни при перевезенні автотранспортом

А.О. Ловська¹

Received: 25 April 2023 / Revised: 20 August 2023 / Accepted: 10 September 2023

Анотація. *Проблематика.* Підвищення ефективності функціонування транспортної галузі зумовлює необхідність впровадження в експлуатацію сучасних транспортних засобів з покращеними технічними, економічними та екологічними характеристиками. В теперішній час перевезення наливних вантажів, в тому числі в міжнародному сполученні, здійснюється здебільшого

в контейнерах-цистернах. Тому для підвищення ефективності експлуатації контейнерів-цистерн важливе впровадження конструкцій з покращеними показниками.

Мета. Висвітлення результатів щодо удосконалення конструкції контейнера-цистерни та дослідження його міцності при перевезенні автотранспортом.

Методика реалізації. Для зменшення матеріалоемності контейнера-цистерни пропонується впровадження труб круглого перерізу у якості елементів каркасу та створення ємності з композитного матеріалу. Визначення параметрів виконання труб здійснено шляхом оптимізаційних розрахунків за критерієм мінімуму матеріалоемності. З метою визначення показників міцності удосконаленої конструкції контейнера-цистерни здійснено розрахунок за методом скінчених елементів, який реалізує програмний комплекс SolidWorks Simulation.

Результати. На підставі проведених розрахунків встановлено, що при підйомі контейнера за верхні кутові фітинги максимальні еквівалентні напруження, що виникають у вертикальних стійках каркаса дорівнюють 133,6 МПа, а в стінках ємності – 121,5 МПа, тобто є нижчими за допустимі. В умовах перевезень контейнера-цистерни автотранспортом максимальні напруження в його конструкції зафіксовані при дії на нього прискорення 1,2g у повздовжньому напрямку за ходом руху. Максимальні еквівалентні напруження в каркасі склали 202,4 МПа, а в стінках ємності – 123,2 МПа, тобто не перевищують допустимих значень.

Висновки. Проведені дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проєктування сучасних конструкцій контейнерів-цистерн та підвищенню ефективності експлуатації транспортної галузі.

Ключові слова: транспортна механіка; контейнер-цистерна; удосконалення конструкції; навантаженість конструкції; міцність; контейнерні перевезення.

Вступ

Забезпечення ефективності функціонування транспортної галузі зумовлює необхідність впровадження в експлуатацію сучасних транспортних засобів з покращеними техніко-економічними показниками [1–3]. Одними з найбільш перспективних транспортних засобів на сьогоднішній день є контейнери, що обумовлено

їх мобільністю та можливістю перевезень майже всіма видами транспорту. Для перевезень наливних вантажів, які складають значну частку вантажооберту у міжнародному сполученні, знайшли використання контейнери-цистерни.

Для підвищення ефективності експлуатації контейнерів-цистерн важливе впровадження конструкцій з покращеними технічними, експлуатаційними та екологічними показниками. Важливо сказати, що при створенні сучасних конструкцій контейнерів-цистерн необхідним є врахування навантажень, які можуть діяти на них при перевезенні різними транспортними засобами, в тому числі і автомобільним, оскільки на

✉ А.О. Ловська
alyona.vagons@gmail.com

¹ Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна

нього припадає значний сегмент контейнерних перевезень. Це сприятиме забезпеченню їх міцності в експлуатації, зменшенню витрат на виготовлення та утримання, підвищенню швидкості та безпеки перевезень тощо. Тому питання проектування та впровадження в експлуатацію сучасних конструкцій контейнерів-цистерн є досить актуальними.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Особливості розрахунку на міцність контейнера-цистерни висвітлюються в публікації [4]. Автором наводяться результати визначення відхилень рами та котла при експлуатаційних режимах навантаження. При цьому в роботі не запропоновано заходів щодо покращення показників міцності кузова-контейнера.

В публікації [5] висвітлюються результати випробування несучих конструкцій контейнерів під впливом низьких температур. До уваги прийнято два типи контейнерів – металеві та композитні. Проведені дослідження дозволили встановити, доцільність застосування завданого типу контейнеру для перевезень відповідної номенклатури вантажів. Однак при цьому авторами не обґрунтовано раціональність конструкції контейнера з точки зору забезпечення міцності.

Особливості визначення основних показників міцності контейнера-цистерни при деяких експлуатаційних режимах навантаження проводиться у роботі [6]. Розрахунок проведений за методом скінчених елементів, реалізованого в програмному пакеті DSMFem. Результати, отримані теоретичним шляхом, підтверджені експериментальними, що проведені за методом електричного тензометрування.

Дослідження динамічної навантаженості танк-контейнера при перевезенні автотранспортом, а також залізницею проводиться у публікації [7]. При проведенні розрахунків статичні умови моделюються з використанням опцій програмного забезпечення ANSYS. Визначено найбільш навантажені складові контейнера-цистерни при завданих умовах навантаження його конструкції. Разом з цим авторами не запропоновано заходів щодо покращення техніко-економічних показників контейнера-цистерни.

В публікації [8] авторами проводиться дослідження повздожньої навантаженості контейнера-цистерни з удосконаленими фітингами, розміщеного на вагоні-платформі при маневровому співударянні. Результати проведених досліджень довели доцільність застосування податливих зв'язків в фітингах для зменшення динамічної навантаженості контейнера-цистерни.

Визначення динамічної навантаженості контейнера у складі комбінованого поїзда при перевезенні залізничним поромом проводиться в роботі [9]. Запропоновано конструкцію вагона-платформи для покращення стійкості контейнерів при перевезенні їх морем. Визначено умови при яких дотримується безпека перевезень контейнерів. Однак у розглянутих роботах не

проводилося визначення навантаженості контейнера при перевезенні автотранспортним засобом, що повною мірою не дозволяє оцінити його міцність при експлуатаційних умовах навантаження.

В роботі [10] наведено результати скінчено-елементного моделювання міцності контейнера при різних розрахункових навантаженнях та умовах експлуатації. Результати моделювання дозволили встановити, що рівень безпеки експлуатації контейнера-цистерни дотримується.

Дослідження навантаженості контейнера-цистерни при перевезенні залізничним транспортом проводиться в публікації [11]. При цьому до уваги прийнято п'ять схем навантажень контейнера-цистерни. Визначено вплив інерційного навантаження на міцність контейнера-цистерни. Необхідно сказати, що у розглянутих публікаціях не запропоновано заходів щодо покращення показників міцності контейнерів-цистерн при експлуатаційних навантаженнях.

Аналіз літературних джерел [4–11] дозволяє зробити висновок, що питання визначення навантаженості контейнерів-цистерн при експлуатаційних режимах є досить актуальними. Однак враховуючи зростаючий попит на даний вид транспортного засобу виникає необхідність удосконалення конструкцій контейнерів-цистерн для підвищення ефективності їх експлуатації.

Метою статті є висвітлення результатів щодо удосконалення конструкції контейнера-цистерни та дослідження його міцності при перевезенні автотранспортом. Для досягнення зазначеної мети поставлені такі задачі:

- запропонувати удосконалену конструкцію контейнера-цистерни;
- дослідити міцність контейнера-цистерни при перевезенні автотранспортом.

Удосконалення конструкції контейнера-цистерни

Для підвищення ефективності експлуатації контейнера-цистерни запропоновано проведення удосконалення його конструкції. В якості прототипу обрано контейнер-цистерну моделі ТК25. Просторову модель контейнера-цистерни наведено на рис. 1. Він складається з каркасу та ємності. При цьому каркас виготовлений з труб прямокутного перерізу та включає вертикальні стійки, укоси та лапи з підкладними листами. Всі елементи каркасу взаємодіють між собою посередництвом зварювання. Для кріплення контейнера-цистерни на транспортному засобі, а також його переміщення за допомогою підйомно-транспортного устаткування він оснащений кутівими фітингами зі стандартними геометричними параметрами. Взаємодія ємності з каркасом здійснюється через чотири лапи на яких розміщуються підкладні листи. Завантаження контейнера-цистерни відбувається через люк-лаз, розміщений у верхній частині ємності. Розвантаження контейнера-цистерни здійснюється через злив

ний пристрій, який знаходиться під ємністю. Для технічного обслуговування контейнера-цистерни він оснащений трапами.

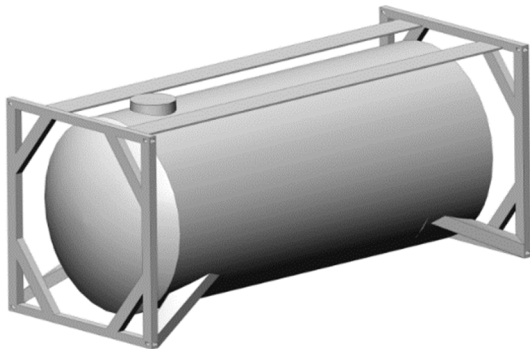


Рис. 1. Просторова модель контейнера-цистерни

З метою зменшення матеріалоемності контейнера-цистерни пропонується впровадження труб круглого перерізу у якості елементів каркасу [8] та створення ємності з композитного матеріалу.

При виборі діаметру труб з яких пропонується виготовлення каркасу контейнера-цистерни враховано геометричні розміри фітінгів. Тому в якості базового елемента обрано труби з зовнішнім діаметром 152 мм. З метою отримання оптимальної конструкції каркасу проведені оптимізаційні дослідження.

При складанні узагальнених математичних моделей, використана методика, наведена в роботі [8].

Отримані узагальнені математичні моделі мають вигляд:

$$m = -(7,013 \cdot 10^4) + (9,243 \cdot 10^2) \cdot D + 542,416 \cdot S - 3 \cdot D^2 + 2,048 \cdot S^2 - 3,6 \cdot D \cdot S; \quad (1)$$

$$l = -0,4537 + 0,00591 \cdot D + 0,0038 \cdot S - 1,916 \cdot D^2 - (2,3 \cdot 10^{-5}) \cdot S^2 - (2 \cdot 10^{-5}) \cdot D \cdot S; \quad (2)$$

$$\sigma = 22383,3 - 286,18 \cdot D - 181,77 \cdot S + 0,928858 \cdot D^2 + 1,1853 \cdot S^2 + 1,1146 \cdot D \cdot S, \quad (3)$$

де D – зовнішній діаметр труби, мм; S – товщина стінки труби, мм; m – маса конструкції, кг; l – деформації в конструкції; σ – напруження в конструкції, МПа. На підставі проведених досліджень зроблено висновок, що оптимальною з точки зору мінімальної маси є труба з зовнішнім діаметром 152 мм та товщиною стінки 3 мм. Даний результат підтверджено результатами розрахунку контейнера-цистерни на міцність та висвітлено у праці [12].

Для забезпечення міцності каркаса контейнера-цистерни в зоні взаємодії лапи з вертикальною стійкою, остання встановлюється на опорному елементі (рис. 2). Цей елемент має вид профільної труби з округленими кутами (рис. 3). Такий елемент був обраний з

точки зору технологічних міркувань, а саме геометричних параметрів фітінга контейнера на якому він розміщується.

З урахуванням запропонованого удосконалення каркасу його маса буде на 349 кг, тобто на 4%, легшою за прототип.

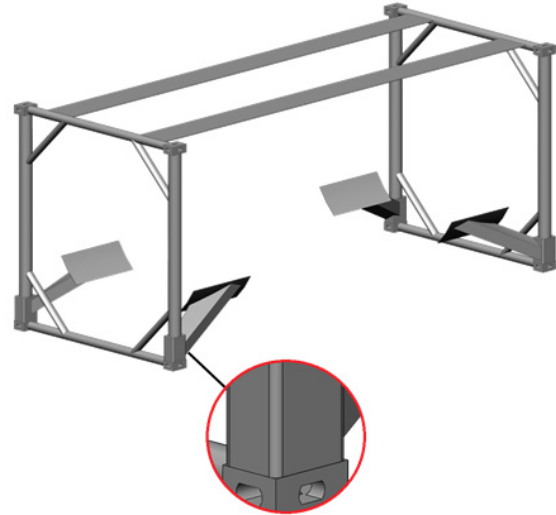


Рис. 2. Каркас контейнера-цистерни

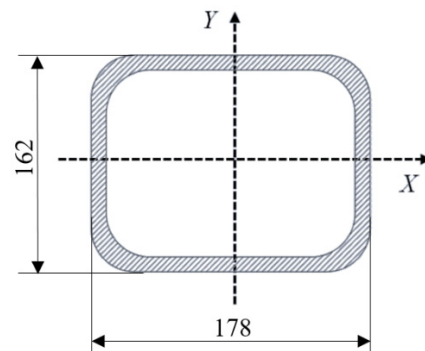


Рис. 3. Переріз опорного елемента для розміщення вертикальної стійки

Дослідження міцності контейнера-цистерни при перевезенні автотранспортом

Для можливості безпечного перевезення контейнера-цистерни автотранспортом проведено його розрахунок на міцність. Оскільки каркас виготовляється зі сталі, яка є ізотропним матеріалом, а ємність із композиту – ортотропний матеріал, то було проведено їх окремі розрахунки на міцність.

На першопочатковому етапі дослідження проведено визначення міцності контейнера-цистерни при завантаженні на автотранспорт. Розрахунок здійснено за методом скінчених елементів в програмному комплексі SolidWorks Simulation [13, 14]. В якості розрахункового використано критерій Мізеса. При переміщенні контейнера-цистерни підйомно-транспортним устаткуванням навантаження каркаса здійснюється через

верхні кутові фітинги. Тому при складанні його розрахункової схеми до верхніх кутових фітингів прикладалося вертикальне P_3^e та поздовжнє P_3^n навантаження від закріплювального стропа. Враховано, що він розміщується під кутом 45° по відношенню до кутових фітингів. Також до підкладних листів прикладалося вертикальне навантаження від ємності P_6^k (рис. 4).

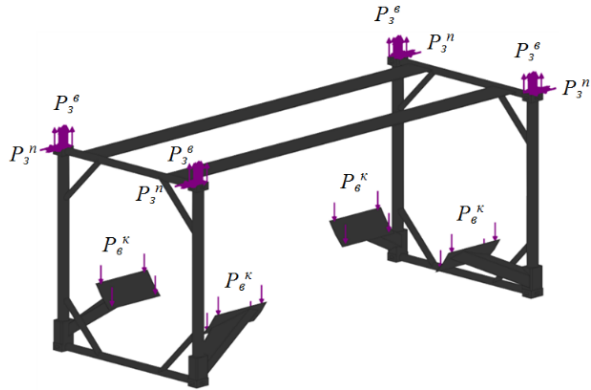


Рис. 4. Розрахункова схема каркаса

Для визначення оптимальної кількості елементів скінчено-елементної моделі використано графоаналітичний метод [15]. Метод заснований на графічному (геометричному) наведенні допустимих рішень та цільової функції задачі. Суть методу при розв'язку даної задачі полягає у побудові залежності максимальних еквівалентних напружень від кількості скінчених елементів. Коли ця залежність починає описуватися горизонтальною лінією, це є оптимумом кількості скінчених елементів. В якості елементів сітки застосовані тетраедри. Кількість елементів сітки склала 1499228, вузлів – 462071. Максимальний розмір елемента сітки дорівнює 10 мм, мінімальний – 2 мм. Матеріал конструкції сталь марки 09Г2С зі значенням межі міцності 490 МПа та межі плинності 345 МПа. Результати розрахунку показали, що максимальні еквівалентні напруження виникають в вертикальних стійках і дорівнюють 133,6 МПа, що нижче за допустимі [16, 17] (рис. 5).

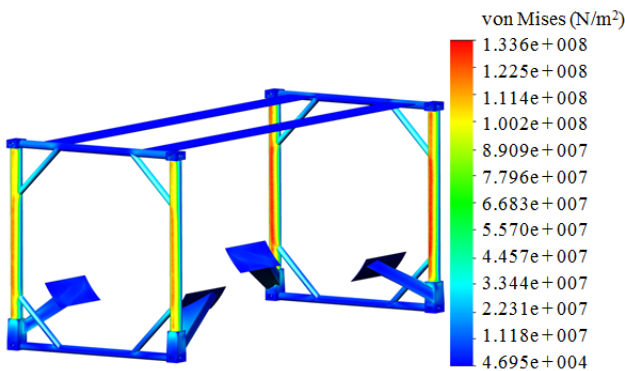


Рис. 5. Напружений стан каркаса контейнера-цистерни

При визначенні міцності ємності враховано, що він навантажений внутрішнім тиском від перевозимого вантажу P_p , а також вертикальним навантаженням P_6 (рис. 6). При проведенні розрахунків враховано максимально допустиму завантаженість ємності умовним вантажем. Величина тиску вантажу на внутрішню поверхню ємності прийнята рівною допустимій і склала 560 кПа.

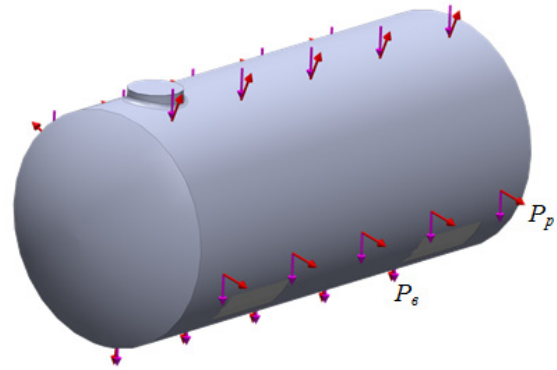


Рис. 6. Розрахункова схема ємності контейнера-цистерни

При визначенні міцності ємності використано критерій максимальних напружень [18]. Враховано, що ємність виготовлено із композитного матеріалу, який має лінійні пружні ортотропні властивості. Межа міцності в напрямку волокон складає 1100–1300 МПа, а в поперечному напрямку – 650 МПа. При складанні скінчено-елементної моделі використані тетраедри. Кількість елементів сітки склала 38714, вузлів – 13065. Максимальний розмір елемента сітки дорівнює 100 мм, мінімальний – 20 мм. Результати розрахунку показали, що максимальні напруження в стінках ємності виникають відносно осі Y та складають 121,5 МПа, що нижче за допустимі [16, 17] (рис. 7).

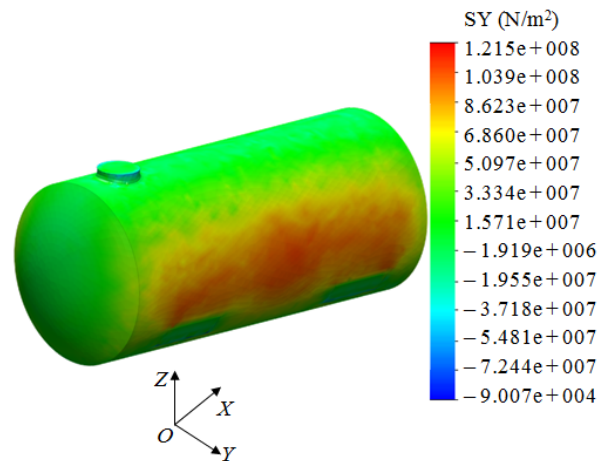


Рис. 7. Напружений стан ємності контейнера-цистерни

При визначенні міцності контейнера-цистерни з урахуванням перевезення його на автотранспорті враховується, що прискорення, яке діє на контейнер у повздовжньому напрямку за ходом руху складає $1,2g$, проти ходу руху – $0,8g$, у поперечному напрямку – $0,5g$. При проведенні розрахунків на міцність контейнера-цистерни не враховано переміщень наливного вантажу у ємності.

Для визначення міцності каркасу контейнера-цистерни з урахуванням його навантаженості за ходом руху транспортного засобу складено розрахункову схему, наведену на рис. 8. При цьому враховано, що на нижні кутові фітинги діє навантаження P_n , обумовлене прискоренням $1,2g$, а на підкладні листи – вертикальне навантаження P_{ϵ}^k .

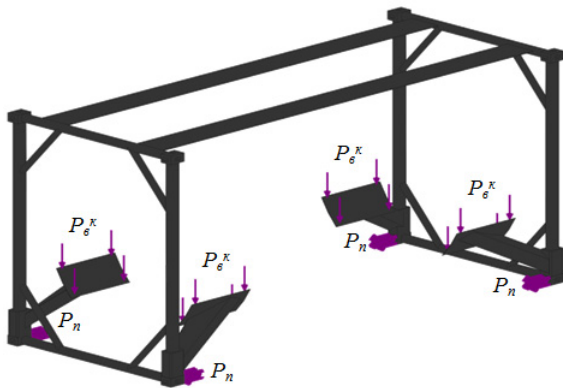


Рис. 8. Розрахункова схема каркаса контейнера-цистерни

З урахуванням цього максимальні еквівалентні напруження в каркасі склали $202,4$ МПа, тобто не перевищують допустиме значення [16, 17] (рис. 9).

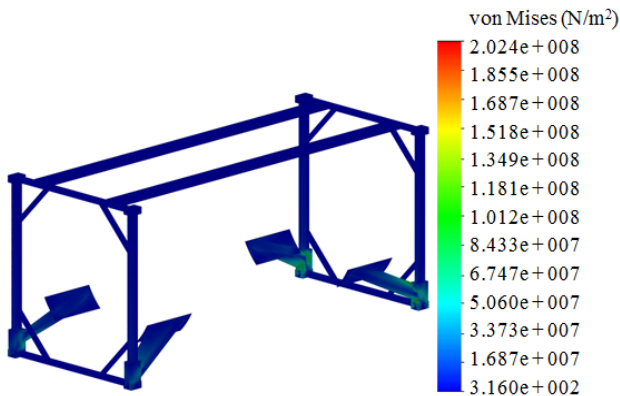


Рис. 9. Напружений стан каркаса контейнера-цистерни

При розрахунку на міцність ємності враховано, що вона навантажена робочим тиском від перевозимого вантажу P_p , вертикальним навантаженням P_{ϵ} , а

також повздовжнім P_n (рис. 10). При цьому з внутрішнього боку ємності до стінок прикладався тиск P_T від сили ваги вантажу (на рис. 10 не показаний), розподілений за лінійним законом з максимумом в нижній частині ємності та рівним нулю – у верхній.

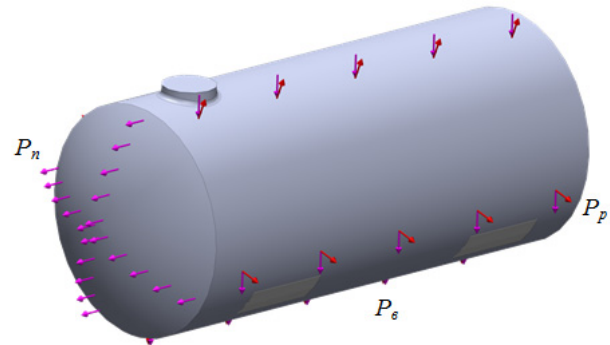


Рис. 10. Розрахункова схема ємності контейнера-цистерни

Встановлено, що максимальні напруження в ємності виникають відносно осі X та дорівнюють $123,2$ МПа, що нижче за допустимі [16, 17] (рис. 11).

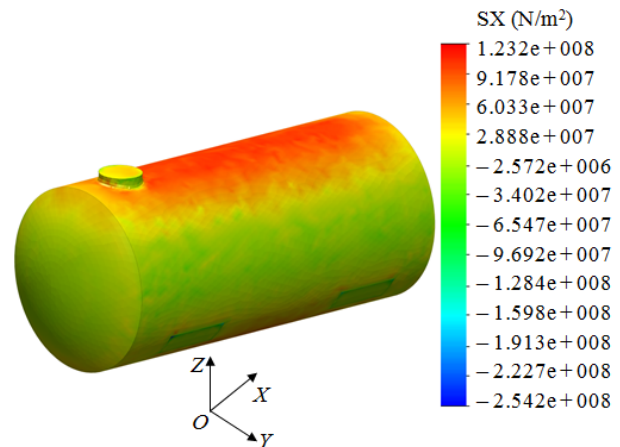


Рис. 11. Напружений стан ємності контейнера-цистерни

Також розрахунок проведений і за умови навантаження ємності в повздовжньому проти ходу руху напрямку, а також поперечному. При цьому максимальні напруження при навантаженні контейнера-цистерни в повздовжньому проти ходу руху транспортного засобу напрямку склали: каркас – $167,4$ МПа, ємність – $108,3$ МПа; в поперечному напрямку: каркас – $187,6$ МПа, ємність – $115,4$ МПа. Отже міцність контейнера-цистерни при перевезенні автотранспортом забезпечується.

Наступним етапом дослідження буде визначення міцності контейнера-цистерни з урахуванням навантажень, які діють на нього при перевезенні залізничним та морським транспортом.

Висновки

1. Запропоновано удосконалену конструкцію контейнера-цистерни з композитною ємністю. З метою зменшення матеріалоемності каркасу контейнера-цистерни запропоновано використання у якості його складових труб круглого перерізу. Встановлено, що удосконалена конструкція каркасу контейнера-цистерни буде на 349 кг легшою за прототип.

2. Досліджено міцність контейнера-цистерни при перевезенні автотранспортом. Встановлено, що при підйомі контейнера за верхні кутові фітинги максимальні еквівалентні напруження, що виникають у

вертикальних стійках каркаса дорівнюють 133,6 МПа, а в ємності – 121,5 МПа, тобто є нижчими за допустимі.

При перевезенні контейнера-цистерни автотранспортом максимальні напруження в його конструкції зафіксовані при дії на нього прискорення 1,2g у поздовжньому напрямку за ходом руху. Максимальні еквівалентні напруження в каркасі склали 202,4 МПа, а в ємності – 123,2 МПа, тобто не перевищують допустимих значень.

Проведені дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування сучасних конструкцій контейнерів-цистерн та підвищенню ефективності експлуатації транспортної галузі.

References

- [1] P. Šťastniak *et al.*, “Structural Analysis of a Main Construction Assemblies of the New Wagon Prototype Type Zans,” *Manufacturing Technology*, Vol. 18, No. 3. pp. 510–515. 2018.
- [2] A. Lovska *et al.*, “Calculation of loads on carrying structures of articulated circular-tube wagons equipped with new draft gear concepts,” *Applied Sciences*, Vol. 10(21), 7441, 2020. DOI: 10.3390/app10217441
- [3] S. Slavchev *et al.*, “STATIC Strength Analysis of the Body of A Wagon, Series Zans,” *Journal of the Balkan Tribological Association*, Vol. 21. No. 1. pp. 38–57. 2015.
- [4] Rudraprasad Bhattacharyya and Abhishek Hazra. “A study on Stress analysis of ISO tank container,” *58th Congress of The Indian Society of Theoretical and Applied Mechanics*, pp. 1–5, 2013.
- [5] J. Föhr *et al.*, “Metal and Composite Intermodal Containers in Comparative Cold Tests with Wood Chips,” *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, Vol. 05, Iss. 01, pp. 32–39, 2015. DOI: 10.4236/jsbs.2015.51003
- [6] E. Lisowski and W. Czyzycki, “Transport and storage of LNG in container,” *Journal of KONES Powertrain and Transport*, Vol. 18, Iss. 3, pp. 193–210, 2011.
- [7] S. Tiernan and M.Fahy, “Dynamic FEA modelling of ISO tank containers,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 124(1), pp. 126–132. 2002.
- [8] O. Fomin *et al.*, “Dynamic load modelling for tank containers with the frame of circle pipes and structurally improved fittings,” *E3S Web of Conferences*, Vol. 166, 07001, 2020. DOI:10.1051/e3sconf/202016607001
- [9] A. Lovska *et al.*, “Dynamic load modelling within combined transport trains during transportation on a railway ferry,” *Applied Sciences*, Vol. 10(16), 5710, 2020. DOI:10.3390/app10165710
- [10] T. Muttaqie *et al.*, “Structural Strength Assessment of 20-ft LNG ISO Tank: an Investigation of Finite Element Analysis and ASME Design Guidance,” *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 972, 012015, 2022. DOI:10.1088/1755-1315/972/1/012015
- [11] Zhiqiang Wang and Caifu Qian, “Strength analysis of LNG tank container for trains under inertial force,” *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1549, 032107, 2020. DOI:10.1088/1742-6596/1549/3/032107
- [12] A. Lovska, “Development of scientific foundations for calculating wagon structures by taking into account the above-norm cases of their operation”:dis ... Dr. technical Sciences: 05.22.07. Kharkiv: UkrSURT, 2021. 406 p.
- [13] A. Lovska, “Viznachennya navantazhenosti kontejnera, rozmishenogo na vagoni-platformi pri pruzhno-v'yazkij vzayemodiyi fittingiv z fittingovimi uporami,” *Zbirnik naukovih prac UkrDUZT*, Vol. 184, pp. 6–19, 2019.
- [14] A. Lovska, “Viznachennya stijkosti kontejnera-cisterni vidnosno rami vagona-platformi pri perevezenni na zaliznichnomu poromi”, *Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovskogo nacionalnogo universitetu zaliznichnogo transportu imeni akademika V. Lazaryana*, Vol. 1(79), pp. 139–150, 2019.
- [15] G. Vatulia *et al.*, “Simulation of performance of circular CFST columns under short-time and long-time load,” *MATEC Web of Conferences*, Vol. 116, 02036, 2017. DOI:10.1051/matecconf/201711602036
- [16] DSTU 7598:2014, *Vagoni vantazhni. Zagalni vimogi do rozrahunkiv ta projektuvannya novih i modernizovanih vagoniv kolyi 1520 mm (nesamohidnih)*. Kyiv, 2015.
- [17] EN 12663–2, *Railway applications - structural requirements of railway vehicle bodies – Part 2: Freight wagons*. Bulgaria, 2010.
- [18] A. Kondratiev, “Improving the mass efficiency of a composite launch vehicle head fairing with a sandwich structure,” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 6, No. 7(102), 2019. DOI:10.15587/1729-4061.2019.184551

Investigation of the strength of a tank container during road transport

A. Lovska¹

¹ Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine

Abstract. Background. Increasing the efficiency of the transport industry leads to the need to introduce modern means of transport with improved technical, economic and environmental characteristics. At present, transportation of liquid cargoes, including those in international traffic, is carried out mainly in tank containers. Therefore, in order to increase the efficiency of tank containers operation it is important to introduce designs with improved performance.

Objective. Highlighting the results of improvements to the tank-container design and a study of its strength in road transport.

Methods. In order to reduce the material intensity of the tank container, it is proposed to use pipes of circular cross section as frame elements and to create a boiler of composite material. Determination of pipe design parameters has been carried out by optimisation calculations according to material intensity minimum criterion. In order to define strength properties of improved tank-container design the calculation by finite element method has been made which has been implemented by SolidWorks Simulation software.

Results. On the basis of the made calculations it is established that at lifting of the container for top corner fittings the maximum equivalent pressure arising in vertical racks of a skeleton are equal 133,6 MPa, and in a boiler – 121,5 MPa, that is below allowed. Under conditions of tank-container transportation by motor transport the maximum stresses in its structure are fixed at influence on it of acceleration 1,2g in a longitudinal direction on a course of movement. The maximum equivalent stresses in the frame were 202.4 MPa, and in the boiler – 122.2 MPa, i.e. do not exceed permissible values.

Conclusions. The research carried out will contribute to the development of the design of modern tank container designs and improve the operational efficiency of the transport industry.

Keywords: transport mechanics; tank-container; design improvement; structural loading; strength; container transport.