

УДК 629.463.32

УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ КІНЦЕВИХ ОПОРНИХ ПРИБОРІВ ВАГОНІВ-ЦИСТЕРН

Павлюченко М.В., Бобрицький С.В., Сумцов А.Л.

IMPROVING THE BRACKET SUPPORT STRUCTURES OF TANK WAGONS

Pavliuchenkov M., Bobrytskyi S., Sumtsov A.

Для перевезення небезпечних вантажів на залізничному транспорті застосовуються вагони-цистерни. Внесенням конструктивних змін може бути досягнутий ефект зниження максимальних напружень, а за рахунок цього і покращення техніко-економічних показників вагона-цистерни. Для дослідження напружено-деформованого стану цистерни створена розрахункова скінченно-елементна модель. Вона використана для чисельних досліджень по виявленню найбільш раціональної конструкції кінцевого опорного пристрою. Для найефективнішого варіанту проведено порівняння з існуючою конструкцією. Показано закони зміни жорсткостей в радіальному напрямку та закони зміни контактної тиску. Конструкція з запропонованим удосконаленням перевірена на спектр навантажень згідно з нормативними документами.

Ключові слова: вагон-цистерна, котел, метод скінченних елементів, опорний пристрій, напружено-деформований стан, еквівалентні напруження, контактний тиск.

Вступ. Для перевезення небезпечних вантажів на залізничному транспорті застосовуються вагони-цистерни, за допомогою яких нафтопродукти безпечно та якісно доставляються замовнику. Умови експлуатації транспортних засобів пред'являють підвищені вимоги до міцності існуючих і нових конструкцій цистерн. Роботи по прогнозуванню, усуненню слабких місць і продовженню терміну служби резервуарних вагонів повинні виконуватися з урахуванням нових досягнень в області дослідження міцності, безвідмовності і довговічності [1, 2].

Дослідження, які проводилися провідними організаціями в галузі рухомого складу, свідчать, що напруження обумовлені дією опорного тиску складають 70-90 % від максимальних напружень, які виникають в котлі цистерни [3]. Спостереження показують, що на котлах цистерн для рідких вантажів, тріщини оболонки в опорних зонах починають проявлятися з особливою інтенсивністю після 10-12 років експлуатації [4]. Тріщини, як правило, мають утомний характер.

Нині в конструкції вагонів практично повністю використаний простір габариту по ширині та висоті, тому подальше збільшення об'єму кузова можливо лише за рахунок збільшення його довжини, що призводить до збільшення тари вагона та до зменшення вантажопідйомності при збереженні осьового навантаження.

$$P \leq q_o m_o - T ; \quad (1)$$

де P – вантажопідйомність вагона, т;
 q_o – допустиме осьове навантаження вагона, т;
 m_o – кількість осей вагона, шт;
 T – тара вагона, т.

Так як добуток $q_o m_o$ не може перевищувати свого максимального значення, тому подальше збільшення вантажопідйомності можливе лише за рахунок зменшення тари вагона.

Аналіз результатів дослідження структури матеріалоемності конструкції вагонів-цистерн вказує на доцільність зниження загальної матеріалоемності вагону-цистерни за рахунок зниження маси окремого вузла вагону. Це потребує проведення оптимізаційного проектування елементів конструкції окремого вузла вагону за критерієм мінімальної матеріалоемності та перевірки конструкції вагону-цистерни на міцність.

Мета статті. Внесенням конструктивних змін, які спрямовані на перерозподіл навантажень і напружень у небезпечних зонах може бути досягнутий ефект зниження максимальних напружень, а за рахунок цього і покращення техніко-економічних показників вагона-цистерни. Завданням дослідження є: запропонувати варіанти удосконалення конструкції кінцевих опорних пристроїв котла вагона-цистерни; виконати оптимізацію геометричних розмірів складових опорного пристрою вагона-цистерни з метою зниження матеріалоемності, визначити напружено-деформований стан (НДС) запропонованих кінцевих

опорних пристроїв та кузова вагона-цистерни взагалі на спектр навантажень згідно з нормативними документами.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сьогодні метод скінченних елементів є одним з найбільш ефективних чисельних методів дослідження міцності і деформативності вагонів-цистерн [5]. Для проведення досліджень НДС цистерни створена розрахункова скінченно-елементна модель (РСЕМ) [6]. Для перевірки адекватності РСЕМ результати розрахунку на моделі порівнювались з аналітичними та експериментальними значеннями.

У рамній конструкції вітчизняних вагонів-цистерн кріплення котла на рамі здійснюється в середніх і кінцевих його частинах. По кінцях котел спирається на дерев'яні бруски, які розташовані у лежнях кінцевих опорних пристроїв. Кінцеві опорні пристрої розташовані на шворневих балках. Шворневі балки виконані у вигляді коробчастого перерізу змінної висоти по довжині. Опори під лежні виконані зварною конструкцією із металевих листів у вигляді відкритої коробки, для жорсткості якої вертикальні листи пов'язані усередині діафрагмами.

Контактний тиск від опорного пристрою на оболонку безпосередньо залежить від зміни жорсткості опори в радіальному напрямку. У більш жорсткішій опорі відбувається «відрив» оболонки в середній частині і тому навантаження переміщується до кінців опори в радіальному напрямку. Жорсткість (контактний тиск) опорного пристрою повинна зменшуватись від середини до кінців в радіальному напрямку.

Недоліком наявної опори є її жорсткість. У конструктивному виконанні опори присутні три горизонтальних пояси, які між собою посилені двома вертикальними. Така схема є досить жорсткою, незалежно від товщини листів, які використовуються. При навантаженні в вертикальних і горизонтальних листах конструкції опори виникають напруження набагато менші в порівнянні з місцями з'єднання шворневої балки з хребтовою, швелерів з вертикальними діафрагмами. Також є невелика так звана «робоча площа» опирання котла на опору. Ширина площі відповідає відстані між вертикальними діафрагмами. Діафрагми розташовані перпендикулярно до твірної котла, тому в опорних місцях з'являються концентратори напружень. У зв'язку з високими напруженнями в котлах цистерн в опорних місцях спостерігаються відхилення від правильної геометричної форми – вм'ятини. Ці вм'ятини часом настільки великі, що спостерігається опускання консольної частини оболонки до торкання з хребтовою балкою.

Для розв'язання поставленої задачі виконано дослідження для пошуку оптимальної конструкції опорного пристрою, запропоновано нові варіанти

конструкцій [7, 8, 9] та визначено найбільш ефективнішу конструкцію (рис. 1).

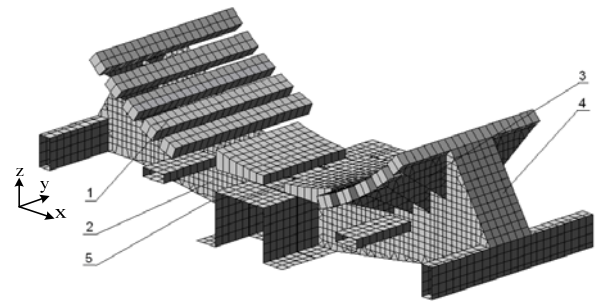


Рис. 1. Схема консольного опорного пристрою:
1 – опорний елемент; 2 – діафрагма; 3 – ребро жорсткості;
4 – похилий лист; 5 – шворневий лист

Для визначення закону розподілу опорного тиску від опорного пристрою на котел цистерни проведено зміни в РСЕМ вагонів-цистерн. У зонах контакту оболонки з опорними брусками між ними введені двовузлові стержневі скінченні елементи. При розрахунку РСЕМ вагонів-цистерн отримані значення поздовжніх зусиль у стержневих елементах, на основі яких побудовані залежності зусиль у стержнях від місця їх розташування в коловому напрямку. На основі отриманих даних визначений закон розподілу опорного тиску в середній частині опорного пристрою в напрямку твірної котла цистерни (рис. 2).

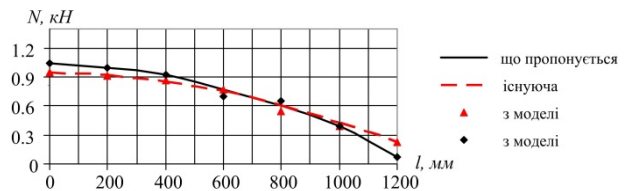


Рис. 2. Графік залежності опорного тиску в коловому напрямку в середній частині кінцевого опорного пристрою

Отримано закони зміни жорсткостей у радіальному напрямку та закони зміни контактного тиску. У запропонованому варіанті вони більше зменшуються до своїх кінців, що позитивно впливає на НДС котла цистерни.

Конструкція з запропонованим удосконаленням перевірена на навантаження згідно з I та III розрахунковими режимами [10]. Аналіз результатів показує, що максимальні напруження не перевищують допустимі.

Для всіх типів вагонів при проектуванні необхідно враховувати основні розрахункові сили, які прикладають до вагону при його ремонті. Результати розрахунку для запропонованої конструкції показують, що максимальні еквівалентні напруження (рис. 3) не перевищують допустимі значення, а найбільші знаходяться в межах 250 МПа (рис. 3, в).

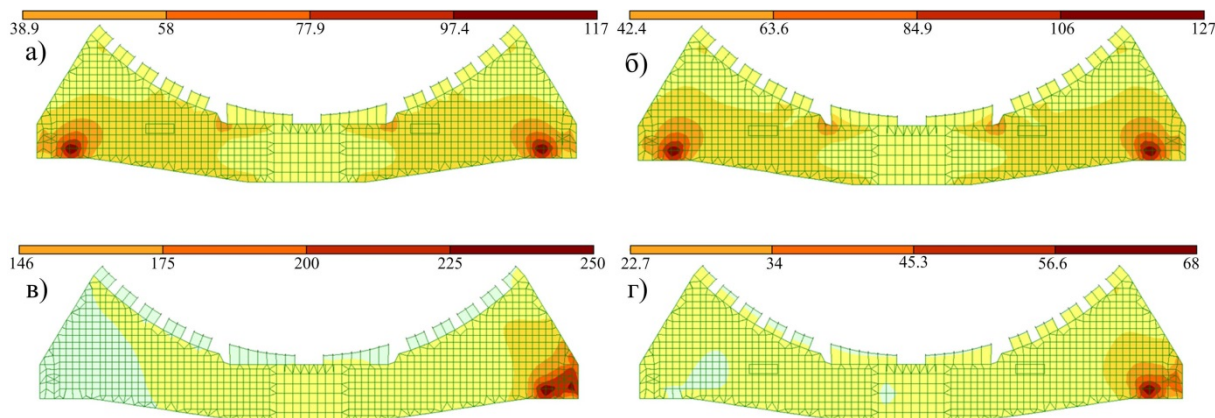


Рис. 3. Результати еквівалентних напружень в консольній опорі при різних варіантах обпирання рами вагона-цистерни: а – підйом завантаженого вагона під кінці шворневої балки з одного боку рами вагона; б – підйом завантаженого вагона під кінці шворневих балок з обох боків рами вагона; в – підйом завантаженого вагона під один кінець шворневої балки; г – підйом порожнього вагона під кінці шворневих балок, розташованих по діагоналі

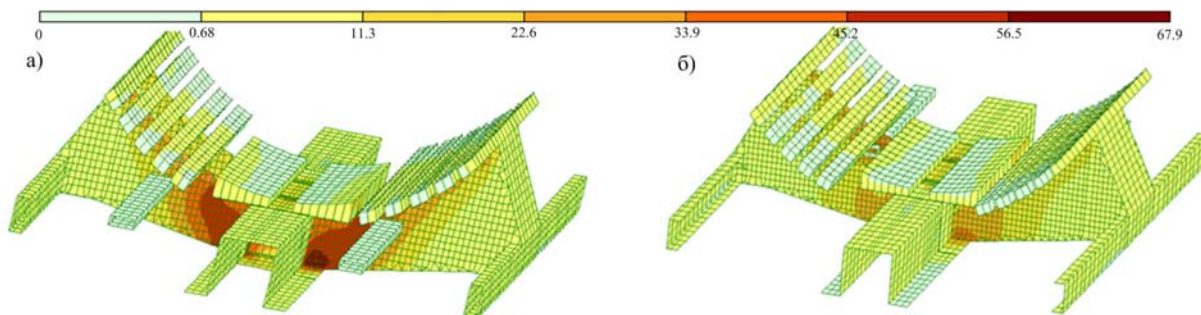


Рис. 4. Ізополю еквівалентних напружень в кінцевій опорі з урахуванням динамічної дії в вертикальній площині при завантаженому кузові та швидкості руху 100 км/год: а – вид з боку автозчепи; б – вид з середньої частини вагону

Для проведення розрахунків на динамічні навантаження, на основі досвіду розроблених моделей [11, 12] в програмному продукті Mathcad створена математична модель. Для спрощення моделі прийнято, що котел цистерни повністю заповнений рідким вантажем. Величина максимальних амплітуд приймається у залежності від стану колії. По результатам розрахунків отримані графіки залежності прискорень кузова від часу.

При розрахунках для урахування інерційних добавок від вертикальних коливань мас вагону – кузова вагона-цистерни – в ПК «Ліра» задаються характеристики для розрахунку на динамічні дії. Вибирається найменшання дії – «акселерограма» – та вводяться дані графіку залежності прискорення кузова в центрі мас від часу. Після закінчення розрахунків, програма вибирає форми коливань, при яких виникають найбільші напруження. Наступним кроком є опція складання напружень від дії статичних та динамічних навантажень, в результаті отримаємо сумарні еквівалентні напруження (рис. 4). Аналіз результатів показує, що максимальні напруження від вертикальних коливань мас вагону становлять 68 МПа і не перевищують допустимі значення, які дорівнюють 195 МПа.

Висновки. Перспективним напрямком поліпшення техніко-економічних показників вагона-цистерни є удосконалення конструкції кінцевих опорних пристроїв на основі результатів досліджень впливу контактного тиску та жорсткості опорних пристроїв на НДС кузова вагона-цистерни. Перевірена конструкція з запропонованим удосконаленням на спектр навантажень згідно з нормативними документами. Результати проведених досліджень, запропоновані та обґрунтовані конструкції опорного пристрою вагона-цистерни рекомендовано для практичного використання ТОВ «Головним спеціалізованим конструкторським бюро вагонобудування ім. В.М. Бубнова».

Л і т е р а т у р а

1. Fomin O. The influence of implementation of circular pipes in load-bearing structures of bodies of freight cars on their physico-mechanical properties / A. Lovska, O. Plakhtii, V. Nerubatskyi // Natsional'nyi Hirnychi Universytet. Naukovi Visnyk – vol. 6, 2017 – pp. 89-96.
2. Zaripov Ramis. Research Opportunities to Improve Technical and Economic Performance of Freight Car through the Introduction of Lightweight Materials in their Construction / R. Zaripov, P. Gavrilovs // 10th International Scientific Conference Transbaltica 2017:

- Transportation Science and Technology – Procedia Engineering – Vol. 187, 2017 – pp.22-29.
3. Котуранов В.Н. Нагруженность элементов конструкции вагонов / В.Н. Котуранов. – М.: Транспорт, 1991. – 238 с.
 4. Boyko A. Influence of barrel damages on life time of tank wagon / A. Boyko // 8th International DAAAM Baltic Conference: "Industrial Engineering 19-21 April 2012, Tallinn, Estonia. – pp. 21-26.
 5. Razaghi Reza. Investigating the effect of sloshing on the energy absorption of tank wagons crash // R. Razaghi, M. Sharavi, M. Feizi / Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering – Vol.39, No2, 2015 – pp.187-200.
 6. Павлюченков М.В. Скінченно-елементна модель вагона-цистерни для оцінювання напружено-деформованого стану / М.В. Павлюченков // Рухомий склад та спеціальна техніка залізничного транспорту: зб. наук. праць. / Харків: УкрДАЗТ, 2009. – Вип. 108. – С. 131–135.
 7. Ломотько Д.В. Компьютерное моделирование опорных устройств вагонов-цистерн / Д.В. Ломотько, Г.Л. Ватуля, М.В. Павлюченков // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании'2012: сб. науч. тр. SWorld. – Одесса: Транспорт, 2012. – Том 2. – С. 42-46.
 8. Мартинов І.Е. Оптимізація опорного пристрою вагона-цистерни / І.Е. Мартинов, М.В. Павлюченков // Зб. наук. праць Української державної академії залізничного транспорту. – Харків: УкрДАЗТ, 2013. – Вип 138. – С. 221–225.
 9. Павлюченков М.В. Рационалізація конструкції опорних пристроїв вагонів-цистерн для рідких вантажів / М.В. Павлюченков // Наука и прогресс транспорта: вестник Днепропетровского национального университета же-лезнодорожного транспорта. – Дніпропетровськ: ДПТ, 2014. – №1 (49). – С. 151–159.
 10. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам / Минск: Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации.
 11. Богомаз Г.И. Динамика железнодорожных вагонов-цистерн / Г.И. Богомаз. – Киев: Наук. думка, 2004. – 223 с.
 12. Дьомін Ю.В. Основи динаміки вагонів: навчальний посібник / Ю.В. Дьомін, Ю.Г. Черняк. – К.: КУЕТТ, 2003. – 270 с.
 4. Boyko A. Influence of barrel damages on life time of tank wagon / A. Boyko // 8th International DAAAM Baltic Conference: "Industrial Engineering 19-21 April 2012, Tallinn, Estonia. – pp. 21-26.
 5. Razaghi Reza. Investigating the effect of sloshing on the energy absorption of tank wagons crash // R. Razaghi, M. Sharavi, M. Feizi / Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering – Vol.39, No2, 2015 – pp.187-200.
 6. Pavliuchenkov M.V. Finite element model of the tank wagon for stress deformed state estimation / M.V. Pavliuchenkov // Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoi derzhavnoi akademii zaliznychnogo transportu. Kharkiv: UkrDAZT, 2009. – Issue 108. – pp. 131 – 135.
 7. Lomotko D.V. Computer simulation of the support device of rail tank cars / D.V. Lomotko, G.L. Vatulja, M.V. Pavliuchenkov // Sovremennyye problemy i puti ih resheniya v nauke, transporte, proizvodstve i obrazovanii'2012: Sbornik nauchnykh trudov SWorld. - Odessa: Transport, 2012. – Vol. 2. – pp. 42-46.
 8. Martynov I.E. Optimization of the support structure of a tank wagon / I.E. Martynov, M.V. Pavliuchenkov // Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoi derzhavnoi akademii zaliznychnogo transportu. Kharkiv, UkrDAZT, 2013. – Issue 138. – pp. 221 – 225.
 9. Pavliuchenkov M.V. Rationalization of support structures of tank wagons for liquids / M.V. Pavliuchenkov // Nauka i progress transporta: Vestnik Dnepropetrovskogo natsionalnogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta. Dnipropetrovsk, DIIT, 2014. – Issue №1 (49). – pp. 151 – 159.
 10. GOST 33211-2014. Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam / Minsk: Evraziyskiy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii.
 11. Bogomaz G.I. Dynamics of rail tank wagons / G.I. Bogomaz // Kiev, Nauk. dumka, 2004. – 223 p.
 12. Diomin Yu.V. Basics of wagon dynamics: tutorial / Yu.V. Diomin, Yu.V. Cherniak // Kyiv, KUETT, 2003. – 270 p.

References

1. Fomin O. The influence of implementation of circular pipes in load-bearing structures of bodies of freight cars on their physico-mechanical properties / A. Lovska, O. Plakhtii, V. Nerubatskyi // Natsional'nyi Hirnychi Universytet. Naukovyi Visnyk – vol. 6, 2017 – pp. 89-96.
2. Zaripov Ramis. Research Opportunities to Improve Technical and Economic Performance of Freight Car through the Introduction of Lightweight Materials in their Construction / R. Zaripov, P. Gavrilovs // 10th International Scientific Conference Transbaltica 2017: Transportation Science and Technology – Procedia Engineering – Vol. 187, 2017 – pp.22-29.
3. Koturanov V.N. Loading upon wagon structure elements / V.N. Koturanov // Moscow, Transport Publ., 1991. – 238 p.

Павлюченков М.В., Бобрицкий С.В., Сумцов А.Л. Усовершенствование конструкции концевых опорных устройств вагонов-цистерн.

Для перевозки опасных грузов на железнодорожном транспорте применяются вагоны-цистерны. Внесением конструктивных изменений может быть достигнут эффект снижения максимальных напряжений, а за счет этого и улучшение технико-экономических показателей вагона-цистерны. Для исследования напряженно-деформированного состояния цистерны создана расчетная конечно-элементная модель. Она применена для численных исследований по выявлению наиболее рациональной конструкции концевого опорного устройства. Для наиболее эффективного варианта проведено сравнение с существующей конструкцией. Показано законы изменения жесткостей в радиальном направлении и законы изменения контактного давления. Конструкция с предложенным усовершенствованием проверена на спектр нагрузок в соответствии с нормативными документами.

Ключевые слова: вагон-цистерна, котел, метод конечных элементов, опорное устройство, напряженно-деформированное состояние, эквивалентные напряжения, контактное давление.

Pavliuchenkov M.V., Bobrytskyi S.V., Sumtsov A.L.
Improving the bracket support structures of tank wagons.

Structural changes aimed at redistribution of loads and stresses in vulnerable areas can contribute to reduction in the maximum stresses.

During long operating time the most vulnerable structural areas of light oil tank wagons have been identified. The researches provided by leading companies in the field of rolling stock testify that stresses exerted by support pressure amount to 70-90% out of the maximum stresses in the tank.

A disadvantage of the existing support is its stiffness, whereas the tank surface is very flexible. Structurally, the support has three horizontal belts reinforced with two vertical ones. The design is rather rigid regardless of thickness of the sheets used. Under loading in vertical and horizontal sheets of the support structure there appear stresses considerably lower compared to those in areas where the bolster beam joins with the center sill, and the channel beams join with the vertical diaphragms. The deformed tank in the areas of bracket support structures is greatly under the influence of the law of external load (contact pressure) distribution. The contact pressure from the support structures on the surface is immediately depends on rigidity change in supports in radial direction.

On observing features of structural design development for Ukrainian and foreign tank wagons, patent and bibliographical analysis of engineering solutions, three variants of support structures have been proposed.

The choice of the most efficient design for the support structure was made on the base of the stressed-state tank wagon analysis and the deformation analysis conducted directly for support structures in the support area.

The most efficient variant was chosen by comparing with the existing structure. Laws of stiffness change in radial direction and laws of contact pressure change have been demonstrated. The improved structure has been checked by a load spectrum according to the normative documents.

Keywords: *tank wagon, barrel, finite element method, support structure, stress-strain state, equivalent stresses, contact pressure.*

Павлюченко М.В. – к.т.н., асистент кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. 61050, м. Харків, майд. Фейєрбаха, 7. E-mail: misha_83@ukr.net

Бобрицький С.В. – к.т.н., доцент кафедри механіки і проектування машин Українського державного університету залізничного транспорту. E-mail: bobrytskyi@kart.edu.ua

Сумцов А.Л. – к.т.н., старший викладач кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. E-mail: sumtsov@kart.edu.ua

Рецензент: д.т.н., проф. **Горбунов М.І.**

Стаття подана 20.03.2018.