

УДК 629.463.03:629.015

А. О. Ловська, к.т.н.

(доцент кафедри «Вагони», Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків)

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ НЕСУЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ КОНТЕЙНЕРА-ЦИСТЕРНИ, РОЗМІЩЕНОГО НА ВАГОНІ- ПЛАТФОРМІ ПРИ МАНЕВРОВОМУ СПІВУДАРЯННІ

Інтенсифікація перевезень наливних вантажів через територію України зумовила необхідність створення і впровадження в експлуатацію контейнерів-цистерн. Для забезпечення міцності контейнерів-цистерн в експлуатації існує низка нормативних документів, які регламентують вимоги до їх конструкції і умов експлуатації. З метою визначення величин експлуатаційних навантажень, які діють на контейнер-цистерну, розміщену на вагоні-платформі при маневровому співударянні, як випадку найбільшої навантаженості несучої конструкції, створена математична модель. При створенні моделі враховані зазори між фітингами контейнера-цистерни і фітинговими упорами вагона-платформи, а також переміщення наливного вантажу відносно котла. Результати досліджень дозволили отримати уточнені величини прискорень, які діють на несучу конструкцію контейнера-цистерни при маневровому співударянні. Максимальні прискорення при цьому зафіксовані для випадку, коли зазор між фітингом і фітинговим упором складає 30 мм.

Результати розрахунку на міцність контейнера-цистерни з урахуванням максимальних величин прискорень, отриманих при математичному моделюванні, дозволили зробити висновок, що еквівалентні напруження в несучій конструкції значно перевищують допустимі.

Проведені дослідження можуть сприяти підвищенню збереження контейнерів-цистерн при маневровому співударянні, а також використанні при проектуванні контейнерів-цистерн нового покоління з підвищеними техніко-економічними і експлуатаційними показниками.

Ключові слова: контейнер-цистерна, динаміка, математичне моделювання, навантаженість конструкції, міцність.

Интенсификация перевозок наливных грузов через территорию Украины обусловила необходимость создания и внедрения в эксплуатацию контейнеров-цистерн. Для обеспечения прочности контейнеров-цистерн в эксплуатации существует ряд нормативных документов, которые регламентируют требования к их конструкции и условиям эксплуатации.

© Ловська А. О., 2016

С целью определения величин эксплуатационных нагрузок, которые действуют на контейнер-цистерну, размещенную на вагоне-платформе при маневровом соударении, как случае наибольшей нагруженности несущей конструкции, создана математическая модель. При создании модели учтены зазоры между фитингами контейнера-цистерны и фитинговыми упорами вагона-платформы, а также перемещения наливного груза относительно котла. Результаты исследований позволили получить уточненные величины ускорений, которые действуют на несущую конструкцию контейнера-цистерны при маневровом соударении. Максимальные ускорения при этом зафиксированы для случая, когда зазор между фитингом и фитинговым упором составляет 30 мм.

Результаты расчета на прочность контейнера-цистерны с учетом максимальных величин ускорений, полученных при математическом моделировании, позволили сделать вывод, что эквивалентные напряжения в несущей конструкции значительно превышают допускаемые.

Проведенные исследования могут способствовать повышению сохранности контейнеров-цистерн при маневровом соударении, а также использованы при проектировании контейнеров-цистерн нового поколения с повышенными технико-экономическими и эксплуатационными показателями.

Ключевые слова: контейнер-цистерна, динамика, математическое моделирование, нагруженность конструкции, прочность.

Постановка проблеми. Підвищення ефективності перевізного процесу в напрямку міжнародних транспортних коридорів (МТК) зумовлює необхідність розробки та впровадження в експлуатацію транспортних засобів нового покоління. Відомо, що одним з найбільш мобільних видів транспортних засобів, що знайшли використання у міжнародному комбінованому сполученні є контейнери. Останнім часом простежується ефективність використання контейнерів-цистерн, що обумовлено підвищенням перевезень об'ємів наливних вантажів через МТК.

Інтермодальність контейнерів-цистерн прогнозує підвищення рівня їх затребуваності при комбінованих перевезеннях. Це викликає необхідність розробки та впровадження у експлуатацію контейнерів-цистерн нового покоління з підвищеними техніко-економічними показниками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження динамічних навантажень, що діють на контейнер-цистерну, розміщену на вагоні-платформі при маневровому співударянні, наведені в [1].

Визначення прискорень, що діють на контейнер-цистерну проводилося з урахуванням зазорів між фітинговими упорами вагона-платформи та фітингами контейнера-цистерни, а також при їх відсутності. Повздовжнє зусилля, що діє на вагон-платформу від вагона-бойка склало близько 2200-2800 кН.

Дослідження проведені стосовно контейнерів-цистерн для перевезення бензину та азотної кислоти, масою бруто, відповідно, 21,9 т та 24,0 т.

Важливо зазначити, що максимальна величина повздовжньої сили удару, яка може діяти на вагон-платформу з розміщеним на ньому вантажем, у тому числі контейнерами-цистернами, при маневровому співударянні, складає 3,5 МН [2]. Тому з метою отримання уточненого значення прискорень, які діють на контейнер-цистерну в експлуатації, необхідним є проведення додаткових досліджень.

Дослідження міцності контейнера-цистерни моделі ТК25 та оптимізація його несучої конструкції наведені в [3]. При складанні моделі міцності контейнера-цистерни враховані нормативні величини навантажень, наведені в [4]. Дослідження міцності несучої конструкції контейнера-цистерни з урахуванням уточнених експлуатаційних величин навантажень (податливість наливного вантажу, переміщення фітингів відносно фітингових упорів тощо) в роботі не проводиться.

Виклад основного матеріалу дослідження. Аналіз нормативних документів з питань забезпечення міцності контейнерів-цистерн в експлуатації дозволив зробити висновок, що найбільші величини динамічних навантажень, що діють на їх несучі конструкції та кріпильні пристрої, зазначені у ГОСТі 31232 «Контейнеры для перевозки опасных грузов. Требования по эксплуатационной безопасности» [4]. Оговорюється, що конструкція контейнера-цистерни повинна витримувати дію власних сил інерції, які виникають під час руху транспортного засобу, а також при маневровому співударянні вагонів, у тому числі при розпуску з гірок, екстремому гальмуванні у поїздах на малих швидкостях руху, при наступних прискореннях: у повздовжньому напрямку $P_{np} - 2g$; поперечному напрямку $P_n - 1g$; у вертикальному напрямку $P_v - 2g$; при співударяннях: для завантаженого контейнера – $4g$; для порожнього (з метою перевірки арматури) – $5g$.

Для визначення експлуатаційних значень динамічних навантажень, що діють на несучу конструкцію контейнера-цистерни, розміщеного на вагоні-платформі при маневровому співударянні використано математичну модель, наведену у [1]. У даній моделі враховано, що три контейнера-цистерни розміщені на довгобазному вагоні-платформі, а зв'язок між ними імітувався як пружньо-дисипативний, тобто кожний контейнер-цистерна має власну ступінь вільності у вертикальній площині.

Важливо зазначити, що в експлуатації для перевезення контейнерів-цистерн також використовуються вагони-платформи на рамі яких можуть розміститися два контейнери. Такі вагони мають меншу базу, а відповідно і менші величини переміщень несучої конструкції під дією вертикального навантаження від контейнерів.

Тому у даній роботі дослідження проведені щодо вагона-платформи моделі 13-4085, побудови ВАТ «Дніпровагонмаш» та контейнера-цистерни моделі ТК25, побудови ВАТ «Зареченский завод химического машиностроения». Зазначений контейнер-цистерна має типорозмір за ISO – 1СС та призначений для транспортування: ПЗМ, бензину, дизпалива, мастила моторного, сожі, сольвенту нафтового, нефрасу, піноутворювача.

Контейнер-цистерна розглядався як прикріплена маса відносно рами вагона-платформи, що має податливість в повздовжньому напрямку за рахунок наявності зазорів між фітинговими упорами вагона-платформи та фітингами контейнера-цистерни. Тобто, контейнер-цистерна має власну ступінь вільності до моменту упору фітинга у фітинговий упор, після чого контейнер-цистерна повторює траєкторію переміщення вагона-платформи. Зв'язок між рамою вагона-платформи та фітингами контейнера-цистерни імітувався як фрикційний. При цьому враховано, що контейнери-цистерни, розміщені на вагоні-платформі, мають однакову завантаженість котла наливним вантажем.

$$M'_{\text{пл}} \cdot x_{\text{пл}} + M_{\text{пл}} \cdot h \cdot \dot{\varphi}_{\text{пл}} = S_a - \sum_{i=1}^2 S_i, \quad (1)$$

$$I_{\text{пл}} \cdot \ddot{\varphi}_{\text{пл}} + M_{\text{пл}} \cdot h \cdot x_{\text{пл}} - g \cdot \varphi_{\text{пл}} \cdot M_{\text{пл}} \cdot h = l \cdot F_{\text{ТР}} (\text{sign} \Delta_1 - \text{sign} \Delta_2) + l(k_1 \cdot \Delta_1 - k_2 \cdot \Delta_2) + F_{\varphi}, \quad (2)$$

$$M_{\text{пл}} \cdot \ddot{z}_{\text{пл}} = k_1 \cdot \Delta_1 + k_2 \cdot \Delta_2 - F_{\text{ТР}} (\text{sign} \Delta_1 - \text{sign} \Delta_2) - \sum_{i=1}^3 F_{z_i}, \quad (3)$$

$$\left(m_i + \sum_{j=1}^k m_{ij} \right) \cdot (\ddot{x}_{\text{пл}} - \ddot{x}_i) + \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \right) \cdot (\ddot{\varphi}_{\text{пл}} - \ddot{\varphi}_i) - \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij} = S_i, \quad (4)$$

$$\left(I_{\alpha} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij}^2 \right) \cdot (\ddot{\varphi}_{\text{пл}} - \ddot{\varphi}_i) + \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \right) \cdot (\ddot{x}_{\text{пл}} - \ddot{x}_i) + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij} - g \cdot \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \right) \cdot (\varphi_{\text{пл}} - \varphi_i) = F_{\alpha i}, \quad (5)$$

$$\left(m_i + \sum_{j=1}^k m_{ij} \right) \cdot \ddot{z}_{\text{пл}} = 0, \quad (6)$$

$$I_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij} - m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{x}_{ij} - m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\varphi}_i + g \cdot m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \xi_{ij} = 0 \quad (7)$$

де

$$M'_{\text{пл}} = M_{\text{пл}} + 2 \cdot m_T + \frac{n \cdot I}{r^2}; \quad \Delta_1 = z_{\text{пл}} - l \cdot \varphi_{\text{пл}}; \quad \Delta_2 = z_{\text{пл}} + l \cdot \varphi_{\text{пл}}$$

$$S_i = f_{mp} \cdot \text{sign} \cdot (x_{\text{пл}} - x_i)'$$

$M_{\text{пл}}$ – маса несучої конструкції вагона-платформи; $I_{\text{пл}}$ – момент інерції вагона-платформи відносно повздовжньої вісі; S_a – величина повздовжньої сили удару в автозчеп; $F_{\text{ТР}}^k$ – сила тертя, що виникає між фітинговим упором та фітингом при повздовжньому переміщенні контейнера; F_i – сила інерції, що виникає при повздовжньому переміщенні контейнера; m_T – маса візка; I – момент інерції колісної пари; r – радіус середнезношеного колеса; n – кількість вісей візка; l – половина бази вагона-платформи; $F_{\text{ТР}}$ – абсолютне значення сили сухого тертя у ресорному комплекті; k_1, k_2 – жорсткість пружин ресорного підвішування візків вагона-платформи; k – кількість тонів коливань наливного вантажу; m_i – маса тіла, яке еквівалентне і-му контейнеру-цистерні з частиною наливного вантажу, що не приймає участі у переміщенні відносно котла; m_{ij} – маса j -го маятника у і-му контейнері-цистерні; z_{ci} – висота центру ваги контейнера-цистерни;

c_{ij} – відстань від площини $z_i = 0$ до точки закріплення j -го маятника у i -му контейнері-цистерні; l_{ij} – довжина j -го маятника; I_{θ} – приведений момент інерції i -го контейнера-цистерни та наливного вантажу, що не приймає участі у русі відносно котла; I_{ij} – момент інерції маятника; x, φ, z – координати, що відповідають, відповідно, повздовжньому, кутовому навколо повздовжньої вісі та вертикальному переміщенню вагона-платформи; x_i, φ_i – координати, що відповідають, відповідно, повздовжньому та кутовому навколо повздовжньої вісі переміщенню контейнера-цистерни; ξ_{ij} – кут відхилення j -го маятника від вертикалі.

При цьому $x_i < 30$ мм [1, 5], якщо $x_i \geq 30$ мм, тоді $x_i = x$.

Вертикальні переміщення контейнера-цистерни відносно рами вагона-платформи не враховувалися. До уваги також приймалася податливість наливного вантажу відносно стінок котла контейнера-цистерни. Рух наливного вантажу описувався сукупністю математичних маятників [1]. Величина сили повздовжнього удару, що діє на вагон-платформу, прийнята рівною максимальному значенню – 3,5 МН [2].

Визначення гідродинамічних характеристик наливного вантажу здійснювалося за методикою, наведеною у [6]. У якості наливного вантажу прийнятий бензин. На підставі проведених розрахунків для випадку максимально-допустимої завантаженості котла контейнера-цистерни у відповідності з [7], отримано значення $m_{ij} \approx 6,8$ т, $I_{ij} \approx 250$ т·м².

Розв'язання диференціальних рівнянь здійснено за допомогою метода Рунге-Кутта в середовищі програмного забезпечення MathCad.

Результати досліджень дозволили зробити висновок, що при відсутності зазорів між фітинговими упорами вагона-платформи та фітингами контейнера-цистерни, прискорення, що діє на несучу конструкцію контейнера-цистерни складає близько 40 м/с². Максимальні прискорення отримані для випадку, коли зазор між фітинговим упором та фітингом дорівнює 30 мм. При цьому прискорення складають близько 200 м/с².

Отримані результати прискорень використані для визначення напружено-деформованого стану несучої конструкції контейнера-цистерни, розміщеного на вагоні-платформі при маневровому співударянні.

Побудова комп'ютерної просторової геометричної моделі контейнера-цистерни здійснювалася у середовищі програмного забезпечення SolidWorks [8]. Розрахунок на міцність проведений за допомогою методу скінчених елементів у програмному комплексі CosmosWorks.

При складанні скінчено-елементної моделі контейнера-цистерни (рис. 1) використані ізопараметричні тетраедри, оптимальна кількість яких визначена за допомогою графоаналітичного методу. Максимальний розмір елементу сітки склав 485,68 мм, мінімальний – 97,14 мм. Кількість елементів сітки склала 169106, вузлів – 56121, максимальне співвідношення боків – 68,862, відсоток елементів з співвідношенням боків менше 3 склав 6,61, а більше 10 – 19,3. Мінімальна кількість елементів в колі склала 9, співвідношення збільшення розміру елементу – 1,7.

Матеріал конструкції контейнера-цистерни – сталь 345-09Г2С.

При побудові моделі міцності контейнера-цистерни враховані наступні навантаження: вертикальне P_e , повздовжнє P_{np} , бокове P_n , а також тиск наливного вантажу на котел P_p .

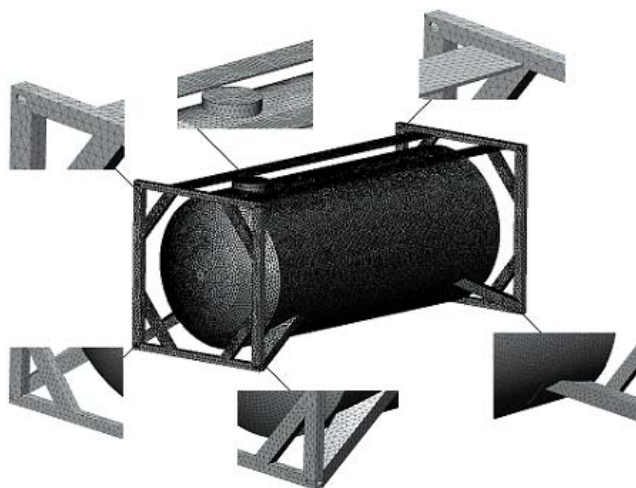


Рис. 1. Скінчено-елементна модель контейнера-цистерни моделі ТК25

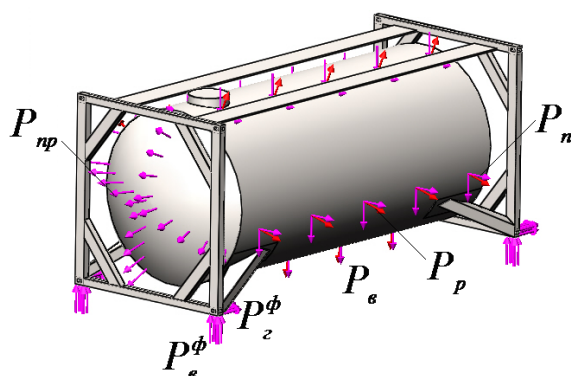


Рис. 2. Модель міцності контейнера-цистерни моделі ТК25

Крім того, в моделі враховані реакції, які виникають у зонах взаємодії контейнера-цистерни з фітинговими упорами вагона-платформи у вертикальному напрямку P_e^ϕ та у повздовжньому P_z^ϕ під час руху.

Допустимі напруження при співударянні прийняті рівними межі плинності матеріалу конструкції.

Закріплення моделі здійснювалося у зонах обпирання контейнера-цистерни на фітингові упори вагона-платформи.

Результати проведених розрахунків дозволили зробити висновок, що максимальні еквівалентні напруження в конструкції контейнера-цистерни виникають у зоні взаємодії опори котла з фітинговим упором та складають близько 1000 МПа (рис. 3), максимальні переміщення в вузлах конструкції склали 13,6 мм, деформації – $6,08 \cdot 10^{-3}$.

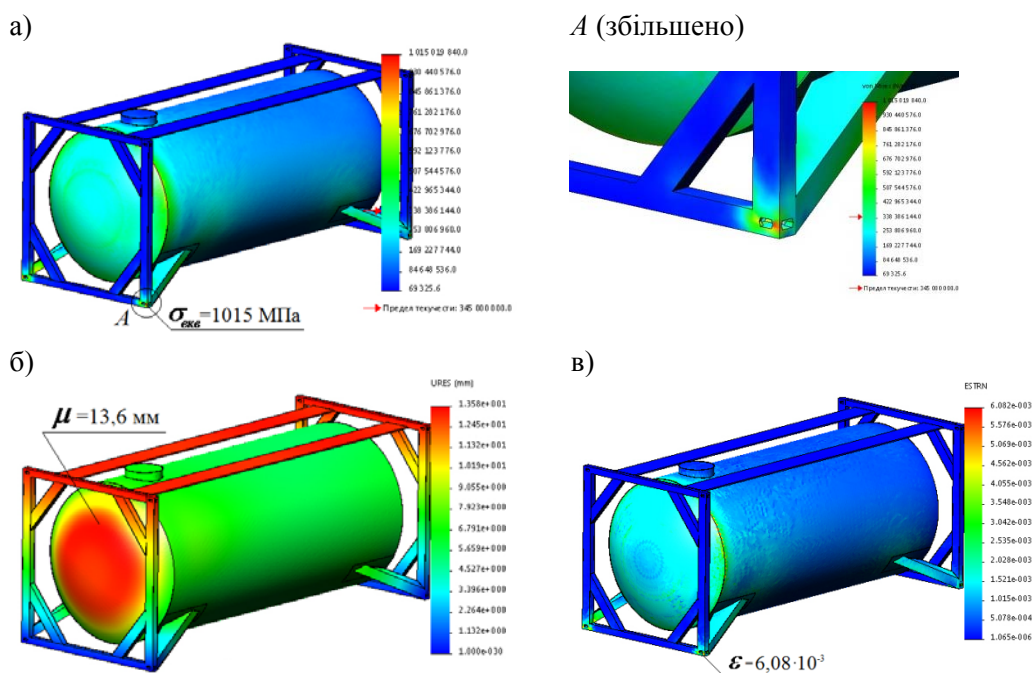


Рис. 3. Результати розрахунку на міцність несучої конструкції контейнера-цистерни моделі ТК25
 а) напружений стан; б) переміщення в вузлах; в) деформації в конструкції

Висновки та пропозиції. На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Проведені дослідження динаміки контейнера-цистерни відносно рами вагона-платформи дозволили отримати уточнену величину прискорення, яке діє на контейнер-цистерну, розміщену на вагоні-платформі при маневровому співударянні. Встановлено, що з урахуванням зазорів між фітингами та фітинговими упорами прискорення, яке діє на контейнер-цистерну при маневровому співударянні значно перевищує нормативну величину [4];

2. Дослідження напружено-деформованого стану несучої конструкції контейнера-цистерни з урахуванням динамічного навантаження, яке діє на нього при маневровому співударянні з урахуванням зазорів між фітингами та фітинговими упорами, дозволило зробити висновок, що максимальні еквівалентні напруження значно перевищують допустимі;

3. Для забезпечення збереження контейнерів-цистерн при маневрових співударяннях необхідним є обмеження їх переміщень відносно рами вагона-платформи;

4. При проектуванні контейнерів-цистерн нового покоління необхідним є урахуванням уточнених величин прискорень, що можуть діяти на них в експлуатації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Богомаз Г. И. Нагруженность контейнеров-цистерн, расположенных на железнодорожной платформе, при ударах в автосцепку / Г. И. Богомаз, Д. Д. Мехов, О. П. Пилипченко, Ю. Г. Черномашенцева // 36. наук. праць »Динаміка та керування рухом механічних систем» – Київ: АНУ, Інститут технічної механіки, 1992. – С. 87 – 95.
2. *Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)*. [Текст]. – М.: ГосНИИВ – ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.
3. *Ловська А. О. Удосконалення контейнерів-цистерн для перевезення нафтопродуктів шляхом впровадження в їх несучі конструкції круглих труб / А. О. Ловська, О. М. Мельничук, О. В. Фомін // Залізничний транспорт України. – 2015. – №1. – С. 40 – 44.*
4. *Контейнеры для перевозки опасных грузов. Требования по эксплуатационной безопасности*. ГОСТ 31232. – [Действителен от 28.03.2005] – Минск: НП РУП «Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации (БелГИСС)», 2005. – 6 с.
5. *Правила размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах при перевозках их по железным дорогам колеи 1520 мм стран-участниц СМГС. Ч. 1. Общие положения. – ОСЖД, 2012. – 681 с.*
6. *Кривовязюк Ю. П. Оценка эквивалентной нагруженности четырехосных железнодорожных цистерн с жидкими грузами различной плотности при продольных ударах: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог и тяга поездов» / Ю. П. Кривовязюк. – Днепропетровск, 1986. – 157 с.*
7. *Правила перевозок опасных грузов. К соглашению о международном железнодорожном грузовом сообщении. Том 3. – ОСЖД, 2011. – 531 с.*
8. *Алямовский А. А. SolidWorks/COSMOSWorks 2006 – 2007. Инженерный анализ методом конечных элементов / А. А. Алямовский. – М.: ДМК, 2007. – 784 с., ил. (Серия «Проектирование»).*

*Alyona O. Lovskaya, PhD (Technical Sciences)
(Associate Professor of Wagons Chair, The Ukrainian State University of Railway Transport)*

RESEARCH OF DURABILITY OF BEARING STRUCTURE OF THE TANK-CONTAINER WHICH WAS PLACED ON A TRAIN PLATFORM WHEN A TRAIN SHUNTING COLLISION

The intensification of liquid cargoes transportation via the territory of Ukraine determined the creation and introduction of tank-containers. To ensure the strength of tank-containers in operation there are a number of regulatory documents regulating requirements for their design and operating conditions. The mathematical model was created to determine the quantities of operational loads which act on a tank-container placed on a train platform when a train shunting collision, considered as the greatest event of loading of the support structure. When a model was created it was taken into account the gaps between the fittings, tank containers and fitting supports the train platform and liquid cargos movement towards the boiler. The research results allowed to obtain more accurate values of specified accelerations that act on the supporting structure of a tank-container during shunting collision. The maximum accelerations were recorded for the case, when the gap between the fitting and the fitting supports was 30 mm.

The results of the calculation of the strength of the tank container with the maximum values of accelerations obtained with mathematical modeling, allowed us to

conclude that equivalent stresses in the supporting structure significantly exceed the permissible steel grades for metal tank-container.

The research can improve the safety of tank containers when shunting collision and can be used in designing of tank-containers of new generation with increased technical, economic and operational performance.

Keywords: *tank-container, the dynamic's, mathematical modeling, loading of construction, strength.*

REFERENCES

1. Bogomaz G. I. Nagruzhennost konteynerov-tsistem, raspolozhennyih na zheleznodorozhnoy plat-forme, pri udarah v avtostsepku / G. I. Bogomaz, D. D. Mehov, O. P. Pilipchenko, Yu. G. Chernomash-entseva // Zb. nauk. prats "Dinamika ta keruvannya ruhom mehanichnih sistem" – KiYiv: ANU, Institut tehnichnoyi mehaniki, 1992. – p. 87 – 95.
2. Normyi dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznyih dorog MPS kolei 1520 mm (nesamo-hodnyih). [Tekst]. – M.: GosNIIV – VNIIZhT, 1996. – 319 p.
3. Lovska A. O. Udoskonalennya konteyneriv-tsistem dlya perevezennya naftoproduktiv shlyahom vprovadzhennya v yih nesuchi konstruktsiyi kruglih trub / A. O. Lovska, O. M. Melnichuk, O. V. Fomin // Zaliznichniy transport Ukrayini. – 2015. – №1. – P. 40 – 44.
4. Konteyneryi dlya perevozki opasnyihрузов. Trebovaniya po ekspluatatsionnoy bezopasnosti. GOST 31232. – [Deystvitelen ot 28.03.2005] – Minsk: NP RUP "Belorusskiy gosudarstvenniy institut standartizatsii i sertifikatsii (BelGISS)", 2005. – 6 p.
5. Pravila razmescheniya i krepleniya Грузов в vagonah i konteynerah pri perevozkah ih po zheleznyim dorogam kolei 1520 mm stran-uchastnits SMGS. Ch. 1. Obschie polozheniya. – OSZhD, 2012. – 681 p.
6. Krivovyazyuk Yu. P. Otsenka ekvivalentnoy nagruzhennosti chetyirehosnyih zheleznodorozhnyih tsistem s zhidkimi Грузами razlichnoy plotnosti pri prodolnyih udarah: dis. na soiskanie uchenoy stepeni kand. tehn. nauk: spets. 05.22.07 "Podvizhnoy sostav zheleznyih dorog i tyaga poezdov " / Yu. P. Krivovyazyuk. – Dnepropetrovsk, 1986. – 157 p.
7. Pravila perevozok opasnyih Грузив. K soglasheniyu o mezhdunarodnom zheleznodorozhnom gru-zovom soobschenii. Tom 3. – OSZhD, 2011. – 531 p.
8. Alyamovskiy A. A. SolidWorks/COSMOSWorks 2006 – 2007. Inzhenerniy analiz metodom konech-niyh elementov / A. A. Alyamovskiy. – M.: DMK, 2007. – 784 p., il. (Seriya "Proektirovanie").