

---

---

**РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ**

---

---

УДК 629.463.03:629.015

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.157.2015.61650>

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ КОНТЕЙНЕРА-ЦИСТЕРНИ,  
РОЗМІЩЕНОГО НА ВАГОНІ-ПЛАТФОРМІ ПРИ МАНЕВРОВОМУ СПІВУДАРЯННІ**

Канд. техн. наук А.О. Ловська

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ КОНТЕЙНЕРА-ЦИСТЕРНЫ,  
РАЗМЕЩЕННОГО НА ВАГОНЕ-ПЛАТФОРМЕ ПРИ МАНЕВРОВОМ СОУДАРЕНИИ**

Канд. техн. наук А.А. Ловская

**MATHEMATICAL MODELING OF DYNAMICS OF TANK-CONTAINER, WHICH  
WAS PLACED ON A TRAIN PLATFORM WHEN A TRAIN SHUNTING COLLISION**

Cand. of techn. sciences A.A. Lovskaya

*У статті наведено дослідження динаміки несучої конструкції контейнера-цистерни, розміщеного на вагоні-платформі, при маневровому співударянні з урахуванням зазорів між фітингами та фітинговими упорами, а також переміщення наливного вантажу відносно котла. Результати досліджень дозволили отримати уточнені величини прискорень, які діють на несучу конструкцію контейнера-цистерни при маневровому співударянні.*

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

*В статті представлені дослідження динаміки несущей конструкции контейнера-цистерны, размещенного на вагоне платформе, при маневровом соударении с учетом зазоров между фитингами и фитинговыми упорами, а также перемещения наливного груза относительно котла. Результаты исследований позволили получить уточненные величины ускорений, которые действуют на несущую конструкцию контейнера-цистерны при маневровом соударении.*

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

*The combined transport systems have been developed to improve the efficiency of the transportation process in the direction of international transport corridors. 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 cargoes 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 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, accelerations.

**Вступ і постановка проблеми.** Відомо, що Україна є транзитною державою, через територію якої проходять важливі міжнародні транспортні коридори. З метою підвищення ефективності перевізного процесу виникає необхідність створення одиниць рухомого складу нового покоління з підвищеними техніко-економічними та експлуатаційними показниками [1, 2].

Одним з найбільш масових і мобільних видів транспортних засобів, що знайшли використання в міжнародному комбінованому сполученні, є контейнери. Інтенсифікація перевезень наливних вантажів у напрямку міжнародних транспортних коридорів зумовила необхідність розроблення контейнерів-цистерн.

У перспективі прогнозується підвищення рівня затребуваності контейнерів-цистерн при комбінованих перевезеннях, що обумовлено їх інтермодальністю. Це викликає необхідність розроблення та впровадження в експлуатацію контейнерів-цистерн нового покоління.

**Аналіз останніх досліджень.** У роботах [3, 4] наведено результати оптимізації несучої конструкції контейнера-цистерни. Обґрунтовано доцільність проектування та впровадження в експлуатацію контейнерів-цистерн як транспортних засобів. Розроблено удосконалену конструкцію контейнера-цистерни для перевезення нафтопродуктів.

Проте подальший розвиток зазначеного виду транспортування нафти і нафтопродуктів вимагає впровадження в експлуатацію контейнерів-цистерн нового покоління з поліпшеними техніко-економічними показниками.

Дослідження динамічних навантажень, що діють на контейнер-цистерну, розміщену на вагоні-платформі, при маневровому співударянні, наведені в [5].

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

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

Важливо зазначити, що максимальна величина повздовжньої сили удару, яка діє на

контейнер-цистерну, що розміщена на вагоні-платформі, при маневровому співударянні складає 3,5 МН [6]. Тому з метою отримання уточненого значення прискорень, які діють на контейнер-цистерну в експлуатації, необхідним є проведення додаткових досліджень.

**Мета статті.** Математичне моделювання динаміки контейнера-цистерни, розміщеного на вагоні-платформі, при маневровому співударянні.

**Основний матеріал дослідження.** З метою забезпечення міцності контейнерів-цистерн в експлуатації існує ряд нормативних документів, які регламентують основні вимоги щодо їх конструкцій та умов експлуатації: “Правила изготовления контейнеров Российского Морского Регистра Судоходства”, “Международный Кодекс морской перевозки опасных грузов (IMDG Code)” і ГОСТ 31232 “Контейнеры для перевозки опасных грузов. Требования по эксплуатационной безопасности”.

Найбільші величини динамічних навантажень, що діють на несучі конструкції контейнерів-цистерн та їх кріпильні пристрої в експлуатації, зазначені в ГОСТ 31232 [7]. Оговорюється, що конструкція повинна витримувати дію власних сил інерції, які виникають під час руху транспортного засобу, а також при співударянні вагонів при маневрових операціях, у тому числі при розпуску з гірок, екстремому гальмуванні в поїздах на малих швидкостях руху, при таких прискореннях: у повздовжньому напрямку  $P_{np} - 2g$ ; поперечному напрямку  $P_n - 1g$ ; у вертикальному напрямку  $P_g - 2g$ ; 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 співударянні в умовах маневрових операцій використано математичну модель, наведену в роботі [5]. Схема дії повздовжньої сили на вагон-платформу з контейнерами-цистернами, розміщеними на ньому, наведена на рисунку.

Дослідження проведено стосовно вагона-платформи моделі 13-4085, побудови ВАТ “Дніпровагонмаш”, і 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.

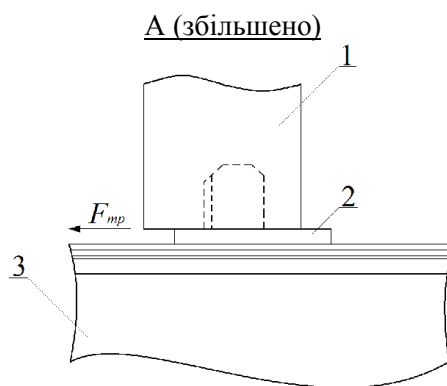
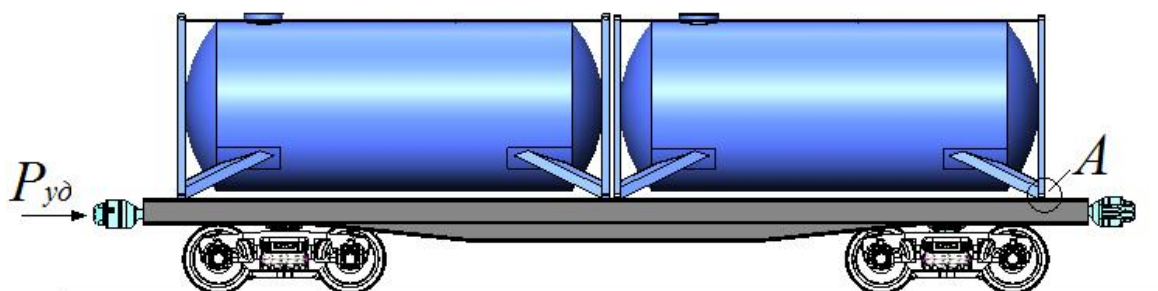


Рис. Схема дії повздовжньої сили на вагон-платформу з контейнерами-цистернами, розміщеними на ньому:

1 – фітинг; 2 – фітинговий упор; 3 – повздовжня балка вагона-платформи

Контейнер-цистерна розглядався як прикріплена маса відносно рами вагона-платформи, що має податливість у 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.

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

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

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

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

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

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

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

де

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

$$S_i = f_{mp} \cdot \text{sign} \cdot (\dot{x}_{\text{пл}} - \dot{x}_i),$$

де  $M_{\text{пл}}$  – маса несучої конструкції вагона-платформи;  $I_{\text{пл}}$  – момент інерції вагона-платформи відносно повздовжньої осі;  $S_a$  – величина повздовжньої сили удару в автозчеп;  $f_{mp}$  – амплітудне значення сили сухого тертя;  $m_T$  – маса візка;  $I$  – момент інерції колісної пари;  $r$  – радіус середньозношеного колеса;  $n$  – кількість осей візка;  $l$  – половина бази вагона-платформи;  $F_{mp}$  – абсолютне значення сили сухого тертя в ресорному комплекті;  $k_1, k_2$  – жорсткість пружин ресорного підвішування візків вагона-платформи;  $F_{\varphi}$  – момент сили, що виникає при взаємодії вагона-платформи з контейнером-цистерною;  $k$  – кількість тонн коливань наливного вантажу;  $m_i$  – маса тіла, яке еквівалентне  $i$ -му контейнеру-цистерні з частиною наливного вантажу, що не бере участі в переміщенні відносно котла;  $m_{ij}$  – маса  $j$ -го маятника в  $i$ -му контейнері-цистерні;  $z_{ci}$  – висота центра ваги контейнера-цистерни;  $c_{ij}$  –

відстань від площини  $z_i = 0$  до точки закріплення  $j$ -го маятника в  $i$ -му контейнері-цистерні;  $l_{ij}$  – довжина  $j$ -го маятника;  $I_{\theta}$  – приведений момент інерції  $i$ -го контейнера-цистерни та наливного вантажу, що не бере участі в русі відносно котла;  $x, \varphi, z$  – координати, що відповідають відповідно повздовжньому, кутовому навколо повздовжньої осі та вертикальному переміщенню вагона-платформи;  $x_i, \varphi_i$  – координати, що відповідають відповідно повздовжньому та кутовому навколо повздовжньої осі переміщенню контейнера-цистерни;  $\xi_{ij}$  – кут відхилення  $j$ -го маятника від вертикалі.

Вертикальні переміщення контейнера-цистерни відносно рами вагона-платформи не враховувалися. До уваги також бралася податливість наливного вантажу відносно стінок котла контейнера-цистерни. Рух наливного вантажу описувався сукупністю математичних маятників [5]. Величина сили повздовжнього удару, що діє на вагон-

платформу, прийнята рівною 3,5 МН. Розв'язання диференціальних рівнянь здійснено за допомогою методу Рунге-Кутта в середовищі програмного забезпечення MathCad.

Визначення гідродинамічних характеристик наливного вантажу здійснювалося за методикою, наведеною у роботі [8]. У якості наливного вантажу прийнято бензин.

Результати досліджень дозволили зробити висновок, що за відсутності зазорів між фітинговими упорами вагона-платформи та фітингами контейнера-цистерни прискорення, що діє на несучу конструкцію контейнера-цистерни, складає близько 40 м/с<sup>2</sup>.

Максимальні прискорення отримано для випадку, коли зазор між фітинговим упором та фітингом дорівнює 30 мм. При цьому прискорення складають близько 300 м/с<sup>2</sup>.

**Висновки.** На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. З метою забезпечення збереження контейнерів-цистерн при маневрових співударяннях необхідним є обмеження їх переміщень відносно рами вагона-платформи.

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

### Список використаних джерел

1. Фомін, О.В. Визначення перспективних напрямків проектування несучих систем у вантажному вагонобудуванні [Текст] / О.В. Фомін // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків. – 2012. – № 3/7(57). – С. 32-35.

2. Фомін, О.В. Аналіз доцільності застосування шестигранних порожнистих профілів в якості складових елементів несучих систем напіввагонів [Текст] / О.В. Фомін // Наука та прогрес транспорту: Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна: науковий журнал. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ ім. В. Лазаряна, 2014. – Вип. 6(54). – С. 146 – 153.

3. Мямлин, С.В. Перспективные конструкции контейнеров-цистерн для перевозки светлых нефтепродуктов, аммиака и углеводородных газов [Текст] / С.В. Мямлин, Ю.В. Кебал, С.М. Кондратюк // Залізничний транспорт України. – 2012. – №2. – С. 44-46.

4. Lisowski, Edward. Transport and storage of lng in container tanks [Text] / Edward Lisowski, Wojciech Czyzycki // Journal of KONES Powertrain and Transport. – 2011. – Vol. 18, No. 3. – P. 193-201.

5. Богомаз, Г.И. Нагруженность контейнеров-цистерн, расположенных на железнодорожной платформе, при ударах в автосцепку [Текст] / Г.И. Богомаз, Д. Д. Мехов, О. П. Филиппенко, Ю. Г. Черномашенцева // Динаміка та керування рухом механічних систем: зб. наук. праць. – К.: АНУ, Інститут технічної механіки, 1992. – С. 87-95.

6. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) [Текст]. – М.: ГосНИИВ – ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.

7. ГОСТ 31232. Контейнеры для перевозки опасных грузов. Требования по эксплуатационной безопасности [Текст]. – [Действителен от 28.03.2005] – Минск: НП РУП “Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации (БелГИСС)”, 2005. – 6 с.

8. Кривовязюк, Ю.П. Оценка эквивалентной нагруженности четырехосных железнодорожных цистерн с жидкими грузами различной плотности при продольных ударах [Текст]: дис... канд. техн. наук: 05.22.07 / Ю.П. Кривовязюк. – Днепропетровск, 1986. – 157 с.

Рецензент д-р техн. наук, професор І.Е. Мартинов

Ловська Альона Олександрівна, канд. техн. наук, доцент кафедри вагонів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-35. E-mail: alyonaLovskaya@rambler.ru.

Lovskaya Alyona Alexandrovna, candidate of technical sciences, associate professor department wagons The Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-35. E-mail: alyonaLovskaya@rambler.ru.

Стаття прийнята 06.10.2015 р.