

УДК 629.463.32

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/43>**Фомін О.В.**

Державний університет інфраструктури та технологій

Ловська А.О.

Український державний університет залізничного транспорту

МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЗДОВЖНЬОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ ВАГОНА-ЦИСТЕРНИ ДВОХСЕКЦІЙНОГО

Підвищення об'ємів перевезень наливних вантажів через міжнародні транспортні коридори зумовлює необхідність впровадження в експлуатацію транспортних засобів для їх перевезень. Для забезпечення ефективності перевезень наливних вантажів залізницею запропоновано концепт несучої конструкції вагона-цистерни двохсекційного. Особливістю конструкції вагона-цистерни є те, що внутрішній об'єм котла розділений на окремі секції. Таке рішення сприяє можливості одночасного перевезення різноманітних вантажів у вагоні-цистерні, скороченню витрат на утримання, а також порожніх пробігів. Для зменшення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-цистерни в просторі між секціями та внутрішньою оболонкою котла розміщується енергопоглинальний матеріал.

Для обґрунтування запропонованого удосконалення проведено математичне моделювання повздовжньої динамічної навантаженості вагона-цистерни двохсекційного. Вагон-цистерна розглядається як система з декількох тіл: несуча конструкція, що спирається на типові візки моделі 18–100 та наливний вантаж. Рух наливного вантажу описувався сукупністю математичних маятників. У якості наливного вантажу прийнятий бензин. Розрахунок здійснено за умови 95% завантаженості секцій. Величина сили повздовжнього удару, що діє на вагон-цистерну, прийнята рівною 3,5 МН. Розв'язок диференціальних рівнянь руху здійснено за методом варіації довільних постійних та підтверджено методом Рунге-Кутта. Початкові умови закладені рівними нулю. Встановлено, що максимальна величина прискорення, що діє на несучу конструкцію вагона-цистерни складає 37,2 м/с². Отримана величина прискорення на 7% нижче за прискорення, що виникає в конструкції без енергопоглинального матеріалу.

Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо проектування сучасних багатифункціональних конструкцій вагонів-цистерн для перевезень широкої номенклатури вантажів.

Ключові слова: транспортна механіка, вагон-цистерна, несуча конструкція, динамічна навантаженість, повздовжня динаміка.

Постановка проблеми. Перспективи підвищення обертів наливних вантажів в напрямку міжнародних транспортних коридорів зумовлюють необхідність впровадження в експлуатацію транспортних засобів для їх перевезень. Відомо, що перевезення наливних вантажів залізницею здійснюється здебільшого вагонами-цистернами або контейнерами-цистернами.

Використання контейнерів-цистерн для перевезень наливних вантажів зумовлена їх мобільністю. В той же час застосування у перевізному процесі вагонів-цистерн дозволяє здійснювати одночасне перевезення більшого об'єму вантажів ніж у контейнерах-цистернах. У зв'язку з цим для підвищення ефективності перевезень наливних вантажів залізничним транспортом доцільним є впровадження інноваційних конструкцій транспортних засобів, які поєднували б у собі переваги вищезазначених. Тому виникає необхід-

ність проведення відповідних досліджень в цьому напрямку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В публікації [1] висвітлено особливості навантаженості несучої конструкції вагона-цистерни при маневровому співударянні. Отримано залежності впливу наливного вантажу на динамічну навантаженість несучої конструкції вагона-цистерни.

Вплив переміщень наливного вантажу на навантаженість котла вагона-цистерни досліджено у статті [2]. Визначено, розподілення динамічних навантажень за довжиною несучої конструкції вагона-цистерни. Однак, заходів щодо зменшення навантаженості вагона-цистерни в експлуатації в даних роботах не запропоновано.

В роботі [3] проведено обґрунтування удосконалення конструкції опорного пристрою вагона-цистерни для перевезень наливних вантажів.

Результати розрахунку на міцність підтвердили доцільність запропонованих заходів щодо удосконалення.

Перспективні варіанти удосконалень несучих конструкцій вагонів-цистерн розглянуті у роботі [4]. Запропоновано нову конструкцію вагона-цистерни з конусоподібними консольними вставками та безазорним пристроєм зчеплення.

Разом з цим запропоновані заходи щодо удосконалення несучих конструкцій вагонів-цистерн не сприяють зменшенню їх динамічної навантаженості в експлуатації.

Авторами роботи [5] запропоновано можливі шляхи підвищення універсальності вагонів-цистерн. Проведено визначення міцності та стійкості вагона-цистерни. Результати досліджень підтвердили можливість модернізації вагонів-цистерн з метою розширення номенклатури перевозимих у них вантажів.

Дослідження удароміцності залізничного вагона-цистерни з композитних матеріалів, армованих волокном наведені у роботі [6]. Встановлено, що ефект початкового натягіння волокон більш значний у випадку, коли навантаження діє паралельно напрямку основного волокна. Важливо сказати, що запропоновані конструкції вагонів-цистерн не дозволяють здійснювати перевезення різнотипних вантажів одночасно, що знижує їх універсальність та затребуваність.

Заходи щодо зменшення динамічної навантаженості несучих конструкцій вагонів при експлуатаційних режимах висвітлюються в публікаціях [7; 8]. При цьому авторами запропоновано впровадження податливих зв'язків в несучі конструкції вагонів. Дослідження проведені шляхом математичного моделювання та підтверджені комп'ютерним з використанням сучасних

засобів програмування. Разом з цим питанням зменшення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-цистерни авторами уваги не приділялося.

Постановка завдання.

Метою статті є висвітлення результатів моделювання повздовжньої навантаженості вагона-цистерни двохсекційного. Для досягнення зазначеної мети визначені такі завдання:

- провести математичне моделювання повздовжньої динамічної навантаженості вагона-цистерни двохсекційного;
- визначити вплив сили удару на динамічну навантаженість несучої конструкції вагона-цистерни.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для підвищення ефективності експлуатації вагона-цистерни пропонується удосконалення його конструкції шляхом розділення внутрішнього об'єму котла 1 на окремі секції 2, виготовлені з композитного матеріалу, які оснащені завантажувальними люками 3 та зливними пристроями 4 (рис. 1). В просторі між секціями 2 та внутрішньою оболонкою котла 1 розміщується енергопоглинальний матеріал 5 для зменшення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-цистерни.

Запропоноване рішення сприятиме можливості одночасних перевезень різнотипних вантажів у вагоні-цистерні, скороченню витрат на утримання, а також порожніх пробігів. Крім того, наявність енергопоглинального матеріалу в конструкції вагона-цистерни сприятиме зменшенню його динамічної навантаженості, а як наслідок пошкоджень складових, а отже і витрат на утримання в експлуатації.

Для обґрунтування запропонованого рішення проведено математичне моделювання динамічної

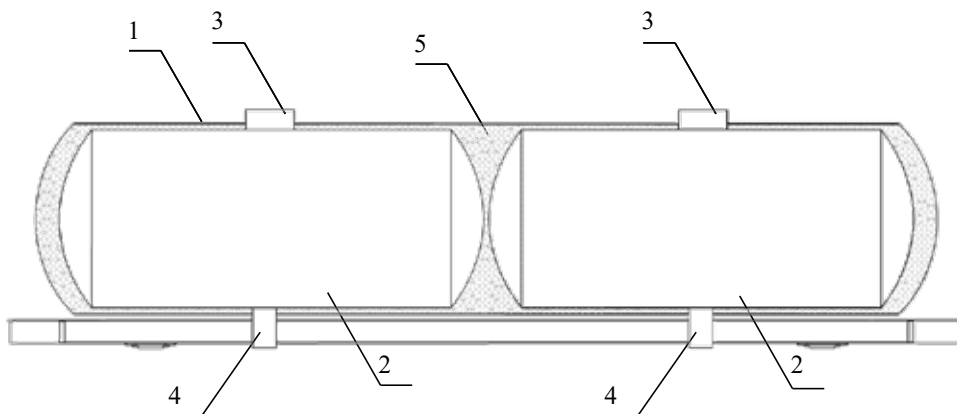


Рис. 1. Несуча конструкція вагона-цистерни

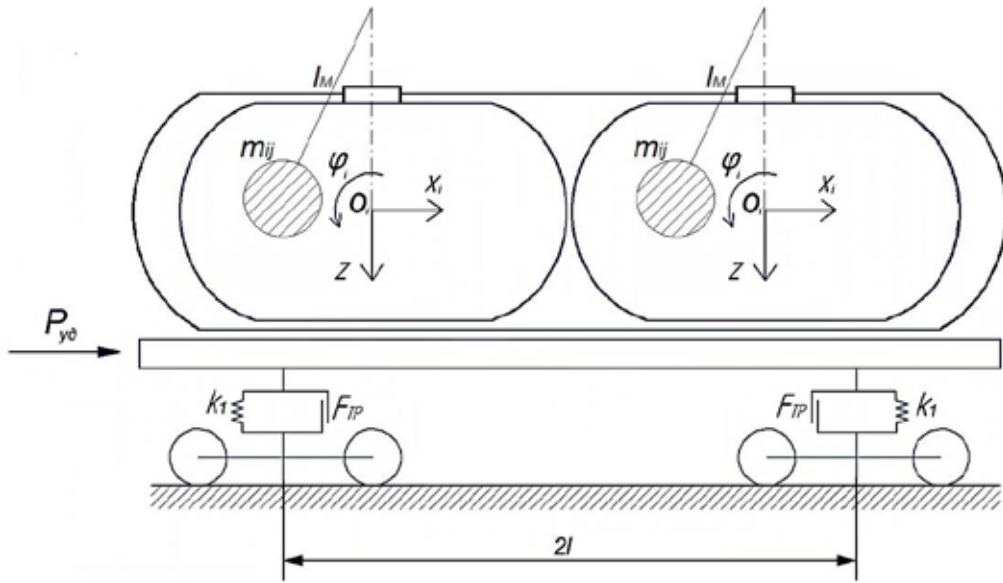


Рис. 2. Розрахункова схема вагона-цистерни

навантаженості несучої конструкції вагона-цистерни [9]. Вагон-цистерна розглядався як система з декількох тіл: несуча конструкція, що спирається на типові візки моделі 18–100 та наливний вантаж. Розрахункову схему вагона-цистерни наведено на рис. 2.

$$M'_p \cdot \ddot{x}_p + M_p \cdot h \cdot \ddot{\varphi}_p = F'_n, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} I_p \cdot \ddot{\varphi}_p + M_p \cdot h \cdot \ddot{x}_p - g \cdot \varphi_p \cdot M_p \cdot h = \\ = l \cdot F_{TP} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2) + \\ + l(k_1 \cdot \Delta_1 - k_2 \cdot \Delta_2), \end{aligned} \quad (2)$$

$$M_p \cdot \ddot{z}_p = k_1 \cdot \Delta_1 + k_2 \cdot \Delta_2 - F_{TP} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2), \quad (3)$$

$$\left(m_i + \sum_{j=1}^k m_{ij} \right) \cdot \ddot{x}_p + I_c \cdot \ddot{\varphi}_p - \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij} = 0, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \left(I_{\theta} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij}^2 \right) \cdot \ddot{\varphi}_p + I_c \cdot \ddot{x}_p + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij} - \\ - g \cdot I_c \cdot \varphi_p = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

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

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

$$F_n = P_{yo} - c \cdot x_p - \beta \cdot \dot{x}_p, \quad (8)$$

$$I_c = \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \right), \quad (9)$$

M_p – маса рами вагона-цистерни; I_p – момент інерції рами відносно повздовжньої осі; m_T – маса візка; I – момент інерції колісної пари; r – радіус середнезношеного колеса; n – кількість осей візка; l – напівбаза вагона-цистерни; P_{yo} – значення повздовжньої сили удару в автозчеп; F_{TP} – абсолютне значення сили сухого тертя у ресорному комплекті; k_1, k_2 – жорсткість пружин ресорного підвішування візків; k – кількість тонів коливань наливного вантажу; m_i – маса тіла, яке еквівалентне i -ій секції з частиною наливного вантажу, що не приймає участі у переміщенні відносно неї; m_{ij} – маса j -го маятника у i -ій секції; z_{ci} – висота центру ваги секції; c_{ij} – відстань від площини $z_i=0$ до точки закріплення j -го маятника у i -ій секції; l_{ij} – довжина j -го маятника; I_{θ} – приведений момент інерції i -ої секції та наливного вантажу, що не приймає участі у русі відносно неї; I_{ij} – момент інерції маятника; x_p, φ_p, z_p – координати, що відповідають, відповідно, повздовжньому, кутовому навколо повздовжньої осі та вертикальному переміщенню рами; ξ_{ij} – кут відхилення j -го маятника від вертикалі; c – жорсткість енергопоглинального матеріалу; β – коефіцієнт в'язкого опору енергопоглинального матеріалу.

Рух наливного вантажу в секціях описувався сукупністю математичних маятників [9; 10]. Величина сили повздовжнього удару, що діє на вагон-цистерна, прийнята рівною 3,5 МН [11; 12].

Жорсткість енергопоглинального матеріалу складала близько 75 кН/м, а коефіцієнт в'язкого опору – 115 кН·с/м, що визначено шляхом математичного моделювання. Визначення гідродинамічних

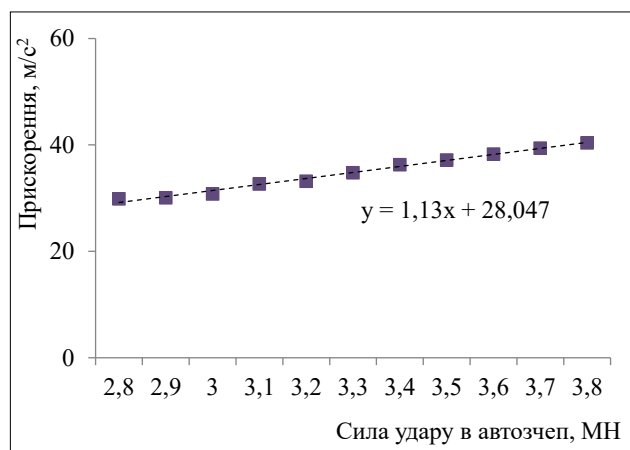


Рис. 3. Залежність прискорень в несучій конструкції вагона-цистерни від сили удару в автозцеп

характеристик наливного вантажу здійснювалося за методикою, наведеною у [10]. У якості наливного вантажу прийнятий бензин. На підставі проведених розрахунків для випадку максимально-допустимої завантаженості секції (95%), отримано значення $m_{ij} \approx 6,8$ т, $I_{ij} \approx 243$ т·м². Розв'язок диференціальних рівнянь (1)–(7) здійснено за методом варіації довільних постійних та підтверджено методом Рунге-Кутта [13–15]. При цьому початкові умови закладені рівними нулю [16; 17]. Результати розрахунку показали, що максимальна величина прискорення, яке діє на несучу конструкцію вагона-цистерни складає 37,2 м/с². Отримана величина прискорення на 7% нижче за прискорення, що виникає в конструкції без енергопоглинального матеріалу.

За математичною моделлю (1)–(7) проведено варіаційні розрахунки та визначено вплив сили

удару на динамічну навантаженість несучої конструкції вагона-цистерни (рис. 3).

Встановлено, що ця залежність є лінійною. Хотілося б відзначити, що з урахуванням запропонованих заходів щодо удосконалення несучої конструкції вагона-цистерни прискорення, які діють на неї знаходяться в межах допустимих при величині сили повздовжнього удару у 3,72 МН. При цьому у якості допустимих прийнято прискорення, які зазначено у [18].

Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо проектування сучасних багатофункціональних конструкцій вагонів-цистерн для перевезень широкої номенклатури вантажів.

Висновки

1. Проведено математичне моделювання повздовжньої динамічної навантаженості вагона-цистерни двохсекційного. Встановлено, що з урахуванням жорсткості енергопоглинального матеріалу, яким заповнено простір між секціями, 75 кН/м та коефіцієнті в'язкого опору 115 кН·с/м, максимальна величина прискорення, що діє на несучу конструкцію вагона-цистерни складає 37,2 м/с². Отримана величина прискорення на 7% нижче за прискорення, що виникає в конструкції без енергопоглинального матеріалу.

2. Визначено вплив сили удару на динамічну навантаженість несучої конструкції вагона-цистерни. Встановлено, що з урахуванням запропонованих заходів щодо удосконалення несучої конструкції вагона-цистерни прискорення, які діють на неї знаходяться в межах допустимих при величині сили повздовжнього удару у 3,72 МН.

Список літератури:

1. Iman H. Ashtiani, Subhash Rakheja, Waiz Ahmed. Investigation of coupled dynamics of a railway tank car and liquid cargo subject to a switch-passing maneuver. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: *Journal of Rail and Rapid Transit*. 2019, Vol. 233, Issue 10. <https://doi.org/10.1177/0954409718823650>
2. Shi H, Wang, L, Nicolsen, B, et al. Integration of geometry and analysis for the study of liquid sloshing in railroad vehicle dynamics. Proc IMechE, Part K: J Multi-body Dynamics. 2017, Vol. 231. P. 608–629.
3. Glib Vatulia, Anatolii Falendysh, Yevhen Orel, Mykhailo Pavliuchenkov. Structural Improvements in a Tank Wagon with Modern Software Packages. *Procedia engineering*. 2017, Vol. 187. P. 301–307.
4. Атаманчук Н. А., Цыганская Л. В. Направления совершенствования конструкций вагонов-цистерн для перевозки нефтепродуктов. *Транспорт Российской Федерации*. 2013, № 3(46). С. 14–17.
5. Песляк А. В., Битюцкий Н. А., Сувернев М. Н., Фомин А. Н. Повышение универсальности вагонов-цистерн для перевозки нефтехимических грузов. Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб. : ПГУПС, 2020, Т. 17, Вып. 4. С. 477–489. doi: 10.20295/1815-588X-2020-4-477-489
6. George Edward Street, Preetum Jayantilal Mistry, Michael Sylvester Johnson. Impact Resistance of Fibre Reinforced Composite Railway Freight Tank Wagons. *Journal of Composites Science*. 2021, Vol. 5 (6), Issue 152, <https://doi.org/10.3390/jcs5060152>
7. Fomin O., Gerlici J., Gorbunov M., Lovska A., Kravchenko K. Dynamics and strength of circular tube open wagons with aluminum foam filled center sills. *Materials*, 2021. Vol. 14 (8), 1915. <https://doi.org/10.3390/ma14081915>

8. Oleksij Fomin, Glib Vatulia, Alyona Lovska. Dynamic load modelling for tank containers with the frame of circle pipes and structurally improved fittings. *E3S Web of Conferences*. 2020, Vol. 166, 07001 (2020). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016607001>
9. Богомаз Г. И., Мехов Д. Д., Пилипченко О. П., Черномашенцева Ю. Г. Нагруженность контейнеров-цистерн, расположенных на железнодорожной платформе, при ударах в автосцепку. Зб. наук. праць «Динаміка та керування рухом механічних систем». Київ : АНУ, Інститут технічної механіки, 1992. С. 87–95.
10. Кривовязюк Ю. П. Оценка эквивалентной нагруженности четырехосных железнодорожных цистерн с жидкими грузами различной плотности при продольных ударах : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог и тяга поездов.» Днепропетровск, 1986. 157 с.
11. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Київ, 2015. 162 с.
12. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. Москва, 2016. 54 с.
13. Lovska A., Fomin O. A new fastener to ensure the reliability of a passenger coach car body on a railway ferry. *Acta Polytechnica*. 2020, Vol. 60(6), P. 478–485.
14. Lovska A., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Dynamic Load and Strength Determination of Carrying Structure of Wagons Transported by Ferries. *J. Mar. Sci. Eng.* 2020, Vol. 8(902). doi:10.3390/jmse8110902.
15. Lovska A., Fomin O., Kučera P., Pištěk V. Calculation of Loads on Carrying Structures of Articulated Circular-Tube Wagons Equipped with New Draft Gear Concepts. *Appl. Sci.* 2020, Vol. 10(7441), doi:10.3390/app10217441.
16. Lovska A., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Dynamic Load Modelling within Combined Transport Trains during Transportation on a Railway Ferry. *Appl. Sci.* 2020, Vol. 10(5710), <https://doi.org/10.3390/app10165710>.
17. Fomin Oleksij, Lovska Alyona. Determination of dynamic loading of bearing structures of freight wagons with actual dimensions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021, Vol. 2/7 (110), P. 6–15. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.220534>
18. ГОСТ 31232-2004. Контейнеры для перевозки опасных грузов. Требования по эксплуатационной безопасности. Минск, 2005. 6 с.

Fomin O.V., Lovska A.O. DYNAMICAL MODELLING OF THE CONTINUOUS LOADING OF A DOUBLE SECTION TANK WAGON

Increased volumes of liquid cargo through the international transport corridors necessitates the introduction into service of vehicles for their transportation. To ensure the efficiency of transport of liquid cargo by the railway introduced the concept of load-bearing design tank wagon bisection. The peculiarity of tank wagon design is that the internal volume of the boiler is divided into separate sections. This solution contributes to the possibility of simultaneous transport of diverse liquids in the tank wagon, reduced costs for maintenance, as well as empty runs. To reduce the dynamic load-bearing structures of the tank car in the space between the sections and the inner shell of the boiler is placed energopoglnalnyy material.

The mathematical modelling of the continuous dynamic loading of the tank wagon was carried out to justify the proposed improvement. The tank wagon was regarded as a system of several bodies: the load-bearing structure which is supported by type of bars (model 18–100) and the loading tank. The flow of the liquid cargo was described by a set of mathematical pendulums. Gasoline was taken as liquid cargo. The calculation was carried out assuming that the sections were 95% loaded. The value of the overhead impact force, which acts on the tank wagon is taken equal to 3.5 MN The determination of differential equations of motion was carried out by the method of variation of constant values and confirmed by Runge-Kutta method. Initial conditions are set equal to zero. It is found that the maximum magnitude of acceleration, which acts on the load carrying structure is 37.2 m/s². The obtained value of acceleration is 7% lower than the acceleration occurring in the structure without energy-global material.

The research will help to develop recommendations for designing modern tank wagons which have a high load capacity and are suitable to transport a wide range of cargo.

Key words: transport mechanics, tank wagon, load-bearing structure, dynamic load, dynamic load.