

Визначення особливостей динамічної навантаженості контейнерів-цистерн при перевезенні на залізничному поромі

О. В. Фомін, А. О. Ловська, О. І. Мельниченко, І. Ф. Шпильовий,
В. Г. Маслієв, О. В. Бамбура, М. М. Клименко

Проведено моделювання динамічної навантаженості контейнера-цистерни при перевезенні у складі комбінованого поїзда на залізничному поромі. Розроблено математичні моделі, які враховують можливі варіанти взаємодії контейнерів-цистерн з рамою вагонів-платформ. Розрахунки проведені стосовно контейнера-цистерни типорозміру ІСС, розміщеного на вагоні-платформі моделі ІЗ-4012М. Враховано, що перевезення контейнера-цистерни здійснюється на залізничному поромі "Герои Шипки" акваторією Чорного моря. Встановлено, що найбільша величина прискорень діє на контейнер-цистерну в випадку наявності переміщень вагона-платформи відносно палуби та контейнера-цистерни відносно рами. Загальна величина прискорення при цьому склала близько 0,9g.

Досліджено стійкість контейнера-цистерни при перевезенні на залізничному поромі. Розраховано допустимі кути крену залізничного порому, при яких забезпечується стійкість контейнера-цистерни відносно рами вагона-платформи.

Проведено комп'ютерне моделювання динамічної навантаженості контейнера-цистерни при перевезенні на залізничному поромі. Розрахунок проведений в середовищі програмного забезпечення CosmosWorks. Визначено поля та чисельні значення прискорень, які діють на контейнер-цистерну. Здійснено перевірку адекватності розроблених моделей за F-критерієм.

Проведені дослідження сприятимуть забезпеченню безпеки та створенню рекомендацій щодо перевезень комбінованих поїздів на залізничних поромах морем, а також проектуванню контейнерів-цистерн з покращеними техніко-економічними, міцністними та екологічними характеристиками

Ключові слова: контейнер-цистерна, динамічна навантаженість, моделювання навантаженості, коефіцієнт стійкості, залізнично-поромні перевезення

1. Вступ

Розвиток зовнішньоекономічних зв'язків між євразійськими державами сприяє створенню комбінованих транспортних систем. Відомо, що одним з найбільш поширених транспортних засобів при комбінованих перевезеннях є контейнери та контейнери-цистерни.

Для скорочення часу доставки вантажів від відправника до отримувача дістало поширення перевезення комбінованих поїздів на залізничних поромах (рис. 1).



Рис. 1. Завантаження комбінованих поїздів на залізничному поромі: *а* – з суховантажних контейнерів; *б* – з контейнерів-цистерн

При цьому для забезпечення стійкості вагонів-платформ з контейнерами (контейнерами-цистернами) відносно палуб здійснюється їх закріплення за допомогою багатообертових засобів (ланцюгові стяжки, механічні упор-домкрати, тупикові упори та гальмівні башмаки).

Кріплення контейнерів (контейнерів-цистерн) відносно рам вагонів-платформ здійснюється за типовою схемою, тобто шляхом встановлення фітингів на фітингові упори.

Важливо зазначити, що динамічні процеси, які супроводжують залізничних рухомий склад, у тому числі контейнери (контейнери-цистерни) при перевезенні морем значно відрізняються від умов експлуатації відносно магістральних колій. Це може сприяти перекиданню контейнерів (контейнерів-цистерн) відносно місця розміщення на вагоні-платформі та загрожуватиме безпеці руху залізничного порому. Крім того, наявність вільної поверхні наливного вантажу у котлі контейнера-цистерни сприяє додатковому динамічному навантаженню на нього та погіршенню стійкості при перевезенні морем.

Тому необхідним є дослідження динамічної навантаженості контейнерів-цистерн та створення рекомендацій щодо забезпечення безпеки перевезень на залізничних поромках. Також дані дослідження сприятимуть створенню контейнерів-цистерн з покращеними техніко-економічними, міцністними та екологічними характеристиками.

2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Результати оптимізації несучої конструкції контейнера-цистерни наведені у [1]. В роботі доведено доцільність проектування та впровадження в експлуатацію контейнерів-цистерн, як транспортних засобів. Розроблено удосконалену конструкцію контейнера-цистерни для перевезення світлих нафтопродуктів. Важливо зазначити, що при цьому до уваги не прийняті навантаження, які можуть діяти на контейнер-цистерну при перевезенні на залізничному поромі.

Вимоги до несучих конструкцій сучасних транспортних засобів висвітлені у [2]. Дані вимоги пропонується застосовувати на стадії виготовлення нових

конструкцій транспортних засобів, а також тих, що проходять модернізацію. Однак при цьому не приділяється уваги питанню дослідження динамічної навантаженості контейнерів-цистерн при перевезенні на залізничних поромках.

Заходи щодо покращення стійкості рухомого складу при експлуатаційних режимах навантаження висвітлені у [3]. Результати математичного моделювання підтверджені шляхом експериментальних досліджень.

Визначення ударної навантаженості транспортних засобів проводиться у [4]. В якості досліджуваного параметру розглянуті прискорення, як складові динамічного навантаження. Розрахунки проведені шляхом математичного моделювання. При цьому визначення стійкості контейнерів-цистерн при експлуатаційних режимах навантаження в даних роботах не проводиться.

Визначення динамічної навантаженості контейнерів при експлуатаційних режимах проводиться у [5]. Наведені математичні моделі обґрунтовані комп'ютерним моделюванням та перевіркою на адекватність.

При цьому дослідження динамічної навантаженості контейнерів-цистерн при перевезенні на залізничному поромі у роботі не проводиться.

Дослідження динамічної навантаженості транспортних засобів при перевезенні на залізничному поромі проводиться у [6, 7]. Результати математичного моделювання підтверджені комп'ютерним. Однак при цьому до уваги не прийнятий випадок динамічної навантаженості контейнера-цистерни при перевезенні у складі комбінованого поїзда на залізничному поромі.

Визначення показників міцності контейнера-цистерни моделі T11, розміщеного на вагоні-платформі, при маневровому співударянні проводиться у [8]. Результати теоретичних досліджень підтверджені експериментальними, які проведені за методом електричного тензOMETрування. Моделювання динамічної навантаженості транспортних засобів при експлуатації відносно магістральних колій проводиться у [9]. Для покращення показників динаміки транспортних засобів запропоновано використання перспективних конструкцій візків типу LEILA та SUSTRAIL.

Визначення динамічної навантаженості контейнерів-цистерн у складі комбінованих поїздів при перевезенні на залізничних поромках в даних роботах не досліджувалося.

Моделювання повздожньої навантаженості контейнера-цистерни, розміщеного на довгобазній конструкції вагона-платформи, проводиться у [10]. Наведені чисельні значення прискорень, які діють на контейнер-цистерну з урахуванням можливих переміщень фітингів відносно фітингових упорів. Питанню дослідження динамічної навантаженості контейнера-цистерни при перевезенні на залізничному поромі в даній роботі уваги не приділяється.

Визначення динамічної навантаженості транспортних засобів при маневровому співударянні проводиться у [11]. Наведено математичну модель, яка дозволяє отримати прискорення, що діють на транспортний засіб. Отримані результати підтверджені шляхом комп'ютерного моделювання. Однак визначення динамічної навантаженості контейнерів-цистерн у складі комбінованих поїздів в роботі не проводиться.

Аналіз літературних джерел [1–11] дозволяє зробити висновок, що досі належної уваги питанням визначення динамічної навантаженості контейнерів-цистерн при перевезенні на залізничному поромі не приділялося. Це зумовлює необхідність проведення відповідних досліджень та формування рекомендацій, які сприятимуть підвищенню ефективності експлуатації контейнерів-цистерн та безпеці руху на сучасному етапі розвитку транспортної галузі.

3. Мета і завдання дослідження

Метою роботи є визначення особливостей динамічної навантаженості контейнерів-цистерн при перевезенні на залізничному поромі. Це дасть можливість підвищити безпеку перевезень контейнерів-цистерн на залізничних поромах, а також сприятиме створенню контейнерів-цистерн з покращеними техніко-економічними, експлуатаційними та екологічними показниками.

Для досягнення зазначеної мети визначені такі задачі:

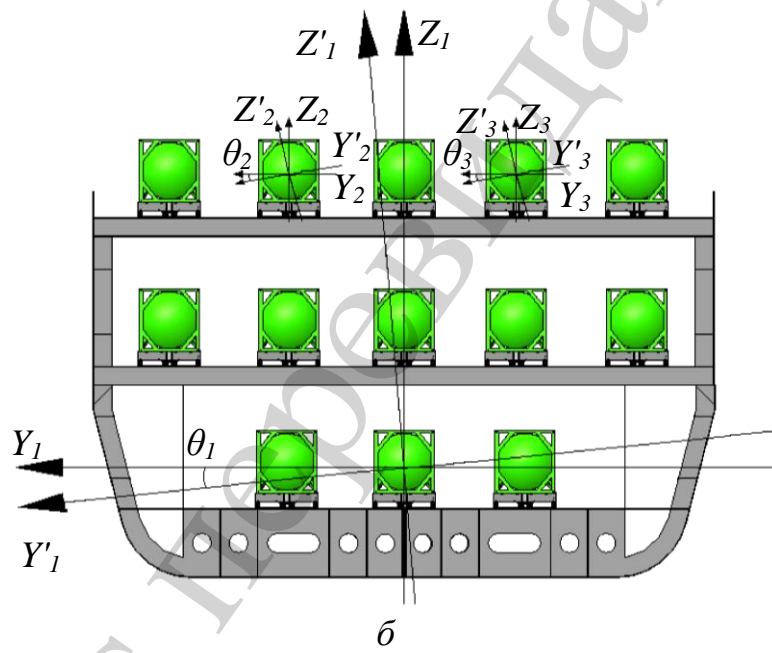
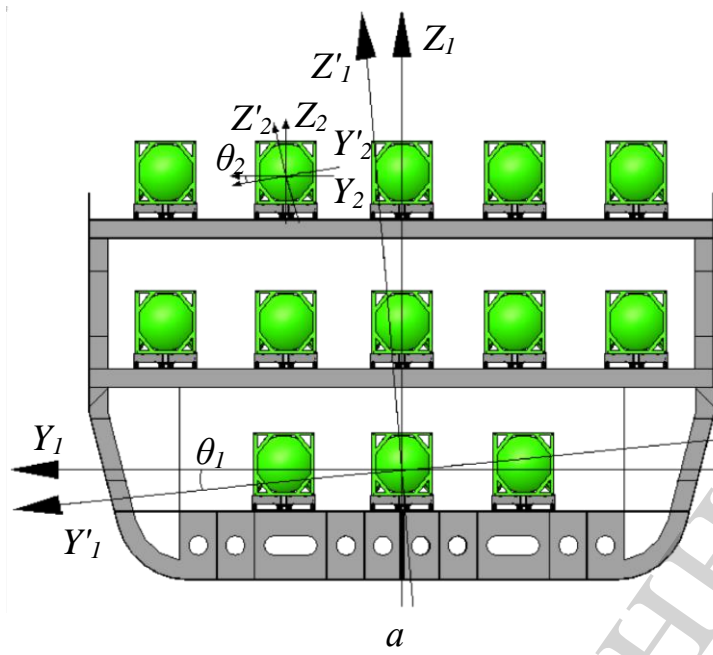
- провести математичне моделювання динамічної навантаженості контейнерів-цистерн при перевезенні на залізничному поромі;
- дослідити стійкість контейнерів-цистерн відносно рам вагонів-платформ при перевезенні на залізничному поромі;
- провести комп'ютерне моделювання динамічної навантаженості контейнерів-цистерн при перевезенні на залізничному поромі;
- провести перевірку адекватності розроблених моделей динамічної навантаженості контейнерів-цистерн при перевезенні на залізничному поромі.

4. Математичне моделювання динамічної навантаженості контейнерів-цистерн при перевезенні на залізничному поромі

Для визначення динамічної навантаженості контейнерів-цистерн при перевезенні на залізничному поромі складено математичні моделі (1)–(3). До уваги прийняті три схеми взаємодії контейнерів-цистерн з рамою вагонів-платформ:

- відсутність переміщень вагона-платформи з контейнерами-цистернами відносно палуби. Тобто при коливаннях залізничного порому вагон-платформа та контейнера-цистерни, розміщені на ньому, повністю повторюють траєкторію коливань судна (рис. 2, *а*);
- наявність переміщень вагона-платформи відносно палуби та відсутність переміщень контейнерів-цистерн відносно рами вагона-платформи (рис. 2, *б*);
- наявність переміщень вагона-платформи відносно палуби та контейнерів-цистерн відносно рами вагона-платформи (рис. 2, *в*).

При цьому до уваги прийняті кутові переміщення залізничного порому відносно повздовжньої осі (бортова хитавиця), як випадок найбільшої навантаженості вагонів-платформ з контейнерами-цистернами при перевезенні морем [12, 13].



He E O B T A H H H M

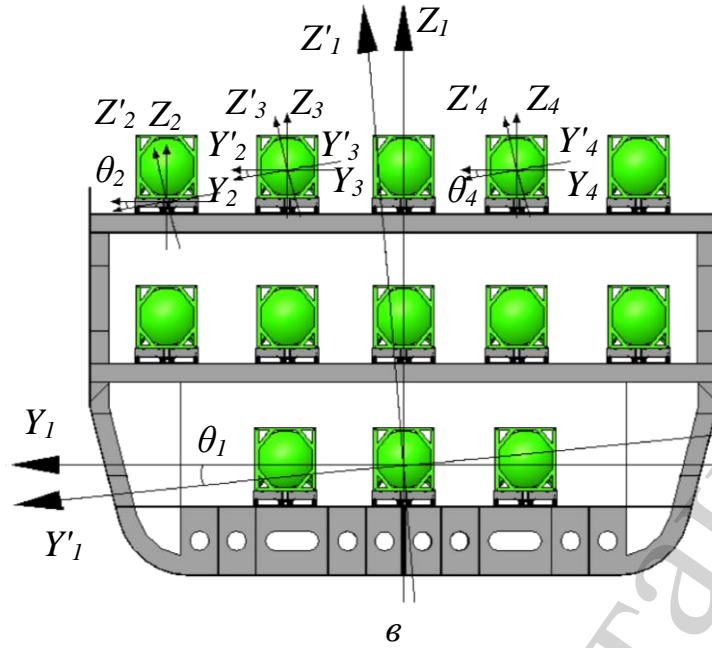


Рис. 2. Схеми переміщень контейнерів-цистерн у складі комбінованих поїздів при перевезенні на залізничному поромі: *а* – при відсутності переміщень вагона-платформи з контейнерами-цистернами відносно палуб; *б* – при наявності переміщень вагона-платформи відносно палуби та відсутності переміщень контейнерів-цистерн відносно рами вагона-платформи; *в* – при наявності переміщень вагона-платформи відносно палуби та контейнерів-цистерн відносно рами вагона-платформи

$$\begin{cases} \left(\frac{D}{12 \cdot g} (B^2 + 4z_g^2) \right) \ddot{\theta}_1 + \left(\Lambda_\theta \cdot \frac{B}{2} \right) \dot{\theta}_1 = p' \cdot \frac{h}{2} + \Lambda_\theta \cdot \frac{B}{2} \cdot \dot{F}(t), \\ I_{ij} \cdot \ddot{\theta}_2 - m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\theta}_1 + g \cdot m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \theta_2 = 0, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \left(\frac{D}{12 \cdot g} (B^2 + 4z_g^2) \right) \ddot{\theta}_1 + \left(\Lambda_\theta \cdot \frac{B}{2} \right) \dot{\theta}_1 = p' \cdot \frac{h}{2} + \Lambda_\theta \cdot \frac{B}{2} \cdot \dot{F}(t), \\ \left(I_{\theta i} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij}^2 \right) \cdot \ddot{\theta}_2 + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\theta}_3 - \\ - g \cdot \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \right) \cdot \theta_2 = M_K^{\text{ВПФ}}, \\ I_{ij} \cdot \ddot{\theta}_3 - m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\theta}_2 + g \cdot m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \theta_3 = 0, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases}
 \left(\frac{D}{12 \cdot g} (B^2 + 4z_g^2) \right) \ddot{\theta}_1 + \left(\Lambda_\theta \cdot \frac{B}{2} \right) \dot{\theta}_1 = p' \cdot \frac{h}{2} + \Lambda_\theta \cdot \frac{B}{2} \cdot \dot{F}(t), \\
 I_{\text{ВПФ}} \cdot \ddot{\theta}_2 = p'_{\text{ВПФ}} \cdot \frac{h_{\text{ВПФ}}}{2} + M_{\text{ВПФ}}^{\text{П}} + M_{\text{ВПФ}}^{\text{К}}, \\
 \left(I_{\theta_i} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij}^2 \right) \cdot \ddot{\theta}_3 + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\theta}_4 - \\
 - g \cdot \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \right) \cdot \theta_3 = M_{\text{К}}^{\text{ВПФ}}, \\
 I_{ij} \cdot \ddot{\theta}_4 - m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\theta}_3 + g \cdot m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \theta_4 = 0.
 \end{cases} \quad (3)$$

Початок системи координат розміщений у центрі мас залізничного порома.

Для залізничного порома: D – вагове водовитіснення; B – ширина залізничного порома; h – висота борта залізничного порома; Λ_θ – коефіцієнт опору коливанням; z_g – координата центру ваги залізничного порома; p' – вітрове навантаження; $F(t)$ і – закон дії зусилля, яке збудує рух залізничного порома з вагонами, розміщеними на його палубах.

Для вагона-платформи: $I_{\text{ВПФ}}$ – момент інерції вагона-платформи відносно повздовжньої осі; $p'_{\text{ВПФ}}$ – вітрове навантаження на бокову проекцію вагона-платформи; $h_{\text{ВПФ}}$ – висота бокової проекції вагона-платформи; $M_{\text{ВПФ}}^{\text{П}}$ – момент сил, який виникає між вагоном-платформою та палубою залізничного порома; $M_{\text{ВПФ}}^{\text{К}}$ – момент сил, який виникає між вагоном-платформою та контейнером-цистерною.

Для контейнера-цистерни та наливного вантажу:

I_{ij} – момент інерції маятника; m_{ij} – маса j -го маятника у i -му контейнері-цистерні; 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 бере участі в русі відносно котла; z_{ci} – висота центру ваги контейнера-цистерни; m_i – маса тіла, яке еквівалентне i -му контейнеру-цистерні з частиною наливного вантажу, що не бере участі в переміщенні відносно котла; $M_{\text{К}}^{\text{ВПФ}}$ – момент сил, що виникає між контейнером-цистерною та вагоном-платформою.

У якості вагона-прототипу обрано вагон-платформу моделі 13-4012М. Дослідження проведені стосовно контейнера-цистерни типорозміру 1СС, завантаженого бензином до 95 % місткості котла [14]. Враховано, що перевезення контейнерів-цистерн здійснюється на залізничному поромі типу “Герои Шипки” через акваторію Чорного моря.

Рух наливного вантажу описувався сукупністю математичних маятників [10].

Розв’язання диференціальних рівнянь (1)–(3) здійснено за методом Рунге-Кутта, реалізованого в середовищі програмного забезпечення MathCad [15, 16].

Перехід від систем диференціальних рівнянь другого порядку (1)–(3) до систем диференціальних рівнянь першого порядку (4)–(6), проводився для застосування стандартних алгоритмів вирішення систем за допомогою функції `rkfixed` Mathcad.

Тобто, для першої схеми при $y_1 = \theta_1$, $y_2 = \dot{\theta}_1$, $y_3 = \theta_2$, $y_4 = \dot{\theta}_2$ маємо

$$Q1(t, y) = \begin{bmatrix} y_2 \\ y_4 \\ \frac{p' \cdot \frac{h}{2} + \Lambda_0 \cdot \frac{B}{2} \cdot \dot{F}(t) - \left(\Lambda_0 \cdot \frac{B}{2} \right) y_2}{\left(\frac{D}{12 \cdot g} (B^2 + 4z_g^2) \right)} \\ \frac{m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \dot{y}_2 - g \cdot m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot y_3}{I_{ij}} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

$$Z1 = rkfixed(Y0, tn, tk, n', Q1),$$

де $Y0$ – вектор, який містить початкові умови, tn , tk – величини, які визначають початкову та кінцеву змінну інтегрування, n' – фіксоване число кроків, $Q1$ – символічний вектор.

Для другої схеми при $y_1 = \theta_1$, $y_2 = \dot{\theta}_1$, $y_3 = \theta_2$, $y_4 = \dot{\theta}_2$, $y_5 = \theta_3$, $y_6 = \dot{\theta}_3$ маємо

$$Z2(t, y) = \begin{bmatrix} y_2 \\ y_4 \\ y_6 \\ \frac{p' \cdot \frac{h}{2} + \Lambda_0 \cdot \frac{B}{2} \cdot \dot{F}(t) - \frac{\Lambda_0 \cdot B}{I} \cdot y_2}{I} \\ - \left(\sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \right) \frac{d}{dt} y_6 + \\ + g \cdot \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \right) \cdot y_3 \\ \frac{M_K^{ВПФ}}{\left(I_{\theta_i} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij}^2 \right)} + \frac{M_K^{ВПФ}}{\left(I_{\theta_i} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij}^2 \right)} \\ \frac{\left(m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \right) \cdot \frac{d}{dt} y_4 - \left(g \cdot m_{ij} \cdot l_{ij} \right) \cdot y_5}{I_{ij}} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

$$Z2 = rkfixed(Y0, tn, tk, n, Q2).$$

Для третьої схеми при $y_1 = \theta_1$, $y_2 = \dot{\theta}_1$, $y_3 = \theta_2$, $y_4 = \dot{\theta}_2$, $y_5 = \theta_3$, $y_6 = \dot{\theta}_3$, $y_7 = \theta_4$, $y_8 = \dot{\theta}_4$ маємо

$$Q3(t, y) = \begin{array}{c} y_2 \\ y_4 \\ y_6 \\ y_8 \\ \frac{p' \cdot \frac{h}{2} + \Lambda_\theta \cdot \frac{B}{2} \cdot \dot{F}(t) - \left(\Lambda_\theta \cdot \frac{B}{2} \right) y_2}{\left(\frac{D}{12 \cdot g} (B^2 + 4z_g^2) \right)} \\ \frac{p'_{\text{ВПФ}} \cdot \frac{h_{\text{ВПФ}}}{2} + M_{\text{ВПФ}}^{\text{П}} + M_{\text{ВПФ}}^{\text{К}}}{I_{\text{ВПФ}}} \\ \frac{M_{\text{К}}^{\text{ВПФ}} - \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \dot{y}_8 + g \cdot \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \right) \cdot y_5}{\left(I_{\theta_i} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij}^2 \right)} \\ \frac{m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \dot{y}_6 - g \cdot m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot y_7}{I_{ij}} \end{array} \cdot \quad (6)$$

$$Z3 = rkfixed(Y0, tn, tk, n, Q3).$$

Початкові переміщення та швидкості прийняті рівними нулю.

Результати розрахунку у вигляді залежностей прискорень, які діють на контейнер-цистерну від курсових кутів хвилі по відношенню до корпусу залізничного порому, наведені на рис. 3. Дані залежності описуються рівняннями, наведеними на рисунку.

Встановлено, що при відсутності переміщень вагона-платформи та контейнерів-цистерн відносно початкового положення загальна величина прискорення, яке діє на крайній від фальшборта вагон-платформу з контейнерами-цистернами, склала близько $0,3g$.

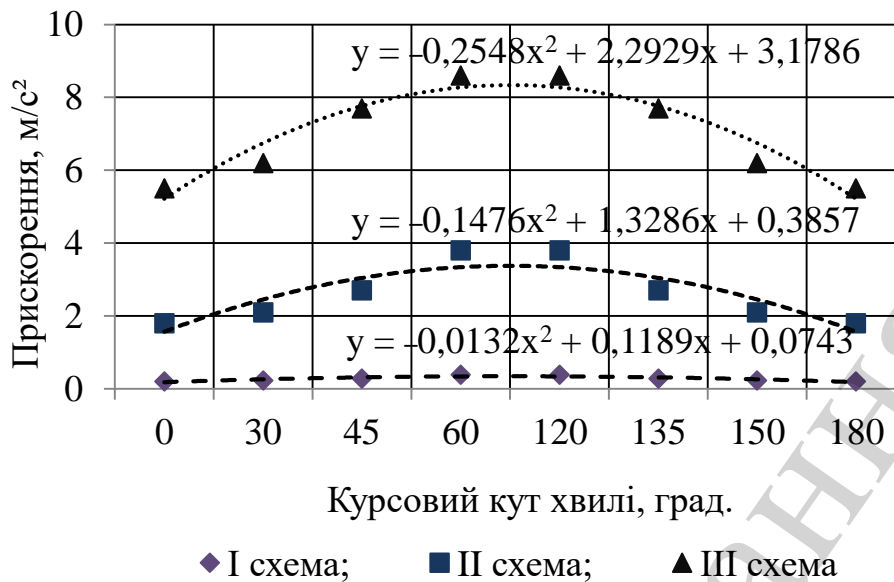


Рис. 3. Прискорення, які діють на контейнер-цистерну при перевезенні на залізничному поромі

При наявності переміщень вагона-платформи відносно палуби та нерухомості контейнерів-цистерн відносно рами загальна величина прискорення, яке діє на крайній від фальшборта контейнер-цистерну, склала близько 0,6g. Дана величина прискорення, перевищує ту, що діє на контейнер-цистерну при експлуатації відносно магістральних колій на 17 % [17].

Для випадку переміщень вагона-платформи відносно палуби та контейнера-цистерни відносно рами загальна величина прискорення, яке діє на крайній від фальшборта контейнер-цистерну, склала близько 0,9g (рис. 4). Тобто дана величина прискорення перевищує на 40 % прискорення, яке діє на контейнер-цистерну при експлуатації відносно магістральних колій.

Кожному кольору кривої на рис. 4 відповідає величина прискорення, яка отримана для певного курсового кута хвилі по відношенню до корпусу залізничного порому з вагонами-платформами, розміщеними на ньому (підписи кутів наведені збоку осі ординат).

Отже максимальні прискорення, які діють на контейнер-цистерну, відповідають курсовим кутам морської хвилі по відношенню до корпусу залізничного порому – 60° та 120°.

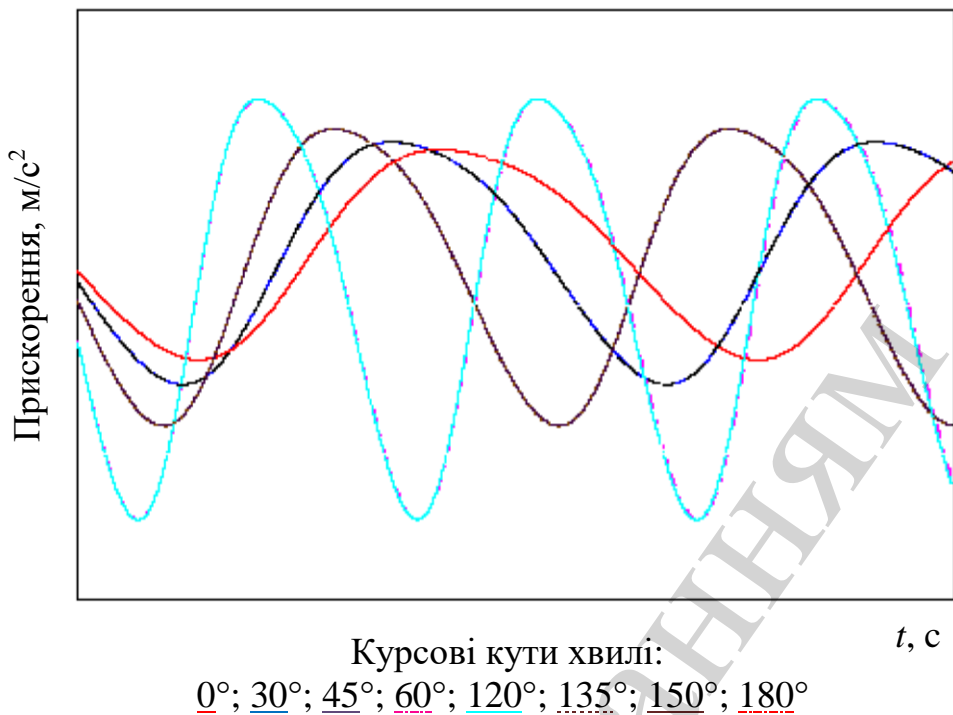


Рис. 4. Прискорення, які діють на контейнер-цистерну, розміщену на вагоні-платформі при перевезенні залізничним поромом

5. Дослідження стійкості контейнерів-цистерн відносно рам вагонів-платформ при перевезенні на залізничному поромі

Отримані величини прискорень враховано при дослідженні стійкості контейнера-цистерни відносно рами вагона-платформи.

Для забезпечення стійкості рівноваги контейнера-цистерни відносно рами вагона-платформи повинна виконуватися умова:

$$k_c = \frac{M_{\text{відн}}}{M_{\text{пер}}} \geq 1, \quad (7)$$

де $M_{\text{відн}}$ – величина відновлюючого моменту; $M_{\text{пер}}$ – величина перекидаючого моменту.

Встановлено, що стійкість контейнерів-цистерн для найбільш несприятливого випадку навантаження забезпечується при куті крену до 10° (рис. 5). При другій схемі стійкість контейнерів-цистерн забезпечується при кутах крену до 12° , при третій – до 25° .

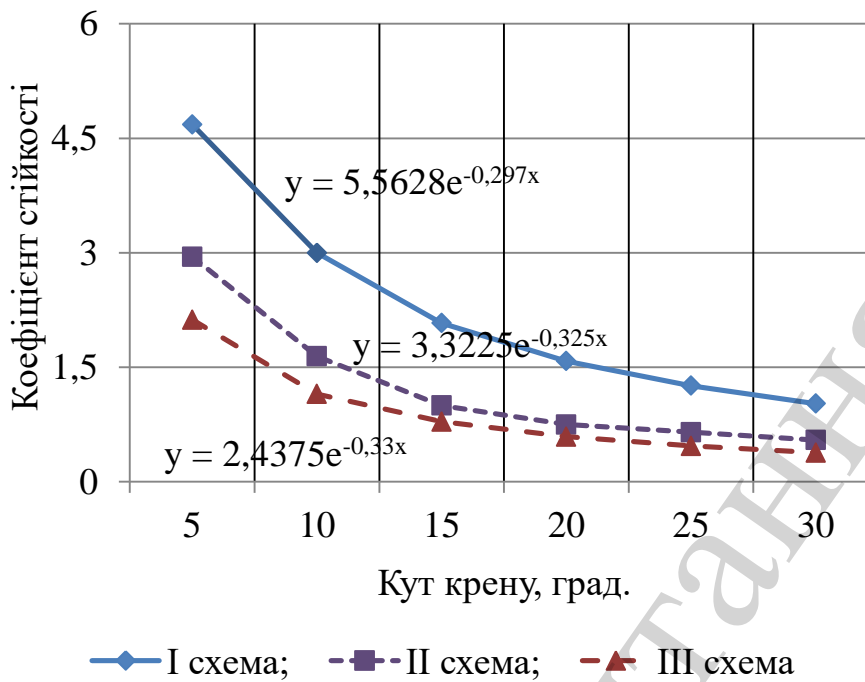


Рис. 5. Залежність коефіцієнту стійкості контейнера-цистерни відносно рами вагона-платформи від кута крену залізничного порому

Отже, для забезпечення безпеки перевезень наливних вантажів у контейнерах-цистернах морем важливим є дотримання відповідних умов, а саме – дотримання кутів крену залізничного порому в межах до 10° .

6. Комп'ютерне моделювання динамічної навантаженості контейнерів-цистерн при перевезенні на залізничному поромі

Для дослідження динамічної навантаженості контейнерів-цистерн при перевезенні на залізничному поромі проведено комп'ютерне моделювання з використанням методу скінчених елементів, реалізованого в програмному пакеті CosmosWorks (Франція) [18, 19].

У якості скінчених елементів застосовані просторові ізопараметричні тетраедри. Оптимальна кількість елементів визначена за графоаналітичним методом. Основні дані щодо скінчено-елементної моделі контейнерів-цистерн, розміщених на вагоні-платформі при перевезенні на залізничному поромі наведені в табл. 1.

Модель для визначення динамічної навантаженості контейнера-цистерни, розміщеного на вагоні-платформі при перевезенні на залізничному поромі, наведена на рис. 6. Враховано, що на вагон-платформу діє вертикальне навантаження від контейнерів-цистерн $P_{\text{в}}^{\text{ВПФ}}$ (рис. 7), розміщених на ньому, горизонтальне навантаження на фітингові упори $P_{\text{р}}^{\text{ВПФ}}$ від фітингів, а також навантаження, яке діє на вагон-платформу через вузли для закріплення ланцюгових стяжок $P_{\text{лс}}$. Внаслідок просторового розміщення ланцюгових стяжок [20, 21] навантаження, яке передається через них на раму вагона-платформи, розкладалося на три складові з урахуванням кутів розміщення в просторі.

Таблиця 1

Дані щодо скінчено-елементної моделі контейнерів-цистерн, розміщених на вагоні-платформі при перевезенні на залізничному поромі

Параметр	Значення
Кількість точок Якобіана	4
Кількість вузлів	396934
Кількість елементів	1192935
Максимальний розмір елементу	70
Мінімальний розмір елементу	14
Мінімальна кількість елементів в колі	9
Співвідношення збільшення розмірів елементів	1,7
Максимальне співвідношення боків	13317
Відсоток елементів зі співвідношенням боків менше 3	36,7
Відсоток елементів зі співвідношенням боків менше 10	15,4

Закріплення вагона-платформи здійснювалося в зонах обпирання на ходові частини, а також робочі поверхні механічних упор-домкратів. Для цього на основних повздовжніх балках рами вагона-платформи в зоні взаємодії зі шворневими встановлювалися накладки, круглої форми, діаметр яких дорівнює діаметру робочих частин механічних упор-домкратів.

На котел контейнера-цистерни діє вертикальне-статичне навантаження $P_{\text{в}}^{\text{ст}}$, тиск від наливного вантажу $P_{\text{нв}}$ та вітрове навантаження $P_{\text{в}} \dots$

Закріплення контейнера-цистерни здійснювалося у зонах його обпирання на вагон-платформу. В якості матеріалу конструкції використано сталь марки 09Г2С. Результати розрахунку наведені на рис. 8.

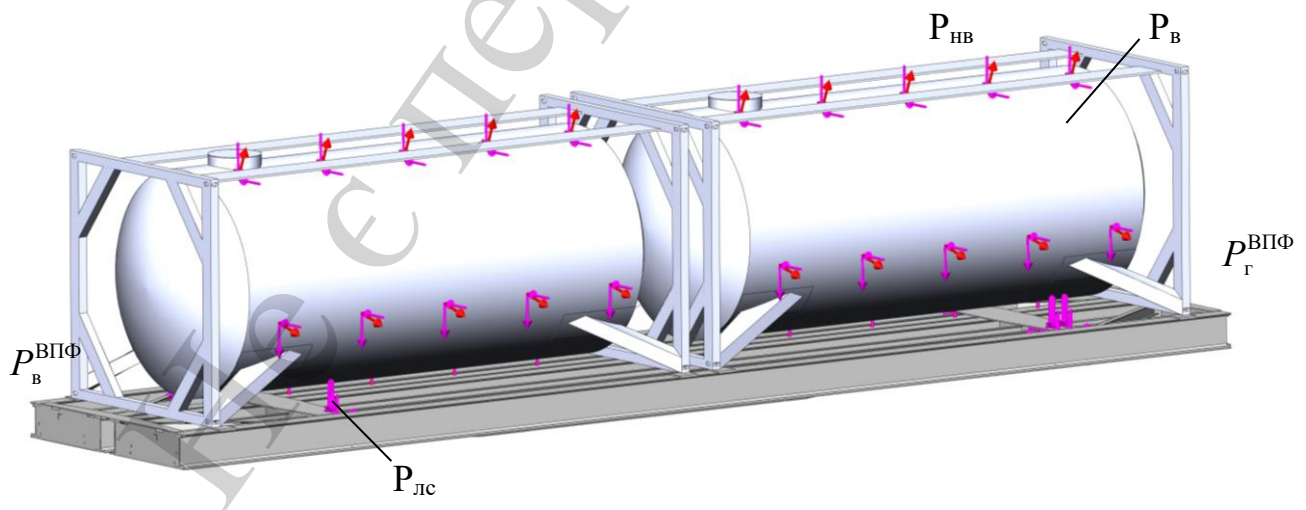


Рис. 6. Модель для визначення динамічної навантаженості контейнера-цистерни при перевезенні на залізничному поромі

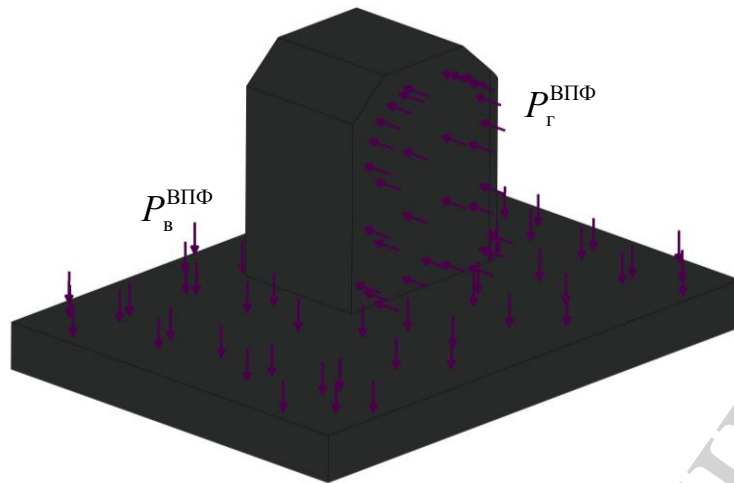


Рис. 7. Навантаження, які діють на фітинговий упор вагона-платформи від фітинга контейнера при коливаннях залізничного порому

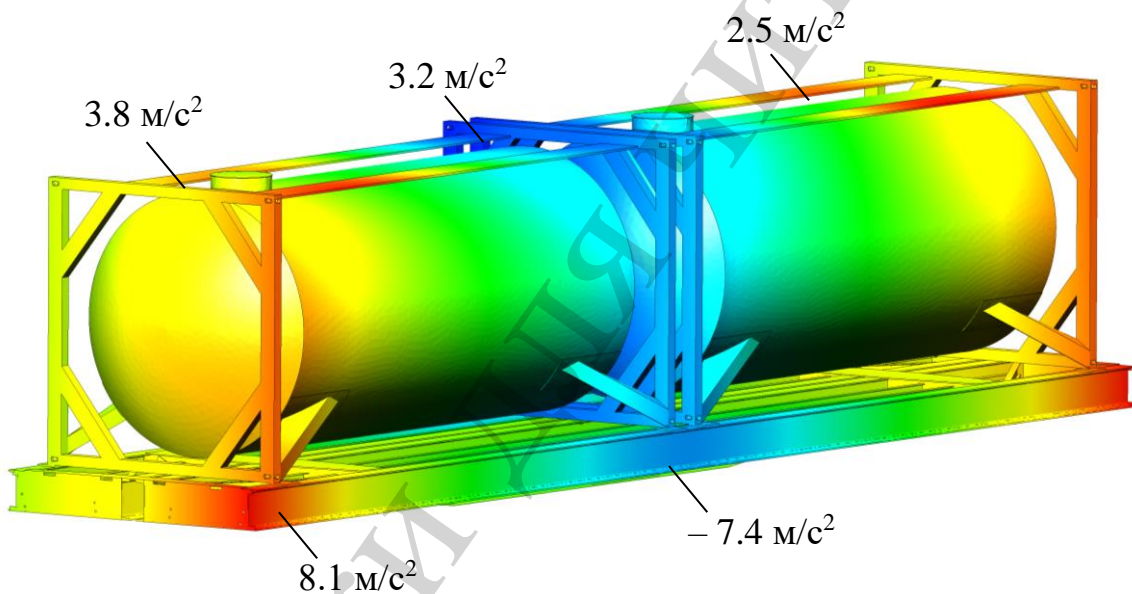


Рис. 8. Розподілення полів прискорень, які діють на контейнер-цистерну при перевезенні на залізничному поромі

Максимальні прискорення, які діють на контейнер-цистерну, зосереджені у рамі з боку натягіння ланцюгових стяжок та складають близько $0,9g$. У верхній частині котла контейнера-цистерни прискорення склали $0,3g$.

7. Перевірка адекватності розроблених моделей динамічної навантаженості контейнерів-цистерн при перевезенні на залізничному поромі

Для перевірки адекватності розроблених моделей динамічної навантаженості контейнерів-цистерн при перевезенні на залізничному поромі, проведено розрахунок за F-критерієм [22, 23].

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2}, \quad (8)$$

де $S_{ад}^2$ – дисперсія адекватності; S_y^2 – дисперсія відтворюваності.

В якості варіаційного параметру враховано кут крену залізничного порому. Результати розрахунку наведені в табл. 2.

Розбіжність між результатами математичного та комп'ютерного моделювання динамічної навантаженості контейнера-цистерни при перевезенні на залізничному поромі наведено на рис. 9.

При цьому оптимальна кількість вимірів визначена на критерієм Стюдента:

$$n = \frac{t^2 \cdot \sigma^2}{\delta^2}, \quad (9)$$

де t – табличне значення критерію Стюдента; σ – середньоквадратичне відхилення випадкової величини; δ^2 – абсолютна погрішність результату вимірювань.

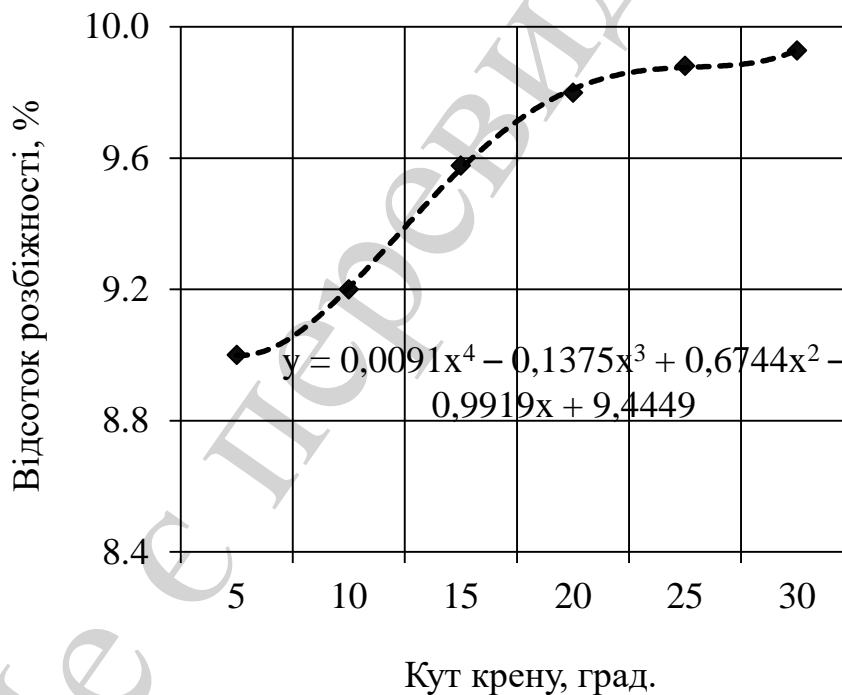


Рис. 9. Розбіжність між результатами математичного та комп'ютерного моделювання динамічної навантаженості контейнера-цистерни

Результати проведених розрахунків дозволили зробити висновок, що розрахункове значення F-критерію складає $F_p=0,81$ при табличному $F_t=4,53$. Отже, гіпотеза про адекватність не відхиляється.

Таблиця 2

Результати моделювання динамічної навантаженості контейнера-цистерни при перевезенні на залізничному поромі

Кут крену, град.	Прискорення, яке діє на контейнер-цистерну, м/с ²	
	Математичне моделювання	Комп'ютерне моделювання
5	3,8	3,4
10	7,4	6,7
15	11,3	10,2
20	15	13,5
25	18,2	16,4
30	21,5	19,4

8. Обговорення результатів визначення динамічної навантаженості контейнерів-цистерн при перевезенні на залізничному поромі

Визначено динамічну навантаженість контейнера-цистерни при перевезенні на залізничному поромі. Для цього складено математичні моделі, які описують коливання контейнера-цистерни при кутових переміщеннях залізничного порому відносно повздовжньої осі. Особливістю моделювання є те, що до уваги прийняті різні схеми взаємодії контейнера-цистерни з вагоном-платформною, розміщеним на палубі залізничного порому. Встановлено, що максимальна величина прискорення має місце при наявності переміщень вагона-платформи відносно палуби та контейнера-цистерни відносно рами. Чисельне значення прискорення при цьому склало близько 0,9g. Дана величина перевищує прискорення, що діють на контейнер-цистерну при експлуатації відносно магістральних колій.

Тому для забезпечення надійності експлуатації контейнерів-цистерн необхідним є врахування на стадії проектування навантажень, що діють на них при перевезенні на залізничних поромах.

Розраховано коефіцієнт стійкості контейнера-цистерни відносно рами вагона-платформи. Визначено допустимі кути крену залізничного порому при яких забезпечується стійкість контейнера-цистерни відносно рами. Для найбільш несприятливого випадку навантаження стійкість контейнера-цистерни забезпечується при кутах крену залізничного порому до 10°. Дані розрахунки сприятимуть підвищенню безпеки перевезень контейнерів-цистерн на залізничних поромах.

Проведено комп'ютерне моделювання динамічної навантаженості контейнера-цистерни при перевезенні на залізничному поромі. При складанні моделі міцності враховані навантаження, які діють на контейнер-цистерну від наливного вантажу, а також від фітингових упорів вагона-платформи. Результати моделювання дозволили визначити поля дислокації прискорень відносно контейнера-цистерни та їх чисельні значення. Отримані результати верифіковано за F-критерієм.

Таким чином, проведені дослідження дозволили визначити динамічну навантаженість контейнера-цистерни при перевезенні у складі комбінованого поїзда на залізничному поромі.

Важливо зазначити, що наведені математичні моделі не враховують стохастичність збурюючої дії, тобто морського хвилювання. В рамках даного дослідження не приділялося уваги визначенню динамічної навантаженості контейнера-цистерни з урахуванням різного рівню заповнення котла наливним вантажем. Також приймалося припущення про наявність сповзаючої кришки на верхній наливного вантажу, тобто не враховувалися його поверхневі збурення.

На даному етапі дослідження обмежені комп'ютерним моделюванням динамічної навантаженості контейнера-цистерни при перевезенні на залізничному поромі. В подальшому розвитку даного питання важливим є проведення фізичного експерименту.

9. Висновки

1. Проведено математичне моделювання динамічної навантаженості контейнерів-цистерн при перевезенні на залізничному поромі. Встановлено, що максимальна величина прискорення, яке діє на контейнер-цистерну при перевезенні на залізничному поромі морем, виникає в випадку наявності переміщень вагона-платформи відносно палуби та контейнерів-цистерн відносно рами вагона-платформи. З урахуванням горизонтальної складової прискорення вільного падіння загальна величина прискорення склала близько $0,9g$ та відповідає курсовим кутам морської хвилі по відношенню до корпусу залізничного порому – 60° та 120° .

2. Досліджено стійкість контейнерів-цистерн відносно рам вагонів-платформ при перевезенні на залізничному поромі. Стійкість контейнерів-цистерн для найбільш несприятливого випадку навантаження забезпечується при куті крену до 10° .

3. Проведено комп'ютерне моделювання динамічної навантаженості контейнерів-цистерн при перевезенні на залізничному поромі. Максимальні прискорення, які діють на контейнер-цистерну, зосереджені у рамі з боку натягання ланцюгових стяжок та складають близько $0,9g$. У верхній частині котла контейнера-цистерни прискорення склали $0,3g$.

4. Проведено перевірку адекватності розроблених моделей динамічної навантаженості контейнерів-цистерн при перевезенні на залізничному поромі. При цьому розбіжність між результатами математичного та комп'ютерного моделювання склала близько 10 %. Результати проведених розрахунків дозволили зробити висновок, що гіпотеза про адекватність розроблених моделей не відхиляється.

Література

1. Мямлин, С. В., Кебал, Ю. В., Кондратюк, С. М. (2012). Перспективные конструкции контейнеров-цистерн для перевозки светлых нефтепродуктов, аммиака и углеводородных газов. Залізничний транспорт України, 2, 44–46.

2. Fomin, O. V., Burlutsky, O. V., Fomina, Yu. V. (2015). Development and application of cataloging in structural design of freight car building. Metallurgical and Mining Industry, 2, 250–256.

3. Gerlici, J., Lack, T., Gorbunov, M., Domin, R., Kovtanets, M., Kravchenko, K. (2017). Slipping and skidding occurrence probability decreasing by means of the friction controlling in the wheel-braking pad and wheel-rail contacts. *Manufacturing technology*, 17 (2), 179–186.
4. Zamecnik, J., Jagelcak, J. (2015). Evaluation of wagon impact tests by various measuring equipment and influence of impacts on cargo stability. *Communications*, 17 (4), 21–27.
5. Lovskaya, A., Ryibin, A. (2016). The study of dynamic load on a wagon-platform at a shunting collision *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (7 (81)), 4–8. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.72054>
6. Fomin, O., Lovska, A., Kulbovskiy, I., Holub, H., Kozarchuk, I., Kharuta, V. (2019). Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (7 (98)), 6–12. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160456>
7. Fomin, O., Lovska, A., Masliyev, V., Tsymbaliuk, A., Burlutski, O. (2019). Determining strength indicators for the bearing structure of a covered wagon's body made from round pipes when transported by a railroad ferry. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (7 (97)), 33–40. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154282>
8. Makeev, С. В., Буйленков, П. М. (2018). Особенности расчета напряженно-деформированного состояния танка-контейнера с учетом реального нагружения в эксплуатации. *НАУКА–ОБРАЗОВАНИЕ–ПРОИЗВОДСТВО: Опыт и перспективы развития: сборник материалов XIV Международной научно-технической конференции, посвященной памяти доктора технических наук, профессора Е. Г. Зудова. Т. 1: Горно-металлургическое производство. Машиностроение и металлообработка. Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ*, 174–184.
9. Iwnicki, S. D., Stichel, S., Orlova, A., Hecht, M. (2015). Dynamics of railway freight vehicles. *Vehicle System Dynamics*, 53 (7), 995–1033. doi: <https://doi.org/10.1080/00423114.2015.1037773>
10. Богомаз, Г. И., Мехов, Д. Д., Пилипченко, О. П., Черномашенцева, Ю. Г. (1992). 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, 87–95.
11. Okorokov, A., Fomin, O., Lovska, A., Vernigora, R., Zhuravel, I., Fomin, V. (2018). Research into a possibility to prolong the time of operation of universal open top wagon bodies that have exhausted their standard resource. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (7 (93)), 20–26. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.131309>
12. Шиманский, Ю. А. (1963). *Динамический расчет судовых конструкций*. Ленинград, 444.
13. Маков, Ю. Л. (2007). *Качка судов*. Калининград, 321.
14. Правила перевозок опасных грузов. К соглашению о международном железнодорожном грузовом сообщении (2011). Т. 3. ОСЖД, 531.

15. Кирьянов, Д. В. (2006). Mathcad 13. СПб., 608.
16. Дьяконов, В. (2000). МATHCAD 8/2000. СПб.: Питер, 592.
17. ГОСТ 31232-2004. Контейнеры для перевозки опасных грузов. Требования по эксплуатационной безопасности (2005). Минск, 6.
18. Алямовский, А. А. (2007). SolidWorks/COSMOSWorks 2006–2007. Инженерный анализ методом конечных элементов. М.: ДМК, 784.
19. Галлагер, Р. (1984). Метод конечных элементов. Основы. Москва.
20. Наставление по креплению генеральных грузов при морской перевозке для т/х “Герои Шипки”. Cargo securing manual for m/v “Geroi Shipky” № 2512. 02. Офиц. изд. (1997). Одесса, 51.
21. Наставление по креплению груза для т/х “Петровск” ПР. № 002CNF001 – ЛМПЛ – 805 (2005). Одесса, 52.
22. Руденко, В. М. (2012). Математична статистика. Киев, 304.
23. Кобзарь, А. И. (2006). Прикладная математическая статистика. Москва, 816.