

Український державний університет залізничного транспорту
Міністерство освіти і науки України

РОБОТА

на здобуття премії Президента України для молодих вчених

Моделі та методи визначення навантаженості залізничних транспортних засобів
контейнерних перевезень

Ловська Альона Олександрівна

д.т.н., професор, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції

2024

Об'єкт дослідження – процеси виникнення, сприйняття та перерозподілу навантажень в конструктивах транспортних засобів контейнерних перевезень.

Предмет дослідження – закономірності функціонування конструктивів транспортних засобів контейнерних перевезень при найбільш неблагоприємних режимах експлуатації.

Мета дослідження.

Метою роботи є створення моделей та методів, які дозволять визначити навантаженість залізничних транспортних засобів контейнерних перевезень при позаштатних режимах експлуатації, зокрема при перевезенні на залізничних поромах, а також при маневрових співударяннях.

Задачі дослідження.

1. Проаналізувати наукові дослідження з визначення навантаженості залізничних транспортних засобів в експлуатації;
2. Створити методи та моделі для визначення навантаженості контейнерів та контейнерів-цистерн у складі комбінованих поїздів при перевезенні на залізничних поромах;
3. Створити моделі для визначення динамічної навантаженості контейнерів та контейнерів-цистерн, розміщених на вагонах-платформах при маневровому співударянні.
4. Створити метод та моделі для визначення навантаженості контейнерів та контейнерів-цистерн з урахуванням пружних, в'язких та пружно-в'язких зв'язків у фітингах, які дозволяють отримати закономірності процесів їх навантаженості при маневрових співударяннях.
5. Провести обґрунтування впровадження сендвіч-панелей у якості торцевих стін контейнера.
6. Провести експериментальне дослідження міцності вагона-платформи при маневровому співударянні.
7. Провести техніко-економічне обґрунтування запропонованих рішень щодо удосконалення несучих конструкцій контейнерів.

Наукова новизна отриманих результатів.

вперше

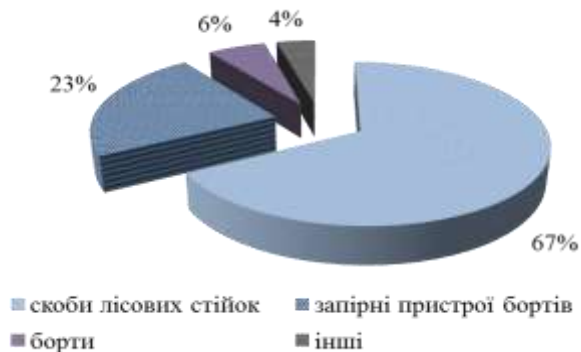
- розроблено методи визначення навантаженості залізничних транспортних засобів контейнерних перевезень, а саме, при русі комбінованих поїздів морем на залізничних поромках та маневрових співударяннях вагонів-платформ, завантажених контейнерами або контейнерами-цистернами з пружними, в'язкими та пружно-в'язкими зв'язками у фітінгах;
- сформовано математичні моделі для визначення динамічної навантаженості суховантажних контейнерів та контейнерів-цистерн у складі комбінованих поїздів при перевезенні на залізничному поромі морем з урахуванням таких схем їх взаємодії:
 - відсутність переміщень вагона-платформи та контейнера відносно початкового положення;
 - наявність переміщень вагона-платформи при коливаннях залізничного порому та нерухомість контейнерів відносно рами;
 - наявність переміщень вагона-платформи відносно палуби та контейнерів відносно рами вагона-платформи.
- сформовано математичну модель для визначення повздовжньої динамічної навантаженості контейнера зі стінами із сендвіч-панелей, розміщеного на вагоні-платформі при маневровому співударянні;
- визначено закономірності динамічної навантаженості суховантажних контейнерів та контейнерів-цистерн при перевезенні у складі комбінованих поїздів на залізничних поромках. Дані закономірності дозволяють визначити стійкість контейнерів, а також контейнерів-цистерн на вагонах-платформах з урахуванням різних кутів крену залізничного порому;
- визначено закономірності динамічної навантаженості суховантажних контейнерів та контейнерів-цистерн, розміщених на вагонах-платформах при маневрових співударяннях з урахуванням пружних, в'язких або пружно-в'язких зв'язків у фітінгах;

доопрацьовано

- математичні моделі динамічної навантаженості несучих конструкцій вагонів з урахуванням використання пружних або в'язких зв'язків із засобами комбінованих перевезень (вагон-платформа, контейнер), що дозволяють отримати закономірності їх динамічної навантаженості при експлуатації.

Дослідження основних пошкоджень несучих конструкцій транспортних засобів при контейнерних перевезеннях

Відсоткове співвідношення найбільш частих пошкоджень несучих конструкцій вагонів-платформ

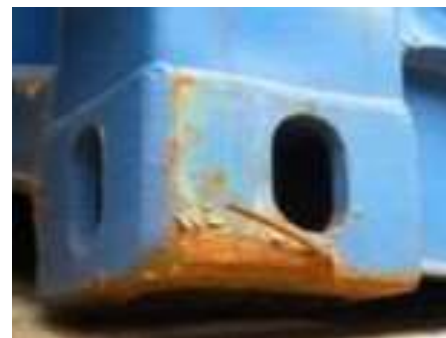


Пошкодження фітингів та фітингових упорів

Кількість пошкоджень фітингових упорів вагонів-платформ в експлуатації



а)



б)



в)



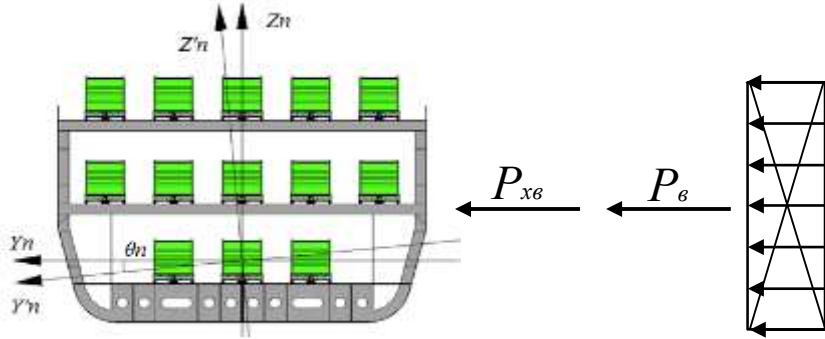
г)



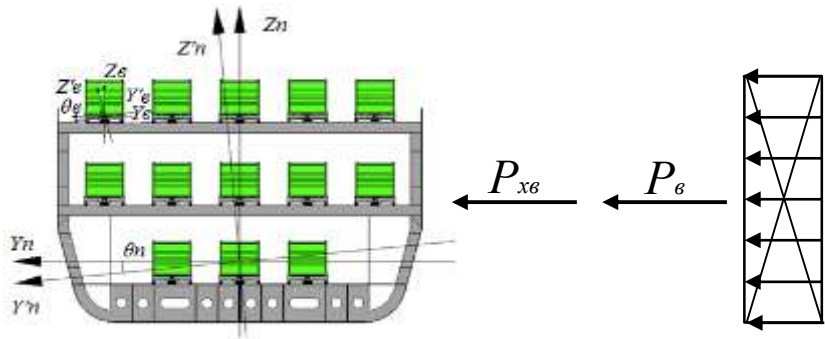
а) перекіс фітинга; б) злам стійки; в), г) тріщини у фітинговому упорі

Розрахункові схеми для дослідження кутових переміщень навколо повздовжньої осі вагона-платформи з контейнерами, розміщеними на залізничному поромі

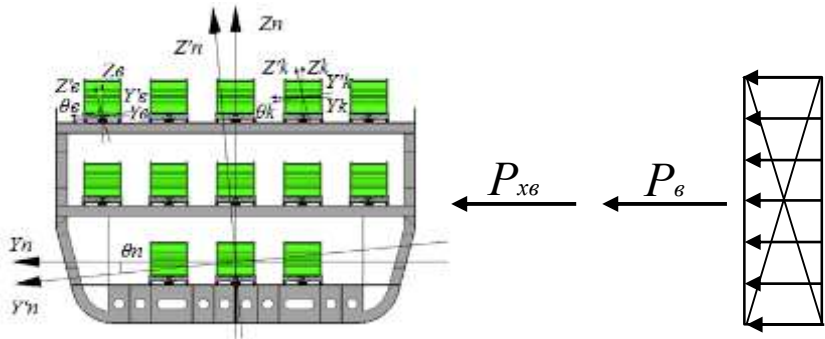
а)



б)



в)



а) при відсутності переміщень вагона-платформи з контейнерами відносно палуби; б) при наявності переміщень вагона-платформи відносно палуби та відсутності переміщень контейнерів відносно рами вагона-платформи; в) при наявності переміщень вагона-платформи відносно палуби та контейнерів відносно рами вагона-платформи

Сформовані математичні моделі для визначення динамічної навантаженості суховантажних контейнерів у складі поїздів комбінованого транспорту при перевезенні на залізничному поромі

$$\left(\frac{D}{12 \cdot g} (B^2 + 4z_g^2) \right) \ddot{q} + \left(\Lambda_\theta \cdot \frac{B}{2} \right) \dot{q} = p' \cdot \frac{h}{2} + \Lambda_\theta \cdot \frac{B}{2} \cdot \dot{F}(t), \quad (1)$$

$$\begin{cases} \left(\frac{D}{12 \cdot g} (B^2 + 4z_g^2) \right) \ddot{q}_1 + \left(\Lambda_\theta \cdot \frac{B}{2} \right) \dot{q}_1 = p' \cdot \frac{h}{2} + \Lambda_\theta \cdot \frac{B}{2} \cdot \dot{F}(t), \\ I_{\theta}^{ВПФ} \cdot \ddot{q}_2 = p'_{ВПФ} \cdot \frac{h_{ВПФ}}{2} + M_{ВПФ}^П, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \left(\frac{D}{12 \cdot g} (B^2 + 4z_g^2) \right) \ddot{q}_1 + \left(\Lambda_\theta \cdot \frac{B}{2} \right) \dot{q}_1 = p'_{ЗП} \cdot \frac{h}{2} + \Lambda_\theta \cdot \frac{B}{2} \cdot \dot{F}(t), \\ I_{ВПФ}^\theta \cdot \ddot{q}_2 = p'_{ВПФ} \cdot \frac{h_{ВПФ}}{2} + M_{ВПФ}^П + M_{ВПФ}^К, \\ I_K^\theta \cdot \ddot{q}_3 = p'_K \cdot \frac{h_K}{2} + M_K^{ВПФ}, \end{cases} \quad (3)$$

де q_i – узагальнені координати, що відповідають кутовому переміщенню навколо повздовжньої осі, відповідно, залізничного порому, вагона-платформи та контейнера. Початок системи координат розміщений в центрі мас залізничного порому.

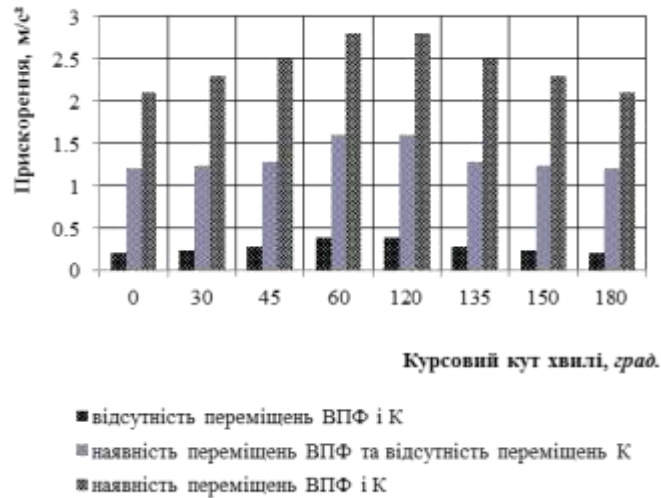
для залізничного порому:

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

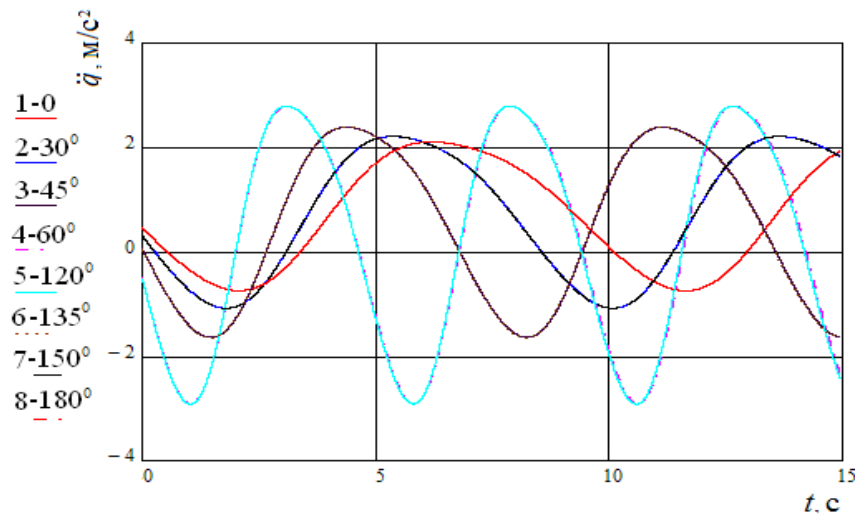
для вагона-платформи з контейнерами:

$I_{ВПФ}^\theta$ – момент інерції вагона-платформи відносно повздовжньої осі; $p'_{ВПФ}$ – вітрове навантаження на бокову проекцію вагона-платформи, розміщеного на верхній палубі залізничного порому; $h_{ВПФ}$ – висота бокової проекції вагона-платформи; $M_{ВПФ}^К$ – момент сил, що виникає між вагоном-платформою та контейнерами при кутових переміщеннях навколо повздовжньої осі; I_K^θ – момент інерції контейнера; h_K – висота бокової поверхні контейнера; p'_K – вітрове навантаження на бокову поверхню контейнера; $M_K^{ВПФ}$ – момент сил, що виникає між контейнером та вагоном-платформою при кутових переміщеннях навколо повздовжньої осі.

Прискорення, які діють на вагон-платформу, завантажений суховантажними контейнерами при перевезенні на залізничному поромі



Прискорення, які діють на суховантажний контейнер з урахуванням переміщень відносно рами вагона-платформи



Умова стійкості контейнера відносно рами вагона-платформи при перевезенні на залізничному поромі

$$k_c = \frac{M_{\text{відн}}}{M_{\text{пер}}} \geq 1, \quad (4)$$

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

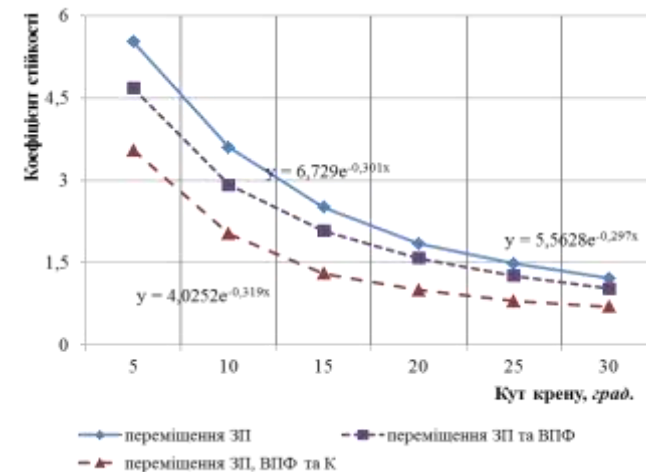
Сформовані вирази для визначення $M_{\text{відн}}$ та $M_{\text{пер}}$

$$M_{\text{відн}} = P_{\text{бр}} \cdot \cos \theta \cdot \frac{B_k}{2} + n_{\phi} \cdot \left(M_{\text{бр}} \cdot (g \cdot \sin \theta + \ddot{q}_k) \right) \cdot \frac{h_{\phi}}{2}, \quad (5)$$

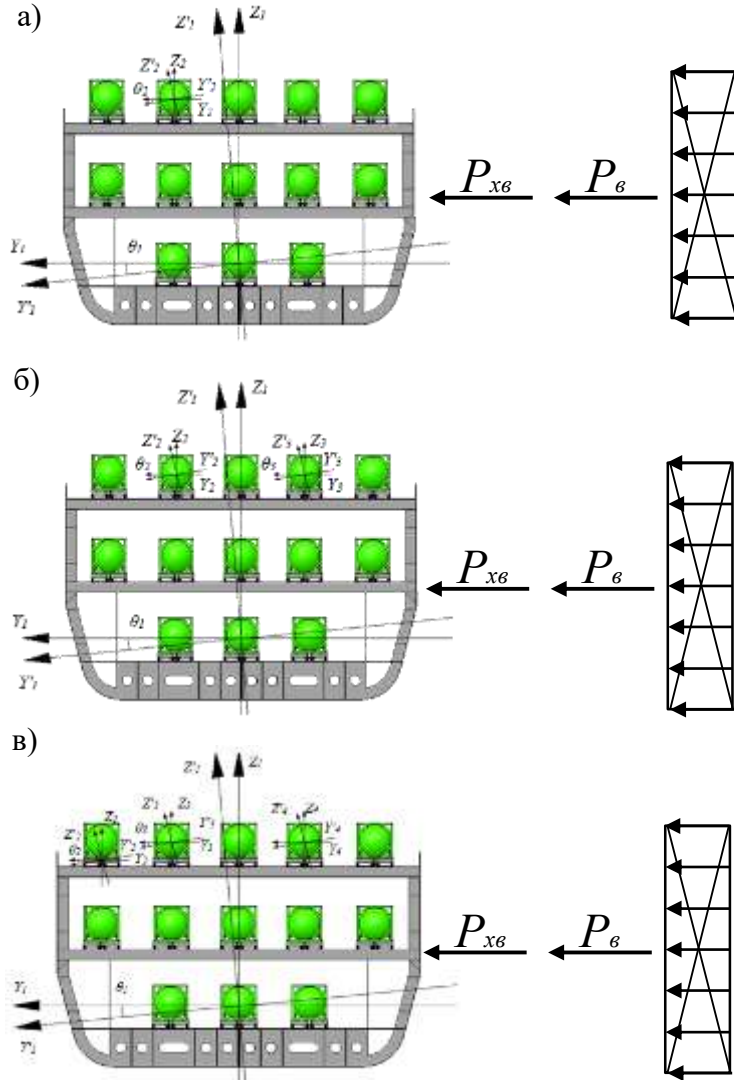
$$M_{\text{пер}} = p'_k \cdot \frac{h_k}{2} + M_{\text{бр}} \cdot (g \cdot \sin \theta + \ddot{q}_k) \cdot \frac{h_k}{2}, \quad (6)$$

де $M_{\text{бр}}$ – маса бруто контейнера; q_k – прискорення, яке діє на контейнер при кутових переміщеннях відносно повздовжньої осі; $P_{\text{бр}}$ – вага бруто контейнера; B_k – ширина контейнера; n_{ϕ} – кількість фітингових упорів на які здійснюється обпирання контейнера при кутових переміщеннях відносно повздовжньої осі; h_{ϕ} – висота фітингового упору.

Залежність коефіцієнта стійкості контейнера, розміщеного на вагоні-платформі, від кута крену



Розрахункові схеми для дослідження кутових переміщень навколо повздовжньої осі вагона-платформи з контейнерами-цистернами, розміщеними на залізничному поромі



а) при відсутності переміщень вагона-платформи з контейнерами-цистернами відносно палуби; б) при наявності переміщень контейнера-цистерни відносно рами та відсутності переміщень вагона-платформи; в) при наявності переміщень вагона-платформи відносно палуби та контейнерів-цистерн відносно рами

Математичні моделі для визначення динамічної навантаженості контейнерів-цистерн у складі поїздів комбінованого транспорту при перевезенні на залізничному поромі

$$\begin{cases} \left(\frac{D}{12 \cdot g} (B^2 + 4z_g^2) \right) \ddot{q}_1 + \left(\Lambda_\theta \cdot \frac{B}{2} \right) \dot{q}_1 = p' \cdot \frac{h}{2} + \Lambda_\theta \cdot \frac{B}{2} \cdot \dot{F}(t), \\ I_{ij} \cdot \ddot{q}_2 - m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{q}_1 + g \cdot m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot q_2 = 0, \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \left(\frac{D}{12 \cdot g} (B^2 + 4z_g^2) \right) \ddot{q} + \left(\Lambda_\theta \cdot \frac{B}{2} \right) \dot{q} = p' \cdot \frac{h}{2} + \Lambda_\theta \cdot \frac{B}{2} \cdot \dot{F}(t), \\ \left(I_{\theta 1} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij}^2 \right) \cdot \ddot{\theta}_2 + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\theta}_3 - g \cdot \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \right) \cdot \theta_2 = F_k, \\ I_{ij} \cdot \ddot{\theta}_3 - m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\theta}_2 + g \cdot m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \theta_3 = 0, \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \left(\frac{D}{12 \cdot g} (B^2 + 4z_g^2) \right) \ddot{\theta}_1 + \left(\Lambda_\theta \cdot \frac{B}{2} \right) \dot{\theta}_1 = p' \cdot \frac{h}{2} + \Lambda_\theta \cdot \frac{B}{2} \cdot \dot{F}(t), \\ I_{\text{впф}} \cdot \ddot{\theta}_2 = p'_{\text{впф}} \cdot \frac{h_{\text{впф}}}{2} + M_{\text{впф}}^H + M_{\text{впф}}^K, \\ \left(I_{\omega} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij}^2 \right) \cdot \ddot{\theta}_3 + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\theta}_4 - g \cdot \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \right) \cdot \theta_3 = M_K^{\text{впф}}, \\ I_{ij} \cdot \ddot{\theta}_4 - m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\theta}_3 + g \cdot m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \theta_4 = 0, \end{cases} \quad (9)$$

для залізничного порому:

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

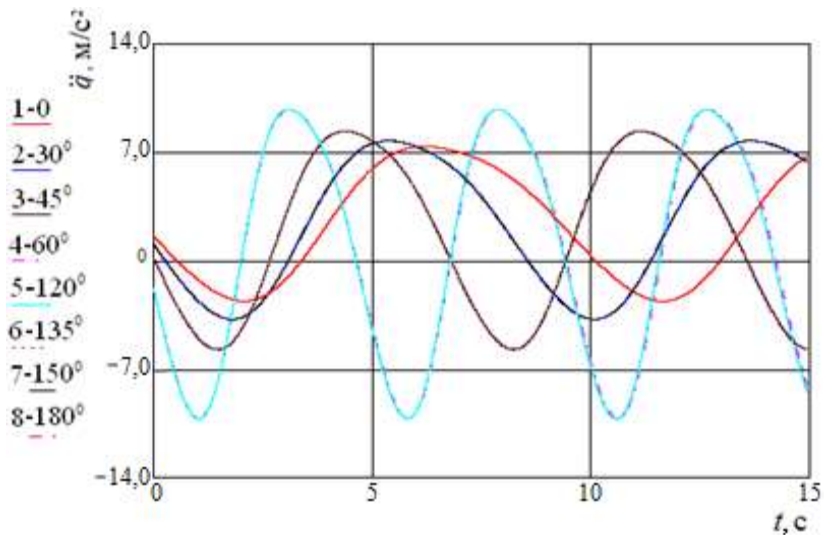
для вагонів-платформ з контейнерами-цистернами:

$I_{\text{впф}}$ – момент інерції вагона-платформи відносно повздовжньої осі; $p'_{\text{впф}}$ – вітрове навантаження на бокову проекцію вагона-платформи; $h_{\text{впф}}$ – висота бокової проєкції вагона-платформи; $M_{\text{впф}}^H$ – момент сил, який виникає між вагоном-платформою та палубою залізничного порому; $M_{\text{впф}}^K$ – момент сил, який виникає між вагоном-платформою та контейнером-цистерною; 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; $I_{\theta i}$ – 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; $M_K^{\text{впф}}$ – момент сил, що виникає між контейнером-цистерною та вагоном-платформою.

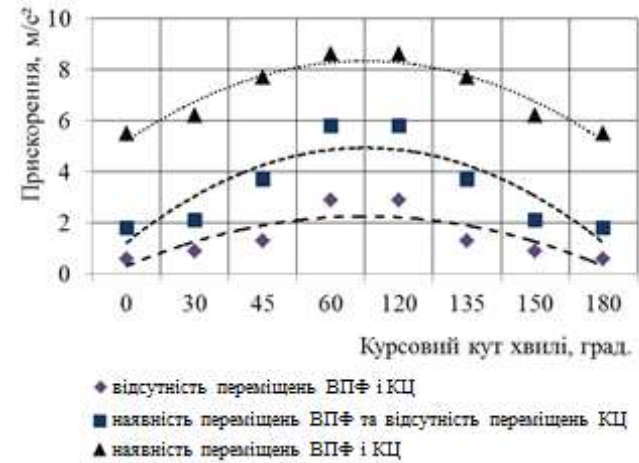
Прискорення, які діють на вагон-платформу, завантажений контейнерами-цистернами при перевезенні на залізничному поромі



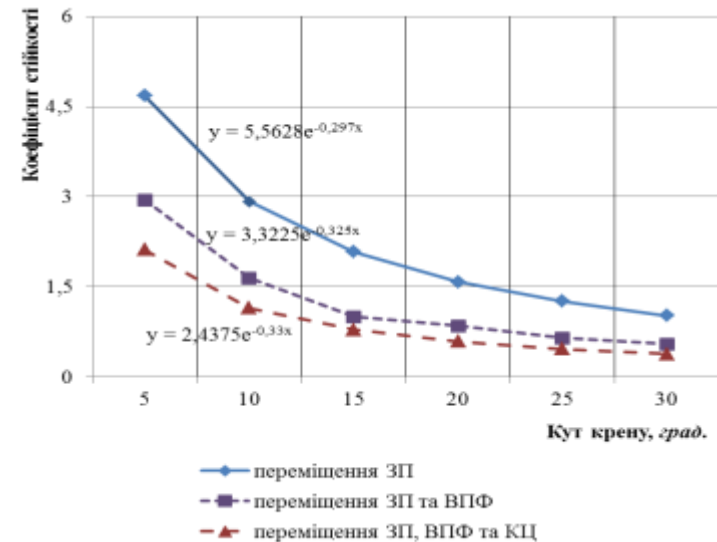
Прискорення, які діють на контейнер-цистерну з урахуванням переміщень відносно рами вагона-платформи



Прискорення, які діють на контейнер-цистерну при перевезенні залізничним поромом

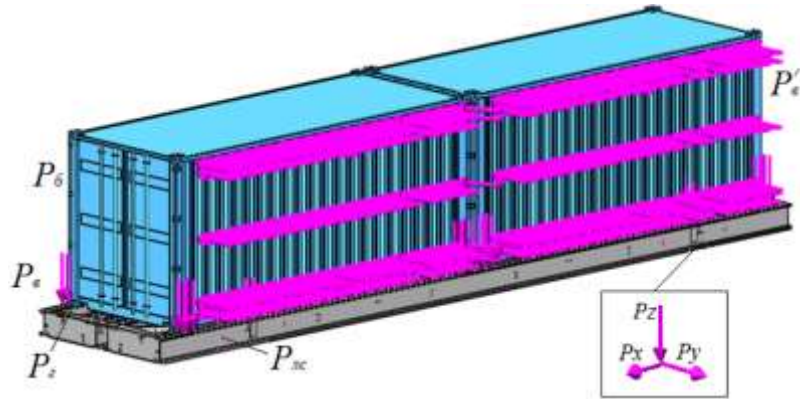


Залежність коефіцієнта стійкості контейнера-цистерни, розміщеного на вагоні-платформі від кута крену залізничного порому

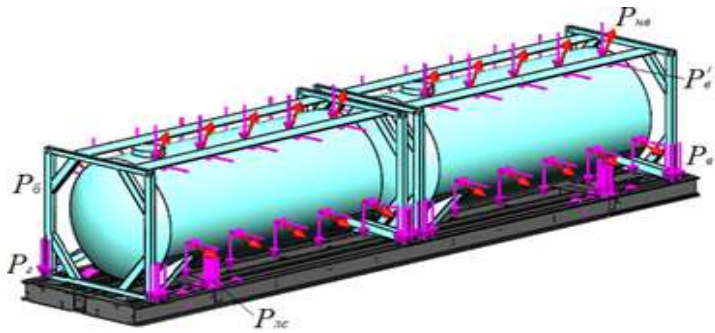


Створені розрахункові схеми контейнерів, розміщених на вагонах-платформах при перевезенні залізничним поромом

а)



б)

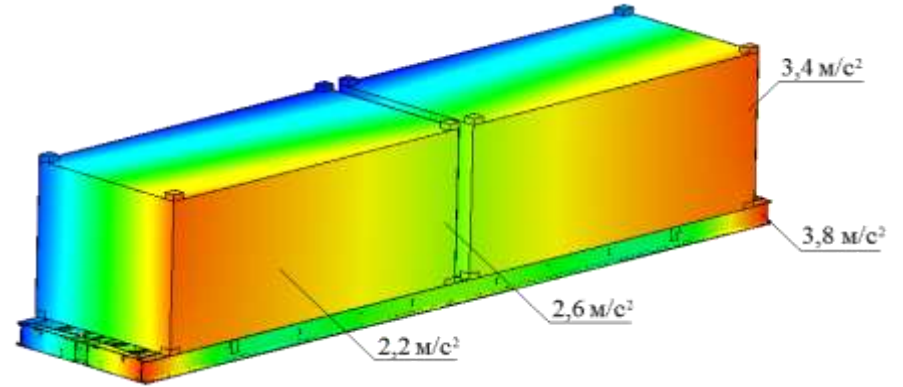


а) суховантажний контейнер; б) контейнер-цистерна

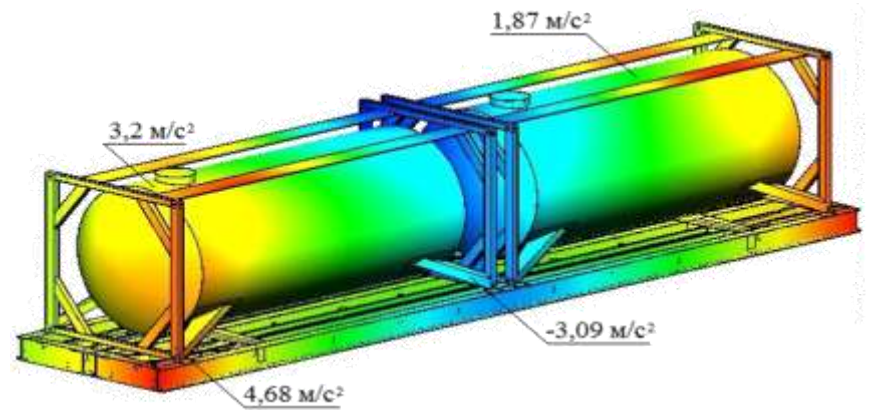
P_e – вертикальне навантаження; P_z – горизонтальне навантаження; P'_e – вітрове навантаження; $P_{нв}$ – тиск наливного вантажу; P'_e – бокове навантаження; $P_{лс}$ – навантаження від ланцюгових стяжок

Поля розподілення прискорень, які діють на контейнера при перевезенні залізничним поромом

а)



б)



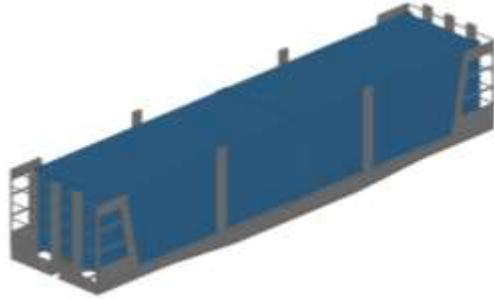
а) суховантажний контейнер; б) контейнер-цистерна

Удосконалена несуча конструкція вагона-платформи

а)

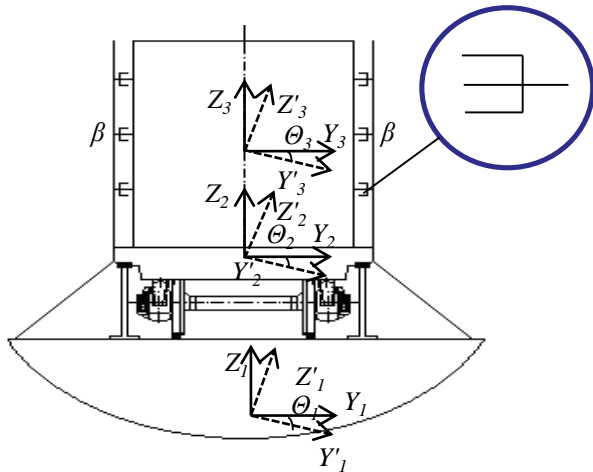


б)



а) в порожньому стані, б) в завантаженому стані

Розрахункова схема вагона-платформи, завантаженого контейнерами



Сформована математична модель переміщень вагона-платформи при в'язкій взаємодії з контейнерами

$$\begin{cases} \left(\frac{D}{12 \cdot g} (B^2 + 4z_g^2) \right) \ddot{q}_1 + \left(\Lambda_\theta \cdot \frac{B}{2} \right) \dot{q}_1 = p'_{зп} \cdot \frac{h}{2} + \Lambda_\theta \cdot \frac{B}{2} \cdot \dot{F}(t), \\ I_{ВПФ}^\theta \cdot \ddot{q}_2 = p'_{ВПФ} \cdot \frac{h_{ВПФ}}{2} + M_{ВПФ}^\Pi + M_{ВПФ}^K, \\ I_K^\theta \cdot \ddot{q}_3 = p'_K \cdot \frac{h_K}{2} - \beta \cdot h_K \cdot \dot{q}_3 + M_K^{ВПФ}, \end{cases} \quad (10)$$

де $q_1 \approx \theta_n$ – узагальнена координата, що відповідає кутовому переміщенню навколо повздовжньої осі залізничного порому; $q_2 \approx \theta_e$ – узагальнена координата, що відповідає кутовому переміщенню навколо повздовжньої осі вагона-платформи; $q_3 \approx \theta_k$ – узагальнена координата, що відповідає кутовому переміщенню навколо повздовжньої осі контейнера.

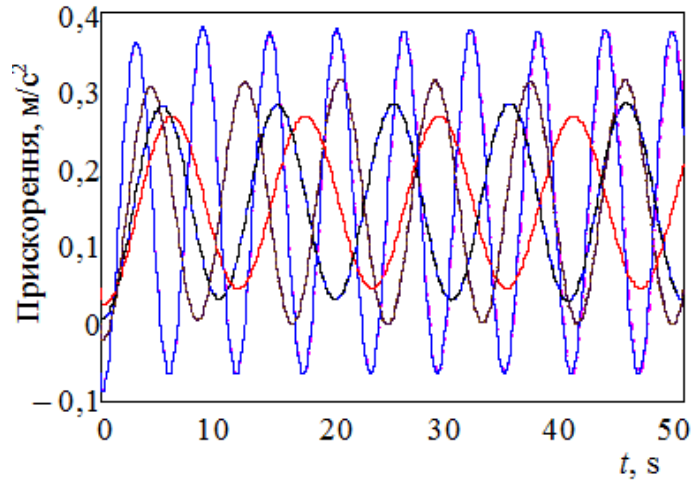
для залізничного порому:

D – вагове водовитіснення; B – ширина; h – висота борта; Λ_θ – коефіцієнт опору коливанням; z_g – координата центру ваги; $p'_{зп}$ – вітрове навантаження на надводну проекцію; $F(t)$ – закон дії зусилля, яке збудує рух залізничного порому з вагонами, розміщеними на його палубах.

для вагона-платформи з контейнерами:

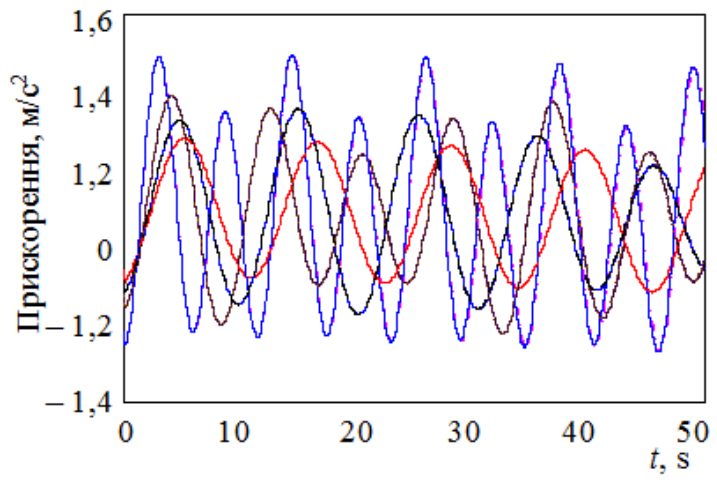
$I_{ВПФ}^\theta$ – момент інерції вагона-платформи; $h_{ВПФ}$ – висота бокової поверхні вагона-платформи; $p'_{ВПФ}$ – вітрове навантаження на бокову поверхню вагона-платформи; $M_{ВПФ}^\Pi$ – момент сил, що виникає між вагоном-платформою та палубою залізничного порому при кутових переміщеннях відносно повздовжньої осі; $M_{ВПФ}^K$ – момент сил, що виникає між вагоном-платформою та контейнерами при кутових переміщеннях відносно повздовжньої осі; I_K^θ – момент інерції контейнера; h_K – висота бокової поверхні контейнера; p'_K – вітрове навантаження на бокову поверхню контейнера; $M_K^{ВПФ}$ – момент сил, що виникає між контейнером та вагоном-платформою при кутових переміщеннях відносно повздовжньої осі; β – коефіцієнт в'язкого опору між несучою конструкцією вагона-платформи та контейнером.

Прискорення, які діють на удосконалену несучу конструкцію вагона-платформи



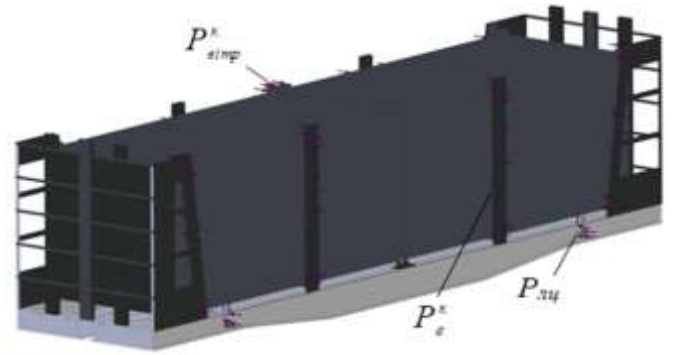
Курсовий кут хвилі:
0°; 30°; 45°; 60°; 120°; 135°; 150°; 180°

Прискорення, які діють на контейнер при перевезенні на залізничному поромі



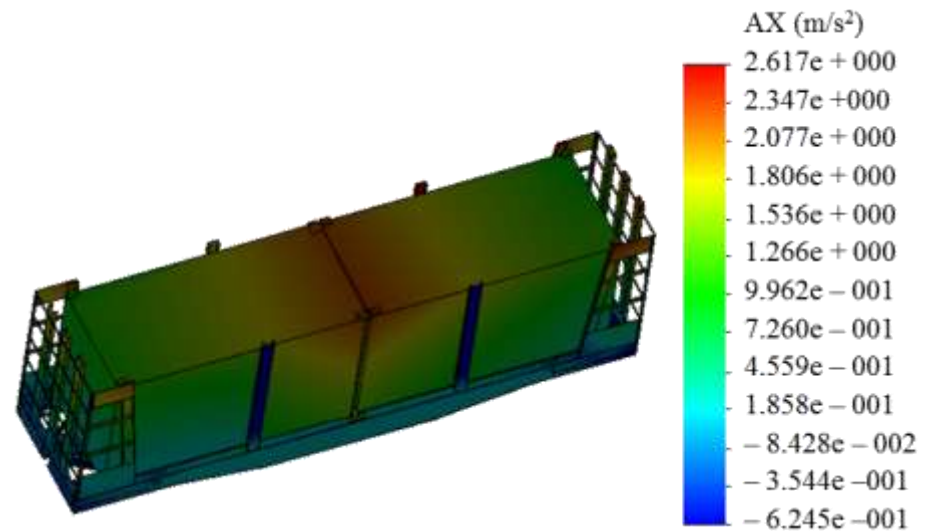
Курсовий кут хвилі:
0°; 30°; 45°; 60°; 120°; 135°; 150°; 180°

Розрахункова схема удосконаленої несучої конструкції вагона-платформи з контейнерами

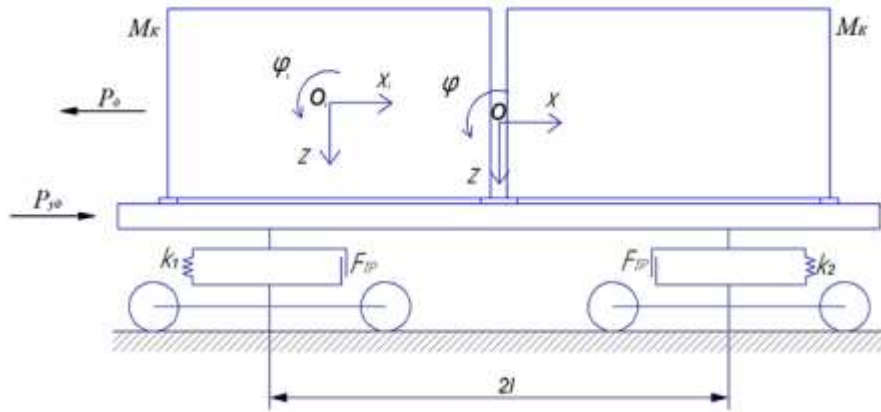


$P_2^к$ – горизонтальне навантаження в зонах взаємодії з надбудовами, $P_{вітр}^к$ – вітрове навантаження на бокову поверхню; $P_{лц}$ – навантаження від ланцюгових стяжок

Розподілення полів прискорень відносно удосконаленої несучої конструкції вагона-платформи з контейнерами

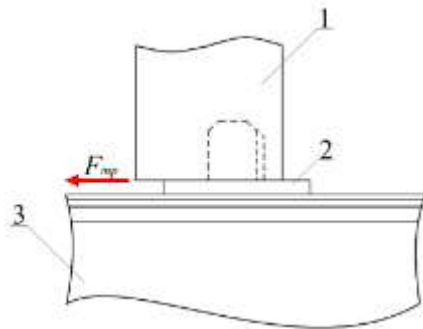


Розрахункова схема вагона-платформи, завантаженого контейнерами з урахуванням технологічних зазорів в парах “фітингові упори-фітинги”



$P_{y\partial}$ – ударне навантаження; P_{∂} – динамічне навантаження, яке діє на контейнер; k_i – жорсткість пружин ресорного підвішування візків; F_{TP} – сила сухого тертя в ресорному комплекті; $2l$ – база вагона; x, z, φ – узагальнені координати

Схема взаємодії фітинга контейнера з фітинговим упором вагона-платформи з урахуванням технологічних зазорів



1 – фітинг; 2 – фітинговий упор; 3 – повздовжня балка рами
 F_{TP} – сила тертя між фітингом та фітинговим упором

Математична модель для визначення повздовжньої навантаженості вагона-платформи з контейнерами при маневровому співударянні з урахуванням технологічних зазорів в парах “фітингові упори-фітинги”

$$\begin{cases} M'_{пл} \cdot \ddot{x}_{пл} + M_{пл} \cdot h \cdot \ddot{\phi}_{пл} = S_a - \sum_{i=1}^2 S_i, \\ I_{пл} \cdot \ddot{\phi}_{пл} + M_{пл} \cdot h \cdot \ddot{x}_{пл} - g \cdot \phi_{пл} \cdot M_{пл} \cdot h = \\ = l \cdot F_{TP} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2) + l (k_1 \cdot \Delta_1 - k_2 \cdot \Delta_2), \\ M_{пл} \cdot \ddot{z}_{пл} = k_1 \cdot \Delta_1 + k_2 \cdot \Delta_2 - F_{TP} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2), \\ m_i \cdot \ddot{x}_i + (m_i \cdot z_{ci}) \cdot \ddot{\phi}_i = S_i, \\ I_i \cdot \ddot{\phi}_i + (m_i \cdot z_{ci}) \cdot \ddot{x}_i - g \cdot (m_i \cdot z_{ci}) \cdot (\phi_{пл} - \phi_i) = 0, \\ m_i \cdot \ddot{z}_{пл} = 0, \end{cases} \quad (11)$$

де $M'_{пл} = M_{пл} + 2 \cdot m_r + \frac{n \cdot I}{r^2}$; $\Delta_1 = z_{пл} - l \cdot \phi_{пл}$; $\Delta_2 = z_{пл} + l \cdot \phi_{пл}$;

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

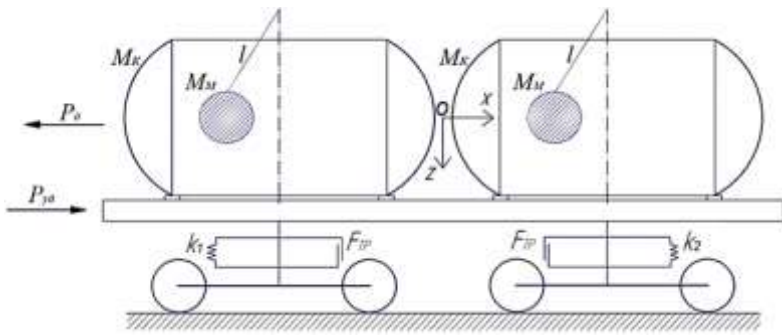
$M_{пл}$ – маса несучої конструкції вагона-платформи; $I_{пл}$ – момент інерції вагона-платформи відносно повздовжньої вісі; S_a – величина повздовжньої сили удару в автозчеп; F_i – момент сили, що виникає при повздовжньому переміщенні контейнера; f_{mp} – амплітудне значення сили сухого тертя; m_r – маса візка; I – момент інерції колісної пари; r – радіус середнєзношеного колеса; n – кількість вісей візка; l – половина бази вагона-платформи; F_{mp} – абсолютне значення сили сухого тертя у ресорному комплекті; k_1, k_2 – жорсткість пружин ресорного підвішування візків вагона-платформи; m_i – маса контейнера; z_{ci} – висота центру ваги контейнера; I_i – приведений момент інерції i -го контейнера; x, φ, z – координати, що відповідають, відповідно, повздовжньому, кутовому навколо поперечної вісі та вертикальному переміщенню вагона-платформи; x_i, ϕ_i – координати, що відповідають, відповідно, повздовжньому та кутовому навколо поперечної вісі переміщенню контейнера.

Математична модель для визначення повздовжньої навантаженості вагона-платформи з контейнерами при маневровому співударянні з урахуванням технологічних зазорів в парах “фітингові упори-фітинги”

$$\left\{ \begin{array}{l} M'_{пл} \cdot \ddot{x}_{пл} + M_{пл} \cdot h \cdot \ddot{\phi}_{пл} = S_a - \sum_{i=1}^2 S_i, \\ I_{пл} \cdot \ddot{\phi}_{пл} + M_{пл} \cdot h \cdot \ddot{x}_{пл} - g \cdot \phi_{пл} \cdot M_{пл} \cdot h = \\ = l \cdot F_{тр} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2) + l (k_1 \cdot \Delta_1 - k_2 \cdot \Delta_2), \\ M_{пл} \cdot \ddot{z}_{пл} = k_1 \cdot \Delta_1 + k_2 \cdot \Delta_2 - F_{тр} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2), \\ m_i \cdot \ddot{x}_i + (m_i \cdot z_{ci}) \cdot \ddot{\phi}_i = S_i, \\ I_i \cdot \ddot{\phi}_i + (m_i \cdot z_{ci}) \cdot \ddot{x}_i - g \cdot (m_i \cdot z_{ci}) \cdot (\phi_{пл} - \phi_i) = 0, \\ m_i \cdot \ddot{z}_{пл} = 0, \end{array} \right. \quad (12)$$

де $M_{пл}$ – маса несучої конструкції вагона-платформи; $I_{пл}$ – момент інерції вагона-платформи відносно повздовжньої осі; S_a – величина повздовжньої сили удару в автозцеп; S_i – сила тертя, що виникає між фітинговим упором та фітингом при повздовжньому переміщенні контейнера; l – половина бази вагона-платформи; $F_{тр}$ – абсолютне значення сили сухого тертя у ресорному комплекті; k_1, k_2 – жорсткість пружин ресорного підвішування візків вагона-платформи; m_i – маса контейнера; z_{ci} – висота центру ваги контейнера; I_i – приведений момент інерції i -го контейнера; $x_{пл}, \phi_{пл}, z_{пл}$ – координати, що відповідають, відповідно, повздовжньому, кутовому відносно поперечної осі та вертикальному переміщенню вагона-платформи; x_i, ϕ_i – координати, що відповідають, відповідно, повздовжньому та кутовому відносно поперечної осі переміщенню контейнера.

Розрахункова схема повздовжньої навантаженості вагона-платформи з контейнерами-цистернами з урахуванням технологічних зазорів в парах “фітингові упори-фітинги”



Математична модель для визначення повздовжньої навантаженості вагона-платформи з контейнерами-цистернами при маневровому співударянні з урахуванням технологічних зазорів в парах “фітингові упори-фітинги”

$$\left\{ \begin{array}{l} M'_{пл} \cdot \ddot{x}_{пл} + M_{пл} \cdot h \cdot \ddot{\phi}_{пл} = S_a - \sum_{i=1}^2 S_i, \\ I_{пл} \cdot \ddot{\phi}_{пл} + M_{пл} \cdot h \cdot \ddot{x}_{пл} - g \cdot \phi_{пл} \cdot M_{пл} \cdot h = l \cdot F_{тр} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2) + \\ + l (k_1 \cdot \Delta_1 - k_2 \cdot \Delta_2), \\ M_{пл} \cdot \ddot{z}_{пл} = k_1 \cdot \Delta_1 + k_2 \cdot \Delta_2 - F_{тр} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2), \\ \left(m_i + \sum_{j=1}^k m_{ij} \right) \cdot \ddot{x}_i + \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \right) \cdot \ddot{\phi}_i - \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij} = S_i, \\ \left(I_{\theta i} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij}^2 \right) \cdot \ddot{\phi}_i + \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \right) \cdot \ddot{x}_i + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij} - \\ - g \cdot \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \right) \cdot (\phi_{пл} - \phi_i) = 0, \\ \left(m_i + \sum_{j=1}^k m_{ij} \right) \cdot \ddot{z}_{пл} = 0, \\ I_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij} - m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{x}_{ij} - m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\phi}_i + g \cdot m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij} = 0 \end{array} \right. \quad (13)$$

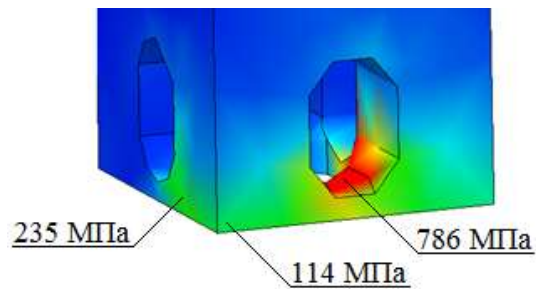
де $M_{пл}$ – маса несучої конструкції вагона-платформи; $I_{пл}$ – момент інерції вагона-платформи відносно повздовжньої осі; S_i – величина повздовжньої сили удару в автозцеп; l – половина бази вагона-платформи; $F_{тр}$ – абсолютне значення сили сухого тертя у ресорному комплекті; k_1, k_2 – жорсткість пружин ресорного підвішування візків вагона-платформи; k – кількість тонн коливального наливного вантажу; m_i – маса тіла, яке еквівалентне i -му контейнеру-цистерні з частиною наливного вантажу, що не приймає участі у переміщенні відносно котла; m_{ij} – маса j -го маятника у i -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; $I_{\theta i}$ – приведений момент інерції i -го контейнера-цистерни та наливного вантажу, що не приймає участі у русі відносно котла; I_{ij} – момент інерції маятника; $x_{пл}, \phi_{пл}, z_{пл}$ – координати, що відповідають, відповідно, повздовжньому, кутовому навколо повздовжньої осі та вертикальному переміщенню вагона-платформи; x_i, ϕ_i – координати, що відповідають, відповідно, повздовжньому та кутовому навколо повздовжньої осі переміщенню контейнера-цистерни; ξ_{ij} – кут відхилення j -го маятника від вертикалі.

Прискорення, які діють на несучі конструкції контейнерів, розміщені на вагонах-платформах при маневровому співударянні

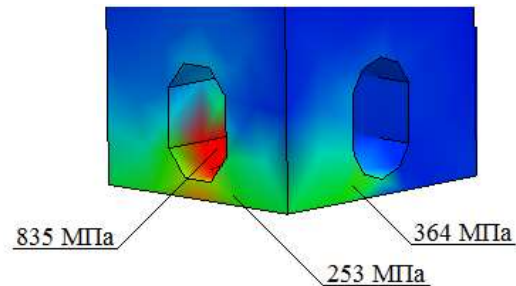
Тип контейнера	Прискорення, m/s^2	
	при відсутності зазору між фітингом та фітинговим упором	при наявності зазору між фітингом та фітинговим упором
Суховантажний контейнер	20	110
Контейнер-цистерна	40	300

Напружений стан фітингів

а)



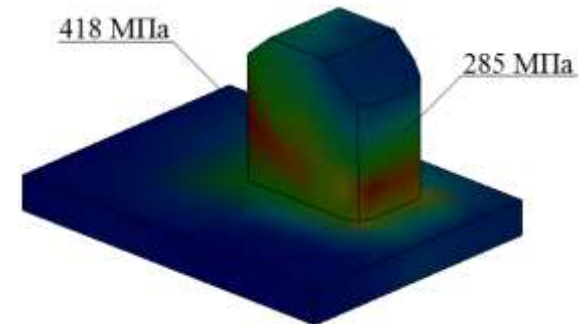
б)



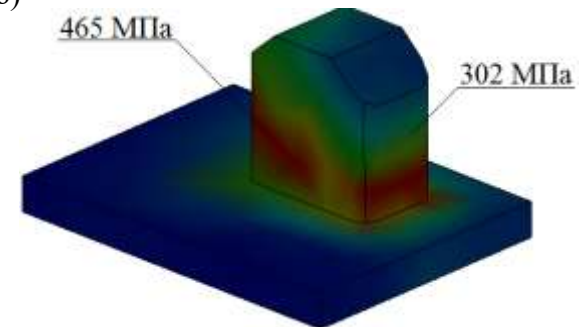
а) контейнер; б) контейнер-цистерна

Напружений стан фітингових упорів

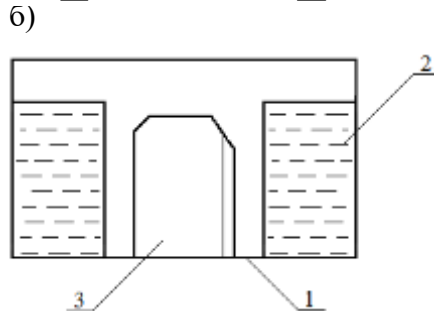
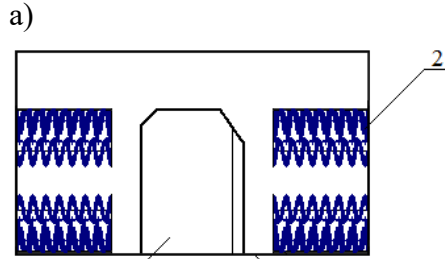
а)



б)

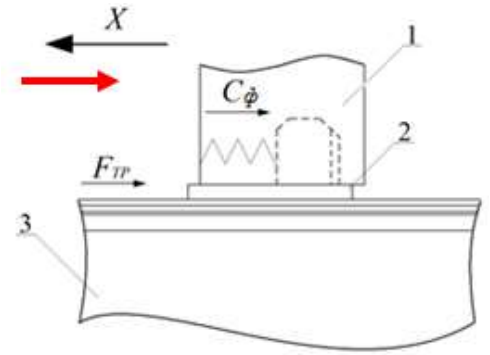


а) при взаємодії з контейнером; б) при взаємодії з контейнером-цистерною



а) пружний зв'язок; б) в'язкий зв'язок
 1 – фітінг; 2 – пружний (в'язкий) елемент;
 3 – фітінговий упор

Схема дії сил між фітінгом та фітінговим упором з урахуванням заходів щодо удосконалення



1 – фітінг; 2 – фітінговий упор; 3 – повздовжня балка

Математична модель для визначення динамічної навантаженості контейнера з пружними зв'язками у фітінгах

$$\begin{cases} M_{ВПФ}^{повн} \cdot \ddot{q}_1 = P_{y\delta} - \sum_{i=1}^n (F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) + C_\phi (q_1 - q_2)), \\ M_k \cdot \ddot{q}_2 = (F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) + C_\phi \cdot (q_1 - q_2)), \end{cases} \quad (14)$$

де $M_{ВПФ}^{повн}$ – маса-брутто вагона-платформи; $P_{y\delta}$ – величина повздовжньої сили, що діє на автозчеп; n – кількість контейнерів, розміщених на вагоні-платформі; F_{TP} – сила тертя між фітінговими упорами та фітінгами; M_k – маса контейнера; C_ϕ – жорсткість пружних елементів у фітінгах; q_1, q_2 – координати, що визначають переміщення, відповідно, вагона-платформи та контейнера відносно повздовжньої осі.

Математична модель для визначення динамічної навантаженості контейнера з в'язкими зв'язками у фітінгах

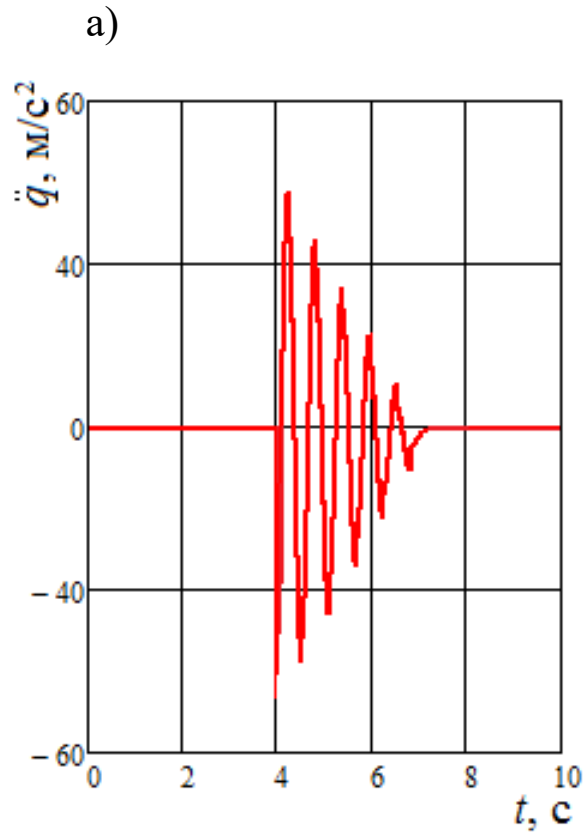
$$\begin{cases} M_{ВПФ}^{повн} \cdot \ddot{q}_1 = P_{y\delta} - \sum_{i=1}^n (F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) + \beta_\phi (\dot{q}_1 - \dot{q}_2)), \\ M_k \cdot \ddot{q}_2 = (F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) + \beta_\phi (\dot{q}_1 - \dot{q}_2)), \end{cases} \quad (16)$$

де β_ϕ – коефіцієнт в'язкого опору у фітінгах.

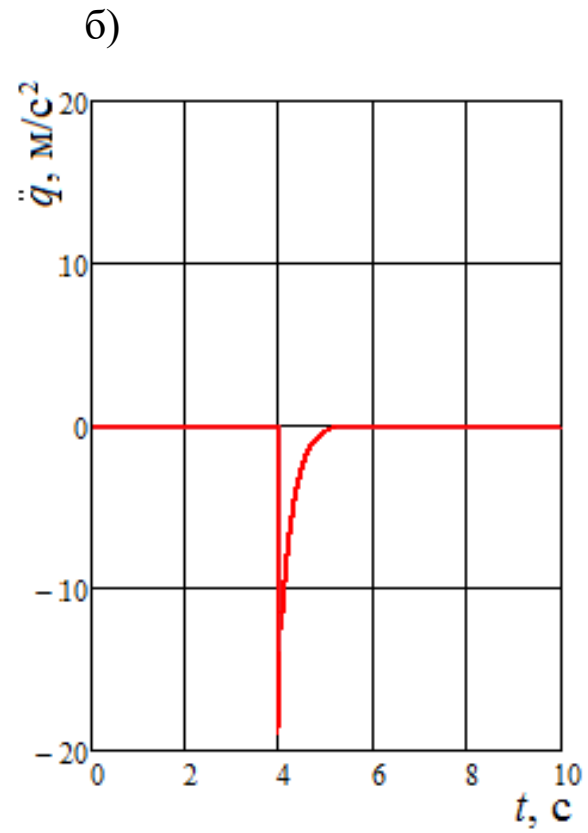
Математична модель для визначення динамічної навантаженості контейнера з пружно-в'язкими зв'язками у фітінгах

$$\begin{cases} M_{ВПФ}^{повн} \cdot \ddot{q}_1 = P_{y\delta} - \sum_{i=1}^n (F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) + C_\phi (q_1 - q_2) + \beta_\phi (\dot{q}_1 - \dot{q}_2)), \\ M_k \cdot \ddot{q}_2 = (F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) + C_\phi \cdot (q_1 - q_2) + \beta_\phi (\dot{q}_1 - \dot{q}_2)). \end{cases} \quad (17)$$

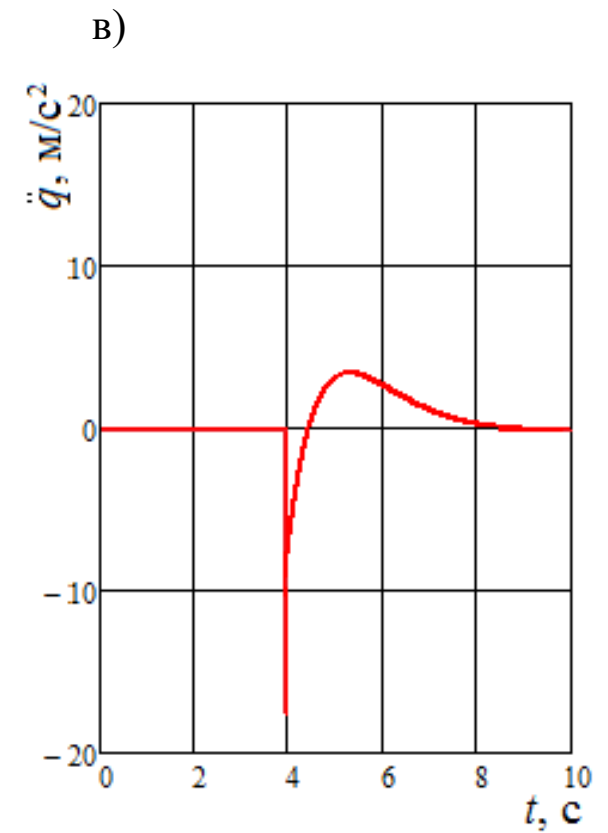
Прискорення, які діють на контейнер



$$C_{\dot{\varphi}} = 1700 \text{ кН/м}$$



$$\beta_{\dot{\varphi}} = 10 - 50 \text{ кН}\cdot\text{с/м}$$



$$C_{\dot{\varphi}} = 20 \text{ кН/м}$$

$$\beta_{\dot{\varphi}} = 30 \text{ кН}\cdot\text{с/м}$$

а) пружний зв'язок; б) в'язкий зв'язок; в) пружно-в'язкий зв'язок

Математична модель для визначення динамічної навантаженості контейнера-цистерни з пружними зв'язками у фітингах

$$\begin{cases} M_{ВПФ}^{повн} \cdot \ddot{q}_1 = P_{y0} - \sum_{i=1}^n (F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) + C_\phi(q_1 - q_2)), \\ M_k \cdot \ddot{q}_2 = \sum_{i=1}^n (F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) + C_\phi \cdot (q_1 - q_2) + M_M \cdot l \cdot q_3), \\ I_{НВ} \cdot \ddot{q}_3 = M_M \cdot l \cdot \ddot{q}_2 - g \cdot M_M \cdot l \cdot q_3, \end{cases} \quad (18)$$

де $M_{ВПФ}^{повн}$ – маса-брутто вагона-платформи; P_{y0} – величина повздовжньої сили, що діє на автозцеп; F_{TP} – сила тертя між фітинговими упорами та фітингами; M_k – маса контейнера-цистерни; C_ϕ – жорсткість пружних елементів у фітингах; M_M – маса маятника, який імітує переміщення наливного вантажу у контейнері-цистерні; l – довжина підвісу маятника; $I_{НВ}$ – момент інерції маятника; q_1, q_2, q_3 – координати, що визначають переміщення, відповідно, вагона-платформи, контейнера-цистерни та наливного вантажу відносно повздовжньої осі.

Математична модель для визначення динамічної навантаженості контейнера-цистерни з в'язкими зв'язками у фітингах

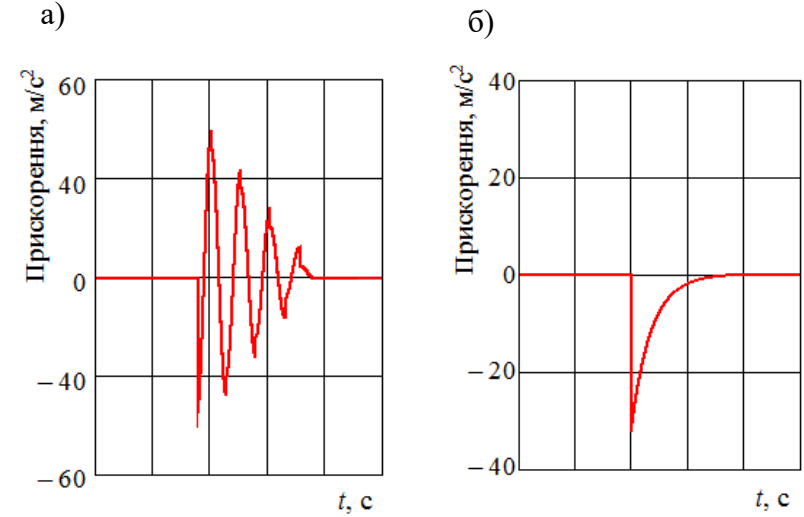
$$\begin{cases} M_{ВПФ}^{повн} \cdot \ddot{q}_1 = P_{y0} - \sum_{i=1}^n (F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) + \beta_\phi(\dot{q}_1 - \dot{q}_2)), \\ M_k \cdot \ddot{q}_2 = \sum_{i=1}^n (F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) + \beta_\phi(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) + M_M \cdot l \cdot q_3), \\ I_{НВ} \cdot \ddot{q}_3 = M_M \cdot l \cdot \ddot{q}_2 - g \cdot M_M \cdot l \cdot q_3, \end{cases} \quad (19)$$

де β_ϕ – коефіцієнт в'язкого опору у фітингах.

Математична модель для визначення динамічної навантаженості контейнера-цистерни з пружно-в'язкими зв'язками у фітингах

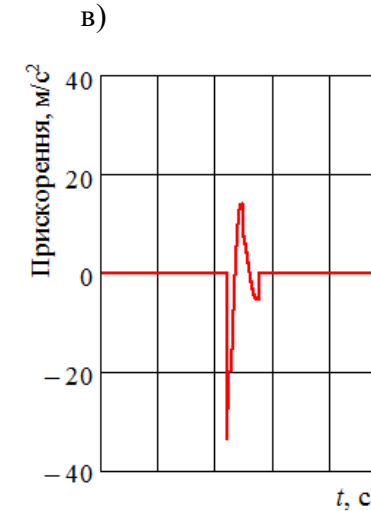
$$\begin{cases} M_{ВПФ}^{повн} \cdot \ddot{q}_1 = P_{y0} - \sum_{i=1}^n (F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) + c(q_1 - q_2) + \beta_\phi(\dot{q}_1 - \dot{q}_2)), \\ M_k \cdot \ddot{q}_2 = \sum_{i=1}^n (F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) + c(q_1 - q_2) + \beta_\phi(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) + M_M \cdot l \cdot q_3), \\ I_{НВ} \cdot \ddot{q}_3 = M_M \cdot l \cdot \ddot{q}_2 - g \cdot M_M \cdot l \cdot q_3. \end{cases} \quad (20)$$

Прискорення, які діють на контейнер-цистерну



$C_\phi = 530 \text{ кН/м}$

$\beta_\phi = 9-54 \text{ кН}\cdot\text{с/м}$.

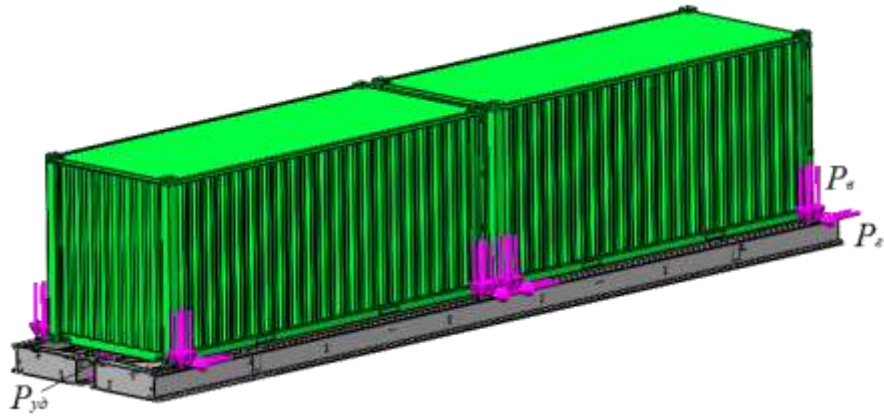


$C_\phi = 480 \text{ кН/м}$

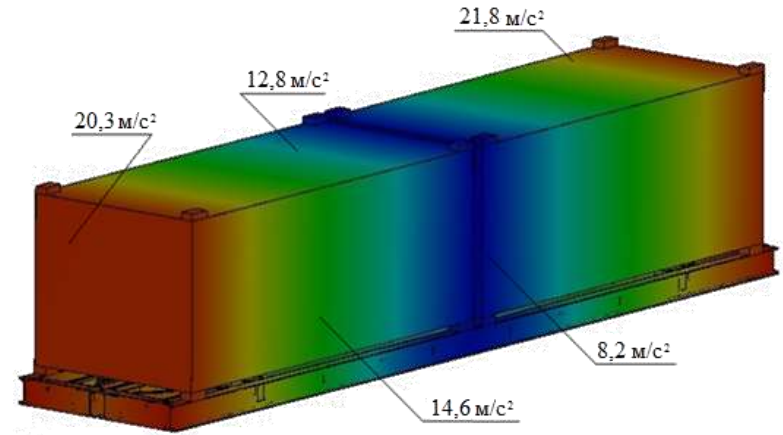
$\beta_\phi = 30 \text{ кН}\cdot\text{с/м}$

- а) пружний зв'язок;
- б) в'язкий зв'язок;
- в) пружно-в'язкий зв'язок

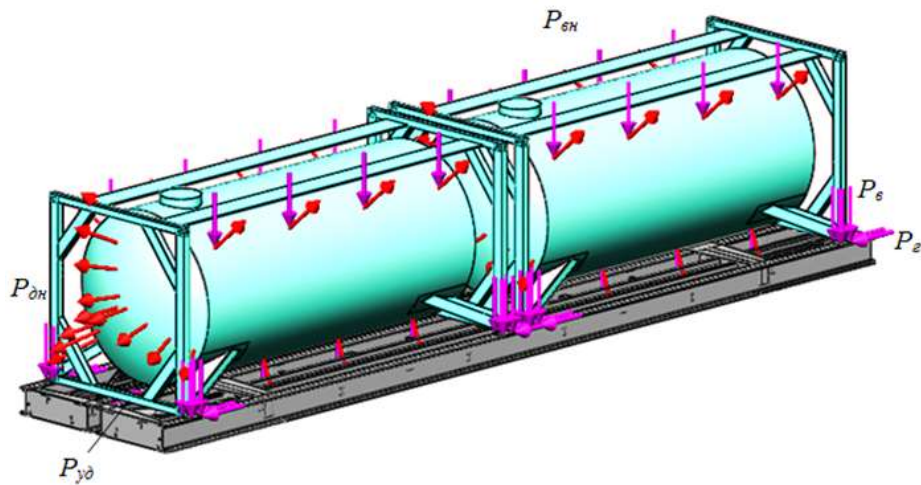
Розрахункова схема несучої конструкції вагона-платформи з контейнерами при маневровому співударянні



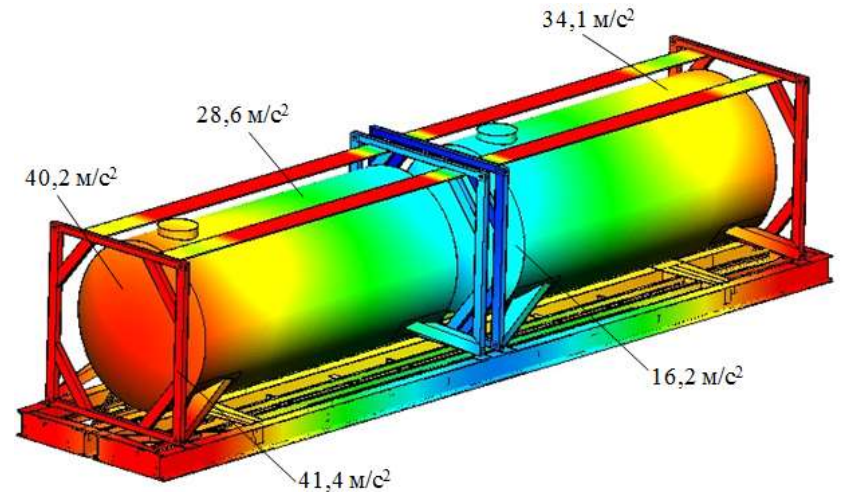
Розподілення прискорень, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи з контейнерами при маневровому співударянні



Розрахункова схема несучої конструкції вагона-платформи з контейнерами-цистернами при маневровому співударянні

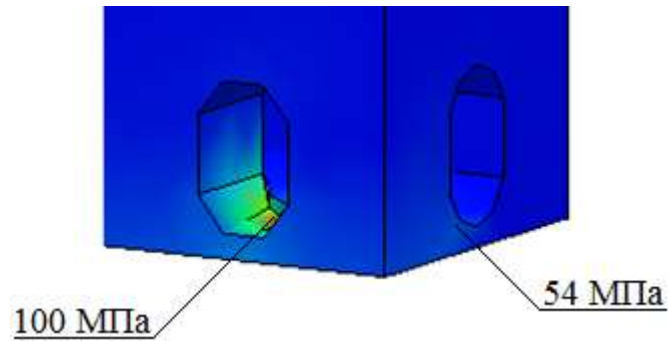


Розподілення прискорень, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи з контейнерами-цистернами при маневровому співударянні

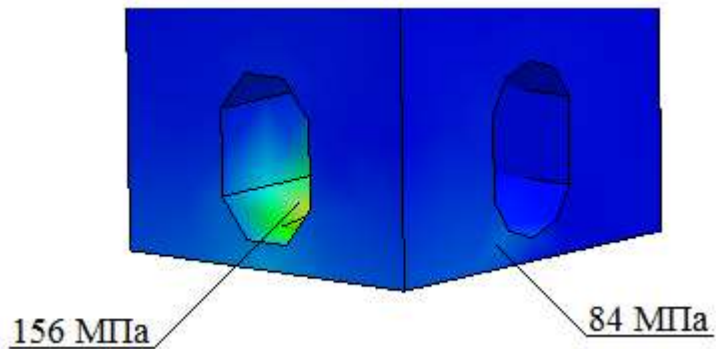


Напружений стан фітинга контейнера з урахуванням заходів щодо удосконалення

а)



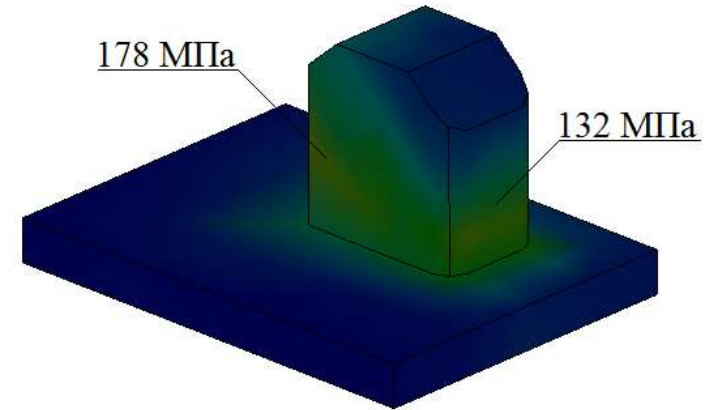
б)



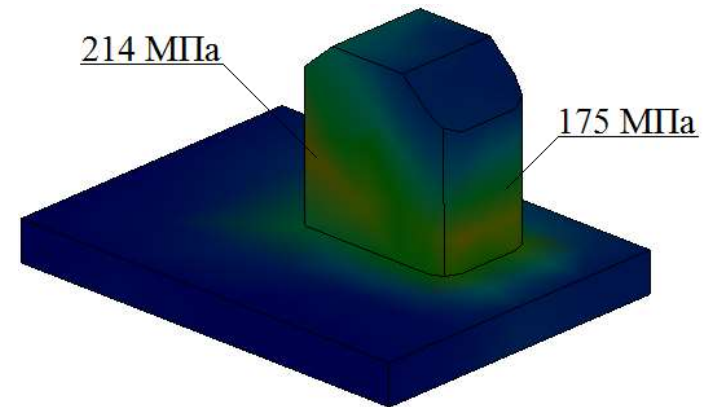
а) контейнер; б) контейнер-цистерна

Напружений стан фітингового упора

а)

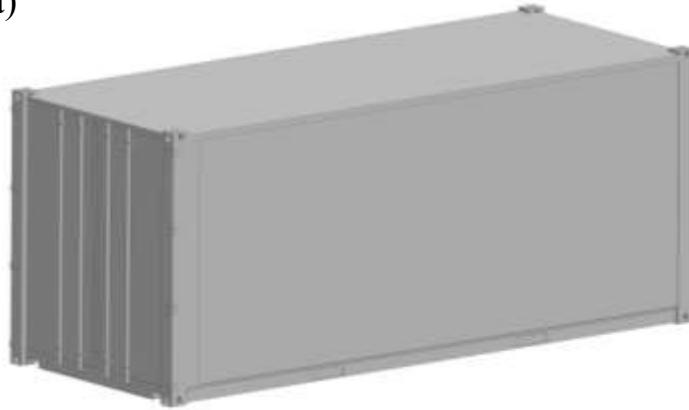


б)

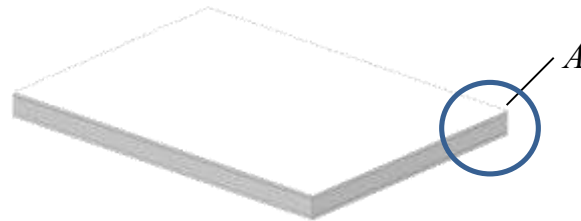
а) при взаємодії з контейнером;
б) при взаємодії з контейнером-цистерною

Контейнер типорозміру 1СС з стінами із сендвіч-панелей

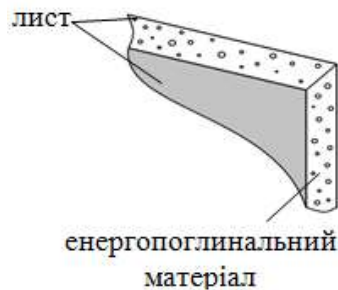
а)



б)

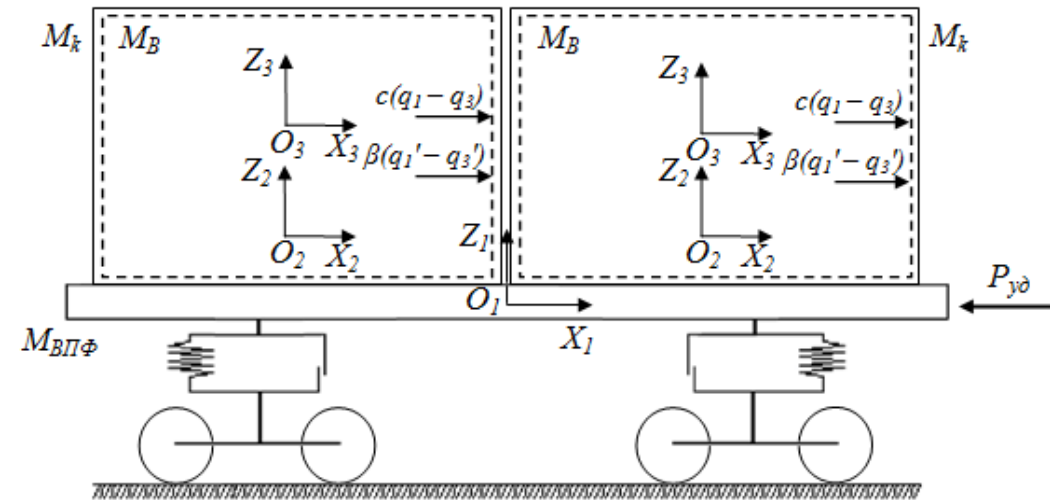


A (збільшено)



а) загальний вигляд контейнера; б) сендвіч-панель

Розрахункова схема вагона-платформи, завантаженого контейнерами

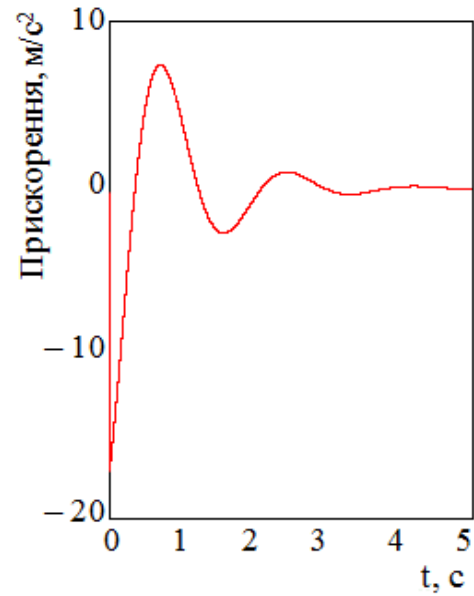


Математична модель динамічної навантаженості вагона-платформи з контейнерами

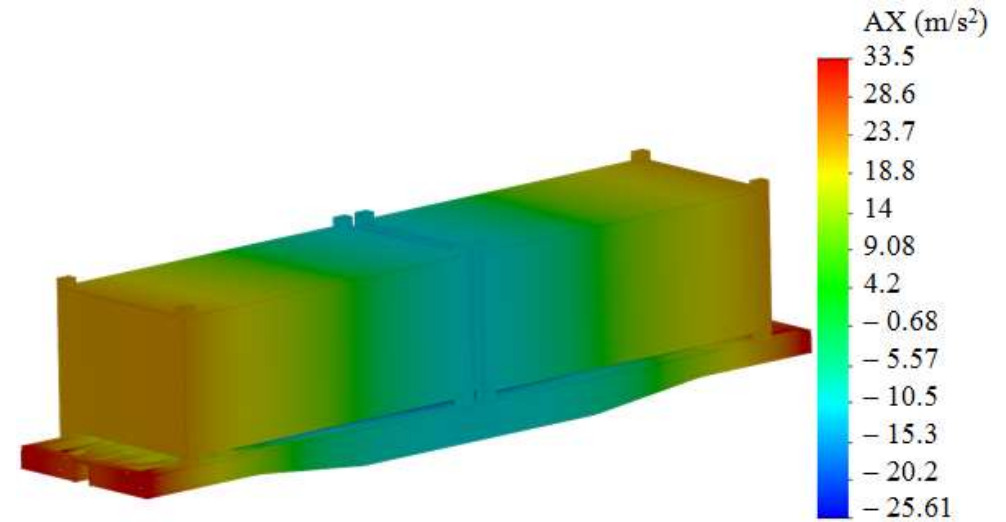
$$\begin{cases} M_{ВПФ} \cdot \ddot{q}_1 = P_{yd} - \sum_{i=1}^n F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2), \\ M_k \cdot \ddot{q}_2 = F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) + C \cdot (q_2 - q_3) + \beta \cdot (\dot{q}_2 - \dot{q}_3), \\ M_B \cdot \ddot{q}_3 = C \cdot (q_2 - q_3) + \beta \cdot (\dot{q}_2 - \dot{q}_3), \end{cases}$$

де $M_{ВПФ}$ – маса-брутто вагона-платформи; P_{yd} – величина повздовжньої сили, що діє на автозчеп; n – кількість контейнерів, розміщених на вагоні-платформі; F_{TP} – сила тертя між фітинговими упорами та фітингами; M_k – маса контейнера; C – жорсткість наповнювача; β – коефіцієнт в'язкого опору наповнювача; q_1, q_2, q_3 – координати, що визначають переміщення, відповідно, вагона-платформи, контейнера та вантажу відносно повздовжньої осі.

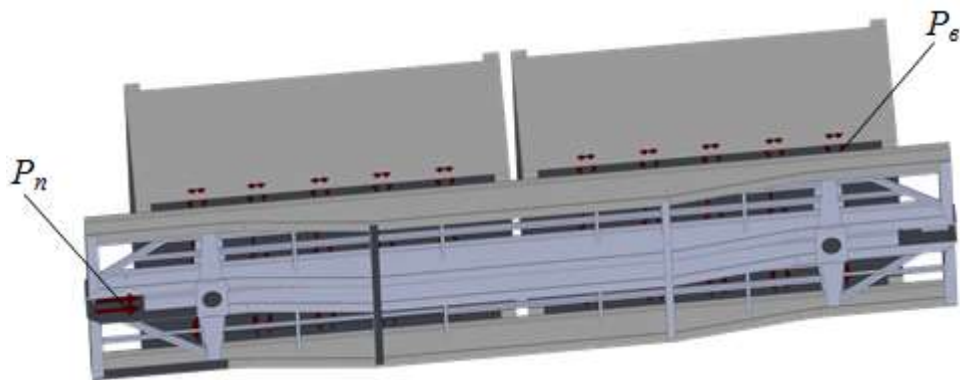
Прискорення, які діють на контейнер при маневровому співударянні



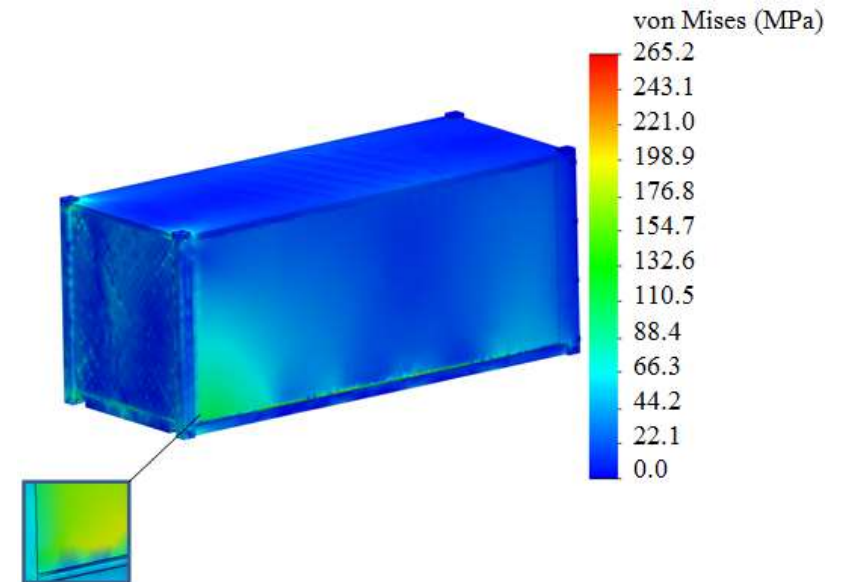
Поля розподілень прискорень відносно несучої конструкції вагона-платформи та контейнерів



Розрахункова схема контейнера, розміщеного на вагоні-платформі



Напружений стан контейнера

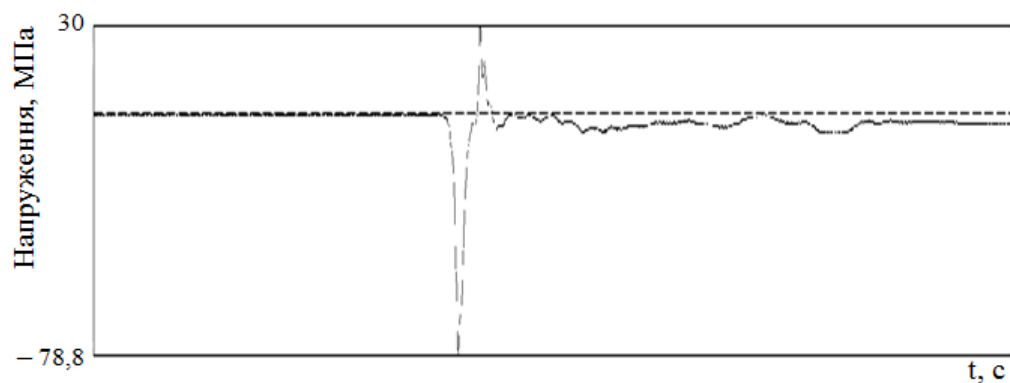


Експериментальне дослідження міцності несучої конструкції вагона-платформи

Вагон-платформа моделі 13-401-17



Напруження в несучій конструкції вагона-платформи



Розміщення тензорезисторів на шворневій балці вагона-платформи



Напруження в несучій конструкції вагона-платформи при ударі (тензорезистор №5)

Швидкість співударяння, км/год.	Напруження, МПа	
	Теорія	Експеримент
3	90,1	78,8
4	96,5	81,3
5	99,4	84,5
6	103,7	88,6
7	105,1	90,4
8	107,4	93,4
9	108,7	95,2
10	109,6	97,3
11	111,6	98,5

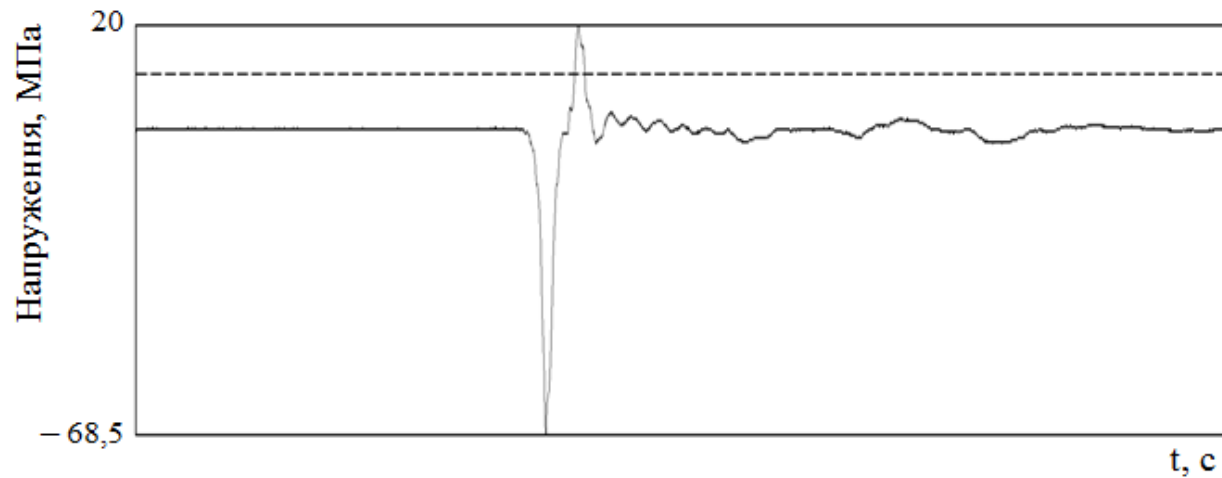
Фітингові пружини



Розміщення пружин в фітингах



Напруження в несучій конструкції вагона-платформи



Напруження в несучій конструкції вагона-платформи при ударі (тензорезистор №5)

Швидкість співударяння, км/год.	Напруження, МПа	
	Теорія	Експеримент
3	79,7	68,5
4	83,5	72,4
5	88,4	75,2
6	91,7	78,3
7	92,3	79,2
8	92,7	79,9
9	93,6	80,5
10	94,4	81,1
11	95,8	81,5

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано наукові дослідження з визначення навантаженості залізничних транспортних засобів в експлуатації. Встановлено, що питанням визначення динамічної навантаженості транспортних засобів контейнерних перевезень при русі морем на залізничних поромках, а також маневрових співударяннях вагонів-платформ з контейнерами та контейнерами-цистернами з урахуванням технологічних зазорів, не приділялося належної уваги. Аналіз нормативних документів з питань проектування залізничних транспортних засобів встановив, що вони не відображають повною мірою даних режимів навантажень. Це викликає пошкодження несучих конструкцій транспортних засобів в експлуатації та необхідність проведення позапланових видів ремонту. Тому актуальним стає створення моделей та методів визначення навантаженості залізничних транспортних засобів контейнерних перевезень, а також створення рішень щодо їх удосконалень.

2. Створено метод та моделі для визначення навантаженості контейнерів та контейнерів-цистерн у складі комбінованих поїздів при перевезенні на залізничних поромках з урахуванням таких схем їх взаємодії: відсутність переміщень вагона-платформи та контейнера відносно початкового положення; наявність переміщень вагона-платформи при коливаннях залізничного порому та нерухомість контейнерів відносно рами; наявність переміщень вагона-платформи відносно палуби та контейнерів відносно рами вагона-платформи, що дозволило сформулювати новий метод урахування позаштатних режимів навантаженості несучих конструкцій вагонів при перевезенні у складі комбінованих поїздів на залізничних поромках. Отримано закономірності динамічної навантаженості суховантажних контейнерів та контейнерів-цистерн при перевезенні у складі комбінованих поїздів на залізничних поромках, що дозволяють визначити стійкість контейнерів та контейнерів-цистерн на вагонах-платформах.

Встановлено, що при відсутності переміщень вагонів-платформ та контейнерів або контейнерів-цистерн відносно початкового положення загальна величина прискорення, яке діє на крайній від фальшборта вагон-платформу з контейнерами склала близько 0,25g, а з контейнерами-цистернами – 0,3g. Для випадку наявності переміщень вагона-платформи при коливаннях залізничного порому та нерухомості контейнерів або контейнерів-цистерн відносно рами встановлено, що загальна величина прискорення, яке діє на крайній від фальшборта вагон-платформу з контейнерами, склала близько 0,3g. При наявності переміщень контейнера-цистерни відносно рами та відсутності переміщень вагона-платформи відносно палуби прискорення, які діють на контейнер-цистерну дорівнюють 0,6g. При наявності переміщень вагона-платформи відносно палуби та контейнерів або контейнерів-цистерн відносно рами вагона-платформи загальна величина прискорення, яке діє на крайній від фальшборта контейнер склала близько 0,47g, а на контейнер-цистерну – 0,9g. При цьому стійкість контейнера забезпечується при кутах крену залізничного порому до 25° . Для забезпечення безпеки перевезень наливних вантажів у контейнерах-цистернах морем важливим є дотримання кутів крену залізничного порому до 10° . Проведено комп'ютерне моделювання динамічної навантаженості вагона-платформи з контейнерами та контейнерами-цистернами при перевезенні залізничним поромом. Отримані результати верифіковані за F-критерієм. Удосконалено несучу конструкцію вагона-платформи з метою забезпечення стійкості контейнерів при перевезенні залізничним поромом шляхом постановки зйомних надбудов на раму. Для зменшення динамічної навантаженості контейнерів здійснюється використання на внутрішніх поверхнях надбудов матеріалу з в'язкими властивостями. Запропоновані технічні рішення обґрунтовані відповідними розрахунками.

3. Створено моделі для визначення динамічної навантаженості контейнерів та контейнерів-цистерн, розміщених на вагонах-платформах при маневровому співударянні. Встановлено, що при наявності зазорів між фітинговими упорами вагона-платформи та фітингами контейнера, прискорення, що діє на їх несучі конструкції складає, відповідно, близько 90 м/с^2 та 110 м/с^2 . При повздовжній навантаженості вагона-платформи з контейнерами-цистернами, розміщеними на ньому максимальні прискорення отримані для випадку, коли зазор між фітинговим упором та фітингом дорівнює 30 мм. При цьому прискорення складають близько 300 м/с^2 .

4. Створено метод та моделі для визначення навантаженості контейнерів та контейнерів-цистерн з урахуванням пружних, в'язких та пружно-в'язких зв'язків у фітингах, які дозволяють отримати закономірності процесів їх навантаженості при маневрових співударяннях. Розроблено новий метод урахування позаштатних режимів навантаженості несучої конструкції вагона-платформи, завантаженої контейнерами та контейнерами-цистернами при маневрових співударяннях з пружними, в'язкими та пружно-в'язкими зв'язками у фітингах. Результати досліджень довели, що прискорення, які діють на контейнер та контейнер-цистерну з в'язкими та пружно-в'язкими зв'язками у фітингах, розміщений на вагоні-платформі при маневровому співударянні складають, відповідно, близько 20 м/с^2 та 40 м/с^2 та не перевищує нормативну величину. Запропоновані заходи щодо удосконалення схеми взаємодії вагона-платформи з контейнерами та контейнерами-цистернами дозволяють знизити максимальні еквівалентні напруження, які діють у фітингових упорах майже у три рази, а у фітингах – майже у сім.

5. Проведено обґрунтування впровадження сендвіч-панелей у якості торцевих стін контейнера. Створено модель для визначення повздовжньої динамічної навантаженості контейнера типорозміру ІСС з торцевими стінами із сендвіч-панелей. Встановлено, що з урахуванням запропонованого рішення стає можливим зменшити ДН контейнера на 10% у порівнянні з типовою конструкцією.

Проведено комп'ютерне моделювання динамічної навантаженості контейнера з торцевими стінами із сендвіч-панелей. Максимальне прискорення виникає в його торцевих стінах з боку консольних частин ВПФ та дорівнюють $19,3 \text{ м/с}^2$. Розбіжність між результатами математичного моделювання динамічної навантаженості контейнера та комп'ютерним моделюванням склала 7,8 %.

Здійснено верифікацію сформованих моделей динамічної навантаженості контейнера. Встановлено, що гіпотеза про адекватність не відхиляється.

Проведено розрахунок на міцність контейнера. Результати розрахунку показали, що максимальні напруження в його конструкції на 15% нижчі за ті, що виникають у типовій конструкції контейнера.

6. Проведено експериментальне дослідження міцності вагона-платформи при маневровому співударянні. При цьому проводилися натурні випробування міцності з використанням методу електричного тензометрування.

До уваги прийняті дві схеми взаємодії фітингів з фітинговими упорами: типова, а також пружна. Максимальна розбіжність між результатами математичного та фізичного експерименту при типовій схемі взаємодії фітингів з фітинговими упорами склала 17,0%, а при пружній – 17,5%. Проведено верифікацію моделей навантаженості несучої конструкції ВПФ за F-критерієм. Встановлено, що гіпотеза про адекватність підтверджується.

7. Проведено техніко-економічне обґрунтування запропонованих рішень щодо удосконалення несучих конструкцій контейнерів. Захід окуповується на другий рік розрахункового періоду. Економічний ефект при цьому складає 430,29 тис. грн. Економічний ефект у цей рік, який включає коефіцієнт приведення до облікового року дорівнює 327,02 тис. грн. Економічний ефект наростаючий підсумком в останній рік розрахункового періоду складе 1126,24 тис. грн.