

Наведені результати моделювання динамічної навантаженості вагона-платформи з контейнерами, розміщеними на ньому при маневровому співударянні. Отримано величини прискорень, які діють на вагон-платформу та контейнери при відсутності переміщень фітінгів відносно фітінгових упорів, а також при їх можливих переміщеннях. Проведені дослідження сприятимуть створенню вагонів-платформ нового покоління з підвищеними техніко-економічними показниками

Ключові слова: вагон-платформа, несуча конструкція, контейнер, динаміка, моделювання, маневрове співударяння, навантаження конструкції, прискорення, комбіновані перевезення

Приведены результаты моделирования динамической нагруженности вагона-платформы с контейнерами, размещенными на нем при маневровом соударении. Получены величины ускорений, которые действуют на вагон-платформу и контейнеры при отсутствии перемещений фитингов относительно фитинговых упоров, а также при их возможных перемещениях. Проведенные исследования способствуют созданию вагонов-платформ нового поколения с повышенными технико-экономическими показателями

Ключевые слова: вагон-платформа, несущая конструкция, контейнер, динамика, моделирование, маневровое соударение, нагружение конструкции, ускорение, комбинированные перевозки

УДК 629.463.03:629.015

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.72054

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ ВАГОНА- ПЛАТФОРМИ ПРИ МАНЕВРОВОМУ СПІВУДАРЯННІ

А. О. Ловська

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: alyonalovskaya@gmail.com

А. В. Рибін

Старший викладач

E-mail: rybinandrey2006@mail.ru*

Кафедра вагонів

*Український державний університет

залізничного транспорту

пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, Україна, 61050

1. Вступ

Підвищення об'ємів перевезень вантажів через територію України, яка є ланкою найважливіших міжнародних транспортних коридорів, зумовило створення та введення в експлуатацію комбінованих транспортних систем.

Відомо, що одним з найбільш затребуваних видів рухомого складу при комбінованих перевезеннях є вагон-платформи. Для забезпечення ефективності перевізного процесу необхідним є розробка та впровадження у експлуатацію вагонів-платформ нового покоління з покращеними техніко-економічними показниками.

Тому важливо на стадії проектування таких вагонів враховувати уточнені величини навантажень, що можуть діяти на їх несучі конструкції.

Найбільші величини експлуатаційних навантажень, що діють на вагони, спостерігаються в умовах маневрових співударянь. Для забезпечення міцності вагона-платформи з контейнерами, розміщеними на ньому необхідним є проведення досліджень динамічних навантажень, що діють на них при маневровому співударянні.

2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Питання удосконалення комбінованих перевезень, зокрема контейнерних, розглянуті у [1], прово-

диться аналіз особливостей кріплення контейнерів на вагонах-платформах. З метою підвищення техніко-економічних показників вагонів при перевезенні контейнерів різного типорозміру проведено обґрунтування удосконалення конструкцій довгобазних вагонів-платформ та вагонів-платформ зчленованого типу для цих перевезень.

Дослідження міцності вагона-платформи нового покоління з поворотною рамою для перевезення контейнерів та завантаження-розвантаження їх за системою ACTS наведені в [2]. Розрахунок на міцність несучої конструкції вагона-платформи при навантаженні її контейнерами проведений за методом скінчених елементів в середовищі програмного забезпечення Nastran. При цьому питанням дослідження динаміки вагона-платформи з контейнерами в зазначених працях уваги не приділяється.

Визначення показників міцності вагона-платформи для перевезення контейнерів та завантаження-розвантаження їх за системою ACTS проводиться в [3]. При цьому розрахунок на міцність проведений у статичі в середовищі програмного забезпечення Nastran. Чисельні значення розрахункових навантажень, які діють на вагон-платформу прийняті у відповідності до нормативів PNEN12663 та BN-77/3532-40. Міцність вагона-платформи визначалася з урахуванням чотирьох схем навантажень її конструкції:

- стискуючих зусиль у 2 МН за всіма буферів;
- стискуючих зусиль у 0,4 МН, прикладених за діагоналлю на рівні буферів;
- зусилля розтягування у 1 МН за всіма буферів;
- вертикального інерційного навантаження, що діє на несучу конструкцію вагона – платформи з урахуванням прискорення 1,95 g.

При розрахунках на міцність вагона-платформи до уваги не прийняті динамічні навантаження, зумовлені можливими переміщеннями контейнерів відносно рами.

Перспективи експлуатації вагона-платформи нового покоління для перевезення великовантажних контейнерів, наведені у [4]. При виготовленні моделі була поставлена задача зменшення опору повітря під час руху, яка вирішена шляхом оптимізації розміщення контейнерів за довжиною вагона – платформи. Модель даного вагона-платформи виготовлена у Німеччині та пройшла експериментальні дослідження у Великобританії.

Доцільність експлуатації вагонів-платформ для перевезення контейнерів, у тому числі контейнерів-цистерн, побудови заводу “Трансмаш” (Росія) зазначена у [5]. Конструкція вагона-платформи має вантажопідйомність 73 тони та може здійснювати перевезення контейнерів типорозміру 1СС, 1С, а також 1СХ.

Конструкційні особливості вагона-платформи для інтермодальних перевезень наведені у [6]. Описані загальні вимоги по організації технології інтермодальних перевезень, а також визначені їх переваги. При цьому в зазначених працях не оговорюється, чи здійснювалося на стадії проектування вагонів-платформ урахування динамічних навантажень, що діють на них при маневрових співударяннях та переміщенні фітінгів контейнерів відносно фітінгових упорів вагона-платформи.

Дослідження динаміки залізничного вагона з відкритою завантажувальною платформою наведені в [7]. Розрахунок проведений у середовищі програмного забезпечення MSC Adams. При цьому дослідження стійкості проти перекидання вагона здійснювалося при його вписуванні у криву радіусом 250 м з урахуванням різної швидкості руху.

Експериментальне дослідження дослідного зразка шарнірноз’єданого вагона-платформи моделі 13-1839 для перевезення великовантажних контейнерів приводиться у [8]. Особливістю зазначеної конструкції вагона-платформи є використання двох секцій з загальною завантажувальною довжиною 80 футів, що встановлені на двох візках. При здійсненні випробувань дослідного зразка вагона-платформи проводилися: статичні випробування на міцність, випробування на співударяння, стаціонарні гальмівні випробування, випробування на проходження кривих малого радіусу та випробування по проходженню сортувальних гірок.

Важливо зазначити, що в цих працях дослідженню динаміки вагонів-платформ з контейнерами при маневрових співударяннях з урахуванням можливих переміщень контейнерів відносно фітінгових упорів уваги не приділяється.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою роботи є дослідження динамічної навантаженості вагона-платформи при маневровому співударянні.

Для досягнення поставленої мети були визначені наступні задачі:

- математичне моделювання динамічної навантаженості вагона-платформи з контейнерами, розміщеним на ньому при маневровому співударянні;
- комп’ютерне моделювання динамічної навантаженості вагона-платформи з контейнерами, розміщеним на ньому при маневровому співударянні.

4. Моделювання динамічної навантаженості вагона-платформи з контейнерами, розміщеним на ньому при маневровому співударянні

4.1. Математичне моделювання

З метою дослідження динамічних навантажень, які діють на вагон-платформу з контейнерами, розміщеними на ньому при маневровому співударянні, використано математичну модель, наведену у [9], де проводиться визначення прискорень контейнера-цистерни та вагона-платформи при дії на нього повздовжнього зусилля від вагона-бойка. Величина повздовжнього зусилля приймалася у діапазоні 2200–2800 кН. Зв’язок між рамою вагона-платформи та фітінгами контейнерів-цистерн імітувався як пружньо-дисипативний.

Важливо зазначити, що максимальна величина повздовжньої сили удару, яка може діяти на вагон-платформу з розміщеним на ньому вантажем, у тому числі контейнерами, при маневровому співударянні, складає 3,5 МН [10]. Тому з метою отримання уточненого значення прискорень, які діють на вагон-платформу та контейнери в експлуатації, необхідним є проведення додаткових досліджень.

Схема дії повздовжньої сили на вагон-платформу з контейнерами, розміщеними на ньому з урахуванням сили тертя між фітінгами та фітінговими упорами, наведена на рис. 1.

Дослідження проведені стосовно вагона-платформи моделі 13-4085, побудови ВАТ “Дніпровагонмаш” (Україна) та контейнера типорозміру за ISO – 1СС.

Контейнер розглядався як прикріплена маса відносно рами вагона-платформи, що має податливість в повздовжньому напрямку за рахунок наявності зазорів між фітінговими упорами вагона-платформи та фітінгами контейнера. Тобто, контейнер має власну ступінь вільності до моменту упору фітінга у фітінговий упор, після чого контейнер повторює траєкторію переміщення вагона-платформи. Зв’язок між рамою вагона-платформи та фітінгами контейнера імітувався як фрикційний.

$$M'_{пл} \cdot \ddot{x}_{пл} + M_{пл} \cdot h \cdot \ddot{\phi}_{пл} = S_a - \sum_{i=1}^2 F_{ТР}^k + F_i, \quad (1)$$

$$I_{пл} \cdot \ddot{\phi}_{пл} + M_{пл} \cdot h \cdot \ddot{x}_{пл} - g \cdot \phi_{пл} \cdot M_{пл} \cdot h = 1 \cdot F_{ТР} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2) + I (k_1 \cdot \Delta_1 - k_2 \cdot \Delta_2), \quad (2)$$

$$M_{пл} \cdot \ddot{z}_{пл} = k_1 \cdot \Delta_1 + k_2 \cdot \Delta_2 - F_{ТР} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2), \quad (3)$$

$$m_i \cdot (\ddot{x}_{пл} - \ddot{x}_i) + (m_i \cdot z_{ci}) \cdot (\ddot{\phi}_{пл} - \ddot{\phi}_i) = F_i - F_{ТР}^k, \quad (4)$$

$$I_i \cdot (\ddot{\phi}_{пл} - \ddot{\phi}_i) + (m_i \cdot z_{ci}) \cdot (\ddot{x}_{пл} - \ddot{x}_i) - g \cdot (m_i \cdot z_{ci}) \cdot (\phi_{пл} - \phi_i) = 0, \quad (5)$$

$$m_i \cdot \ddot{z}_{пл} = 0, \quad (6)$$

де

$$M'_{пл} = M_{пл} + 2 \cdot m_T + \frac{n \cdot I}{r^2},$$

$$\Delta_1 = z_{пл} - l \cdot \phi_{пл}, \Delta_2 = z_{пл} + l \cdot \phi_{пл},$$

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; $F_{тр}^k$ – сила тертя, що виникає між фітинговим упором та фітингом при повздовжньому переміщенні контейнера; F_i – сила інерції, що виникає при повздовжньому переміщенні контейнера; m_T – маса візка; I – момент інерції колісної пари; r – радіус середнього колеса; n – кількість вісей візка; l – половина бази вагона – платформи; $F_{тр}$ – абсолютне значення сили сухого тертя у ресорному комплекті; k_1, k_2 – жорсткість пружин вагона-платформи; m_i – маса контейнера; z_{ci} – висота центру ваги контейнера; I_i – приведений момент інерції i -го контейнера; x, z – координати, що відповідають, відповідно, повздовжньому, кутовому навколо поперечної осі та вертикальному переміщенню вагона-платформи; x_i, ϕ_i – координати, що відповідають, відповідно, повздовжньому та кутовому навколо поперечної осі переміщенню контейнера.

При цьому $x_i < 30$ мм [9, 11], якщо $x_i \geq 30$ мм, тоді $x_i = x$.

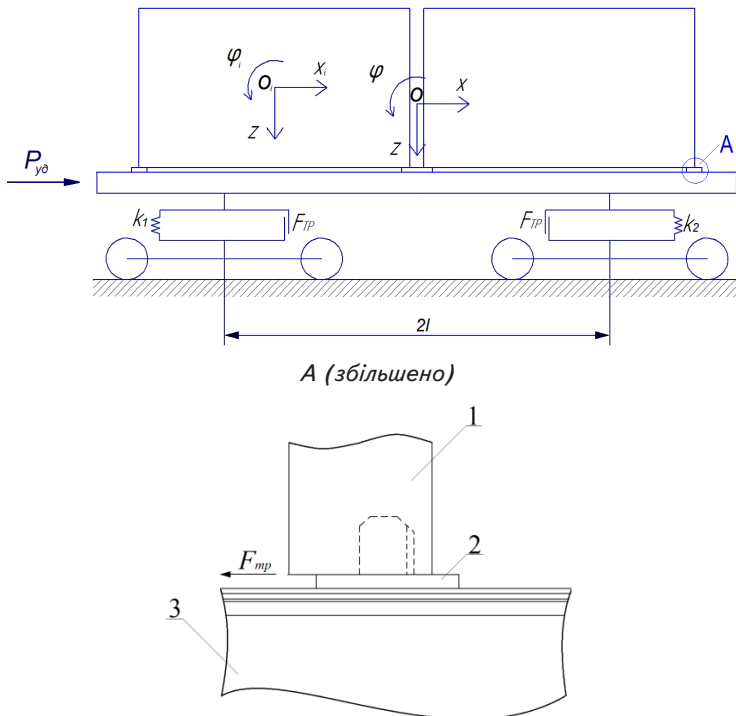


Рис. 1. Схема дії повздовжньої сили на вагон-платформу з контейнерами, розміщеними на ньому: 1 – фітинг; 2 – фітинговий упор; 3 – повздовжня балка вагона – платформи

Вертикальні переміщення контейнера відносно рами вагона-платформи не враховувалися. Величина сили повздовжнього удару, що діє на вагон-платформу, прийнята рівною 3,5 МН.

Розв'язання диференціальних рівнянь здійснено за допомогою метода Рунге-Кутта в середовищі програмного забезпечення MathCad [12, 13].

Результати досліджень дозволили зробити висновок, що при наявності зазорів між фітинговими упорами вагона-платформи та фітингами контейнера, прискорення, що діє на їх несучі конструкції складає, відповідно, близько 90 м/с² та 110 м/с² (рис. 2, а, б).

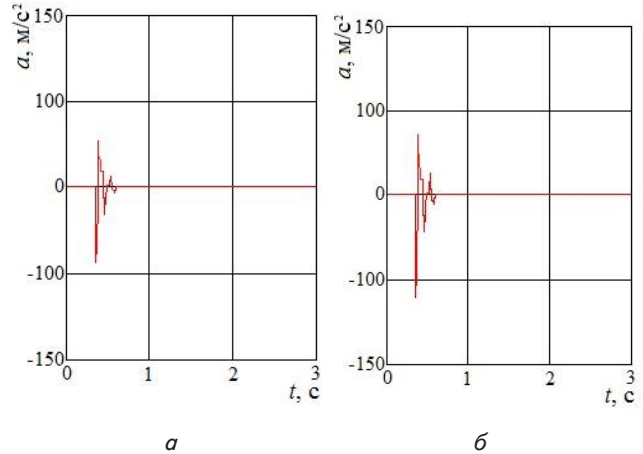


Рис. 2. Прискорення, які діють на вагон-платформу та контейнери, розміщені на ньому при маневровому співударянні з урахуванням наявності зазорів між фітинговими упорами та фітингами: а – вагон-платформа; б – контейнер

З метою визначення прискорень, які діють на вагон-платформу з контейнерами, розміщеними на ньому, при маневровому співударянні з урахуванням відсутності зазорів між фітинговими упорами та фітингами, наведена вище математична модель зведена до вигляду:

$$M'_{пл} \cdot \ddot{x}_{пл} + M_{пл} \cdot h \cdot \ddot{\phi}_{пл} = S_a, \tag{7}$$

$$I_{пл} \cdot \ddot{\phi}_{пл} + M_{пл} \cdot h \cdot \ddot{x}_{пл} - g \cdot \phi_{пл} \cdot M_{пл} \cdot h = = l \cdot F_{тр} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2) + l (k_1 \cdot \Delta_1 - k_2 \cdot \Delta_2), \tag{8}$$

$$M_{пл} \cdot \ddot{z}_{пл} = k_1 \cdot \Delta_1 + + k_2 \cdot \Delta_2 - F_{тр} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2), \tag{9}$$

$$m_i \cdot \ddot{x}_{пл} + (m_i \cdot z_{ci}) \cdot \ddot{\phi}_{пл} = 0, \tag{10}$$

$$I_i \cdot \ddot{\phi}_{пл} + (m_i \cdot z_{ci}) \cdot \ddot{x}_{пл} - g \cdot (m_i \cdot z_{ci}) \cdot \phi_{пл} = 0, \tag{11}$$

$$m_i \cdot \ddot{z}_{пл} = 0, \tag{12}$$

тобто в ній скасовані сили тертя між фітинговими упорами та фітингами, а також сили інерції, що виникають при русі контейнера відносно рами вагона-платформи. Результати розрахунку наведені на рис. 3, а, б.

При цьому встановлено, що максимальне значення прискорення, яке діє на вагон-платформу та контейнери, розміщені на ньому, при маневровому співударянні складає близько 50 м/с².

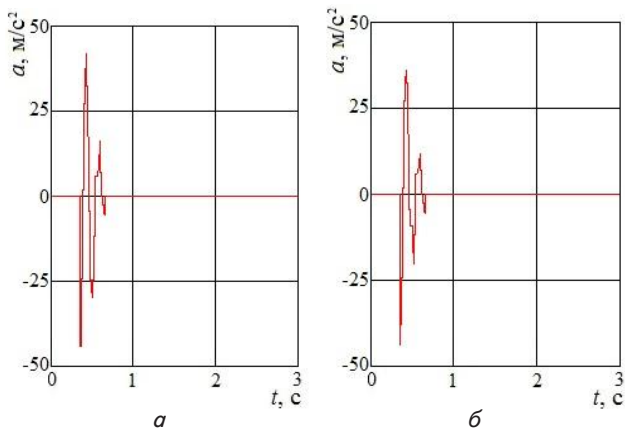


Рис. 3. Прискорення, які діють на вагон-платформу та контейнери, розміщені на ньому при маневровому співударянні з урахуванням відсутності зазорів між фітинговими упорами та фітингами: *а* – вагон-платформа; *б* – контейнер

4. 2. Комп'ютерне моделювання

З метою апробації отриманих величин прискорень проведено комп'ютерне моделювання динаміки вагона-платформи з контейнерами, розміщеними на ньому, при дії позадвожньої сили у 3,5 МН на задній упор автозцепу в середовищі програмного забезпечення CosmosWorks, версія 2015 [14]. Просторова модель несучої конструкції вагона-платформи з контейнерами наведена на рис. 4.

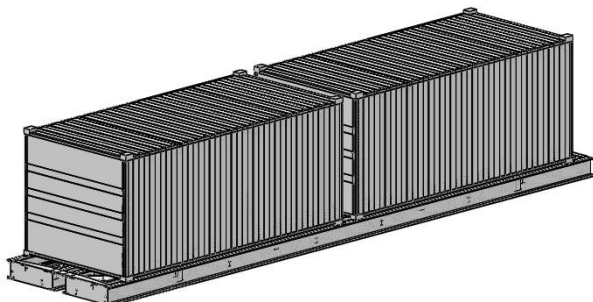


Рис. 4. Просторова модель вагона-платформи з контейнерами, розміщеними на ньому

Розрахунок виконано за допомогою методу скінчених елементів.

При складанні скінчено-елементної моделі використані просторові ізопараметричні тетраедри. При цьому кількість вузлів сітки складала 669705, елементів – 2010206. Максимальний розмір елемента дорівнює 50 мм, мінімальний – 10 мм. Мінімальна кількість елементів в колі складала 9, співвідношення збільшення розмірів елементів у сітці – 1,7. Максимальне співвідношення боків – 16258, відсоток елементів зі співвідношенням боків менше 3 – 47,6, більше 10 – 20,4.

При складанні моделі міцності враховано, що на вагон-платформу окрім позадвожньої сили $P_{уд}$ діють вертикальні зусилля у зонах спирання контейнерів на фітингові упори $P_{уп}^b$ (рис. 5). Враховано, що на контейнер діє вертикальна реакція у зоні спирання фітинга на фітинговий упор $P_{уп}^b$. При складанні комп'ютерної моделі не враховано дію вантажу, розміщеного у контейнері на його стіні. Для урахування сили тертя в зонах взаємодії вагона-платформи з

контейнерами використаний коефіцієнт модального демпфірування.

В якості матеріалу несучої конструкції вагона-платформи та контейнерів застосована сталь марки 09Г2С зі значенням межі міцності $\sigma_B = 490$ МПа та межі плинності $\sigma_T = 345$ МПа.

Результати комп'ютерного моделювання наведені на рис. 5, *а*, *б*.

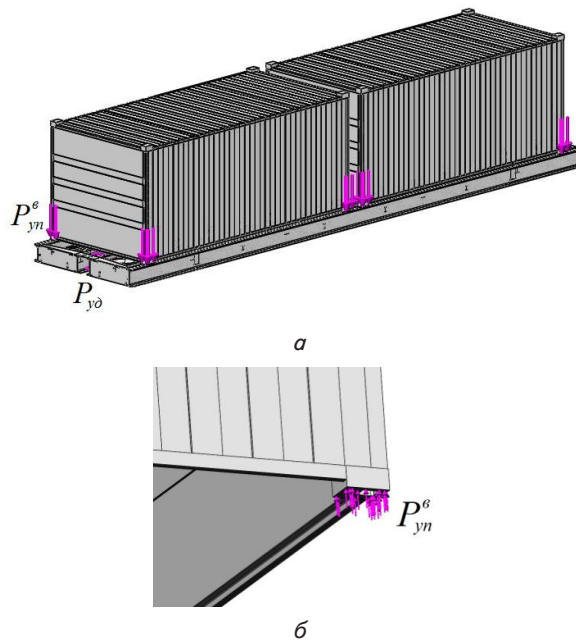


Рис. 5. Модель міцності вагона-платформи з контейнерами, розміщеними на ньому при дії позадвожньої сили на задній упор автозцепу: *а* – загальний вид; *б* – дія вертикальної реакції на фітинг контейнера від опорної площини фітингового упору

З проведених досліджень можна зробити висновок, що максимальні прискорення, які діють на вагон-платформу при наявності зазорів у 30 мм між фітинговими упорами та фітингами, складають близько 100 м/с², при відсутності зазорів – близько 60 м/с², для контейнера значення прискорень склали, відповідно, близько 120 м/с² та 50 м/с².

З метою перевірки адекватності розробленої моделі використаний критерій Фішера.

Встановлено, що модель, яка розглядається, є лінійною та характеризує зміну прискорень вагона-платформи з контейнерами, розміщеними на ньому від позадвожньої сили, що діє на задній упор автозцепу. При цьому кількість ступенів вільності при $N = 5$ буде складати $f_1 = 3$.

При визначенні адекватності моделі з урахуванням наявності зазорів між фітинговими упорами та фітингами встановлено, що при дисперсії відтворюваності $S_y^2 = 2,5$ та дисперсії адекватності $S_{ад}^2 = 6,67$, фактичне значення критерію Фішера $F_p = 2,67$, що менше табличного значення критерію $F_t = 5,41$. Отже гіпотеза про адекватність розробленої моделі не заперечується. Похибка апроксимації при цьому складала 4,27 %.

При відсутності зазорів між фітинговими упорами та фітингами встановлено, що при дисперсії відтворюваності $S_y^2 = 2,5$ та дисперсії адекватності $S_{ад}^2 = 3,33$, фактичне значення критерію Фішера $F_p = 0,24$, що мен-

ше табличного значення критерію $F_t = 1,33$. Гіпотеза про адекватність розробленої моделі не заперечується. Похибка апроксимації при цьому складала 7,77 %.

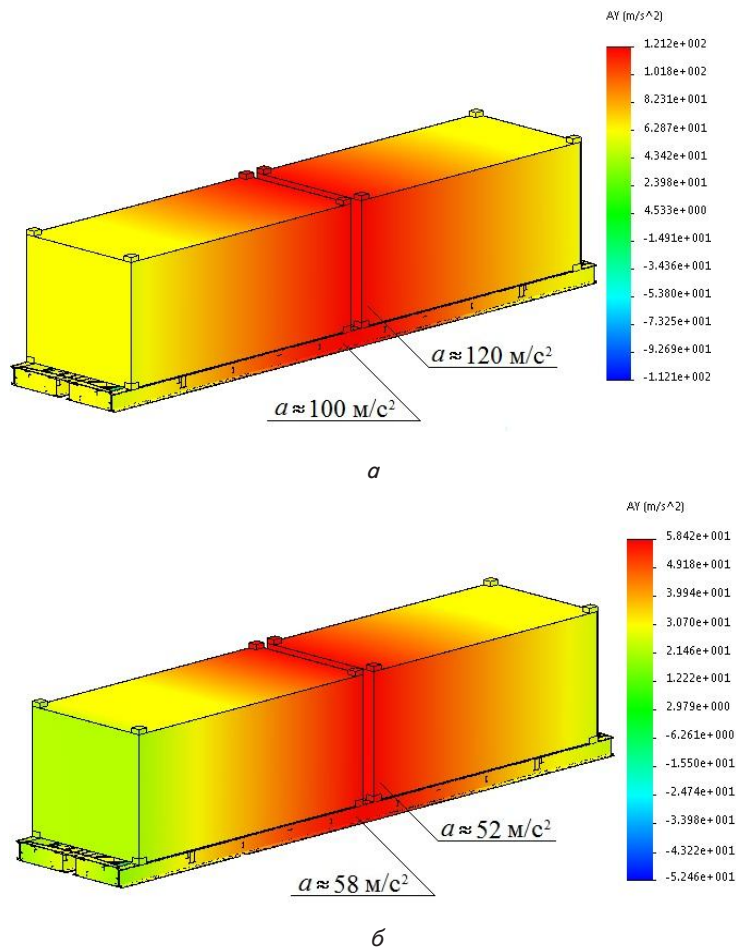


Рис. 7. Прискорення вагона-платформи з контейнерами, розміщеними на ньому при дії повздовжньої сили на задній упор автозчепу: *a* – при наявності зазорів між фітинговими упорами та фітингами; *б* – при відсутності зазорів між фітинговими упорами та фітингами

Проведені дослідження показали, що прискорення, які діють на вагон-платформу та контейнери при маневровому співударянні, з урахуванням можливих переміщень фітингів відносно фітингових упорів, значно перевищують нормативні величини [10]. Тому необхідним є уточнення нормативних документів з урахуванням внесення в них максимальних величин прискорень, що можуть діяти на вагон-платформу та контейнери при маневровому співударянні, а також урахування уточнених величин динамічних навантажень на стадії їх проектування в умовах вагонобудівних підприємств.

6. Висновки

1. Проведені дослідження динаміки вагона-платформи з контейнерами, розміщеними на ньому, дозволили отримати прискорення, які виникають при маневровому співударянні з урахуванням переміщень контейнерів відносно рами вагона-платформи. Максимальні прискорення, які діють на вагон-платформу та контейнери, при наявності зазорів між фітинговими упорами та фітингами, складають, відповідно, близько 100 м/с² та 120 м/с², при відсутності зазорів, відповідно, близько 60 м/с² та 50 м/с².

Встановлено, що при відсутності зазорів між фітинговими упорами та фітингами, можна знизити величину прискорень, які діють на вагон – платформу та контейнери, що розміщені на ньому, відповідно, на 40 % та 60 %.

2. Для забезпечення міцності вагонів-платформ та контейнерів при маневрових співударяннях необхідно обмежити переміщення контейнерів відносно рами вагона-платформи, що дозволить знизити величину динамічних навантажень, які діють на них.

3. При проектуванні вагонів-платформ нового покоління для перевезення з'ємних транспортних одиниць та контейнерів необхідно враховувати уточнені величини прискорень, які можуть діяти в експлуатації, що дозволить забезпечити міцність їх несучих конструкцій при маневрових співударяннях.

Література

1. Мямлин, С. В. Подвижной состав для перевозки контейнеров железнодорожным транспортом [Текст] / С. В. Мямлин, А. В. Шатунов, А. В. Сороколет // Сб. науч. трудов ДонИЖТа. – 2010. – Вып. 22. – С. 125–132.
2. Chlus, K. Dynamic analysis of railway platform chassis model [Text] / K. Chlus, W. Krason // Journal of KONES Powertrain and Transport. – 2011. – Vol. 18, Issue 2. – P. 93–100.
3. Chlus, K. Numerical standard tests of railway carriage platform [Text] / K. Chlus, W. Krason // Journal of KONES Powertrain and Transport. – 2012. – Vol. 19, Issue 3. – P. 59 – 64. doi: 10.5604/12314005.1137944
4. New livery for tarmac wagons [Text] / Online. – 2011. – Issue 17. – P. 1.
5. Switching over to the home platform [Text] / Journal for partners Transmashholding. – 2015. – Vol. 3. – P. 22–23.
6. Nader, M. Kolejowy wagon transportowy jako nowatorskie, innowacyjne rozwiazanie konstrukcyjne do przewozu naczep siodlowych i zestawow drogowych dla transportu intermodalnego [Text] / M. Nader, M. Sala, J. Korzeb, A. Kostrzewski // Logistyka. – 2014. – Vol. 4. – P. 2272–2279.
7. Niezgodna, T. Simulations of motion of prototype railway wagon with rotatable loading floor carried out in MSC Adams software [Text] / T. Niezgodna, W. Krason, M. Stankiewicz // Journal of KONES Powertrain and Transport. – 2012. – Vol. 19, Issue 4. – P. 495–502. doi: 10.5604/12314005.1138622

8. Бубнов, В. М. Экспериментальные исследования шарнирно соединенного вагона – платформы для крупно – тоннажных контейнеров модели 13 – 1839 [Текст] / В. М. Бубнов, С. В. Мямлин, Н. Л. Гуржи // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 28. – С. 12–16.
9. Богомаз, Г. И. Нагруженность контейнеров-цистерн, расположенных на железнодорожной платформе, при ударах в автосцепку [Текст]: зб. наук. пр. / Г. И. Богомаз, Д. Д. Мехов, О. П. Пилипченко, Ю. Г. Черномашенцева // Динаміка та керування рухом механічних систем, 1992. – С. 87–95.
10. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) [Текст]. – М.: ГосНИИВ – ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.
11. Правила размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах при перевозках их по железным дорогам колеи 1520 мм стран-участниц СМГС. Ч. 1. Общие положения [Текст]. – ОСЖД, 2012. – 681 с.
12. Дьяконов, В. MATHCAD 8/2000 [Текст]: спец. справочник / В. Дьяконов. – СПб: Питер, 2000. – 592 с.
13. Кирьянов, Д. В. Mathcad 13 [Текст] / Д. В. Кирьянов. – СПб.: БХВ – Петербург, 2006. – 608 с.
14. Алямовский, А. А. SolidWorks/COSMOSWorks 2006 – 2007. Инженерный анализ методом конечных элементов [Текст] / А. А. Алямовский. – М.: ДМК, 2007. – 784 с.