

УДК 629.463.62

*Альона Ловська, к.т.н., доцент
(доцент кафедри вагонів, Український державний університет
залізничного транспорту)*

ОСОБЛИВОСТІ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НАВАНТАЖЕНОСТІ КОНТЕЙНЕРА З ПРУЖНО-В'ЯЗКИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ У ФІТИНГАХ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕЖИМАХ

В статті наведені результати комп'ютерного моделювання динамічної навантаженості контейнера удосконаленої конструкції, розміщеного на вагоні-платформі при маневровому співударянні. Особливістю конструкції контейнера є наявність у фітингах в'язких та пружно-в'язких зв'язків, що дозволяє забезпечити динамічну навантаженість в межах нормативної. Результати проведених досліджень сприятимуть створенню контейнерів нового покоління з покращеними експлуатаційними показниками та підвищенню ефективності експлуатації контейнерних перевезень.

Ключові слова: контейнер, моделювання, динамічна навантаженість, прискорення, контейнерні перевезення.

Вступ. Утримання лідерських позицій залізничного транспорту на ринку транспортних послуг зумовлює введення в експлуатацію комбінованих перевезень. Однією з найбільш пріоритетних складових є контейнерні перевезення, що обумовлено мобільністю контейнера як транспортного засобу.

Для підвищення ефективності контейнерних перевезень на сучасному етапі розвитку транспортної галузі необхідним є створення контейнерів нового покоління з покращеними техніко-економічними та експлуатаційними показниками. Конструкція таких контейнерів повинна передбачати можливість забезпечення показників міцності при найбільш навантажених експлуатаційних режимах.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Визначення показників міцності підлоги 40-футового контейнера в середовищі програмного забезпечення Abaqus/CAE v. 6.1 наведені у [1]. За результатами проведених досліджень розроблені рекомендації щодо безпечної експлуатації даного типу контейнера.

Дослідження напружено-деформованого стану кузова-контейнера при підйманні краном та переміщенні волоком проводиться у [2]. Теоретичне визначення показників міцності здійснено у пакеті програмного забезпечення APM WinMachine. Експериментальне дослідження міцності проводилося за допомогою метода електричного тензометрування.

Особливості удосконалення несучої конструкції контейнера-цистерни для

DOI: 10.32703/2617-9040-2019-33-2-3

перевезення світлих нафтопродуктів проводиться у [3]. Для зменшення матеріалоемності контейнера-цистерни запропоновано виготовлення несучих елементів рами з труб круглого перерізу.

Заходи щодо удосконалення несучої конструкції контейнера для зменшення його динамічної навантаженості при експлуатаційних режимах в зазначених роботах не наводяться.

Моделювання навантаженості контейнера-цистерни при перевезенні у складі комбінованого поїзда на залізничному поромі проводиться у [4]. При цьому вагон-платформа та контейнера-цистерни, розміщені на ньому розглянуті як прикріплені маси відносно палуби, які повторюють траєкторію переміщень залізничного порому при його коливаннях.

Особливості створення контейнера для перевезення плодоовочевої продукції висвітлені у [5]. В статті наведені вимоги до кузова-контейнера, запропонована його конструкція та проведений розрахунок на міцність за методом скінчених елементів.

Задача удосконалення несучої конструкції контейнера для зменшення його динамічної навантаженості у даних роботах не ставиться.

Визначення факторів, які впливають на утворення дуального фрикційного зносу гальмових колодок рухомого складу проводиться у [6]. Викладено новий науковий підхід і метод дослідження дуального фрикційного клиноподібного зносу, обумовленого наявністю крайкової верхньої стертості колодки.

Дослідження основних проблем динаміки залізничних вагонів, які пов'язані з безпекою руху, проводиться у [7]. Розглянуті основні критерії, які використовуються при оцінці безпеки руху рухомого складу у відповідності до стандартів різних країн.

Питання безпечної експлуатації контейнерів відносно магістральних колій в розглянутих роботах не висвітлюються.

Шляхи покращення техніко-економічних показників та динамічних властивостей вантажних вагонів розглянуті у [8]. Запропоновано новий аспект проектування вантажних вагонів, який заснований на ідеалістичній стратегії розвитку технічних систем.

Питання удосконалення несучих конструкцій контейнерів у роботі не досліджені.

Мета і завдання дослідження. Виявлення особливостей комп'ютерного моделювання навантаженості контейнера з пружно-в'язкими зв'язками у фітінгах при експлуатаційних режимах. Для досягнення зазначеної мети визначені такі задачі:

1. Створити комп'ютерну модель вагона-платформи з контейнерами, розміщеними на ньому;
2. Провести комп'ютерне моделювання динамічної навантаженості контейнера з урахуванням заходів щодо удосконалення;
3. Верифікувати розроблені моделі динамічної навантаженості контейнера.

Матеріали та методи дослідження. Одним з найбільш навантажених експлуатаційних режимів контейнерів, розміщених на вагоні-платформі є маневрове співударяння з урахуванням переміщення фітінгів відносно фітінгових упорів.

Для зменшення ударних навантажень між фітінгами контейнера та фітінговими упорами вагона-платформи при маневровому співударянні, в випадку коли ударне

навантаження перевищує силу тертя між горизонтальними площинами фітингів та фітингових упорів, пропонується постановка у фітинги контейнера пружних або в'язких елементів.

Визначення динамічної навантаженості контейнера при маневровому співударянні з урахуванням заходів щодо удосконалення на першопочатковому етапі проведено шляхом математичного моделювання.

Як вагон-прототип обрано вагон-платформу моделі 13-4012М. Дослідження проведені стосовно контейнера типорозміру 1СС.

Проведені розрахунки показали, що пружний зв'язок не компенсує у повній мірі величину динамічного навантаження, яке діє на контейнер.

При наявності у фітингах в'язкого зв'язку прискорення складо близько 20 м/с^2 ($\approx 2g$) та не перевищує нормативну величину [9]. При цьому в'язкий опір переміщенню контейнера повинен знаходитися в діапазоні $10 - 50 \text{ кН}\cdot\text{с/м}$.

Для зменшення динамічної навантаженості контейнера, розміщеного на вагоні-платформі при маневровому співударянні також розглянутий варіант виконання фітингів з пружно-в'язкими зв'язками.

Результати проведених розрахунків показали, що при значенні жорсткості пружного елемента 20 кН/м та коефіцієнта в'язкого опору $30 \text{ кН}\cdot\text{с/м}$ прискорення, які діють на контейнер, розміщений на вагоні-платформі при маневровому співударянні складають близько 20 м/с^2 ($\approx 2g$) та знаходяться в межах допустимих [9].

Для дослідження динамічної навантаженості контейнера з урахуванням заходів щодо удосконалення проведено комп'ютерне моделювання з використанням методу скінчених елементів, реалізованого в програмному пакеті CosmosWorks [10].

У якості скінчених елементів застосовані просторові ізопараметричні тетраедри, оптимальна кількість елементів яких визначена за графоаналітичним методом. Скінчено-елементна модель вагона-платформи з контейнерами наведена на рис. 1. Кількість вузлів сітки складо 285189 , елементів – 853256 . Максимальний розмір елемента дорівнює 100 мм , мінімальний – 20 мм . Мінімальна кількість елементів в колі складо 9 , співвідношення збільшення розмірів елементів у сітці – $1,7$. Максимальне співвідношення боків – $306,67$, відсоток елементів зі співвідношенням боків менше $3 - 29,6$, більше $10 - 21,2$.

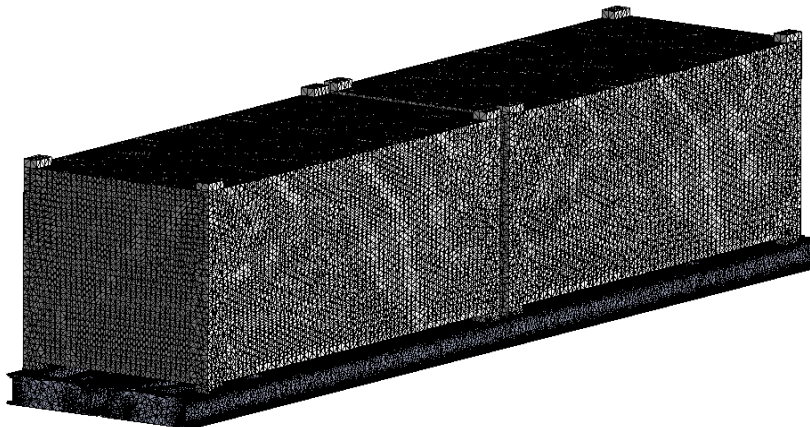


Рис. 1. Скінчено-елементна модель вагона-платформи з контейнерами

Модель для визначення динамічної навантаженості вагона-платформи з контейнерами при маневровому співударянні наведена на рис. 2. В моделі враховано, що на фітинги контейнера діє горизонтальне навантаження P_x , зумовлене дією на вертикальну поверхню заднього упору автозчепу ударного навантаження P_{y0} , а також вертикальні реакції у зонах обпирання фітингів на фітингові упори P_z . При складанні моделі не враховано дію вантажу, розміщеного у контейнері на його стіни. Закріплення контейнера здійснювалося у зонах його обпирання на вагон-платформу. Враховано, що при дії на фітинги горизонтального навантаження P_x здійснюється його переміщення відносно початкового положення на 30 мм.

При моделюванні динамічної навантаженості контейнера з урахуванням наявності у фітингах в'язкого зв'язку загальний в'язкий опір переміщенню одного контейнера прийнятий рівним 50 кН·с/м. Для моделювання в'язкого зв'язку в програмному комплексі CosmosWorks використано опцію "пружина-демпфер". При цьому значення жорсткості задавалося близьким до нуля (рис. 3).

Як матеріал конструкції використано сталь марки 09Г2С з відповідними значеннями межі міцності та плинності [11, 12]. Результати розрахунку наведені на рис. 4.

Максимальні прискорення, які діють на контейнера з урахуванням в'язкої взаємодії фітингів з фітинговими упорами виникають у торцевих стінах з консольних частин рами вагона-платформи та складають близько 20 м/с².

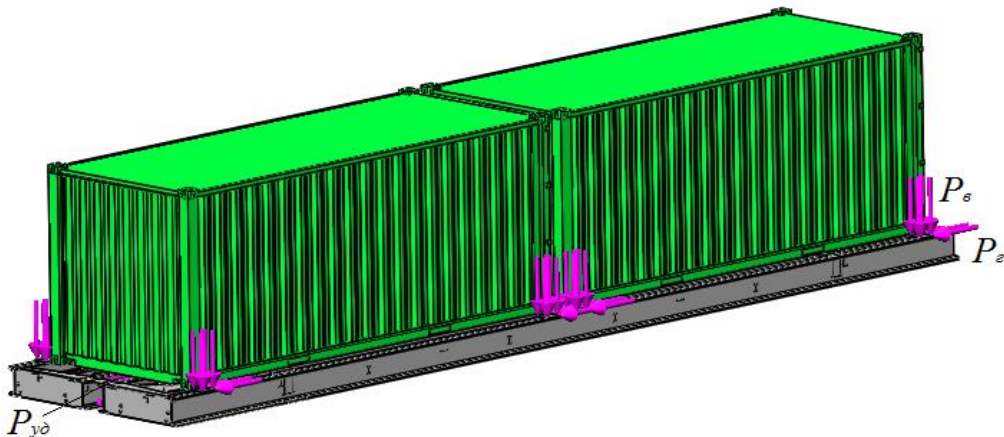


Рис. 2. Модель для визначення динамічної навантаженості вагона-платформи з контейнерами при маневровому співударянні

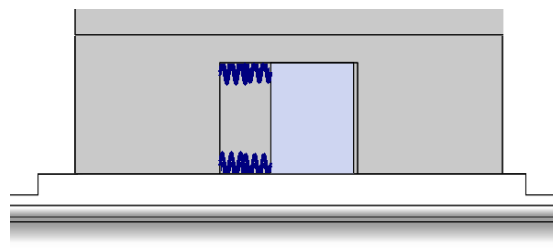


Рис. 3. Моделювання в'язкого (пружно-в'язкого) зв'язку між фітингом та фітинговим упором

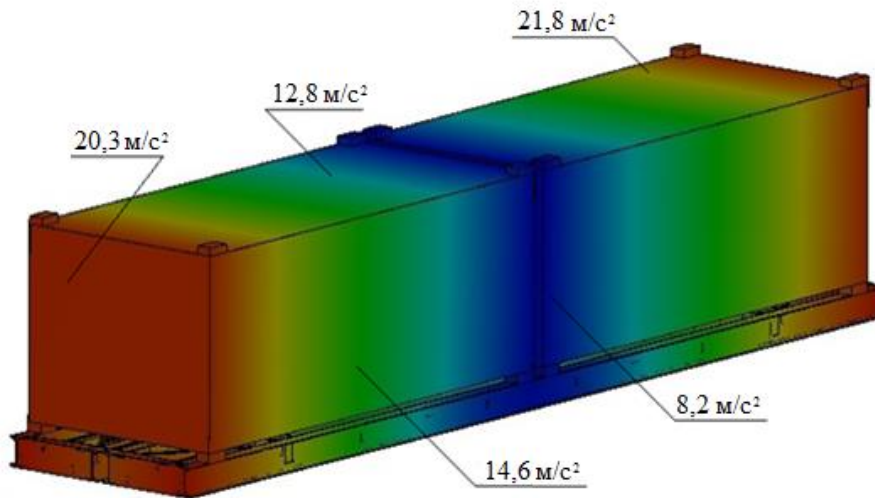


Рис. 4. Розподілення прискорень, які діють на вагон-платформу з контейнерами при маневровому співударянні

У середній частині контейнера прискорення склали майже 15 м/с^2 . Найменша величина прискорень виникає у торцевих стінах контейнера за центром рами вагона-платформи – близько 8 м/с^2 .

Максимальні прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи виникають у консольних частинах та складають близько 38 м/с^2 , за шкворневими перетинами рами – близько 30 м/с^2 . У середній частині хребтової балки прискорення складають $21,4 \text{ м/с}^2$. Найменша величина прискорень виникає у середніх частинах основних повздовжніх балок рами вагона-платформи – $7,2 \text{ м/с}^2$.

При моделюванні динамічної навантаженості контейнера з урахуванням наявності у фітингах пружно-в'язкого зв'язку жорсткість пружного елемента прийнята рівною 20 кН/м та коефіцієнта в'язкого опору $30 \text{ кН}\cdot\text{с/м}$.

Результати розрахунку дозволили зробити висновок, що максимальні прискорення, які діють на несучу конструкцію контейнера, розміщеного на вагоні-платформі склали, відповідно, $19,7 \text{ м/с}^2$ та $38,4 \text{ м/с}^2$.

Проведені дослідження дозволили зробити висновок, що максимальні прискорення, які діють на контейнер з урахуванням пружно-в'язкого зв'язку між фітингами та фітинговими упорами не перевищують допустимі [9].

З метою верифікації розроблених моделей застосований критерій Фішера [13-15]. Вхідним параметром математичної та комп'ютерної моделей є сила удару в автозчеп вагона-платформи, а вихідним – прискорення, які діють на контейнер, розміщений на вагоні-платформі (табл.1, 2).

$$F_p = \frac{S_{ao}^2}{S_y^2}, \quad (1)$$

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

Дисперсія адекватності знаходилася за формулою:

$$S_{ao}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_i^p)}{f_i}, \quad (2)$$

де y_i^p – розрахункове значення величини, отриманої шляхом моделювання; f_i – кількість ступенів вільності.

$$f_i = N - q, \quad (3)$$

де N – кількість дослідів в матриці планування; q – кількість коефіцієнтів рівняння.
Дисперсія відтворюваності визначалася за формулою:

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n S_i^2, \quad (4)$$

де S_i^2 – дисперсія в кожній строці, де проводилися паралельні експерименти.

Таблиця 1. Чисельні значення прискорень, які діють на контейнер з в'язкими зв'язками у фітінгах, розміщений на вагоні-платформі при маневровому співударянні

Сила удару, МН	Величина прискорення, м/с ²	
	Математична модель	Комп'ютерна модель
2,6	14,6	15,1
2,7	15,1	15,7
2,8	15,7	16,2
2,9	16,2	16,8
3,0	16,8	17,4
3,1	17,4	18,0
3,2	17,8	18,5
3,3	18,5	19,2
3,4	19,0	19,7
3,5	19,6	20,3

Таблиця 2. Чисельні значення прискорень, які діють на контейнер з пружно-в'язкими зв'язками у фітингах, розміщений на вагоні-платформі при маневровому співударянні

Сила удару, МН	Величина прискорення, м/с ²	
	Математична модель	Комп'ютерна модель
2,6	14,2	14,8
2,7	14,8	15,4
2,8	15,4	15,9
2,9	15,9	16,6
3,0	16,7	17,5
3,1	17,2	17,8
3,2	17,8	18,1
3,3	18,3	18,6
3,4	18,8	19,2
3,5	19,3	19,7

Встановлено, що для випадку в'язкої взаємодії фітингів з фітинговими упорами при дисперсії відтворюваності $S_y=2,83$ та дисперсії адекватності $S_{ao}^2=3,1$, фактичне значення критерію Фішера $F_p=1,09$, що менше табличного значення критерію $F_t=3,07$.

При пружно-в'язкій взаємодії фітингів з фітинговими упорами дисперсія відтворюваності склала $S_y=2,7$ та дисперсія адекватності $S_{ao}^2=3,0$. Фактичне значення критерію Фішера $F_p=1,11$, що менше табличного значення $F_t=3,07$.

Отже гіпотеза про адекватність в обох варіантах розрахунку не заперечується.

Висновки. На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Для зменшення динамічної навантаженості контейнерів, розміщених на вагоні-платформі при маневровому співударянні запропоновано постановку у фітинги в'язких (пружно-в'язких) елементів;

2. Проведено комп'ютерне моделювання динамічної навантаженості контейнера удосконаленої конструкції, розміщеного на вагоні-платформі при маневровому співударянні. Встановлено, що максимальні прискорення, які діють на контейнер складають близько 20 м/с². Тобто знаходяться в межах допустимих. Максимальні прискорення, які діють при цьому на вагон-платформу складають близько 40 м/с²;

3. Верифіковано розроблені моделі динамічної навантаженості контейнера, розміщеного на вагоні-платформі при маневровому співударянні за критерієм Фішера. Встановлено, що гіпотеза про адекватність не заперечується;

4. Проведені дослідження сприятимуть підвищенню ефективності експлуатації комбінованого транспорту через міжнародні транспортні коридори та посиленню зовнішньоекономічних зв'язків України.

ЛІТЕРАТУРА

1. Arkadiusz Rzeczycki. Strength analysis of shipping container floor with gooseneck tunnel under heavy cargo load. *Solid State Phenomena*. 2016. Vol. 252. P. 81 – 90.
2. Еремін В., Семенникова Л. Исследование напряженно-деформированного состояния кузов-контейнера с помощью программного комплекса АРМ WinMachine САПР и графика. 2004. №7. С. 23–28.
3. Ловська А. О., Мельничук О. М., Фомін О. В. Удосконалення контейнерів-цистерн для перевезення нафтопродуктів шляхом впровадження в їх несучі конструкції круглих труб. *Залізничний транспорт України*. 2015. №1. С. 40 – 44.
4. Ловська А. О. Моделювання навантаженості контейнера-цистерни при перевезенні у складі комбінованого поїзда на залізничному поромі. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Динаміка і міцність машин. 2018. Вип. 33. С. 28 – 32.
5. Ибрагимов Н. Н., Рахимов Р. В., Хаджимухамедова М. А. Разработка конструкции контейнера для перевозки плодоовощной продукции. *Молодой ученый*. 2015. №21(101). С. 168 – 173.
6. Равлюк В. Г. Оцінювання факторів утворення дуального фрикційного зносу гальмових колодок. *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. Серія: Транспортні системи і технології. 2018. № 31. С. 109 – 126.
7. Ewa Kardas-Cinal. Selected problems in railway vehicle dynamics related to running safety. *The archives of transport*. 2014. Vol. 31, Issue 3. P. 37 – 45.
8. Фомін О. В., Гостра А. В. Варіаційне описання конструктивних виконань вантажних вагонів *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту Міністерства освіти і науки України: Серія «Транспортні системи і технології»*. 2015. Вип. 26-27. С. 137 – 147.
9. ДСТУ ISO 1496-1:2013. Вантажні контейнери серії 1. Технічні вимоги та методи випробовування. Частина 1. Контейнери загальної призначеності універсальні [Чинний від 2013-11-29]. Київ, 2014. 34 с.
10. Алямовский А. А. SolidWorks/COSMOSWorks 2006 – 2007. Инженерный анализ методом конечных элементов: справочник. Москва: ДМК, 2007. 784 с.
11. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних) [Чинний від 01.07.2015]. Київ, 2015. 162 с.
12. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. – [Действителен от 22.12.2014]. Москва, 2016. 54 с.
13. Ивченко Г. И., Медведев Ю. И. Математическая статистика: учебник. Москва: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2014. 352 с.
14. Фомін О.В. Розробка методики впровадження різних профілів в якості складових елементів несучих систем вантажних вагонів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2012. С. 29 – 33
15. Чернова Н. И. Математическая статистика: учебник. Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск. 2007. 148 с.

REFERENCES

1. Arkadiusz, Rzeczycki. (2016). Strength analysis of shipping container floor with gooseneck tunnel under heavy cargo load. *Solid State Phenomena*, 252. 81 – 90. (in English).
2. Eremin V. (2004). Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kuzov-konteynera s pomoschyu programmnogo kompleksa ARM WinMachine. *SAPR i grafika*. 7. 23 – 28. (in Russian).
3. Lovska, A. O., Melnichuk, O. M., Fomin, O. V. (2015). Udoskonalennya konteyneriv-tsistern dlya perevezennya naftoproduktiv shlyahom vprovadzhennya v yih nesuchi konstruktsiyi kruglih trub. *Zaliznichnyi transport Ukrayini*. 1. 40 – 44. (in Ukrainian).
4. Lovska, A. O. (2018). Modelyuvannya navantazhenosti konteynera-tsisterni pri perevezenni u skladі kombinovanogo poyizda na zaliznichnomu poromi. *Visnik Natsionalnogo tehnicnogo universitetu «HPI»*. Seriya: Dinamika i mitsnist mashin. 33. 28 – 32. (in Ukrainian).
5. Ibragimov, N. N. (2015). Razrabotka konstruktсии konteynera dlya perevozki plodoovoschnoy produktsii. *Molodoy ucheniy*. 21(101). 168 – 173. (in Russian).
6. Ravlyuk, V. G. (2018). Otsinyuvannya faktoriv utvorennya dualnogo friktsiynogo znosu galmovih kolodok. *Zbirnik naukovih prats Derzhavnogo univerersitetu infrastrukturi ta tehnologiy*. Seriya: Transportni sistemi i tehnologiyi. 31. 109–126. (in Ukrainian).
7. Ewa, Kardas-Cinal. (2014). Selected problems in railway vehicle dynamics related to running safety. *The archives of transport*. 31, Issue 3. 37 – 45. (in English).

8. Fomin O.V. (2015). Variacijne opisannja konstruktivnih vikonan' vantazhnih vagoniv [Variations describe the structural designs of freight cars] / O.V. Fomin, A.V. Gostra // *Proceedings of the State Economic and Technological University of Transport, Ministry of Education and Science of Ukraine series "Transport systems and technologies"* - Kyiv: DETUT. - Vyp.26-27. - S.137-147 (in Ukrainian).

9. Vantazhni konteyneri seriyi 1. Tehnichni vimogi ta metodi viprobuvannya. Chastina 1. Konteyneri zagalnoyi priznachenosti universalni, 34 DSTU ISO 1496-1:2013. (2014). (in Ukrainian).

10. Alyamovskiy, A. A. (2007). SolidWorks/COSMOSWorks 2006 – 2007. Inzhenernyiy analiz metodom konechnyih elementov. M.: DMK, 784 s., il. (Seriya "Proektirovanie"). (in Russian).

11. Vagony vantazhni. Zagalni vimogi do rozrahunkiv ta proektuvannya novih i modernizovanih vagoniv koliyi 1520 mm (nesamohidnih). 162. DSTU 7598:2014 (2015). (in Ukrainian).

12. Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam, 54 GOST 33211-2014 (2016). (in Russian).

13. Ivchenko, G. I. (2014). Matematicheskaya statistika: Uchebnik. M.: Knizhnyiy dom "LIBROKOM". 352 s. (in Russian).

14. Fomin O.V. (2012). Rozrobka metodiki vprovadnennja riznih profiliv v jacosti scladovih elementiv nesuchih system vantazhni vagoniv [Development of a method for the introduction of various profiles as components of carrier systems of freight cars] / O.V. Fomin // *Visnik Nacionalnogo tehnicnogo universitetu «HPI»*. – Kharkiv. – P.29-33. (in Ukrainian).

15. Chernova, N. I. (2007). Matematicheskaya statistika. Novosibirsk: Novosib. gos. un-t. Novosibirsk. 148 s. (in Russian).

Алена Ловская, к.т.н., доцент
(доцент кафедры вагонов, Украинский государственный университет железнодорожного транспорта)

ОСОБЕННОСТИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НАГРУЖЕННОСТИ КОНТЕЙНЕРА С УПРУГО-ВЯЗКИМИ СВЯЗЯМИ В ФИТИНГАХ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМАХ

В статье приведены результаты компьютерного моделирования динамической нагруженности контейнера усовершенствованной конструкции, размещенного на вагоне-платформе при маневровом соударении. Особенностью конструкции контейнера является наличие в фитингах вязких и упруго-вязких связей, что позволяет обеспечить динамическую нагруженность в пределах нормативной. Результаты проведенных исследований будут способствовать созданию контейнеров нового поколения с улучшенными эксплуатационными показателями и повышению эффективности эксплуатации контейнерных перевозок.

Ключевые слова: контейнер, моделирование, динамическая нагруженность, ускорения, контейнерные перевозки.

Alyona Lovska, PhD (Technical Sciences), Associate Professor
(Associate Professor of Wagons Chair, The Ukrainian State University of Railway Transport)

FEATURES OF THE COMPUTER MODELING OF LOADING OF CONTAINER WITH ELASTIC-RELATED CONNECTIONS IN THE FITTINGS IN OPERATING MODES

The article presents the results of computer simulation of the dynamic loading of the container of the improved design, located on the platform carriage, with maneuvering coaxing. The design feature of the container is the presence in the fittings of viscous and

elastic-viscous bonds, which allows ensuring the dynamic loading of the container within the limits of the normative.

The mathematical modeling of the dynamic loading of the container is carried out taking into account the elastic, viscous and elastic-viscous bonds between the fittings and the fittings of the platform carriage. It has been established that the elastic bond does not compensate for the dynamic loads that act on the container placed on the platform carriage while maneuvering the bending. When viscous and elastic-viscous interaction of fittings with fittings, the value of dynamic loads is within the permissible limits.

The results of computer modeling of the dynamic loading of the container are presented. The calculation is based on the finite element method implemented in the CosmosWorks software environment. The magnitudes and fields of concentration of accelerations acting on the container are determined. Verification of the developed models is carried out according to the F-criterion.

The results of the research will promote the creation of new generation containers with improved performance and increase the efficiency of container transport operations.

Keywords: *container, modeling, dynamic loading, acceleration, container transportation.*