

УДК [629.463.62:656.073.235]-047.58

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ ВАГОНА- ПЛАТФОРМИ ЗЧЛЕНОВАНОГО ТИПУ ПРИ ПЕРЕВЕЗЕННІ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ПОРОМІ

Ловська А. О.

MODELING THE DYNAMIC LOADING OF AN ARTICULATED WAGON-PLATFORM AT TRANSPORTATION ON A RAILWAY FERRY

Lovska A. O.

Наведені результати математичного та комп'ютерного моделювання динамічної навантаженості вагона-платформи зчленованого типу при перевезенні на залізничному поромі морем. Визначено величини прискорень, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи при коливаннях залізничного порому. Проведені дослідження сприятимуть створенню вагонів-платформ зчленованого типу нового покоління з покращеними техніко-економічними показниками та адаптованими до перевезення на залізничних поромках.

Ключові слова: вагон-платформа, моделювання, навантаженість конструкції, прискорення, комбіновані перевезення.

Вступ. Географічне розміщення України на стику міжнародних транспортних коридорів зумовлює її участь у перевезеннях між країнами Європи та Азії. Для підвищення ефективності перевізного процесу набули поширення комбіновані транспортні системи, найбільш перспективними серед яких є залізнично-поромні та контейнерні.

На сьогоднішній день одним з найбільш затребуваних видів рухомого складу при комбінованих перевезеннях є вагони-платформи, а також вагони-платформи зчленованого типу або секційні. Конструкційною особливістю таких вагонів є те, що вони складаються з двох окремих секцій, які спираються на три візки. Україна також має досвід виготовлення та успішної експлуатації таких вагонів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження міцності вагона-платформи нового покоління з поворотною рамою для перевезення контейнерів та завантаження-розвантаження їх за системою ACTS наведені в [1]. Розрахунок на міцність несучої конструкції вагона-платформи при навантаженні її контейнерами проведений за методом скінчених елементів в середовищі програмного забезпечення Nastran.

Визначення показників міцності вагона-

платформи для перевезення контейнерів та завантаження-розвантаження їх за системою ACTS проводиться в [2]. 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 осями буферів;
- стискуючих зусиль у 0,4 МН, прикладених за діагоналлю на рівні буферів;
- зусилля розтягування у 1 МН за осями буферів;
- вертикального інерційного навантаження, що діє на несучу конструкцію вагона-платформи з урахуванням прискорення 1,95 g.

Особливості дослідження динамічних якостей зчленованого вагона-платформи на математичних моделях розглядаються у [3]. В статті наведені оцінка власних форм коливань та стійкості незбуреного руху, дослідження динамічних якостей на нелінійній моделі зчленованого вагона-платформи.

Перспективи удосконалення несучих конструкцій кузовів вагонів на сучасному етапі розвитку розглянуті у [4, 5]. При цьому розрахунок на міцність несучих конструкцій кузовів вагонів проводився при нормативних експлуатаційних режимах навантаження.

Конструкційні особливості вагона-платформи для інтермодальних перевезень розглянуті у [6]. Описані загальні вимоги по організації технології інтермодальних перевезень, а також визначені їх переваги.

Важливо зазначити, що у розглянутих роботах питанню динамічної навантаженості несучих

конструкцій кузовів вагонів при перевезенні на залізничних поромках уваги не приділялося.

Мета статті. Метою роботи є висвітлення особливостей моделювання динамічної навантаженості вагона-платформи зчленованого типу при перевезенні на залізничному поромі.

Для досягнення поставленої мети були визначені наступні задачі:

- математичне моделювання динамічної навантаженості вагона-платформи зчленованого типу при перевезенні на залізничному поромі;
- комп’ютерне моделювання динамічної навантаженості вагона-платформи зчленованого типу при перевезенні на залізничному поромі;
- перевірка адекватності розроблених моделей.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для визначення прискорень, як складових динамічного навантаження несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу, завантаженого контейнерами при перевезенні на залізничному поромі, складено математичну модель, яка враховує кутові переміщення елементів системи (“залізничний пором – вагон-платформа – контейнер”) навколо повздожньої осі (крен), як випадку найбільшої навантаженості несучої конструкції вагона, а також забезпечення його стійкості відносно палуби (рис. 1) [7, 8].

При визначенні моменту сил, що виникає між вагоном-платформою та палубою взята до уваги горизонтальна складова ваги бруто з урахуванням сили тертя між складовими вагона (буксовий вузол відносно осі колісної пари, рама візка відносно буксового вузла, переміщення п’ятника по підп’ятнику тощо [9]). При визначенні моменту сил між вагоном-платформою та контейнером до уваги прийнята горизонтальна складова ваги бруто контейнера, сили тертя між фітинговим упором та фітингом, а також геометрія фітингового упору.

Для розв’язання диференціальних рівнянь (1-3) складено програму розрахунку в середовищі пакету Mathcad [10, 11], для чого воно зводилося до нормальної форми Коші, після чого інтегрувалися за методом Рунге – Кутти.

Загальна величина прискорення, яке діє на крайній від фальшборта вагон-платформу, складала близько 0,4g.

$$\left(\frac{D}{12 \cdot g} (B^2 + 4z_g^2) \right) \ddot{q}_1 + \left(\Lambda_\theta \cdot \frac{B}{2} \right) \dot{q}_1 = p'_{зп} \cdot \frac{h}{2} + \Lambda_\theta \cdot \frac{B}{2} \cdot \dot{F}(t), \quad (1)$$

$$I_{впф}^\theta \cdot \ddot{q}_2 = p'_{впф} \cdot \frac{h_{впф}}{2} + M_{впф}^\Pi + M_{впф}^K, \quad (2)$$

$$I_K^\theta \cdot \ddot{q}_3 = p'_K \cdot \frac{h_K}{2} + M_K^{впф}, \quad (3)$$

де $q_1 \approx \theta_n$ – узагальнена координата, що відповідає кутовому переміщенню навколо повздожньої осі залізничного порому; $q_2 \approx \theta_e$ – узагальнена координата, що відповідає кутовому переміщенню навколо повздожньої осі вагона-платформи; $q_3 \approx \theta_x$ – узагальнена координата, що відповідає кутовому переміщенню навколо повздожньої осі контейнера. Початок системи координат розміщений в центрі мас залізничного порому.

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; $F(t)$ і– закон дії зусилля, яке збудує рух залізничного порому з вагонами, розміщеними на його палубах.

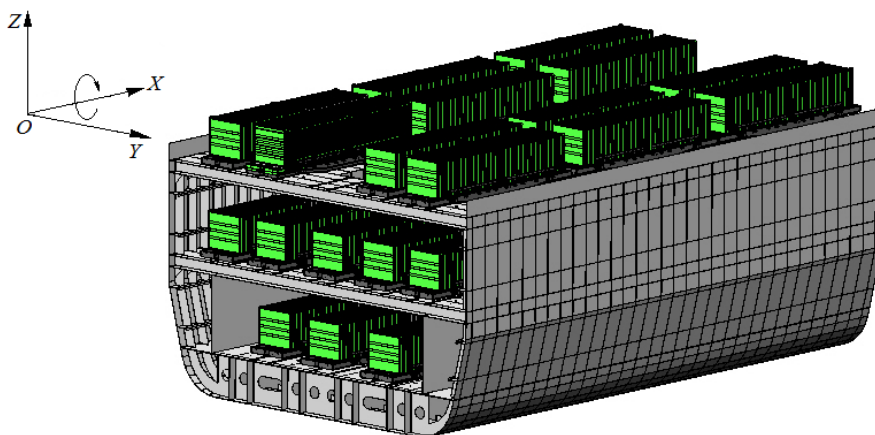


Рис. 1. Розміщення вагонів-платформ, завантажених контейнерами відносно палуб залізничного порому

для вагона-платформи з контейнерами:

$I_{впф}^0$ – момент інерції вагона-платформи; $h_{впф}$ – висота бокової поверхні вагона-платформи; $p'_{впф}$ – вітрове навантаження на бокову поверхню вагона-платформи; $M_{впф}^I$ – 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^0 – 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.

Також дослідження динамічних навантажень, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи зчленованого типу при перевезенні на залізничному поромі проводилося шляхом комп'ютерного моделювання за методом скінчених елементів, реалізованого в середовищі програмного забезпечення CosmosWorks [12].

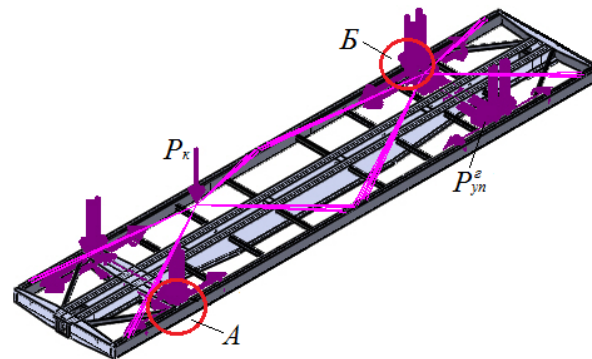
Розрахунок проведений стосовно вагона-платформи зчленованого типу, конструкційні особливості якого розглянуті у [13].

Закріплення моделі здійснювалося у зонах обпирання несучої конструкції на візки та робочі поверхні механічних упор-домкратів. Для цього на рамі вагона-платформи встановлювалися накладки круглої форми, діаметр яких дорівнює діаметру робочої поверхні упор-домкрата.

В якості матеріалу несучої конструкції вагона-платформи застосовано сталь марки 09Г2С зі значенням межі плинності 345 МПа та межі міцності 490 МПа [14, 15].

Враховано, що на несучій конструкції вагона-платформи розміщується чотири контейнери типорозміру 1СС, тобто по два на кожній секції.

При складанні моделі міцності несучої конструкції вагона-платформи до уваги прийняте вертикальне навантаження у зонах обпирання контейнерів на фітингові упори P_k , що розглянуто у вигляді дистанційного, рівнодіюча якого знаходиться у центрі ваги контейнера; горизонтальне, яке діє на фітингові упори вагона-платформи від фітингів контейнерів при їх кутових переміщеннях відносно повздовжньої осі P_{yn}^z ; зусилля від ланцюгових стяжок на вузли для закріплення відносно палуби $P_{лс}^i$. Оскільки ланцюгова стяжка має просторове розміщення, то зусилля, що діє на вузол закріплення від неї розкладалося на три складові (рис. 2).



А (збільшено)

Б (збільшено)

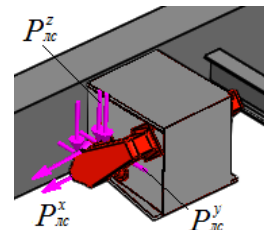
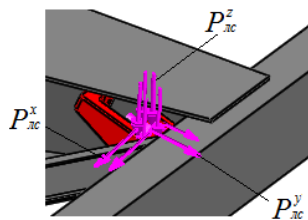


Рис. 2. Модель міцності несучої конструкції секції вагона-платформи зчленованого типу з вузлами для закріплення відносно палуби залізничного порому

Для визначення оптимальної кількості елементів сітки застосований графоаналітичний метод. Кількість вузлів сітки склала 148723, елементів – 462131. Максимальний розмір елементу дорівнює 200 мм, мінімальний – 40 мм. Максимальне співвідношення боків – 6182,6, відсоток елементів зі співвідношенням боків менше 3 – 13,4, більше 10 – 33,7. Мінімальна кількість елементів в колі склала 9, співвідношення збільшення розмірів елементів у сітці – 1,7.

Результати комп'ютерного моделювання наведені на рис. 3, а, б.

При цьому встановлено, що максимальне значення прискорення, яке діє на секцію вагона-платформи зчленованого типу виникає у середній

частині основних повздовжніх балок рами та складає 3,42 м/с² (0,35g).

Для перевірки адекватності розроблених моделей використаний F-критерій [16]:

$$F_p = \frac{S_{ao}^2}{S_y^2}, \tag{4}$$

Дисперсія адекватності знаходилася за формулою:

$$S_{ao}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_i^p)^2}{f_i}, \tag{5}$$

де y_i^p – розрахункове значення величини, отриманої шляхом моделювання;

f_i – кількість ступенів вільності.

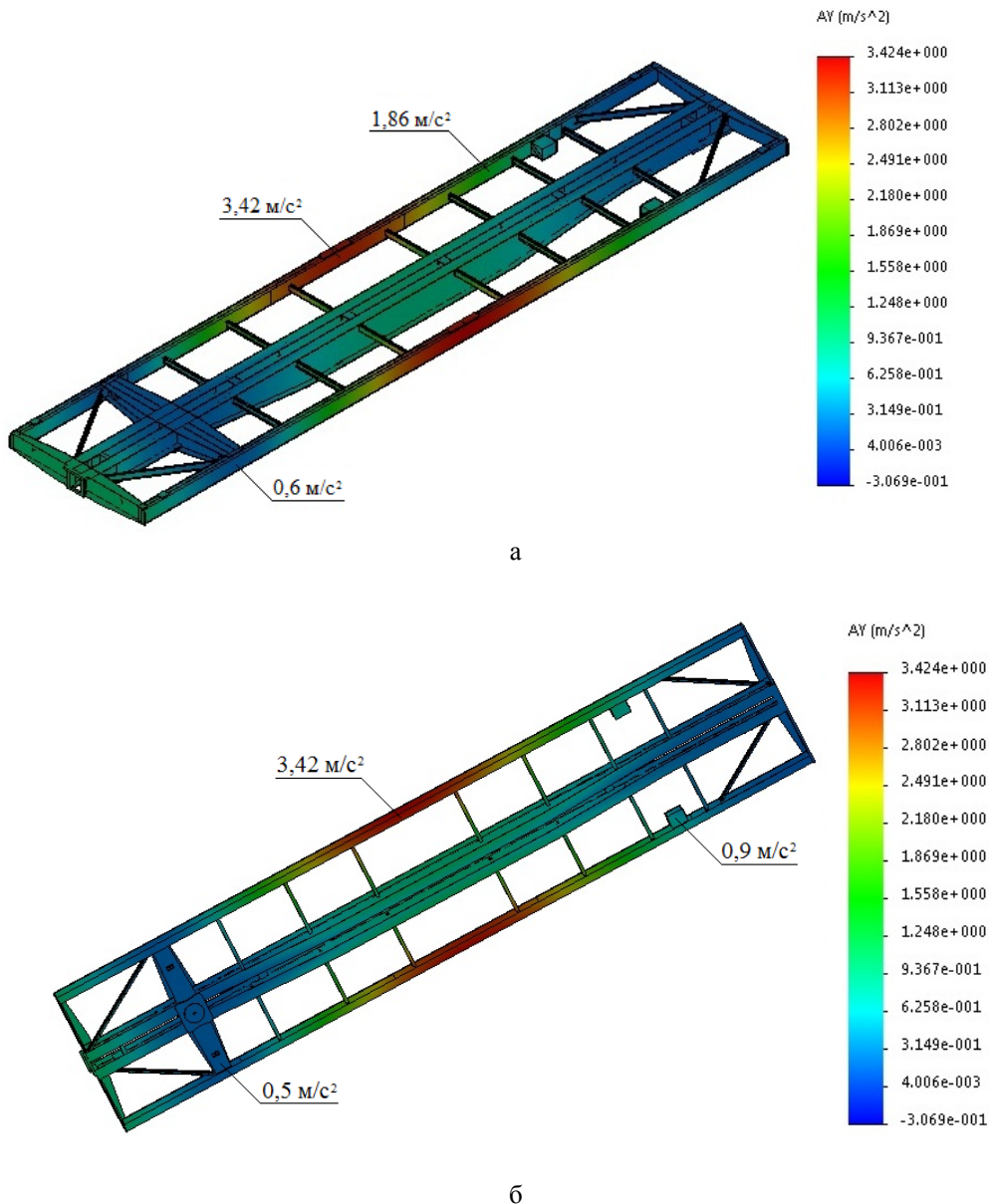


Рис. 3. Прискорення, які діють на несучу конструкцію секції вагона-платформи зчленованого типу при перевезенні на залізничному поромі: а – вид збоку; б – вид знизу

$$f_i = N - q, \quad (6)$$

де N – кількість дослідів в матриці планування;
 q – кількість коефіцієнтів рівняння.

Дисперсія відтворюваності визначалася за формулою:

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n S_i^2, \quad (7)$$

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

Встановлено, що модель, яка розглядається, є лінійною та характеризує зміну прискорень несучої конструкції вагона-платформи від кута крену залізничного порому. При цьому кількість ступенів вільності при $N = 5$ буде складати $f_1 = 3$.

При визначенні адекватності моделі з урахуванням наявності зазорів між фітінговими упорами та фітінгами встановлено, що при дисперсії відтворюваності $S_y^2 = 0,12$ та дисперсії адекватності $S_{ав}^2 = 0,51$, фактичне значення F-критерію $F_p = 4,24$, що менше табличного значення критерію $F_t = 5,41$. Отже гіпотеза про адекватність розробленої моделі не заперечується. Похибка апроксимації при цьому склала 5,37%.

6. Висновки

1. Проведені дослідження динамічної навантаженості вагона-платформи зчленованого типу з контейнерами при перевезенні на залізничному поромі шляхом математичного моделювання. Загальна величина прискорення, яке діє на крайній від фальшборта вагон-платформу зчленованого типу, склала близько 0,4g;

2. Дослідження динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу при перевезенні на залізничному поромі проведено також шляхом комп'ютерного моделювання. Встановлено, що максимальні прискорення виникають у середній частині основних повздовжніх балок рами вагона-платформи та складають 3,42м/с² (0,35g);

3. Результати перевірки адекватності розробленої моделі дозволили зробити висновок, що гіпотеза про адекватність не заперечується;

4. При проектуванні вагонів-платформ нового покоління для перевезення з'ємних транспортних одиниць та контейнерів необхідно враховувати уточнені величини прискорень, які можуть діяти на них при експлуатації не тільки відносно рейкових колій, а і при перевезенні на залізничному поромі, що дозволить забезпечити міцність їх несучих конструкцій при експлуатації в напрямку міжнародних транспортних коридорів.

Література

- 1 Karol, Chlus. Dynamic analysis of railway platform chassis model [Text] / Karol Chlus, Wieslaw Krason // Journal of KONES Powertrain and Transport. – 2011. – Vol. 18, No. 2. – P. 93 – 100.
- 2 Karol, Chlus. Numerical standard tests of railway carriage platform [Text] / Karol Chlus, Wieslaw Krason // Journal of KONES Powertrain and Transport. – 2012. – Vol. 19, No. 3. – P. 59 – 64.
- 3 Рудакова, Е. А. Исследование динамических качеств сочлененного вагона-платформы на математических моделях / Е. А. Рудакова, А. М. Орлова // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 23. – С. 85 – 88.
- 4 Fomin, O. Improvement of upper bundling of side wall of gondola cars of 12-9745 model [Text] / O.V. Fomin // Metallurgical and Mining Industry. – 2015, №1. – P. 45 – 48.
- 5 Kelrykh, M. Perspective directions of planning carrying systems of gondolas [Text] / M. Kelrykh, O. Fomin // Metallurgical and Mining Industry. – 2014, №6. – P.64 – 67.
- 6 Mirosław, Nader. Kolejowy wagon transportowy jako nowatorskie, innowacyjne rozwiązanie konstrukcyjne do przewozu naczep siodłowych i zestawów drogowych dla transportu intermodalnego [Text] / Mirosław Nader, Marian Sala, Jarosław Korzeb, Arkadiusz Kostrzewski // Logistyka. – 2014. – №4. – P. 2272 – 2279.
- 7 Ловська, А. О. Дослідження динамічної навантаженості вагона-платформи з контейнерами при перевезенні на залізничному поромі / А. О. Ловська // Залізничний транспорт України – 2017. – № 2. – с. 16 – 20.
- 8 Ловська, А. О. Визначення навантаженості контейнерів у складі комбінованих поїздів при перевезенні залізничним поромом / А. О. Ловська // Зб. наук. праць. ДНУЗТа: ДПТ. – 2017. – Вип. 6 (72) – с. 49 – 60.
- 9 Конструирование и расчет вагонов / В. В. Лукин, Л. А. Шадур, В. И. Котуранов, А. А. Хохлов, П. С. Анисимов. – Москва : УМК МПС России, 2000. – 731 с.
- 10 Дьяконов, В. MATHCAD 8/2000: специальный справочник В. Дьяконов. – СПб: Питер. – 2000. – 592 с.
- 11 Кирьянов, Д. В. Mathcad 13 [Текст] / Д. В. Кирьянов. – СПб.: БХВ – Петербург. – 2006. – 608 с.
- 12 Алямовский, А. А. SolidWorks/COSMOSWorks 2006 – 2007. Инженерный анализ методом конечных элементов [Текст] / А. А. Алямовский. – М.: ДМК. – 2007. – 784 с., ил. (Серия “Проектирование”).
- 13 Ловська А. О. Визначення показників міцності несучих конструкцій кузовів вагонів-платформ зчленованого типу при перевезенні на залізничних пороммах [Текст] / А. О. Ловська // Зб. наук. праць. ДЕУТ: ДЕУТ. – 2017. – Вип. 31. – с. 82 – 92.
- 14 Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) [Текст] / М.: ГосНИИВ – ВНИИЖТ. – 1996. – 319 с.
- 15 Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. ГОСТ 33211-2014. – [Действителен от 22.12.2014] – М.: Стандартиформ, 2016. – 54 с.
- 16 Чернова Н. И. Математическая статистика [Текст] / Н. И. Чернова. – Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск. – 2007. – 148 с.

References

- 1 Karol, Chlus. Dynamic analysis of railway platform chassis model [Text] / Karol Chlus, Wieslaw Krason // Journal of KONES Powertrain and Transport. – 2011. – Vol. 18, No. 2. – P. 93 – 100.
- 2 Karol, Chlus. Numerical standard tests of railway carriage platform [Text] / Karol Chlus, Wieslaw Krason // Journal of KONES Powertrain and Transport. – 2012. – Vol. 19, No. 3. – P. 59 – 64.
- 3 Rudakova, E. A. Issledovanie dinamicheskikh kachestv sochlenennogo vagona-platformy na matematicheskikh modelyakh / E. A. Rudakova, A. M. Orlova // Visn. Dnipropetr. nats. un-tu zalizn. transp. im. akad. V. Lazaryana. – Dnipropetrovsk, 2008. – Vip. 23. – S. 85 – 88.
- 4 Fomin, O. Improvement of upper bundling of side wall of gondola cars of 12-9745 model [Text] / O.V. Fomin // Metallurgical and Mining Industry. – 2015, №1. – P. 45 – 48.
- 5 Kelrykh, M. Perspective directions of planning carrying systems of gondolas [Text] / M. Kelrykh, O. Fomin // Metallurgical and Mining Industry. – 2014, №6. – P.64 – 67.
- 6 Mirosław, Nader. Kolejowy wagon transportowy jako nowatorskie, innowacyjne rozwiązanie konstrukcyjne do przewozu naczeł siodłowych i zestawów drogowych dla transportu intermodalnego [Text] / Mirosław Nader, Marian Sala, Jarosław Korzeb, Arkadiusz Kostrzewski // Logistyka. – 2014. – №4. – P. 2272 – 2279.
- 7 Lovska, A. O. Doslidzhennya dinamichnoyi navantazhenosti vagona-platformi z konteynerami pri perevezenni na zaliznichnomu poromi / A. O. Lovska // Zaliznichniy transport Ukrayini – 2017. – № 2. – s. 16 – 20.
- 8 Lovska, A. O. Vznachennya navantazhenosti konteyneriv u skladi kombinovanih poyizdiv pri perevezenni zaliznichnim poromom / A. O. Lovska // Zb. nauk. prats. DNUZTA: DIIT. – 2017. – Vip. 6 (72) – s. 49 – 60.
- 9 Konstruirovaniye i raschet vagonov / V. V. Lukin, L. A. Shadur, V. I. Koturanov, A. A. Hohlov, P. S. Anisimov. – Moskva : UMK MPS Rossii, 2000. – 731 s.
- 10 Dyakonov, V. MATHCAD 8/2000: spetsialnyiy spravochnik V. Dyakonov. – SPb: Piter. – 2000. – 592 s.
- 11 Kiryanov, D. V. Mathcad 13 [Tekst] / D. V. Kiryanov. – SPb.: BHV – Peterburg. – 2006. – 608 s.
- 12 Alyamovskiy, A. A. SolidWorks/COSMOSWorks 2006 – 2007. Inzhenernyiy analiz metodom konechnykh elementov [Tekst] / A. A. Alyamovskiy. – M.: DMK. – 2007. – 784 s., il. (Seriya “Proektirovaniye”).
- 13 Lovska A. O. Vznachennya pokaznikov mitsnosti nesuchih konstruktsiy kuzoviv vagoniv-platform zchlenovanogo tipu pri perevezenni na zaliznichnih poromah [Tekst] / A. O. Lovska // Zb. nauk. prats. DETUT: DETUT. – 2017. – Vip. 31. – s. 82 – 92.
- 14 Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznyih dorog MPS kolei 1520 mm (nesamohodnyih) [Tekst] / M.: GosNIIV – VNIIZhT. – 1996. – 319 s.
- 15 Vagonyi gruzovyye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam. GOST 33211-2014. – [Deystvitelen ot 22.12.2014] – M.: Standartinform, 2016. – 54 s.
- 16 Chernova N. I. Matematicheskaya statistika [Tekst] / N. I. Chernova. – Novosibirsk: Novosib. gos. un-t. Novosibirsk. – 2007. – 148 s.

Ловская А. А. Моделирование динамической нагруженности вагона платформы сочлененного типа при перевозке на железнодорожном пароме

Приведены результаты математического и компьютерного моделирования динамической нагруженности вагона-платформы сочлененного типа при перевозке на железнодорожном пароме морем. Определены величины ускорений, действующие на несущую конструкцию вагона-платформы при колебаниях железнодорожного парома. Проведенные исследования будут способствовать созданию вагонов-платформ сочлененного типа нового поколения с улучшенными технико-экономическими показателями и адаптированными к перевозке на железнодорожных паромах.

Ключевые слова: вагон-платформа, моделирование, нагруженность конструкции, ускорения, комбинированные перевозки.

Lovska A. O. Modeling the dynamic loading of an articulated wagon-platform at transportation on a railway ferry

The results of mathematical and computer simulation of the dynamic loading of an articulated wagon-platform are shown at transportation on a railway ferry by sea. The values of the accelerations acting on the load-carrying structure of the wagon –platform are determined at the railway ferry oscillations. The conducted researches will contribute to the creation of new generation wagon-platforms with improved technical and economic indicators and adapted to transportation on railway ferries.

Keywords: wagon-platform, modeling, structural loading, acceleration, combined transport.

Ловська А. О. – к.т.н., доцент кафедри вагонів Українського державного університету залізничного транспорту, e-mail: alyonalovskaya.vagons@gmail.com.

Рецензент: д.т.н., проф. **Марченко Д.М.**

Стаття подана 02.03.2018.