

О.В. Фомін*

Державний університет інфраструктури та технологій
вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна
Телефон: +380 95 1429074, E-mail: fomin1985@ukr.net
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

Г.Л. Ватуля

Український державний університет залізничного транспорту
пл. Фейербаха, 7, м. Харків, 61050, Україна
Телефон: +380 50 3007770, E-mail: glebvatulya@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3823-7201>

А.О. Ловська

Український державний університет залізничного транспорту
пл. Фейербаха, 7, м. Харків, 61050, Україна
Телефон: +380 66 3381946, E-mail: alyonaLovskaya.vagons@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8604-1764>

ДОСЛІДЖЕННЯ НАВАНТАЖЕНОСТІ НЕСУЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ ВАГОНА-ПЛАТФОРМИ З НАПОВНЮВАЧЕМ В ЇЇ СКЛАДОВИХ

В статті висвітлюються результати досліджень навантаженості несучої конструкції вагона-платформи з наповнювачем в її складових. Дослідження проведені стосовно вагона-платформи моделі ІЗ-401. Для визначення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи проведено математичне моделювання. При цьому використано математичну модель, сформовану професором Г. І. Богомазом. Однак дану модель було доопрацьовано шляхом адаптації до визначення динамічної навантаженості вагона-платформи з пружно-в'язким наповнювачем в хребтовій та основних поєздовжніх балках. Враховано, що вагон-платформа завантажений контейнером-цистерною типорозміру ІСС. У якості наливного вантажу прийнято бензин. Розв'язання диференціальних рівнянь руху здійснено за методом Рунге-Кутти в програмному комплексі MathCad. Максимальні прискорення склали 35,2 м/с² та виникають в момент удару. Дана величина прискорення на 3,7% нижча за ту, що отримана для несучої конструкції без наповнювача. Величина прискорення, яке діє на контейнер-цистерну дорівнює близько 40 м/с², тобто не перевищує допустиме значення. Отримані прискорення враховано при розрахунках на міцність несучої конструкції вагона-платформи. При цьому застосовано метод скінчених елементів, який реалізовано в програмному комплексі SolidWorks Simulation.

© Фомін О.В., Ватуля Г.Л., Ловська А.О., 2022

Наявність наповнювача в несучій конструкції моделювалася постановкою зв'язків “пружина–демпфер” з відповідними характеристиками. Максимальні еквівалентні напруження при цьому зафіксовані в зонах взаємодії шворневих балок з хребтовою та складають близько 300 МПа, що нижче на 13% у порівнянні з тишовою конструкцією.

Проведені дослідження сприятимуть зменшенню пошкоджень вагонів-платформ та контейнерів при експлуатаційних режимах, а також створенню рекомендацій щодо проектування інноваційних конструкцій транспортних засобів.

Ключові слова: транспортна механіка, вагон-платформа, несуча конструкція, динамічна навантаженість, міцність.

А. В. Фомин*

Государственный университет инфраструктуры и технологий

ул. Кирилловская, 9, г. Киев, 04071, Украина

Телефон: +380 95 1429074, E-mail: fomin1985@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

Г. Л. Ватуля

Украинский государственный университет железнодорожного транспорта

пл. Фейербаха, 7, м. Харьков, 61050, Украина

Телефон: +380 50 3007770, E-mail: glebvatulya@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3823-7201>

А. А. Ловская

Украинский государственный университет железнодорожного транспорта

пл. Фейербаха, 7, м. Харьков, 61050, Украина

Телефон: +380 66 3381946, E-mail: alyonaLovskaya.vagons@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8604-1764>

ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ ВАГОНА-ПЛАТФОРМЫ С НАПОЛНИТЕЛЕМ В ЕЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ

В статье освещаются результаты исследований нагруженности несущей конструкции вагона-платформы с наполнителем в ее составляющих. Исследования проведены на вагоне-платформе модели 13-401. Для определения динамической нагруженности несущей конструкции вагона-платформы проведено математическое моделирование. При этом использована математическая модель, сформированная профессором Г. И. Богомазом. Однако эта модель была доработана путем адаптации к определению динамической нагруженности вагона-платформы с упруго-вязким наполнителем в хребтовой и основных продольных балках. Учтено, что вагон-платформа загружен контейнером-цистерной типоразмера ИСС. В качестве наливного груза принят бензин. Решение дифференциальных уравнений движения осуществлено методом Рунге-

Кутта в програмному комплексі MathCad. Максимальні прискорення склали $35,2 \text{ м/с}^2$ і виникають при ударі. Данна величина прискорення на 3,7% нижче отриманої для несучої конструкції без наповнювача. Величина прискорення, діючого на контейнер-цистерну, дорівнює приблизно 40 м/с^2 , тобто не перевищує допустиме значення. Отримані прискорення враховані при розрахунку міцності несучої конструкції вагона-платформи. При цьому застосовано метод кінцевих елементів, реалізований в програмному комплексі SolidWorks Simulation.

Наявність наповнювача в несучій конструкції моделювалося постановкою зв'язей "пружина-демпфер" з відповідними характеристиками. Максимальне еквівалентне напруження при цьому зафіксовано в зонах взаємодії шкворневих балок з хребтовою і становить приблизно 300 МПа, що нижче на 13% порівняно з типовою конструкцією.

Проведені дослідження будуть сприяти зменшенню пошкоджень вагонів-платформ і контейнерів при експлуатаційних режимах, а також створенню рекомендацій по проектуванню інноваційних конструкцій транспортних засобів.

Ключові слова: транспортна механіка, вагон-платформа, несуча конструкція, динамічна навантаженість, міцність.

Вступ та постановка проблеми. Перспективи техніко-економічного розвитку європейських держав зумовлюють необхідність підвищення ефективності використання залізничного транспорту. Найбільш поширеними типами вагонів, які дістали використання у міжнародному сполученні є вагони-платформи для перевезення контейнерів.

Важливо сказати, що несучі конструкції вагонів-платформ зазнають значних пошкоджень в експлуатації, зокрема при маневрових співудареннях, в випадках коли динамічне навантаження, яке діє на контейнера, розміщені на них, перевищує силу тертя між фітінговими упорами та фітінгами. Це обумовлює додаткову навантаженість як фітінгів контейнерів, так і фітінгових упорів вагонів-платформ. При цьому найбільш поширеними пошкодженнями фітінгових упорів є тріщини та деформації, а контейнерів – тріщини в фітінгах, деформації, перекоси стійок тощо.

Тому важливим є створення заходів щодо зменшення пошкоджень несучих конструкцій вагонів-платформ та контейнерів, що дозволить підвищити ефективність їх експлуатації, зменшити витрати на позапланові види ремонту, створити рекомендації щодо проектування сучасних транспортних засобів тощо.

Аналіз існуючих досліджень. Результати визначення стійкості, розтягнення та підйому несучої конструкції вагона-платформи при експлуатаційних навантаженнях приведені у роботі [1]. При цьому проводилися теоретичні та експериментальні дослідження, які здійснені з використанням сучасних методів розрахунків.

Розрахунок основних характеристик міцності довгобазної несучої конструкції вагона-платформи проводиться у роботі [2]. Визначено найбільш навантажені елементи рами вагона-платформи та вимоги щодо безпечної експлуатації.

Однак заходів щодо покращення показників міцності вагонів-платформ в зазначених роботах не запропоновано.

Дослідження вертикальної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи зі зміщеним центром ваги проводиться у роботі [3]. Визначено прискор-

рення, які діють на вагон. Запропоновані заходи щодо покращення безпеки руху вагона.

Визначення динамічних показників вагона-платформи під час руху рейковою колією розглянуто у роботі [4]. Запропоновані розрахункові схеми та диференціальні рівняння, які дозволяють дослідити просторові коливання вагона-платформи з двома кососиметрично розміщеними важковаговими вантажами.

Разом з цим, заходів щодо зменшення динамічної навантаженості несучих конструкцій вагонів-платформ в роботі не запропоновано.

Визначення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи, завантаженої двома контейнерами, при маневровому співударянні проводиться у роботі [5]. Дослідження проведені для випадку відсутності переміщень контейнерів відносно рами вагона-платформи, а також з урахуванням їх наявності. Однак заходам щодо зменшення динамічної навантаженості вагона-платформи та контейнерів в роботі уваги не приділено.

Особливості концепції модернізації вантажних вагонів, в тому числі, відкритого типу, наведені в роботі [6]. Запропоновані заходи щодо адаптації несучих конструкцій вагонів до експлуатаційних умов навантаження. Наведені результати розрахунку на міцність модернізованих несучих конструкцій вагонів.

Важливо відмітити, що під час проектування несучих конструкцій вагонів не передбачено заходів щодо зменшення їх динамічної навантаженості під час експлуатації.

В публікації [7] наведено результати визначення динамічної навантаженості та міцності несучої конструкції вагона-платформи з наповнювачем в хребтовій балці. Проведені розрахунки підтвердили доцільність запропонованих рішень.

Однак дослідження проведені за умови застосування наповнювача тільки в хребтовій балці, а також завантаження вагона-платформи суховантажними контейнерами. Викликає цікавість дослідження навантаженості несучої конструкції вагона-платформи з наповнювачем, який має енергопоглинальні властивості, в складових рами завантаженої контейнерами-цистернами при найбільш несприятливих режимах навантаження.

Мета. Метою статті є висвітлення результатів дослідження завантаженості несучої конструкції вагона-платформи з наповнювачем в її складових. Для досягнення зазначеної мети визначені такі завдання:

- провести моделювання динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи з наповнювачем в її складових;
- провести розрахунок на міцність несучої конструкції вагона-платформи з наповнювачем в її складових.

Матеріали та результати досліджень. Для зменшення навантаженості несучої конструкції вагона-платформи в експлуатації запропоновано її удосконалення шляхом створення хребтової та основних повздовжніх балок замкненої конструкції, заповнених наповнювачем з пружно-в'язкими властивостями (рис. 1).

Доцільність заповнення конструкції наповнювачем з пружно-в'язкими властивостями розглянуто в роботі [7], тому детально зупинятись на цьому питанні в даному дослідженні відсутня необхідність. Дослідження проведені стосовно вагона-платформи моделі 13-401 (рис. 2).

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

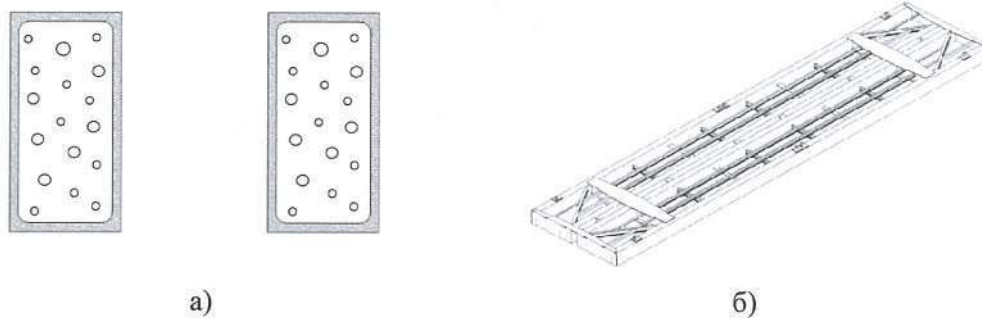


Рис. 1. Удосконалена конструкція рами вагона-платформи
(а – переріз хребтової балки; б – несуча конструкція)



Рис. 2. Вагон-платформа моделі 13-401

Визначення оптимальних параметрів профілів хребтової та основних повздовжніх балок здійснено методом лінійного програмування.

З метою обґрунтування запропонованих рішень проведено визначення динамічної навантаженості вагона-платформи у повздовжній площині. Для цього використано математичну модель, розроблену проф. Богомазом Г.І., яка описує динамічну навантаженість довгобазного вагона-платформи, завантаженого чотирма контейнерами-цистернами при дії повздовжньої сили на задній упор автозчепу [8, 9]. Однак дану модель було доопрацьовано шляхом адаптації до визначення динамічної навантаженості вагона-платформи з пружно-в'язким наповнювачем в хребтовій та основних повздовжніх балках. Розрахункова схема наведена на рисунку 3.

Враховано, що на задній упор автозчепу діє повздовжня сила у 3,5 МН [10, 11]. Вагон-платформа завантажений контейнером-цистерною типорозміру 1СС. У якості наливного вантажу прийнято бензин.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

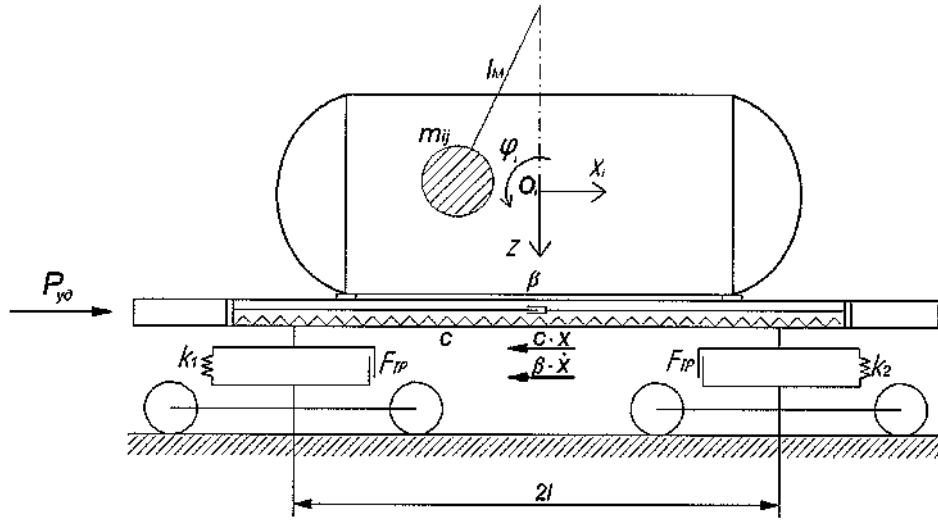


Рис. 3. Розрахункова схема вагона-платформи

Вертикальні переміщення контейнера-цистерни відносно рами не враховувалися. У випадку коли $x_i=30$ мм, тоді $x_i=x$.

$$M'_{пл} \cdot \ddot{x}_{пл} + M_{пл} \cdot h \cdot \ddot{\phi}_{пл} = S_a - S_i - \beta \cdot \dot{x} - c \cdot x, \quad (1)$$

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

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

$$\left(m_i + \sum_{j=1}^k m_{ij} \right) \cdot \ddot{x}_i + \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \right) \cdot \ddot{\phi}_i - \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij} = S_i, \quad (4)$$

$$\left(I_{\theta i} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij}^2 \right) \cdot \ddot{\phi}_i + \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \right) \cdot \ddot{x}_i + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij} - g \cdot \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \right) \cdot (\phi_{пл} - \phi_i) = 0, \quad (5)$$

$$\left(m_i + \sum_{j=1}^k m_{ij} \right) \cdot \ddot{z}_{пл} = 0, \quad (6)$$

$$I_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij} - m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{x}_{ij} - m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\phi}_i + g \cdot m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij} = 0, \quad (7)$$

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

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

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

де $M_{пл}$ – маса несучої конструкції вагона-платформи;
 $I_{пл}$ – момент інерції вагона-платформи відносно повздовжньої осі;
 S_a – величина повздовжньої сили удару в автозчеп;
 f_{mp} – амплітудне значення сили сухого тертя;
 m_T – маса візка;
 I – момент інерції колісної пари;
 r – радіус середнезношеного колеса;
 n – кількість осей візка;
 l – половина бази вагона-платформи;
 F_{Tp} – абсолютне значення сили сухого тертя у ресорному комплекті;
 k_1, k_2 – жорсткість пружин ресорного підвішування візків вагона-платформи;
 k – кількість тонів коливань наливного вантажу;
 m_i – маса тіла, яке еквівалентне контейнеру-цистерні з частиною наливного вантажу, що не приймає участі у переміщенні відносно котла;
 m_{ij} – маса маятника у контейнері-цистерні;
 z_{ci} – висота центру ваги контейнера-цистерни;
 c_{ij} – відстань від площини $z_i = 0$ до точки закріплення маятника у контейнері-цистерні;
 l_{ij} – довжина маятника;
 I_θ – приведений момент інерції контейнера-цистерни та наливного вантажу, що не приймає участі у русі відносно котла;
 I_{ij} – момент інерції маятника;
 $x_{пл}, \varphi_{пл}, z_{пл}$ – 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;
 ζ_{ij} – кут відхилення маятника від вертикалі.

Під час проведення розрахунків враховано, що несуча конструкція вагона-платформи спирається на візки моделі 18-100. Розв'язання диференціальних рівнянь руху (1)–(7) здійснено за методом Рунге-Кутта в програмному комплексі MathCad [12, 13]. Початкові переміщення та швидкості прийняті рівними нулю [14, 15]. Жорсткість матеріалу, яким заповнена хребтова та основні повздовжні балки склала 87 кН/м, а коефіцієнт в'язкого опору – 130 кН·с/м, що визначено шляхом математичного моделювання.

Максимальні прискорення склали 35,2 м/с² та виникають в момент удару (рис. 4). Дана величина прискорення на 3,7% нижча за ту, що отримана для несучої конструкції без наповнювача. Величина прискорення, яке діє на контейнер-цистерну дорівнює близько 40 м/с², тобто не перевищує допустиме значення [16].

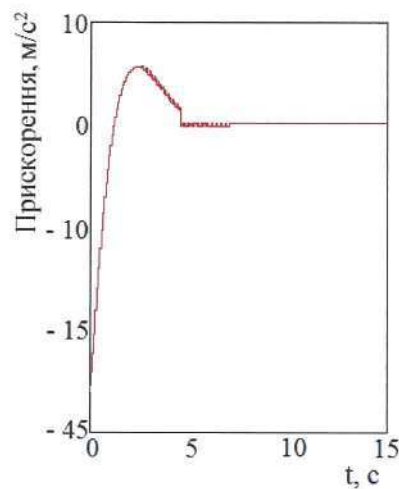


Рис. 4. Прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи

Отримані прискорення враховано при розрахунках на міцність несучої конструкції вагона-платформи. При цьому застосовано метод скінчених елементів, який реалізовано в програмному комплексі SolidWorks Simulation. Розрахункова схема несучої конструкції вагона-платформи наведена на рисунку 5. При її складанні враховано, що на несучу конструкцію вагона-платформи діє повздовжнє навантаження P_n у 3,5 МН, яке прикладене до заднього упору автотягача, вертикальне навантаження P_θ від ваги бруто контейнера, а також горизонтальні реакції P_z , що діють на фітингові упори.

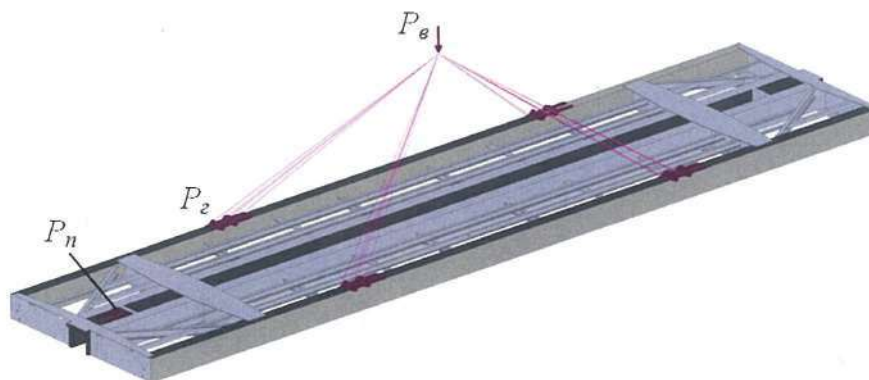


Рис. 5. Розрахункова схема несучої конструкції вагона-платформи

У якості скінчених елементів використані ізопараметричні тетраедри, оптимальна чисельність яких визначена за графоаналітичним методом [17, 18]. Кількість елементів сітки склала 374541, вузлів – 127832. Максимальний розмір елементу сітки дорівнює 100,0 мм, мінімальний – 20,0 мм, максимальне співвідношення боків елементів – 4731,9, відсоток елементів з співвідношенням боків менше трьох – 10,9,

більше десяти – 20,3. Мінімальна кількість елементів в колі – 9, співвідношення збільшення розміру елемента – 1,7. Матеріал конструкції – сталь марки 09Г2С. Закріплення моделі здійснювалося в зонах обпирання на ходові частини. Наявність наповнювача в несучій конструкції моделювалася постановкою зв'язків “пружина–демпфер” з відповідними характеристиками. Результати розрахунку наведені на рисунку 6.



Рис. 6. Напружений стан несучої конструкції вагона-платформи

Максимальні еквівалентні напруження при цьому зафіксовані в зонах взаємодії шворневих балок з хребтовою та складають близько 300 МПа і не перевищують допустимих [10, 11]. Отримана величина напружень нижча на 13% у порівнянні з тією, що виникає у типовій конструкції.

Висновки.

1. Проведено моделювання динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи з наповнювачем в її складових. Жорсткість матеріалу, яким заповнена хребтова та основні повздовжні балки склала 87 кН/м, а коефіцієнт в'язкого опору – 130 кН·с/м.

Максимальні прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи склали $35,2 \text{ м/с}^2$ та виникають в момент удару. Отримана величина прискорення на 3,7% нижча за ту, що розрахована для несучої конструкції без наповнювача. Величина прискорення, яке діє на контейнер-цистерну дорівнює близько 40 м/с^2 , тобто не перевищує допустиме значення.

2. Проведено розрахунок на міцність несучої конструкції вагона-платформи з наповнювачем в її складових. При цьому максимальні еквівалентні напруження зафіксовані в зонах взаємодії шворневих балок з хребтовою та складають близько 300 МПа, що нижче на 13% у порівнянні з типовою конструкцією.

Проведені дослідження сприятимуть зменшенню пошкоджень вагонів-платформ та контейнерів при експлуатаційних режимах, а також створенню рекомендацій щодо проектування інноваційних конструкцій транспортних засобів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Apurba Das, Gopal Agarwal. Compression, tension & lifting stability on a meter gauge flat Wagon: an experimental approach. *Australian Journal of Mechanical Engineering*. 2020. June. DOI: <https://doi.org/10.1080/14484846.2020.1775007>
2. Fedosov-Nikonov D.V., Sulym A.O., Ilchysyn V.V., Safronov O.M., Kelrikh M.B. Study of strength characteristics of the long wheelbase flat cars. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 985. 012029. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012029>
3. Shatunov O.V., Shvets A.O. Study of dynamic indicators of flat wagon with load centre shift. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2019. № 2 (80). С. 127 – 143. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/165160>
4. Анисимов П. С., Петров Г. И. Пространственные колебания вагона-платформы. *Мир транспорта*. 2014. №2. С. 20 – 26.
5. Fomin O., Lovska A., Radkevych V., Horban A., Skliarenko I., Gurenkova O. The dynamic loading analysis of containers placed on a flat wagon during shunting collisions. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019. Vol. 14. No. 21. P. 3747 – 3752.
6. Placzek M., Wróbel A., Buchacz A. A concept of technology for freight wagons modernization. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 161. 012107 DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/161/1/012107>
7. Фомін О. В., Ловська А. О., Рибін А. В. Дослідження повздовжньої навантаженості вагона-платформи з наповнювачем в несучій конструкції. *Наукові вісті Дніпровського університету*. 2021. №21. DOI: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21-17>
8. Богомаз Г. И., Мехов Д. Д., Пилипченко О. П., Черномашенцева Ю. Г. Нагруженность контейнеров-цистерн, расположенных на железнодорожной платформе, при ударах в автосцепку. *Зб. наук. праць "Динаміка та керування рухом механічних систем"*. Київ: АНУ, Інститут технічної механіки. 1992. С. 87 – 95.
9. Fomin O., Lovska A. Determination of dynamic loading of bearing structures of freight wagons with actual dimensions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. №2/7 (110). P. 6 – 15. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.220534>
10. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Київ, 2015. 162 с.
11. ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. Москва, 2016. 54 с.
12. Lovska A., Fomin O., Píštěk V., Kučera P. Dynamic load modelling within combined transport trains during transportation on a railway ferry. *Applied Sciences*. 2020. №10. 5710. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10165710>
13. Fomin O., Lovska A. Establishing patterns in determining the dynamics and strength of a covered freight car, which exhausted its resource. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6. Issue 7 (108). P. 21 – 29. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217162>
14. Fomin O., Gerlici J., Gorbunov M., Vatulja G., Lovska A., Kravchenko K. Research into the Strength of an Open Wagon with Double Sidewalls Filled with Aluminium Foam. *Materials*. 2021. Vol. 14 (12). 3420. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14123420>
15. Fomin O., Gorbunov M., Lovska A., Gerlici J., Kravchenko K. Dynamics and strength of circular tube open wagons with aluminum foam filled center sills. *Materials*. 2021. Vol. 14(8). 1915. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14081915>
16. ГОСТ 31232-2004. Контейнеры для перевозки опасных грузов. Требования по эксплуатационной безопасности. Минск, 2005. 6 с.
17. Vatulja G., Falendysh A., Orel Y., Pavliuchenkov M. Structural Improvements in a Tank Wagon with Modern Software Packages. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 187. P. 301–307. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.379>
18. Kitov Y., Verevicheva M., Vatulja G., Orel Y., Deryzemlia S. Design solutions for structures with optimal internal stress distribution. *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 133(1–3) 03001 DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713303001>

O.V. Fomin

State University of Infrastructure and Technologies
Kyrylivska str., 9, Kyiv, 04071, Ukraine
Tel.: +380 95 1429074, E-mail: fomin1985@ukr.net
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

G.L. Vatulia

Ukrainian State University of Railway Transport
Feuerbakh sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine
Tel.: +380 50 3007770, E-mail: glebvatulya@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3823-7201>

A.O. Lovska

Ukrainian State University of Railway Transport
Feuerbakh sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine
Tel.: +380 66 3381946, E-mail: alyonaLovskaya.vagons@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8604-1764>

EXAMINATION OF THE LOAD CAPACITY OF THE LOAD-BEARING STRUCTURE OF THE FLATCARS WITH THE LOADING DEVICE IN THEIR COMPONENTS

The paper covers the results of research on the load-bearing structure of a flatcar with filler in its components. Investigations were carried out on the platform wagon model 13-401. Mathematical modeling was carried out to determine dynamic load-bearing capacity of the flat car load-bearing structure. The mathematical model, formed by Professor G. I. Bogomaz, was used for this purpose. However, this model was further improved by means of adaptation to determination of dynamic loading of a flatcar with a rod-and-tie damper in the backbone and main overhead beams. It is taken into account that the flat wagon is loaded with a tank container of the size 1CC. Gasoline was taken as the liquid cargo. The differential flow rates were determined by the Runge-Kutta method in the MathCad software package. The maximum acceleration is 35.2 m/s^2 and occurs at the moment of impact. This value of acceleration is 3.7% lower than the one obtained for the load-bearing structure without the damper. The value of acceleration, which acts on the tank container is close to 40 m/s^2 , that is not exceeding the allowable value. The acceleration taken into account when calculating the strength of the load-bearing structure of the flat wagon. The method of joined elements was used, which is implemented in the SolidWorks Simulation software package. The presence of the load-carrier in the load-carrying structure was modeled by making the "spring-dampener" links with the appropriate characteristics. The maximum equivalent tension in this case exerted in the areas of interaction between the kingpin beams with the backbone structure and is close to 300 MPa, which is lower by 13% compared with the standard design.

The conducted research will contribute to the reduction of damage of flat wagons and containers under operating conditions as well as to the development of recommendations on the design of innovative structures of transport vehicles. The conducted research will contribute to the creation of guidelines on the design of innovative structures of the vehicle fleet and increasing the efficiency of its functioning.

Key words: transport mechanics, flatcar, load-bearing structure, dynamic load capacity, strength.

REFERENCES

1. Apurba, Das, Gopal, Agarwal (2020). Compression, tension & lifting stability on a meter gauge flat Wagon: an experimental approach. Australian Journal of Mechanical Engineering, June. DOI: 10.1080/14484846.2020.1775007
2. Fedosov-Nikonov, D.V., Sulym, A.O., Ilchyshyn, V.V., Safronov, O.M., Kelrikh, M.B. (2020). Study of strength characteristics of the long wheelbase flat cars. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 985, 012029. DOI: 10.1088/1757-899X/985/1/012029
3. Shatunov, O.V., Shvets, A.O. (2019). Study of dynamic indicators of flat wagon with load centre shift. *Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zaliznichnogo transport - Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2 (80), 127 – 143.
4. Anisimov, P.S., Petrov, G.I. (2014). Prostranstvennye kolebaniya vagona-platformy [Spatial oscillations of the platform car]. *Mir transporta - The world of transport*, 2, 20 – 26 [in Russian]
5. Fomin O., Lovska A., Radkevych V., Horban A., Skliarenko I., Gurenkova O. (2019). The dynamic loading analysis of containers placed on a flat wagon during shunting collisions. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 14, 21, 3747 – 3752.
6. Placzek, M., Wróbel, A., Buchacz, A. (2016). A concept of technology for freight wagons modernization. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 161, 012107 DOI:10.1088/1757-899X/161/1/012107
7. Fomin, O.V., Lovska, A.O., Ribin, A.V. (2021). Doslidzhennya povzdovzhnoi navantazhenosti vagona-platformi z napovnyuvachem v nesuchij konstrukcii. [Investigation of the longitudinal load of a platform car with a filler in the load-bearing structure]. *Naukovi visti Dalivskogo universitetu - Scientific news of Dahl University*, 21. DOI: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21-17>
8. Bogomaz, G.I., Mekhov, D.D., Pilipchenko, O.P., Chernomashenceva, Yu.G. (1992). Nagruzhennost kontejnerov-cistern, raspolozhennyh na zheleznodorozhnoj platforme, pri udarah v avtoscepku. [Loading of tank-containers located on the railway platform when hitting an automatic coupler]. *Zb. nauk. prats "Dinamika ta keruvannya ruhom mekhanichnih sistem" - Coll. Science. works "Dynamics and control of the motion of mechanical systems"*. Kyiv: ANU, Institut tekhnichnoi mekhaniki, 87 – 95.
9. Fomin O., Lovska A. (2021). Determination of dynamic loading of bearing structures of freight wagons with actual dimensions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2/7 (110), 6 – 15. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.220534>
10. Vahony vantazhni. Zagalni vymohy do rozrahunkiv ta proektuvannia novykh i modernizovanykh vahoniv kolii 1520 mm (nesamohidnih). [FREIGHT WAGONS General requirements to calculation and designing of the new and modernized 1520 mm gauge wagons (non-self-propelled)] (2015). *DSTU 7598:2014*. Kyiv.
11. Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam. [Freight wagons. Requirements to structural strength and dynamic qualities] (2016). *GOST 33211-2014*. Moscow [in Russian].
12. Lovska A., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. (2020). Dynamic load modelling within combined transport trains during transportation on a railway ferry. *Applied Sciences*, 10, 5710. DOI:10.3390/app10165710
13. Fomin O., Lovska A. (2020). Establishing patterns in determining the dynamics and strength of a covered freight car, which exhausted its resource. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6, 7 (108), 21 – 29. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.217162
14. Fomin O., Gerlici, J., Gorbunov, M., Vatulja, G., Lovska, A., Kravchenko, K. (2021). Research into the Strength of an OpenWagon with Double Sidewalls Filled with Aluminium Foam. *Materials*, 14 (12), 3420. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14123420>
15. Fomin, O., Gorbunov, M., Lovska, A., Gerlici, J., Kravchenko, K. (2021). Dynamics and strength of circular tube open wagons with aluminum foam filled center sills. *Materials*, 14(8), 1915. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14081915>
16. Trebovaniya po ekspluatacionnoj bezopasnosti. Kontejnery dlja perevozki opasnyh gruzov. [Containers for transportation of dangerous loads. Requirements for operational safety] (2005). *GOST 31232-2004*. Minsk [in Russian].
17. Vatulja, G., Falendysh, A., Orel, Y., Pavliuchenkov, M. (2017). Structural Improvements in a Tank Wagon with Modern Software Packages. *Procedia Engineering*, 187, 301–307. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.379
18. Kitov, Y., Verevicheva, M., Vatulja, G., Orel, Y., Deryzemlia, S. (2017). Design solutions for structures with optimal internal stress distribution. *MATEC Web of Conferences*, 133(1–3) 03001 DOI: 10.1051/mateconf/201713303001