

**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 13-401. 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 повздовжніх 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-Кутта в програмному комплексі MathCad. Максимальні прискорення склали 35,2 м/с<sup>2</sup> 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/с<sup>2</sup>, 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 типовою 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 програмном комплекс MathCad. Максимальные ускорения составили 35,2 м/с<sup>2</sup> и возникают при ударе. Данная величина ускорения на 3,7% ниже полученной для несущей конструкции без наполнителя. Величина ускорения, действующего на контейнер-цистерну, равна около 40 м/с<sup>2</sup>, то есть не превышает допустимое значение. Полученные ускорения учтены при расчете на прочность несущей конструкции вагона-платформы. При этом применен метод конечных элементов, реализованный в програмном комплексе SolidWorks Simulation.*

*Наличие наполнителя в несущей конструкции моделировалось постановкой связей “пружина–демпфер” с соответствующими характеристиками. Максимальное эквивалентное напряжение при этом зафиксировано в зонах взаимодействия шкворневых балок с хребтовой и составляет около 300 МПа, что ниже на 13% по сравнению с типовой конструкцией.*

*Проведенные исследования будут способствовать уменьшению поврежденных вагонов-платформ и контейнеров при эксплуатационных режимах, а также созданию рекомендаций по проектированию инновационных конструкций транспортных средств.*

*Ключевые слова: транспортная механика, вагон-платформа, несущая конструкция, динамическая нагруженность, прочность.*

**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 співударяннях, в випадках коли динамічне навантаження, яке діє на контейнера, розміщені на них, перевищує силу тертя між фітинговими упорами та фітингами. Це обумовлює додаткову навантаженість як фітингів контейнерів, так і фітингових упорів вагонів-платформ. При цьому найбільш поширеними пошкодженнями фітингових упорів є тріщини та деформації, а контейнерів – тріщини в фітингах, 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 здійсненні 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 означених 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 заходами 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:

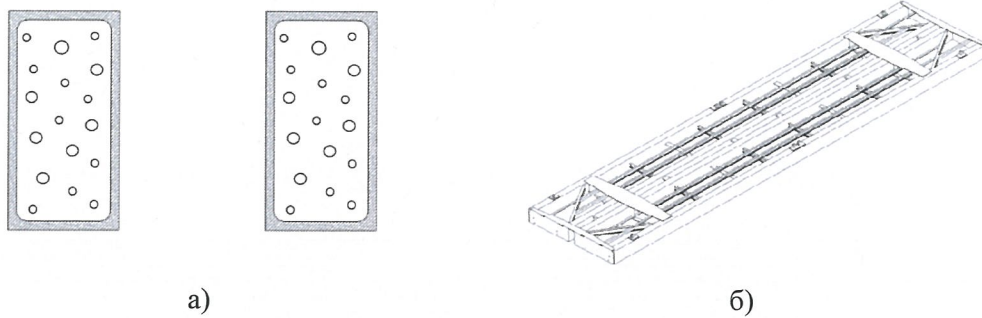
- провести моделювання динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи з наповнювачем в її складових;
- провести розрахунок на міцність несучої конструкції вагона-платформи з наповнювачем в її складових.

**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 автотягача [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 автотягача 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

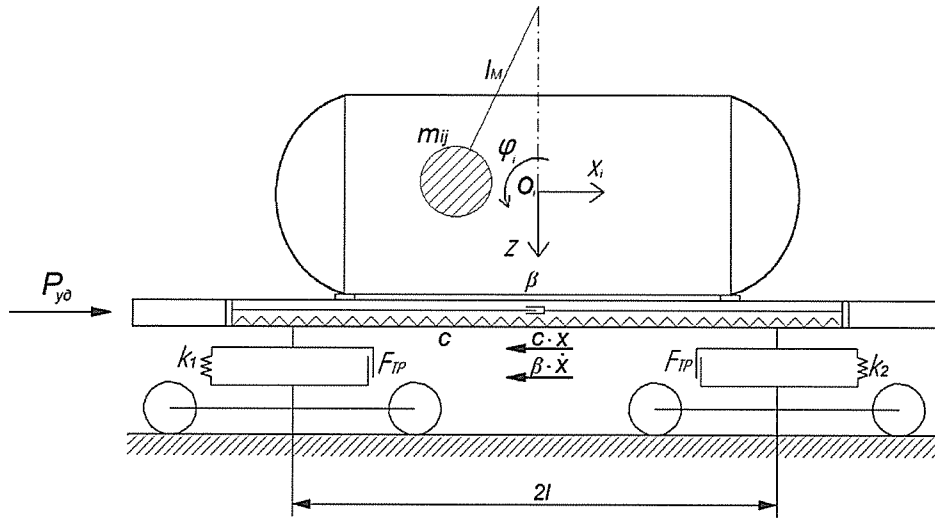


Рис. 3. Розрахункова схема вагона-платформи

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

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

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

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

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

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

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

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

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

---

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

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

де  $M_{\text{пл}}$  – маса несучої конструкції вагона-платформи;  
 $I_{\text{пл}}$  – момент інерції вагона-платформи відносно повздожньої осі;  
 $S_a$  – величина повздожньої сили удару в автозчеп;  
 $f_{\text{мп}}$  – 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;  
 $F_{\text{тр}}$  – 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;  
 $I_{\theta}$  – приведений момент інерції контейнера-цистерни та наливного вантажу, що не приймає участі у русі відносно котла;  
 $I_{ij}$  – момент інерції маятника;  
 $x_{\text{пл}}, \varphi_{\text{пл}}, z_{\text{пл}}$  – координати, що відповідають, відповідно, повздожньому, кутовому навколо повздожньої осі та вертикальному переміщенню вагона-платформи;  
 $x_i, \varphi_i$  – координати, що відповідають, відповідно, повздожньому та кутовому навколо повздожньої осі переміщенню контейнера-цистерни;  
 $\zeta_{ij}$  – 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 повздожні 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/с<sup>2</sup> 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/с<sup>2</sup>, тобто не перевищує допустиме значення [16].

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

---

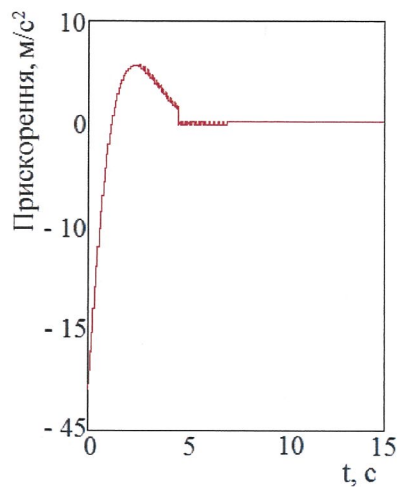


Рис. 4. Прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи

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 автозчепу, вертикальне навантаження  $P_g$  від ваги бруто контейнера, а також горизонтальні реакції  $P_z$ , що діють на фітингові упори.

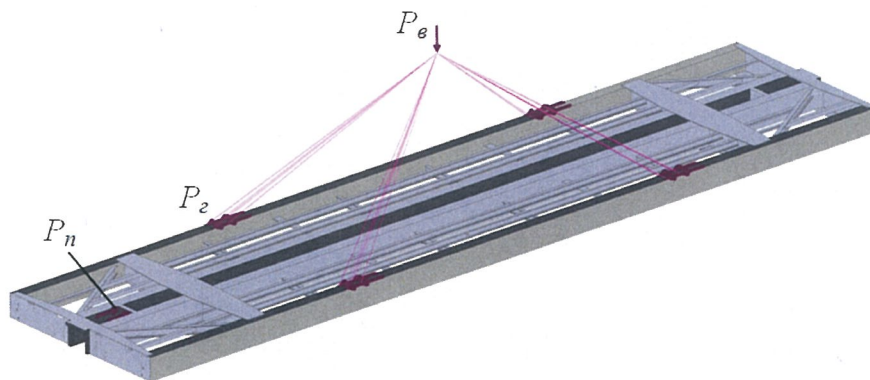


Рис. 5. Розрахункова схема несучої конструкції вагона-платформи

У якості скінчених елементів використані ізопараметричні тетраедри, оптимальна чисельність яких визначена за графоаналітичним методом [17, 18]. Кількість елементів сітки складала 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,



## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

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.

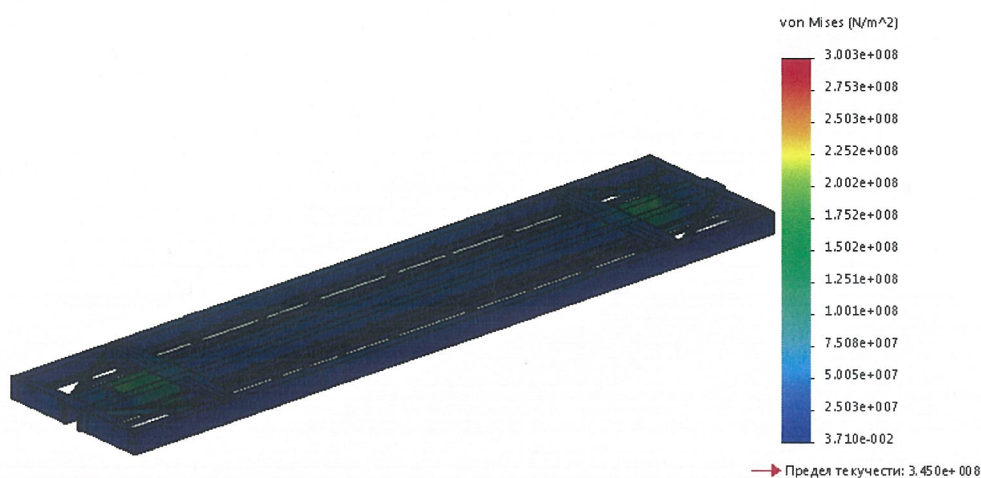


Рис. 6. Напружений стан несучої конструкції вагона-платформи

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 м/с<sup>2</sup> 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<sup>2</sup>, 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., Ilchyshyn 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. Płaczek 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 Далівського 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, Píšťek 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., Vatulia 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. Vatulia 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., Vatulia 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 ICC. 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  $35.2 \text{ m/s}^2$  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  $40 \text{ m/s}^2$ , 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. Płaczek, 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 proiektuvannia novykh i modernizovanykh vahoniv kolii 1520 mm (nesamohidnih). [FREIGHT WAGONS General requirements to calculation and design 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., Vatulia, 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. Vatulia, 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., Vatulia, 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

**О.В. Фомін\***

Державний університет інфраструктури та технологій  
вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна  
Телефон: +380 44 5915126, E-mail: fomin1985@ukr.net  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

**А.О. Ловська**

Український державний університет залізничного транспорту  
пл. Фейербаха, 7, м. Харків, 61050, Україна  
Телефон: +380 57 7301035, E-mail: alyonaLovskaya.vagons@gmail.com  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8604-1764>

**А.М. Фоміна**

Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля  
пр. Центральний, 59-а, м. Северодонецьк, 93400, Україна  
Телефон: +380 6452 40342, E-mail: anyta220885@gmail.com  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9810-8997>

**А.О. Климаш**

Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля  
пр. Центральний, 59-а, м. Северодонецьк, 93400, Україна  
Телефон: +380 6452 40342, E-mail: kland-80@ukr.net  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4055-1195>

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕРТИКАЛЬНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ НЕСУЧОЇ  
КОНСТРУКЦІЇ ВАГОНА-ПЛАТФОРМИ МОДЕЛІ 13-401 З  
КОМПОЗИТНИМИ СТІЙКАМИ ПІД ЧАС РУХУ СТИКОВОЮ  
НЕРІВНІСТЮ**

*В статті наведені результати досліджень вертикальної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи з композитними стійками для перевезення лісу в хлистах. Визначено основні показники динаміки несучої конструкції вагона-платформи під час руху у порожньому та завантаженому станах стиковою нерівністю з пружно-в'язкими властивостями: прискорення несучої конструкції вагона-платформи в центрі мас, прискорення в зонах спирання несучої конструкції на візки, сили, які виникають у ресорному комплекті, а також коефіцієнт вертикальної динаміки. Дослідження проведені на прикладі вагона-платформи моделі 13-401 побудови Дніпродзержинського вагонобудівного заводу. Враховано, що несуча конструкція вагона-платформи спирається на типові візки моделі 18-100. Розв'язок диференціальних рівнянь руху здійснений в програмному комплексі MathCad. При цьому застосований метод Рунге-Кутта.*

© Фомін О.В., Ловська А.О., Фоміна А.М., Климаш А.О., 2022

*При визначенні інерційних коефіцієнтів, які входять до системи диференціальних рівнянь, враховані номінальні геометричні параметри несучої конструкції вагона-платформи. Дані коефіцієнти визначалися шляхом побудови просторової моделі несучої конструкції вагона-платформи в програмному комплексі SolidWorks з послідовним застосуванням опцій, які дозволяють їх отримати.*

*Результати розрахунку показали, що досліджувані показники динаміки вагона-платформи під час руху у порожньому стані знаходяться в межах допустимих. Хід руху вагона-платформи оцінюється як “добрий”. З урахуванням руху вагона-платформи у завантаженому стані досліджувані показники динаміки також знаходяться в межах допустимих, а хід руху вагона є “відмінним”.*

*Проведені дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування інноваційних конструкцій рухомого складу та підвищенню ефективності його функціонування.*

*Ключові слова: транспортна механіка, вагон-платформа, несуча конструкція, модернізація конструкції, динаміка.*

### ***А. В. Фомин\****

Государственный университет инфраструктуры и технологий  
ул. Кирилловская, 9, г. Киев, 04071, Украина  
Телефон: +380 44 5915126, E-mail: fomin1985@ukr.net  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

### ***А. А. Ловская***

Украинский государственный университет железнодорожного транспорта  
пл. Фейербаха, 7, м. Харьков, 61050, Украина  
Телефон: +380 57 7301035, E-mail: alyonaLovskaya.vagons@gmail.com  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8604-1764>

### ***А. Н. Фомина***

Востоchnoукраинский национальный университет имени Владимира Даля  
пр. Центральный 59-а, г. Северодонецк, 93404, Украина  
Телефон: +380 6452 40342, E-mail: anyta220885@gmail.com  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9810-8997>

### ***А. А. Климаш***

Востоchnoукраинский национальный университет имени Владимира Даля  
пр. Центральный 59-а, г. Северодонецк, 93404, Украина  
Телефон: +380 6452 40342, E-mail: E-mail: kland-80@ukr.net  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4055-1195>

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НАГРУЖЕННОСТИ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ ВАГОНА-ПЛАТФОРМЫ МОДЕЛИ 13-401 С КОМПОЗИТНЫМИ СТОЙКАМИ ПРИ ДВИЖЕНИИ СТЫКОВОЙ НЕРОВНОСТЬЮ**

*В статье приведены результаты исследований вертикальной нагруженности несущей конструкции вагона-платформы с композитными стойками для перевозки леса в хлыстах. Определены основные показатели динамики несущей*

*конструкції вагона-платформи при русненні в порожньому та завантаженому стані стиковою нерівністю з упродо-в'язкими властивостями: прскорення несущої конструкції вагона-платформи в центрі мас, прскорення в зонах опирання несущої конструкції на тележки, сили, виникаючі в ресорному комплексі, а також коефіцієнт вертикальної динаміки. Исследования проведенные на примере вагона-платформы модели 13-401 постройки Днепродзержинского вагоностроительного завода. Учтено, что несущая конструкция вагона-платформы опирается на типовые тележки модели 18-100. Решение дифференциальных уравнений движения осуществлено в программном комплексе MathCad. При этом использован метод Рунге-Кутты.*

*При определении инерционных коэффициентов, входящих в систему дифференциальных уравнений, учтены номинальные геометрические параметры несущей конструкции вагона-платформы. Данные коэффициенты определялись путем построения пространственной модели несущей конструкции вагона-платформы в программном комплексе SolidWorks с последующим применением опций, позволяющих их получить.*

*Результаты расчета показали, что исследуемые показатели динамики вагона-платформы при движении в порожнем состоянии находятся в пределах допустимых. Ход движения вагона-платформы оценивается как "хороший". С учетом движения вагона-платформы в завантаженому стані досліджуємі показателі динаміки також знаходяться в межах допустимих, а ход руснення вагона являється "отличным".*

*Проведенные исследования будут способствовать созданию наработок по проектированию инновационных конструкций подвижного состава и повышению эффективности его функционирования.*

*Ключевые слова: транспортная механика, вагон-платформа, несущая конструкция, модернизация конструкции, динамика.*

**Вступ та постановка проблеми.** Одним з найголовніших напрямків Національної транспортної стратегії України до 2030 року є забезпечення розвитку та ефективного функціонування рухомого складу. Однак важливо зазначити, що ступінь поповнення вагонного парку за останні роки є досить незначним. Тому для забезпечення своєчасної доставки вантажів можливим є ситуаційна адаптація існуючого парку вагонів до перевезень завданої номенклатури вантажів. Доцільним рішенням є проведення відповідних модернізацій вагонів-платформ, оскільки їх несуча конструкція представлена рамою. Однак модернізація їх конструкцій сприяє збільшенню підресореної маси. Така обставина впливає на погіршення показників динаміки вагона у складі поїзда. Тому важливим є проведення досліджень щодо можливості ситуаційної адаптації вагонів з урахуванням мінімізації підресореної маси шляхом використання прогресивних матеріалів зі зменшеною у порівнянні із сталлю масою.

**Аналіз існуючих досліджень.** Розрахунок на міцність несучої конструкції вагона-платформи проводиться у роботі [1]. До уваги прийнято два варіанти завантаження вагона-платформи, при яких отримано найбільші згинальні моменти у несучій конструкції. Визначення максимальних еквівалентних напружень у основних несучих елементах рами здійснено за методом скінчених елементів.

Питання щодо можливості застосування методів теоретичних і експериментальних досліджень міцності основних несучих елементів конструкцій довгобазних вагонів-платформ розглянуті у публікації [2]. В роботі висвітлено

результати розрахунку складових елементів конструкції на втому з використанням обчислювального комплексу, що реалізує метод скінченних елементів стандарту IBM-PC.

Разом з цим питання ситуаційної адаптації несучих конструкцій вагонів-платформ для підвищення ефективності їх експлуатації в даних роботах не висвітлюються.

Особливості проведення ходових міцнісних та динамічних випробувань вагона-платформи наведені у роботі [3]. Враховано, що вагон-платформа завантажений 20-ти та 40-футовими контейнерами. Визначені основні показники динаміки вагона-платформи.

Конструкційні особливості інноваційного вагона для інтермодальних перевезень з адаптованою завантажувальною платформою розглянуто у роботі [4]. Також авторами наведені результати розрахунків на міцність несучої конструкції вагона-платформи.

Важливо сказати, що в даних роботах не зазначено можливостей адаптації запропонованих конструкцій вагонів-платформ до перевезень завданої номенклатури вантажів в залежності від ринкового попиту.

В публікації [5] розглянуто питання модернізації універсальних вантажних вагонів. Наведені результати розрахунку міцності несучої конструкції вагона-платформ на підставі комплексу розрахункових і експериментальних досліджень.

Питання підвищення ефективності експлуатації вагонів-платформ в міжнародному сполученні висвітлені у публікації [6]. Проведено розрахунок динамічної навантаженості та міцності несучої конструкції вагона-платформи з урахуванням запропонованої модернізації.

Разом з цим запропоновані модернізації не дозволяють здійснювати перевезення довгомірних вантажів на вагонах-платформах.

В роботі [7] запропоновано модернізацію вагона-платформи шляхом постановки спеціальних надбудов на її несучу конструкцію. Це сприяє можливості перевезень на ній контейнерів, а також інших вантажів. Модернізована конструкція вагона-платформи розрахована на динамічну навантаженість, а також міцність. Однак при модернізації даної конструкції вагона-платформи не розглянуто можливість використання у якості її складових перспективних матеріалів для зменшення тари.

**Мета.** Метою статті є дослідження вертикальної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи моделі 13-401 з композитними стійками для перевезення лісу в хлистах під час руху стиковою нерівністю. Для досягнення зазначеної мети поставлені такі завдання:

- провести визначення основних показників динаміки модернізованої конструкції вагона-платформи під час руху у порожньому стані стиковою нерівністю;
- провести визначення основних показників динаміки модернізованої конструкції вагона-платформи під час руху у завантаженому стані стиковою нерівністю.

**Матеріали та результати досліджень.** З метою ситуаційної адаптації універсальних конструкцій вагонів-платформ до перевезень лісу у хлистах пропонується їх модернізація, яка полягає у монтажі вертикальних стійок на основні повздовжні балки рами (рис. 1). Особливістю стійок є те, що вони виготовлені з композитного матеріалу та встановлені у металеві стакани, що розміщені на поворотних секторах. Дані сектори мають можливість обертатися відносно вертикальної осі для зручності завантаження вагона-платформи. З урахуванням запропонованої модернізації маса несучої конструкції вагона-платформи збільшується на 6,5% у порівнянні з прото-



## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

типом. Однак при цьому стає можливим зменшити тару модернізованої конструкції вагона-платформи на 4,6% у порівнянні з використанням сталевих стійок.

Дослідження проведені на прикладі несучої конструкції вагона-платформи моделі 13-401 побудови Дніпродзержинського вагонобудівного заводу. Основні технічні характеристики вагона-платформи наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. – Основні технічні характеристики вагона-платформи моделі 13-401

Тип вагона	Розмірність	Значення
Вантажопідйомність	т	70,0
Тара вагона	т	20,92
Швидкість конструкційна	км/год	120
Габарит	–	0 – ВМ (01 – Т)
База вагона	мм	9720
Довжина за осями зчеплення автосцепів	мм	14620
Висота від рівня верха головки рейки до рівня підлоги (максимальна)	мм	1310
Довжина кузова всередині	мм	13300
Ширина кузова всередині	мм	2770

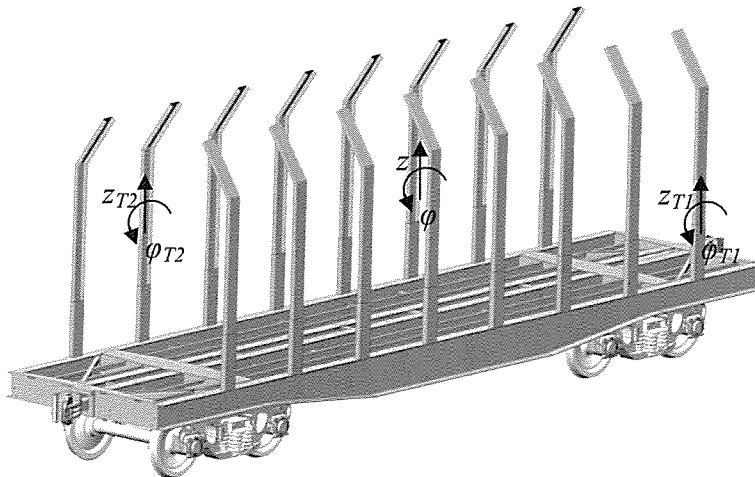


Рис. 1. Просторова модель модернізованого вагона-платформи

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Для визначення основних показників динаміки несучої конструкції вагона-платформи з композитними стійками для перевезення лісу в хлистах проведено математичне моделювання. При цьому до уваги прийнято коливання підсакування та галопування. На першопочатковому етапі дослідження розглянуто рух вагона-платформи у порожньому стані стиковою нерівністю [8, 9]. Враховано, що колія має пружно-в'язкі властивості.

Вагон-платформа розглянутий як система з трьох твердих тіл: рами та двох візків моделі 18-100 з ресорними комплектами, які мають жорсткість і коефіцієнт відносного тертя (рис. 2).

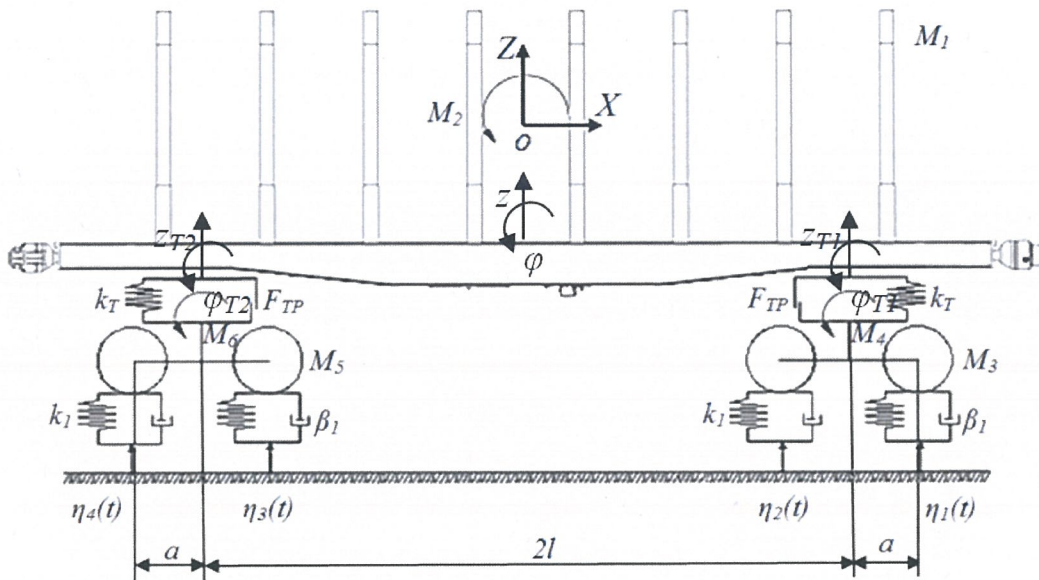


Рис. 2. Розрахункова схема вагона-платформи

Прийнято припущення, що на систему накладені такі зв'язки:

- колісні пари рухаються без проковзування;
- через відсутність пружних елементів в буксовому підвішуванні підстрибування візків визначаються підстрибуванням колісних пар.

Рівняння руху розрахункової моделі мають вигляд [8]:

$$M_1 \cdot \frac{d^2}{dt^2} z + C_{1,1} \cdot z + C_{1,3} \cdot z_{T_1} + C_{1,5} \cdot z_{T_2} = -F_{TP} \cdot \Delta, \quad (1)$$

$$M_2 \cdot \frac{d^2}{dt^2} \varphi + C_{2,2} \cdot \varphi + C_{2,3} \cdot \varphi_{T_1} + C_{2,5} \cdot \varphi_{T_2} = F_{TP} \cdot l \cdot \Delta, \quad (2)$$

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

$$\begin{aligned}
 M_3 \cdot \frac{d^2}{dt^2} z_{T1} + C_{3,1} \cdot z + C_{3,2} \cdot \varphi + C_{3,3} \cdot z_{T1} + B_{3,3} \cdot \frac{d}{dt} z_{T1} = \\
 = F_{TP} \cdot \Delta_1 + k_1 (\eta_1 + \eta_2) + \beta_1 \left( \frac{d}{dt} \eta_1 + \frac{d}{dt} \eta_2 \right),
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$M_4 \cdot \frac{d^2}{dt^2} \varphi_{T1} + C_{4,4} \cdot \varphi_{T1} + B_{4,4} \cdot \frac{d}{dt} \varphi_{T1} = -k_1 (\eta_1 - \eta_2) - \beta_1 \cdot a \cdot \left( \frac{d}{dt} \eta_1 - \frac{d}{dt} \eta_2 \right), \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 M_5 \cdot \frac{d^2}{dt^2} z_{T2} + C_{5,1} \cdot z + C_{5,2} \cdot \varphi + C_{5,5} \cdot z_{T2} + B_{5,5} \cdot \frac{d}{dt} z_{T2} = \\
 = F_{TP} \cdot \Delta_2 + k_1 (\eta_3 + \eta_4) + \beta_1 \left( \frac{d}{dt} \eta_3 + \frac{d}{dt} \eta_4 \right),
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$M_6 \cdot \frac{d^2}{dt^2} \varphi_{T2} + C_{6,6} \cdot \varphi_{T2} + B_{6,6} \cdot \frac{d}{dt} \varphi_{T2} = -k_1 \cdot a \cdot (\eta_3 - \eta_4) - \beta_1 \cdot a \cdot \left( \frac{d}{dt} \eta_3 - \frac{d}{dt} \eta_4 \right), \tag{6}$$

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = \left( \text{sign} \left( \frac{d}{dt} \delta_1 \right) + \text{sign} \left( \frac{d}{dt} \delta_2 \right) \right), \tag{7}$$

де  $M_1, M_2$  – відповідно маса та момент інерції несучої конструкції вагона-платформи при коливаннях підсакування та галопування;

$M_3, M_4$  – відповідно маса та момент інерції першого за ходом руху візка при коливаннях підсакування та галопування;

$M_5, M_6$  – відповідно маса та момент інерції другого за ходом руху візка при коливаннях підсакування та галопування;

$C_{ij}$  – характеристика пружності елементів коливальної системи;

$B_{ij}$  – функція розсіювання;

$a$  – половина бази візка;

$z, \varphi$  – узагальнені координати, що відповідають поступальному переміщенню відносно вертикальної осі та кутовому переміщенню навколо вертикальної осі несучої конструкції вагона-платформи;

$z_{T1}, \varphi_{T1}$  – узагальнені координати, що відповідають поступальному переміщенню відносно вертикальної осі та кутовому переміщенню навколо вертикальної осі першого за ходом руху візка;

$z_{T2}, \varphi_{T2}$  – узагальнені координати, що відповідають поступальному переміщенню відносно вертикальної осі та кутовому переміщенню навколо вертикальної осі другого за ходом руху візка;

$k_i$  – жорсткість ресорного підвішування;

$\beta_i$  – коефіцієнт демпфірування;

$F_{TP}$  – сила абсолютного тертя у ресорному комплекті;

$\eta_i$  – нерівність колії;

$\delta_i$  – деформації пружних елементів ресорного підвішування.

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Під час визначення інерційних коефіцієнтів, які входять до системи диференціальних рівнянь, враховані номінальні геометричні параметри несучої конструкції вагона-платформи. Дані коефіцієнти визначалися шляхом побудови просторової моделі несучої конструкції вагона-платформи в програмному комплексі SolidWorks з послідовним застосуванням опцій, які дозволяють їх отримати.

Прийнято, що амплітуда стикової нерівності дорівнює 0,01 м, довжина – 3 м, а відстань між нерівностями – 25 м. Значення коефіцієнтів відносного тертя прийнято рівним 0,1.

При проведенні розрахунків значення жорсткості колії прийнято рівним 100000 кН/м, а коефіцієнт демпфірування – 200 кН·с/м. Розрахунок динамічних показників вагона-платформи здійснено для швидкості руху 27,8 м/с.

Транспортне запізнення визначалося відстанню між колісними парами та швидкістю руху вагона. Тож для першої колісної пари воно дорівнює 0, другої – 0,067 с, третьої – 0,31 с, четвертої – 0,38 с.

Розв'язок диференціальних рівнянь (1)–(7) здійснений в програмному комплексі MathCad з урахуванням таких початкових умов: початкове переміщення несучої конструкції вагона-платформи дорівнює 0,004 м, а візків – 0,003 м. Початкова швидкість прийнята рівною 0. При цьому застосований метод Рунге-Кутта [10–12].

На рисунках 3–6 наведено основні показники динаміки вагона-платформи під час руху в порожньому стані. Графічна залежність, зображена на рис. 3, визначена шляхом подвійного диференціювання переміщення  $z$  несучої конструкції вагона-платформи.

Прискорення несучої конструкції вагона-платформи в зонах спирання на візки визначалося:  $ddz - ldd\varphi$ .

Для визначення сил в ресорному підвішуванні вагона-платформи використано залежність:  $k_T(z - l\varphi - z_{TI}) + F_{TP} \text{sign}(dz - l\cdot d\varphi - dz_{TI})$ .

Коефіцієнт динаміки розраховано як відношення сили в ресорному підвішуванні до статичного навантаження на візок.

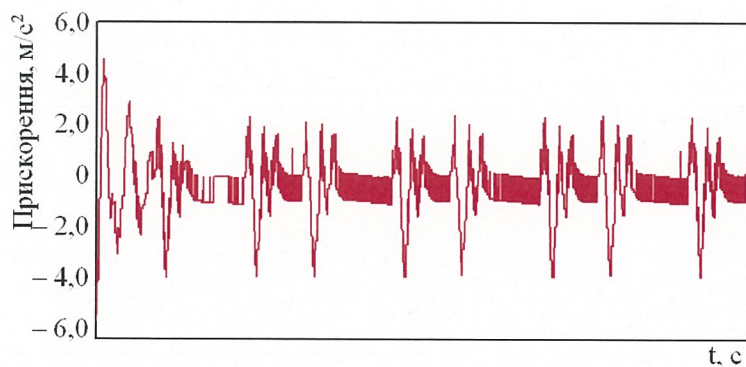
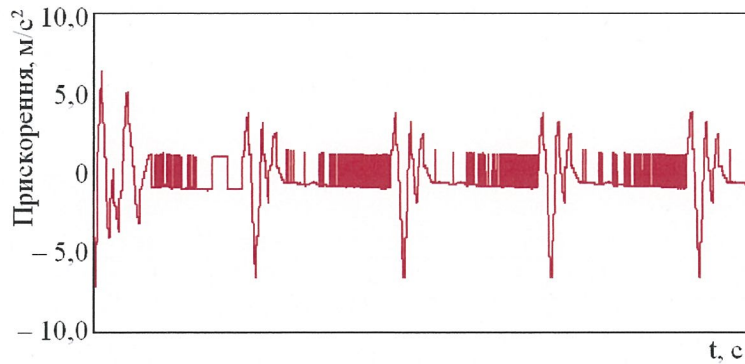


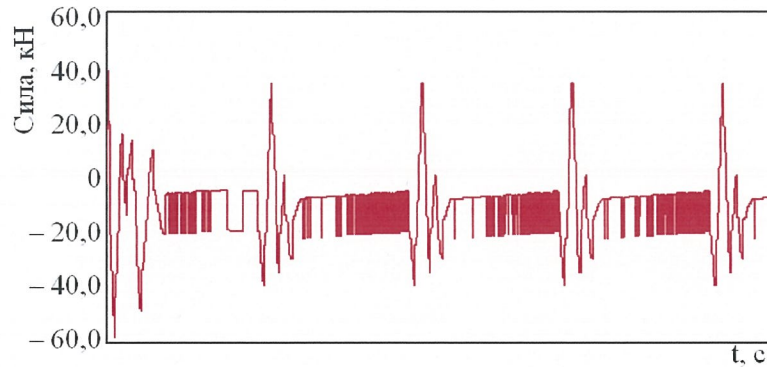
Рис. 3. Прискорення несучої конструкції вагона-платформи в центрі мас під час руху у порожньому стані

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

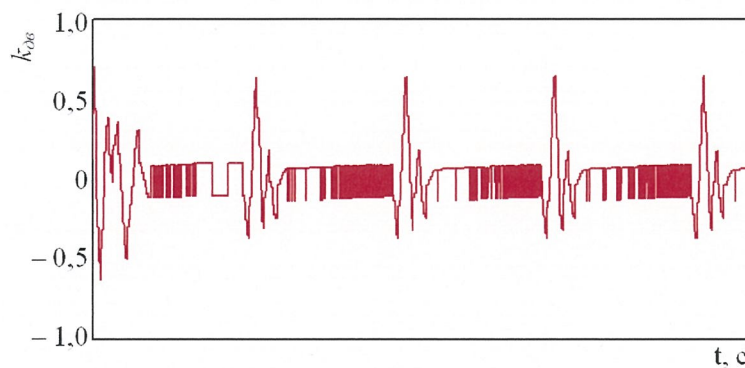
---



*Рис. 4. Прискорення несучої конструкції вагона-платформи в зонах спирання на візки під час руху у порожньому стані*



*Рис. 5. Сили, що виникають в ресорному підвішуванні вагона-платформи під час руху у порожньому стані*



*Рис. 6. Коефіцієнт динаміки обресореної конструкції вагона-платформи під час руху у порожньому стані*

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Максимальне прискорення, яке діє на несучу конструкцію вагона-платформи в центрі мас дорівнює близько  $0,54g$  (рис. 3), що відповідає “доброму” ходу вагона під час його руху у порожньому стані. В зонах спирання несучої конструкції вагона-платформи на візки прискорення складо близько  $0,65g$  (рис. 4). Максимальна величина сили, що виникає в ресорному підвішуванні вагона-платформи дорівнює майже  $60$  кН (рис. 5). При цьому коефіцієнт динаміки склав близько  $0,6$  (рис. 6).

Аналізуючи графічні залежності, наведені на рисунках 3–6 можна зробити висновок, що всі розглянуті показники динаміки знаходяться в межах допустимих [13, 14], (рис. 7).

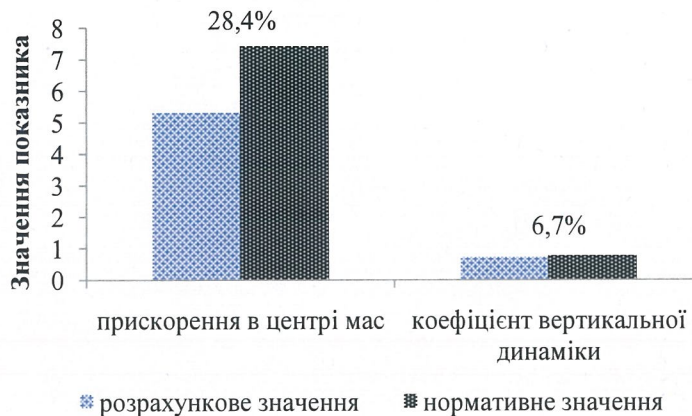


Рис. 7. Порівняльний аналіз показників динаміки вагона-платформи

На наступному етапі проведено визначення показників динаміки вагона-платформи за умови руху у завантаженому стані. Враховано, що використовується повна вантажопідйомність вагона-платформи. Результати розрахунку зведені до таблиці 2.

Таблиця 2. – Основні показники динаміки вагона-платформи під час руху у завантаженому стані

Назва показника	Чисельне значення
Прискорення несучої конструкції вагона-платформи в центрі мас, $m/s^2$	1,7
Прискорення несучої конструкції вагона-платформи в зонах спирання на візки, $m/s^2$	1,9
Сили, що виникають в ресорному підвішуванні, кН	80,2
Коефіцієнт динаміки обресореної конструкції вагона-платформи	0,2

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

З урахуванням даних, наведених у таблиці 2, можна зробити висновок, що показники динаміки вагона-платформи під час руху у завантаженому стані знаходяться в межах допустимих (рис. 8). Хід руху вагона оцінюється як “відмінний”.

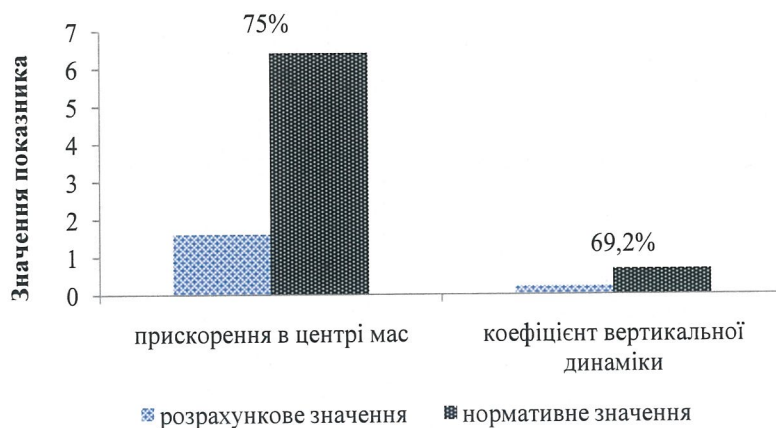


Рис. 8. Порівняльний аналіз показників динаміки вагона-платформи

Проведені дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування інноваційних конструкцій рухомого складу та підвищенню ефективності його функціонування.

### Висновки.

1. Проведено визначення основних показників динаміки модернізованої конструкції вагона-платформи під час руху у порожньому стані стиковою нерівністю. Встановлено, що всі розглянуті показники динаміки знаходяться в межах допустимих. Максимальні прискорення, які виникають в центрі мас несучої конструкції вагона-платформи склали  $5,3 \text{ м/с}^2$  ( $0,54g$ ), а коефіцієнт динаміки –  $0,6$ . Отже хід руху вагона оцінюється як “добрий”.

2. Проведено визначення основних показників динаміки модернізованої конструкції вагона-платформи під час руху у завантаженому стані стиковою нерівністю. Результати розрахунків показали, що досліджувані показники динаміки знаходяться в межах допустимих. Максимальні прискорення, які виникають в центрі мас несучої конструкції вагона-платформи склали  $1,7 \text{ м/с}^2$  ( $0,17g$ ), а коефіцієнт динаміки –  $0,2$ . Отже хід руху вагона оцінюється як “відмінний”.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Кельріх М. Б., Федосов-Ніконов Д. В. Дослідження на міцність конструкції довгобазної платформи. Вісник Східноукраїнського Національного університету імені Володимира Даля. 2016. № 1 (225). С. 90 – 94.
2. Донченко А. В., Федосов-Ніконов Д. В. Методика розрахунково-експериментальних досліджень конструкції довгобазної платформи. Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія: Транспортні системи і технології. 2016. Вип. 28. С. 53 – 60.
3. Чепурной А. Д., Литвиненко А. В., Шейченко Р. И., Граборов Р. В., Чубань М. А. Ходовые прочностные и динамические испытания вагона-платформы. Вісник НТУ “ХПІ”. 2015. Вип. 31 (1140). С. 111 – 128.

4. Šťastniak P., Kurčík P., Pavlík A. Design of a new railway wagon for intermodal transport with the adaptable loading platform. MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 235(2): 00030.
5. Reidemeister O.H., Kalashnyk V.O., Shygunov O.A.. Modernization as a way to improve the use of universal cars. Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. 2016. № 2 (62). С. 148 – 156.
6. Panchenko S., Fomin O., Vatulia G., Ustenko O., Lovska A. Determining the load on the long-based structure of the platform car with elastic elements in longitudinal beams. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. №1/7 (109). P. 6 – 13. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.224638>
7. Lovska A., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Dynamic load modelling within combined transport trains during transportation on a railway ferry. Applied Sciences. 2020. №10. 5710. doi:10.3390/app10165710
8. Дьомін Ю. В., Черняк Г. Ю. Основи динаміки вагонів: навч. посіб. Київ: КУЕТТ, 2003. 269 с.
9. 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>
10. Fomin O., Gerlici J., Gorbunov M., Vatulia 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>
11. 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>
12. 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>
13. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Київ, 2015. 162 с.
14. ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. Москва, 2016. 54 с.

### ***O.V. Fomin***

State University of Infrastructure and Technologies  
Kyrylivska str., 9, Kyiv, 04071, Ukraine  
Tel.: +380 44 5915126, E-mail: [fomin1985@ukr.net](mailto:fomin1985@ukr.net)  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

### ***A.O. Lovska***

Ukrainian State University of Railway Transport  
Feuerbakh sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine  
Tel.: +380 57 7301035, E-mail: [alyonaLovskaya.vagons@gmail.com](mailto:alyonaLovskaya.vagons@gmail.com)  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8604-1764>

### ***A.M. Fomina***

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University.  
Tsentrallyy ave. 59-A, Severodonetsk, 93404, Ukraine,  
Tel.: +380 6452 40342, E-mail: [anyta220885@gmail.com](mailto:anyta220885@gmail.com)  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9810-8997>

### ***A.O. Klymash***

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University.  
Tsentrallyy ave. 59-A, Severodonetsk, 93404, Ukraine,  
Tel.: +380 6452 40342, E-mail: [kland-80@ukr.net](mailto:kland-80@ukr.net)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4055-1195>



### STUDY OF THE VERTICAL LOADING OF THE BEARING STRUCTURE OF A PLATFORM CAR MODEL 13-401 WITH COMPOSITE RACKS WHEN MOVING BY A JOINT ROUGHNESS

*The article contains the results of vertical load-car load-carrying structure examination with composite struts for timber transportation in solid wood. The main indices of load-bearing structure dynamics of flat wagon at empty empty load with structural nerves with string-composite properties are determined: acceleration of the load-bearing structure of the flat car in the center of masses, acceleration in the areas of spinning of the load-bearing structure on the ties, the forces that occur in the reshoring set, as well as the coefficient of vertical dynamism. Investigations were carried out on the application of the flatcar model 13-401 by Dniprodzerzhynskiy Carriage Works. It is taken into account that the load-bearing structure of the flat car is based on the type of bogies of model 18-100.*

*Differential equations of motion were developed in MathCad. The Runge-Kutta method was used. When determining the inertial coefficients, which are included in the system of differential equations, the nominal geometrical parameters of the load-bearing structure of the flatcar were taken into account. These values were determined by creating a simple model of the load-bearing structure of the flat car in the SolidWorks software with the subsequent use of options, which allow to obtain them.*

*The results of the calculation showed that the investigated parameters of the platform-car dynamics in empty running are within the permissible limits. The running behavior of the flat car is estimated as "good". Taking into account the flat car running in the loaded condition the investigated indices of dynamics are also within the permissible limits, and the running behavior of the car is "excellent".*

*The conducted research will contribute to the creation of guidelines for designing innovative structures of the rolling stock and increasing the efficiency of its functioning.*

*Key words: transport mechanics, flatcar, load-bearing structure, design modernization, dynamics.*

### REFERENCES

1. Kelrih, M.B., Fedosov-Nikonov, D.V. (2016). Doslidzhennia na mitsnist konstrukcii dovhobaznoi platformy. [Research on the strength of the long-base platform structure]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho Nacionalnoho universitetu imeni Volodimira Dalya - Bulletin of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 1 (225), pp. 90 – 94 [in Ukrainian]
2. Donchenko, A.V., Fedosov-Nikonov, D.V. (2016). Metodika rozrahunkovo-eksperimental'nih doslidzen' konstrukcii dovgobaznoi platformi [Methods of computational and experimental studies of the design of long-base platform]. *Zbirnik naukovih prats Derzhavnoho ekonomiko-tehnologichnoho universitetu transportu. Seriya: Transportni sistemi i tekhnologii - Collection of scientific works of the State Economic and Technological University of Transport. Series: Transport systems and technologies*, 28, pp. 53 – 60 [in Ukrainian]
3. Chepurnoj, A.D., Litvinenko, A.V., Shejchenko, R.I., Graborov, R.V., Chuban', M. A. (2015). Hodovye prochnostnye i dinamicheskie ispytaniya vagona-platformy [Running strength and dynamic tests of the platform car]. *Visnyk NTU "HPI" - Bulletin of NTU "KhPI"*, 31 (1140), pp. 111 – 128.
4. Štastniak, P., Kurčík, P., Pavlík, A. (2018). Design of a new railway wagon for intermodal transport with the adaptable loading platform. *MATEC Web of Conferences*, 235(2): 00030.
5. Reidemeister O.H., Kalashnyk V.O., Shykunov O.A. (2016). Modernization as a way to improve the use of universal cars. *Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zaliznynohogo transportu*, 2 (62), pp. 148 – 156.

6. Panchenko, S., Fomin, O., Vatulia, G., Ustenko, O., Lovska, A. (2021). Determining the load on the long-based structure of the platform car with elastic elements in longitudinal beams. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/7 (10), pp. 6 – 13. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.224638>
7. 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: <https://doi.org/10.3390/app10165710>
8. Domin, Yu.V., Cherniak, H.Yu. (2003). *Osnovy dynamiky vahoniv [Fundamentals of car dynamics: textbook]*. Kyiv: KUETT, 269.
9. 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: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217162>
10. Fomin, O., Gerlici, J., Gorbunov, M., Vatulia, 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>
11. 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>
12. 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), pp. 6 – 15. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.220534>
13. DSTU 7598:2014. *Freight Wagons. General requirements to calculation and designing of the new and modernized 1520 mm gauge wagons (non-self-propelled)* (2015). Kyiv, 162.
14. GOST 33211-2014. *Freight wagons. Requirements to structural strength and dynamic qualities*. Moscow, 54.