

УДК 629.463.004.4:656.211.7

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.149.2014.81806>

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВИПАДКОВИХ КОЛИВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ КУЗОВА НАПІВВАГОНУ ПРИ ПЕРЕВЕЗЕННІ ЗАЛІЗНИЧНИМ ПОРОМОМ В УМОВАХ ХВИЛЮВАННЯ МОРЯ**

К-т техн. наук А. О. Ловська

**ИССЛЕДОВАНИЕ СЛУЧАЙНЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ КУЗОВА ПОЛУВАГОНА ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ПАРОМОМ В УСЛОВИЯХ ВОЛНЕНИЯ МОРЯ**

К-т техн. наук А. А. Ловская

**THE RESEARCH OF CASUAL OSCILLATORY PROCESSES OF THE OPEN-TOP WAGON BODY WHILE TRANSPORTING IF BY RAILWAY-FERRY BOAT IN CONDITIONS OF THE SEA STORM**

Candidate of technical sciences A. A. Lovskaya

*В статті проводиться дослідження динаміки несучої конструкції кузова напіввагона з урахуванням випадковості збурюючої дії (морської хвилі). Розроблено математичну модель коливань кузова напіввагона в умовах морської хитавиці, при цьому до уваги прийняті дійсні параметри збурення, зафіксовані під час шторму у Чорному морі*

*Отримані результати дозволять забезпечити міцність кузовів вагонів при експлуатації в міжнародному залізнично-водному сполученні.*

**Ключові слова:** вагон, динаміка вагона, навантаження конструкції, залізнично-водний транспорт, залізнично-поромні перевезення.

*В статье проводится исследование динамики несущей конструкции кузова полувагона с учетом случайности возникновения возмущающего воздействия (морской волны). Разработана математическая модель колебаний кузова полувагона в условиях морской качки, при этом ко вниманию приняты действительные параметры возмущения, зафиксированные во время шторма в Черном море.*

*Полученные результаты позволят обеспечить прочность кузовов вагонов при эксплуатации в международном железнодорожно-водном сообщении.*

**Ключевые слова:** вагон, динамика вагона, нагружение конструкции, железнодорожно-водный транспорт, железнодорожно-паромные перевозки.

*The article deals with the open-top wagon body dynamics under the operation on the railway ferry-boat in the conditions of rolling taking into account different wave route angles in relation to the ferry vessel body. Principle kinds of the wagon oscillatory movement are considered under sea roughness conditions that make impact on it's durability and stability relatively to the vessel deck.*

*There was proposed a mathematical model of wagon bodies transporting by the rail ferries in conditions of the sea storm, it provides the possibility of determining of accelerations of wagon bodies placed on the decker rail ferries taking into account the hydrometeorology characteristics. The results of researches can be used when designing new generation wagons to provide their*

*strength during the combination of rail and water transportation. It gives us an opportunity to develop measures as to the adaptation of wagons bodies to the interaction with the fastenings of railway ferries by means of equipping their bearing constructions with special fastening assembly units. Such technical solution will allow decreasing expenses for unscheduled repair of wagons while transporting them on railway ferries and providing safety of traffic of combined transport.*

**Key words:** wagon, the dynamic's of wagon, loading of construction, railway-ferry transport, railway-ferry boat transportation.

**Вступ.** Процес інтеграції України в систему міжнародних транспортних коридорів зумовлює необхідність розробки та впровадження в експлуатацію вагонів нового покоління з підвищеними техніко-економічними показниками. Однією зі складових інтеграції є розвиток систем комбінованого транспорту. У зв'язку з цим набули поширення залізнично-поромні перевезення вагонів морем.

На сьогоднішній день залізнично-поромні маршрути забезпечують взаємодію України з Болгарією, Грузією, Туреччиною та Росією. Враховуючи географічну дислокацію України, у перспективі є можливим розширення залізнично-поромних сполучень в акваторіях Чорного та Азовського морів.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями.** Дослідження статистичних даних пошкоджень несучих конструкцій кузовів вантажних вагонів при перевезенні їх морем дозволили зробити висновок, що головною причиною їх виникнення є відсутність конструкційної адаптації вагонів до надійної взаємодії з засобами закріплення відносно палуб. Крім того, величини навантажень, які діють на вагон при перевезенні залізничним поромом (ЗП) значно відрізняються від експлуатаційних відносно магістральних колій. Тому з метою забезпечення безпеки руху комбінованого транспорту необхідним є на стадії проектування вагонів нового покоління врахування навантажень, що можуть діяти на них при перевезенні морем.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Відомо, що одним з визначальних зусиль, які здійснюють значний вплив на стійкість кузовів вагонів відносно палуб є інерційні, зумовлені коливаннями ЗП в умовах хвилювання моря.

Дослідженню інерційних зусиль, які діють на кузова вагонів при перевезенні ЗП присвячені труди ВНИИЖТа [1]. Визначення прискорень, що діють відносно штатних місць розміщення вагонів на палубах, проводилося на підставі диференціювання

закону руху морської хвилі. Розрахунки проведені стосовно ЗП типу "Советский Азербайджан", що курсував між Азербайджаном та Дагестаном, а також Туркменістаном. Отримані при цьому результати стали основою для формування п. 2.18 "Норм для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)" [2].

Важливо зазначити, що у зв'язку з інтенсифікацією розвитку залізнично-поромних перевезень, створенням нових ЗП, різних гідрометеорологічних характеристик акваторій плавання ЗП необхідним є розширення п. 2.18 "Норм...".

Дослідження динаміки вантажного вагона на візках, удосконаленої конструкції, наводиться в [3]. При цьому моделювання динаміки виконувалося для вантажних вагонів Shimmns, обладнаних візками Y25. В ході досліджень визначалися динамічні зусилля в зоні взаємодії колеса з рейками.

Математична модель коливань кузова вантажного вагона при взаємодії з рейковою колією наведена в [4]. Дослідження виконувалися в середовищі програмного забезпечення GENSYS.

Необхідно зауважити, що моделі, наведені в [3, 4] можуть застосовуватися тільки при дослідженні коливань кузова вагона відносно рейкової колії.

Питанням дослідження динаміки кузовів вагонів при перевезенні ЗП в зазначених роботах уваги не приділяється.

Конструкційні особливості вагонів нового покоління з підвищеними техніко-економічними параметрами наведені в [5, 6]. При цьому в зазначених працях не оговорюється, чи здійснювалося на стадії проектування та розрахунку вагонів урахування навантажень, які можуть діяти на їх несучу конструкцію при перевезенні ЗП, оскільки у відповідності з [2] ці навантаження перевищують ті, що діють на вагони при експлуатації на магістральних коліях.

Оцінка зовнішніх зусиль, які діють на вагони при перевезенні ЗП наведена в [7]. При цьому прискорення, які діють на кузова

вагонів в умовах хвилювання моря визначаються на підставі розрахунку хитами ЗП, яка відбувається з шістьма ступенями вільності в умовах нерегулярного трохвимірної хвилювання при русі зі швидкістю 6,5 вузлів.

Дана методика може бути використана для однопалубного ЗП обмеженого району плавання.

**Мета статті.** Дослідження випадкових коливальних процесів кузова напіввагону при перевезенні залізничним поромом в умовах хвилювання моря.

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

де  $q_1 = \theta$  – узагальнена координата, що відповідає кутовому переміщенню навколо поздовжньої вісі  $\theta$ . Початок системи координат розміщений в центрі мас ЗП.

$D$  – вагове водовитіснення ЗП, кН;  $B$  – ширина ЗП, м;  $h$  – висота борта ЗП, м;  $\Lambda_\theta$  – коефіцієнт опору коливанням ЗП, кН · с · м<sup>-1</sup>;  $z_g$  – координата центру ваги ЗП, м;  $p'$  – вітрове навантаження, кН;  $F(t)$  – закон дії зусилля, яке збуджує рух ЗП з кузовами вагонів, розміщеними на його палубах.

При складанні рівняння (1) враховано, що кузов вагона жорстко закріплений відносно палуби і здійснює переміщення разом з нею. Ударна дія морських хвиль на корпус ЗП з вагонами, розміщеними на його борту не враховувалася.

При розробці моделі враховано трохоїдальний закон руху збуджуючої дії (морської хвилі) на ЗП з кузовами вагонів, розміщеними на його палубах та дисипативну складову, яка виникає при коливаннях ЗП в умовах морського хвилювання, що викликає опір його руху, курсові кути морської хвилі по відношенню до корпусу ЗП та вітрове навантаження, що

**Викладення основного матеріалу статті.** Для визначення інерційної складової навантаження, яке діє на несучу конструкцію кузовів вагонів при перевезенні ЗП в умовах хвилювання моря складено математичну модель переміщень вагона ЗП при кутових переміщеннях навколо поздовжньої вісі (крен), оскільки даний вид коливального процесу здійснює найбільший вплив на стійкість кузовів вагонів відносно палуб:

діє на надводну проекцію ЗП з кузовами вагонів, розміщеними на верхній палубі.

Вхідними параметрами моделі є технічні характеристики ЗП, а також гідрометеорологічні характеристики акваторії плавання.

При урахуванні параметрів збуджуючої дії враховані дійсні гідрометеорологічні характеристики хвилювання моря, які зафіксовані під час шторму в Чорному морі [8, 9]. Оскільки шторм відбувався у II районі Чорного моря, то в розрахунках врахована довжина поромних маршрутів, які проходять через цей район – “Іллічівськ – Поті”, “Іллічівськ – Батумі” (Україна – Грузія). В статті наведені результати розрахунків для поромного маршруту “Іллічівськ – Поті”, для якого час руху через штормовий район Чорного моря складає близько 4 год., при русі з конструкційною швидкістю 18,6 вузлів (9,6 м/с).

Вирішення диференціального рівняння здійснювалося в середовищі програмного забезпечення MATHCAD. Для урахування змінних параметрів збуджуючої дії використано теорію рядів Фур'є [10], тобто

$$F(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} C_i \cos(\omega_i t + \beta_i) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cos(\omega_i t) + \sum_{i=1}^{\infty} b_i \sin(\omega_i t); \quad (2)$$

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_0^T F(t) dt; \quad (3)$$

$$a_i = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) \cos(\omega_i t) dt; \quad (4)$$

$$b_i = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) \sin(\omega_i t) dt \quad (5)$$

Після проведення відповідних розрахунків, отримано:

$$\begin{aligned}
 F(t) = & a - \frac{2R \cdot e^{k \cdot b}}{\omega \cdot t} (\cos(k \cdot a + \omega \cdot t) - 1) + 2b - \frac{2R \cdot e^{k \cdot b}}{\omega \cdot t} \sin(k \cdot a + \omega \cdot t) + \\
 & + \sum_{i=1}^n \left( \frac{2a}{t \cdot \omega} \sin \omega t + \frac{R \cdot e^{k \cdot b}}{t} \left( t \cdot \sin(k \cdot a) - \frac{1}{2\omega} (\cos(k \cdot a + 2\omega \cdot t) - \cos(k \cdot a)) \right) \right) + \\
 & + \frac{2b}{t \cdot \omega} \sin(\omega \cdot t) - \frac{R \cdot e^{k \cdot b}}{t} \left( t \cdot \cos(k \cdot a) + \frac{1}{2\omega} (\sin(k \cdot a + 2\omega \cdot t) - \sin(k \cdot a)) \right) \Bigg) + \\
 & + \sum_{i=1}^n \left( -\frac{2a}{t \cdot \omega} (\cos(\omega_i \cdot t)) + \frac{R \cdot e^{k \cdot b}}{t} \left( t \cdot \cos(k \cdot a) - \frac{1}{2\omega} (\sin(k \cdot a + 2\omega \cdot t)) \right) \right) - \\
 & - \frac{2b}{t \cdot \omega} (\cos(\omega_i \cdot t)) + \frac{R \cdot e^{k \cdot b}}{t} \left( t \cdot \sin(k \cdot a) - \frac{1}{2\omega} (\cos(k \cdot a + 2\omega \cdot t)) \right) \Bigg), \quad (6)
 \end{aligned}$$

де  $R$  – радіус траєкторії, за якою здійснюється оберт кузова вагона у завданий інтервал часу, м;  $k$  – частота траєкторії збурюючого зусилля;  $a$  та  $b$  – горизонтальна та вертикальна координати центру траєкторії за якою обертається кузов вагона,

закріплений відносно палуби ЗП, що має на даний час координати  $x$  та  $z$ ;  $\omega$  – частота збурюючого зусилля у завданий інтервал часу, рад/с.

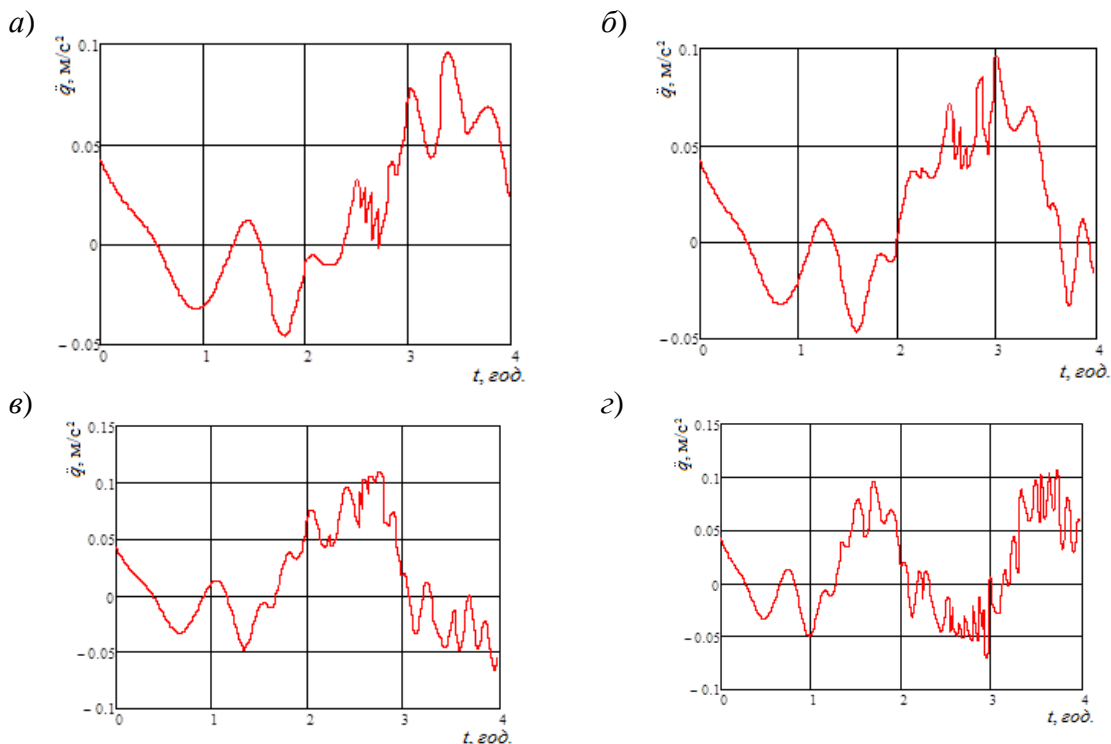


Рис. 1. Прискорення, які діють на крайній від фальшборта кузов вагона, розміщений на верхній палубі ЗП: а) при  $\chi = 0^\circ$  та  $120^\circ$ ; б) при  $\chi = 30^\circ$  та  $135^\circ$ ; в) при  $\chi = 45^\circ$  та  $150^\circ$ ; г) при  $\chi = 60^\circ$  та  $180^\circ$ .

На підставі проведених розрахунків отримані прискорення, які діють на кузов вагонів при перевезенні ЗП в умовах хвилювання моря з урахуванням різних курсових кутів хвилі по відношенню до корпусу ЗП. Результати розрахунків наведені на рис. 1.

З рис. 2 видно, що максимальне значення прискорення складає близько  $0,11 \text{ м/с}^2$  (з урахуванням горизонтальної складової прискорення вільного падіння –  $2,2 \text{ м/с}^2$  ( $0,22 \text{ g}$ )) та відповідає значенням курсових кутів хвилі  $\chi = 45^\circ; 60^\circ; 150^\circ$  та  $180^\circ$ .

Отримані величини прискорень відрізняються від зазначених у “Нормах...”, де для акваторії Каспійського моря зазначено прискорення  $1g$  при куті крену  $30^\circ$

**Висновки.** На підставі проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Отримано величини максимальних прискорень, які діють на кузова вагонів, розміщених відносно палуб ЗП з урахуванням дійсних

гідрометеорологічних умов хвилювання акваторії Чорного моря, які склали близько  $0,22g$ ;

2. Проведені дослідження сприятимуть підвищенню безпеки руху вагонів на ЗП морем, а також розширенню п. 2.18 “Норм...” [2], з урахуванням внесення уточнених величин прискорень, які діють на кузова вагонів при перевезенні різними типами ЗП та відповідних характеристик акваторій їх плавання.

### Список використаних джерел

1. Землезин И. Н. Методика расчета и исследования сил, действующих на вагон при транспортировке на морских паромов / И. Н. Землезин – М.: Транспорт, 1970. – 104 с.
2. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М.: ГосНИИВ – ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.
3. Buonsanti, M. Dynamic modelling of freight wagon with modified bogies / M. Buonsanti, G. Leonardi // European Journal of Scientific Research. – 2012. – Vol. 86, № 2. – P. 274–282.
4. Berghuvud, Ansel. Dynamic modelling of freight wagons / Ansel Berghuvud, Sebastian Stichel, Thomas Nordmark. – Master’s Degree Thesis, 2011. – 80 p.
5. New livery for tarmac wagons (2011). Online, Issue 17 summer, 2.
6. Our freight wagons (2013). DB Schenker, 113.
7. Наставление по креплению груза для т/х “Петровск” ПР. № 002CNF001 – ЛМПЛ – 805. – Офиц. изд. – Одесса: МИБ, 2005. – 52 с.
8. Ветер и волны в океанах и морях: справочные данные [под. ред. И.Н. Давидана] – Л.: Транспорт, 1974. – 360 с.
9. Кабатченко И. М. Моделирование ветрового волнения. Численные расчеты для исследования климата и проектирования гидротехнических сооружений: автореф. дис. на соискание ученой степени доктора географических наук: спец. 25.00.28 “Океанология” / И. М. Кабатченко. – Москва, 2006. – 41 с.
10. Маков Ю. Л. Качка судов / Ю. Л. Маков. – Калининград, “КГТУ”, 2007. – 321 с.

Рецензент д-р техн. наук, профессор І.Е.Мартинів

Ловська Альона Олександрівна к.т.н., ст. викладач кафедра вагони Українська державна академія залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-35. E-mail: alyonaLovskaya@rambler.ru

Lovskaya Alyona Alexandrovna Candidate of technical sciences, Sen. Lecturer department wagons Ukraine State Academy of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-35. E-mail: alyonaLovskaya@rambler.ru