

Особливості математичного моделювання динаміки кузовів вагонів при їх перевезенні на залізничних поромках

Постановка проблеми

Прискорені темпи інтеграції України в систему міжнародних транспортних коридорів зумовлює необхідність створення комбінованих транспортних систем, однією з найбільш успішних серед яких є залізнично-поромні перевезення. Рух вагонів залізничними поромками (ЗП) морем в умовах його хвилювання супроводжується виникненням та дією на несучу конструкцію кузовів різних типів зусиль, визначальними серед яких є динамічні. Тому, з метою забезпечення безпеки руху вагонів ЗП необхідним є дослідження динамічних зусиль, які діють на несучу конструкцію кузовів при перевезенні морем.

Аналіз останніх досліджень

Визначення динамічних зусиль, які діють на кузова вагонів при перевезенні ЗП в умовах хвилювання моря проводилися ВНДІЗТом ще в 60-70-х рр. минулого сторіччя [1]. Недоліками наведеної методики є неможливість урахування курсового кута хвилі по відношенню до корпусу ЗП, а також вітрового зусилля, яке діє на надводну проекцію ЗП з кузовами вагонів, розміщеними на його верхній палубі. Крім того, дана методика може враховуватися тільки для плоских морських хвиль.

Оцінка зовнішніх зусиль, які діють на вагони при перевезенні ЗП наведена в [2]. При цьому прискорення, які діють на кузова вагонів в умовах хвилювання моря визначаються на підставі розрахунку хитавиці ЗП, яка відбувається з шістьма ступенями вільності в умовах

нерегулярного трьохвимірною хвилювання при русі зі швидкістю 6,5 вузлів.

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

Дослідження динаміки кузова вагона при перевезенні його ЗП наведені в [3]. З метою визначення прискорень, які діють на кузова вагонів при перевезенні їх морем розроблено математичну модель переміщень кузовів ЗП. Недоліками цієї моделі є відсутність дії вітрового навантаження на надводну проекцію ЗП з кузовами вагонів, розміщеними на його верхній палубі.

Мета статті

Визначення динамічних зусиль, які діють на несучу конструкцію кузовів вагонів при перевезенні на ЗП.

Викладення основного матеріалу статті

Значний вплив на величину зусиль, які діють на кузов вагона при перевезенні ЗП, здійснює динаміка морських хвиль. При оцінці морехідних якостей судна для описування регулярного хвилювання частіш за все використовують формули теорії прогресивних хвиль відносно малої амплітуди.

Профіль трохіодальної хвилі описується рівняннями в параметричному вигляді [4]:

$$\begin{aligned}x &= a + Re^{kb} \sin(ka + \omega t) \\z &= b - Re^{kb} \cos(ka + \omega t)\end{aligned}\quad (1)$$

де a та b – горизонтальна та вертикальна координати центра траєкторії, за якою

обертається частинка, що має на даний час координати x та z ;

R – радіус траєкторії, за якою здійснюється оберт частинки, м;

ω – частота морської хвилі, c^{-1} ;

k – частота траєкторії збурюючого зусилля.

Коливання ЗП з вагонами на його борту в умовах хвилювання моря можна розглядати як коливання твердого тіла з прикріпленими до нього масами. При цих коливаннях виникають зусилля, які пропорційні величині переміщень ЗП відносно першепочаткового положення. Дані зусилля, наводяться у вигляді додаткових сил плавучості корпусу ЗП [5]. Тому, ЗП розглядається як тверде тіло з трьома ступенями вільності (рис. 1):

– поступальні переміщення в вертикальному напрямку відносно осі Z (рис. 1, *a*);

– кутові переміщення навколо поперечної вісі Y на кут φ (рис. 1, *б*);

– кутові переміщення навколо повздовжньої вісі X на кут θ (рис. 1, *в*).

Інші три можливих переміщення (поступальне переміщення у повздовжньому напрямку відносно осі X , кутове переміщення навколо вісі Z на кут ψ , поступальне переміщення у поперечному напрямку відносно осі Y), не можуть мати характеру коливального руху, оскільки вони не супроводжуються зміною величини або форми підводного об'єму корпусу ЗП [5, 6].

При коливаннях ЗП з вагонами на його борту в умовах хвилювання моря окрім оберткових переміщень навколо

поперечної та повздовжньої вісей, що проходять через його центр ваги, він отримує також переміщення, при якому ці вісі рухаються за деякими траєкторіями, близькими до кола. Це переміщення відбувається з періодом, який дорівнює періоду хвилі. Радіус вказаної траєкторії переміщення ЗП з вагонами на його борту може бути прийнятий в розрахунках рівним половині висоти морської хвилі.

Схеми переміщень кузова вагона, закріпленого відносно палуби ЗП ланцюговими стяжками в умовах хвилювання моря, наведені на рис. 1.

Суттєвий вплив на величину зусиль, які діють на кузова вагонів в умовах хвилювання моря, має розміщення їх відносно палуб ЗП. Так, на вагони, які знаходяться на крайніх від фальшборта коліях, при кутових переміщеннях ЗП навколо повздовжньої вісі будуть приходитися більші навантаження, ніж на вагони, які знаходяться ближче до діаметральної площини ЗП. Така ж ситуація простежується і при кутових переміщеннях ЗП навколо поперечної вісі, тобто на крайні від ахтерштевня вагони будуть приходитися більші зусилля, ніж на вагони, які розміщені ближче до площини мідель-шпангоута.

З метою визначення інерційної складової навантаження, яке діє на несучу конструкцію кузовів вагонів при перевезенні ЗП в умовах хвилювання моря на кафедрі “Вагони” УкрДАЗТ розроблено математичну модель переміщень кузова вагона ЗП, яка має вигляд:

$$D' \cdot \ddot{q}_1 + \Lambda_z \cdot \dot{q}_1 = \Lambda_z \cdot \dot{F}(t); \tag{2}$$

$$\left(0,07 \frac{0,8}{g} D \cdot L^2 \right) \ddot{q}_2 + \left(\Lambda_\varphi \cdot \frac{L}{2} \right) \dot{q}_2 = p' \cdot \frac{h}{2} + \Lambda_\varphi \cdot \frac{L}{2} \cdot \dot{F}(t); \tag{3}$$

$$\left(\frac{D}{12 \cdot g} (B^2 + 4z_g^2) \right) \ddot{q}_3 + \left(\Lambda_\theta \cdot \frac{B}{2} \right) \dot{q}_3 = p' \cdot \frac{h}{2} + \Lambda_\theta \cdot \frac{B}{2} \cdot \dot{F}(t), \tag{4}$$

де $q_1 = z, q_2 = \varphi, q_3 = \theta$ – узагальнені координати, що відповідають: z –

переміщенню кузова відносно вертикальної вісі, яка проходить через його центр мас,

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ

φ – кутовому переміщенню навколо поперечної вісі, θ – кутовому переміщенню навколо повздовжньої вісі. Початок системи координат розміщений в центрі мас ЗП.

D' – масове водовитіснення, т; D – вагове водовитіснення, кН; L , B – відповідно, довжина та ширина ЗП, м; h –

висота борта ЗП, м; Λ_i – коефіцієнт опору коливанням, кН · с · м⁻¹; z_g – координата центру ваги ЗП, м; p' – вітрове навантаження, кН; $F(t)$ – закон дії зусилля, яке збудує рух ЗП з кузовами вагонів, розміщеними на його палубах.

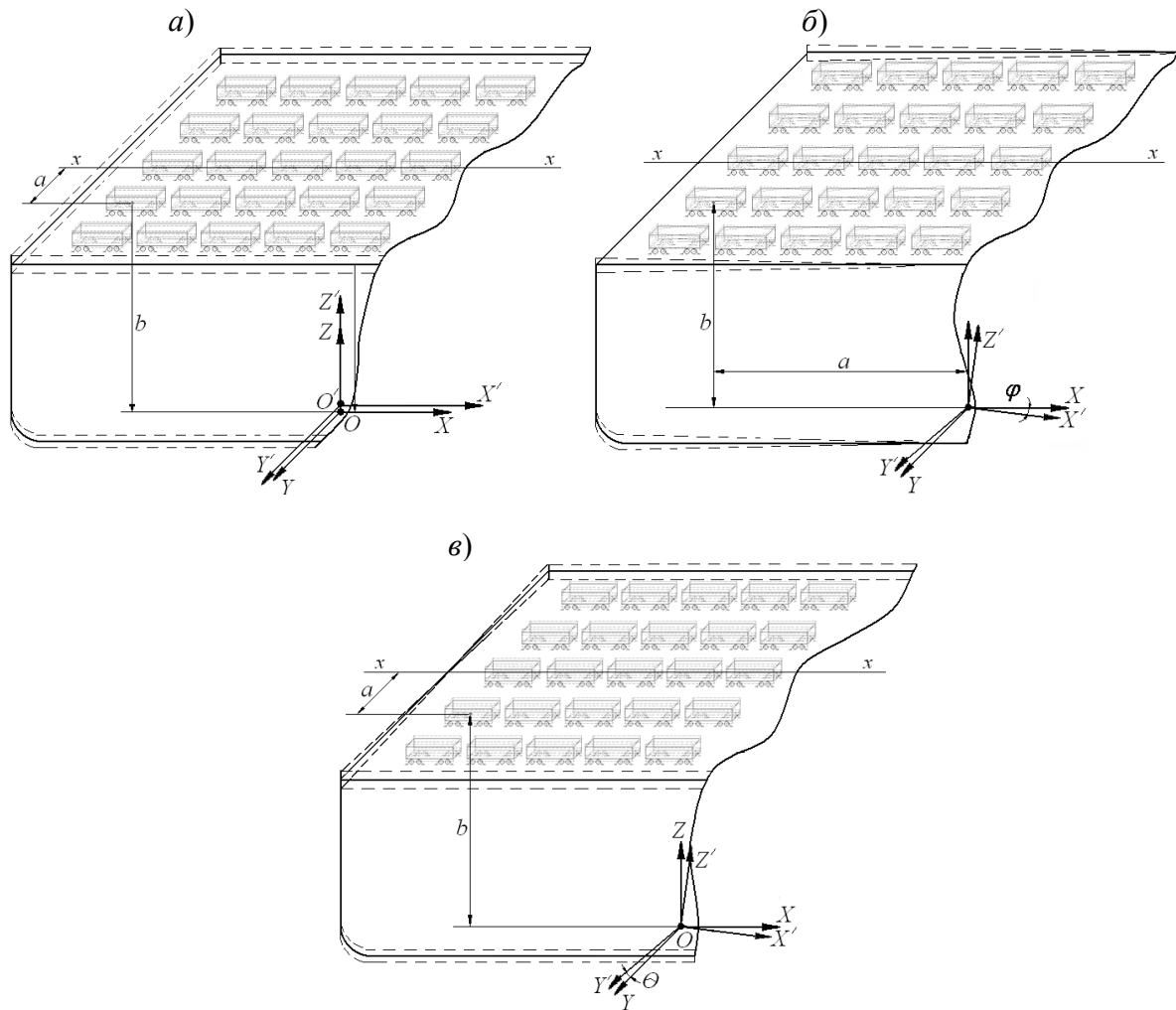


Рис. 1. Переміщення кузова вагона в умовах морського хвилювання
 а) в вертикальному напрямку; б) навколо поперечної вісі; в) навколо повздовжньої вісі

Коефіцієнт опору переміщенням ЗП визначений за наступною формулою:

$$\Lambda_i = \int_{-L/2}^{L/2} \rho \omega T^2 \bar{\Lambda}_i dL, \quad (5)$$

де $\bar{\Lambda}_i$ – безрозмірний коефіцієнт демпфірування, який визначається за графічними залежностями довідкової літератури, у відповідності з технічними характеристиками ЗП [7].

При складанні математичної моделі враховано, що кузов вагона жорстко

закріпленій відносно опорної площини і здійснює переміщення разом з нею. Ударна дія морських хвиль на корпус ЗП з вагонами, розміщеними на його борту не враховувалася [8].

Вхідні параметри математичної моделі: геометричні характеристики ЗП [9, 10], гідрометеорологічні характеристики акваторії Чорного моря [11], координати розміщення кузовів вагонів відносно центру коливань ЗП [12].

Вирішення диференціальних рівнянь руху кузова вагона (2-4) здійснено за допомогою методу варіації довільних постійних.

Переміщення системи у вертикальному напрямку та кутові навколо поперечної (повздовжньої) вісі, як загальні рішення мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 q_1 = & \frac{R \cdot e^{kb} \omega \Lambda_i}{2Dv} \left(-\frac{1}{\omega-v} \cos vt \cos(t(\omega-v)+ka) + \frac{1}{\omega-v} \cos vt \cos ka - \right. \\
 & - \frac{1}{\omega+v} \cos vt \cos(t(\omega+v)+ka) + \frac{1}{\omega+v} \cos vt \cos ka - \\
 & - \frac{1}{\omega-v} \cos vt \sin(ka-t(\omega-v)) + \frac{1}{\omega-v} \cos vt \sin ka - \frac{1}{\omega+v} \cos vt \times \\
 & \times \sin(ka+(t(\omega+v))) + \frac{1}{\omega+v} \cos vt \sin ka) + \frac{R \cdot e^{kb} \omega \Lambda_i}{2Dv} \left(\frac{1}{\omega-v} \sin vt \sin(ka+t(\omega-v)) \right. \\
 & - \frac{1}{\omega-v} \sin vt \sin ka + \frac{1}{\omega+v} \sin vt \sin(ka+t(\omega+v)) - \frac{1}{\omega+v} \sin vt \sin ka - \frac{1}{\omega-v} \sin vt \times \\
 & \times \cos(ka+t(\omega-v)) + \frac{1}{\omega-v} \sin vt \cos ka - \frac{1}{\omega+v} \sin vt \cos(ka+t(\omega+v)) + \frac{1}{\omega+v} \sin vt \\
 & \times \cos ka); \tag{6}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 q_2 = & \left[-\frac{R \cdot e^{kb} \omega \Lambda_i}{2I_i v} \left(-\frac{1}{\omega-v} \cos(t(\omega-v)+ka) + \frac{1}{\omega-v} \cos ka - \right. \right. \\
 & - \frac{1}{\omega+v} \cos(t(\omega+v)+ka) + \frac{1}{\omega+v} \times \cos ka - \frac{1}{\omega-v} \sin(ka-t(\omega-v)) + \frac{1}{\omega-v} \sin ka - \\
 & \left. \left. - \frac{1}{\omega+v} \sin(ka+(t(\omega+v))) + \frac{1}{\omega+v} \sin ka \right) + \frac{p' h}{I_i v^2} (\cos vt + 1) \right] \cos vt + \\
 & + \left[\frac{R \cdot e^{kb} \omega \Lambda_i}{2I_i} \left(\frac{1}{\omega-v} \sin(ka+t(\omega-v)) - \frac{1}{\omega-v} \sin ka + \frac{1}{\omega+v} \sin(ka+t(\omega+v)) - \right. \right.
 \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} & \frac{1}{\omega + \nu} \sin ka - \frac{1}{\omega - \nu} \times \cos(ka + t(\omega - \nu)) + \frac{1}{\omega - \nu} \cos ka - \frac{1}{\omega + \nu} \cos(ka + t(\omega + \nu)) + \\ & + \frac{1}{\omega + \nu} \cos ka \Big) + \frac{p' h \sin \nu t}{I_i \nu} \Big] \nu \sin \nu t, \end{aligned} \right. \quad (7)$$

де ν – частота вільних коливань ЗП з кузовами вагонів, розміщеними на палубах, c^{-1} ;

I_i – момент інерції маси ЗП відносно поперечної (повздовжньої) вісі, $kH \cdot m^2$.

Тоді, загальна величина прискорення кузова вагона дорівнює:

– при поступальних переміщеннях ЗП з кузовами вагонів, розміщеними на його палубах у вертикальному напрямку:

$$a_z = \ddot{q}_1 + g.$$

– при кутових переміщеннях навколо поперечної вісі:

$$a_\varphi = \ddot{q}_2 + g \sin \varphi.$$

– при кутових переміщеннях навколо повздовжньої вісі:

$$a_\theta = \ddot{q}_2 + g \sin \theta.$$

Для розв’язання диференціальних рівнянь руху кузова вагона складено програму розрахунку в середовищі пакету Mathcad [13, 14], для чого вони зводилися до нормальної форми Коші, після чого інтегрувалися за методом Рунге – Кутта. Отримані результати представлені на рис. 2 – 4.

При дослідженні динаміки кузовів вагонів за умови слідування акваторією моря посередництвом ЗП окремо розглянуто кожний вид коливального процесу, тривалість якого приймалася рівною періоду хвилі, характер збурювання – трохіодальним, амплітуда – рівною

максимальній висоті хвилі для заданої акваторії моря, а частота визначалася курсовим кутом хвилі по відношенню до корпусу ЗП.

На рис. 2, а) наведено прискорення кузова вагона в умовах поступальних переміщень ЗП у вертикальному напрямку з урахуванням різних курсових кутів хвилі по відношенню до корпусу

$$(0^0, 30^0, 45^0, 60^0, 90^0, 120^0, 135^0, 150^0, 180^0)$$

Максимальне значення прискорення спостерігається при курсовому куті хвилі по відношенню до площини корпусу ЗП $\chi = 60^0$, найменша періодичність прискорення спостерігається при $\chi = 135^0$.

Рис. 2, б) відображає прискорення кузовів вагонів, які знаходяться на головній палубі ЗП в умовах хвилювання моря. Максимальне значення прискорення спостерігається при курсовому куті хвилі по відношенню до площини корпусу ЗП $\chi = 60^0$.

З рис. 2, в), який відображає зміну прискорень вагонів трюмної палуби, видно, що максимальне значення прискорення спостерігається при курсовому куті хвилі по відношенню до корпусу ЗП $\chi = 60^0$.

Отже, величина прискорень вагонів при поступальних переміщеннях ЗП у вертикальному напрямку не залежить від їх розміщення за палубою відносно діаметральної та міделевої площин ЗП, а залежить від розміщення вагонів за висотою ЗП, тобто з віддаленням від центру коливань величина прискорень, які діють на вагони, розміщені за палубами, збільшується.

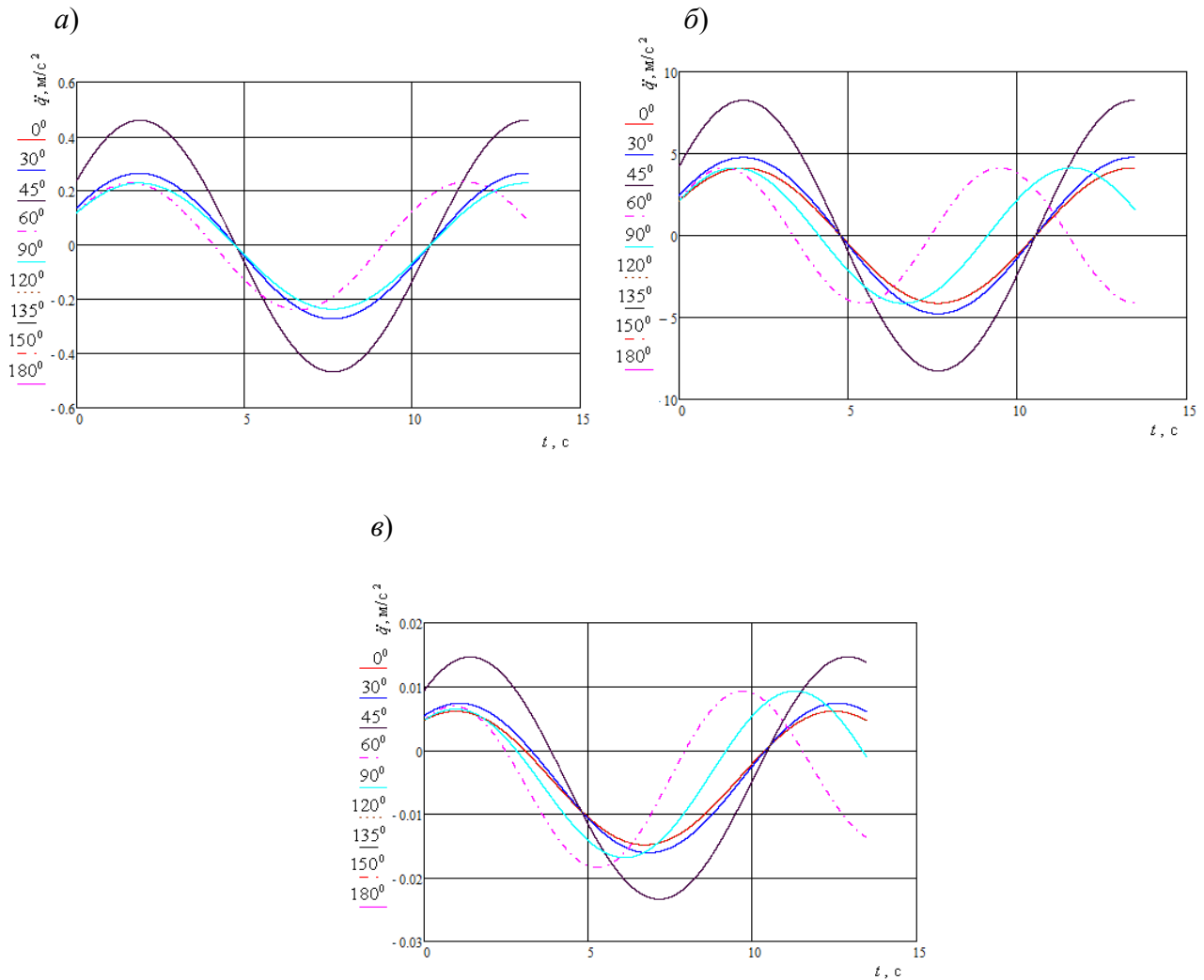


Рис. 2. Прискорення кузова вагону при поступальних переміщеннях ЗП у вертикальному напрямку
 а) для вагонів, розміщених на верхній палубі; б) для вагонів, розміщених на середній палубі; в) для вагонів, розміщених на трюмній палубі

Рис. 3, а) відображає прискорення крайнього від ахтерштевня (кормової частини) ЗП для вагона головної палуби в умовах хвилювання моря з урахуванням різних курсових кутів хвилі по відношенню до корпусу ЗП. Найбільшої величини прискорення досягає при курсовому куті хвилі по відношенню до корпусу ЗП $\chi = 120^\circ$.

На рис. 3, б) наведено прискорення вагону, розміщеного на площині мідельшпангоута головної палуби ЗП. Найбільша величина прискорень спостерігається при $\chi = 60^\circ$. В інших випадках величина прискорення має меншу величину. При

$\chi = 150^\circ$ та $\chi = 180^\circ$ прискорення має приблизно однакову періодичність.

Рис. 3, в) відображає характер прискорення крайнього з боку форштевня (носової частини ЗП) вагону головної палуби з урахуванням різних курсових кутів хвилі по відношенню до площини корпусу ЗП. Максимальне прискорення вагону виникає при $\chi = 120^\circ$. Найбільша періодичність прискорення простежується при $\chi = 120^\circ$.

На підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що величина прискорень вагонів при кутових переміщеннях ЗП навколо поперечної вісі

залежить від розміщення вагонів відносно площини мідель-шпангоута.

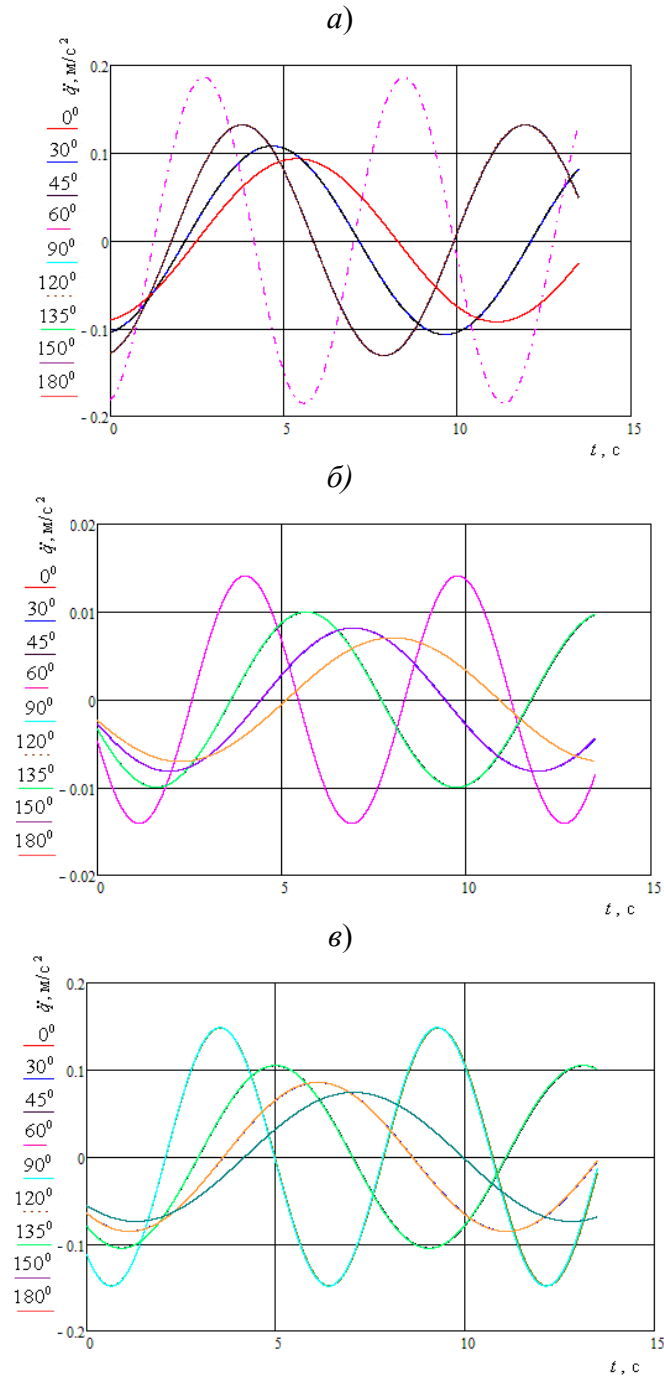


Рис. 3. Прискорення кузова вагону при кутових переміщеннях ЗП навколо поперечної вісі
 а) для крайнього зі сторони ахтерштевня ЗП вагону головної палуби; б) для вагону, розміщеного на площині мідель-шпангоуту головної палуби; в) для крайнього зі сторони форштевня ЗП вагону головної палуби

Рис. 4, а) відображає прискорення вагонів, розміщених на крайній від фальшборта колії верхньої палуби ЗП при кутових переміщеннях навколо повздовжньої вісі. Найбільша величина прискорення вагонів виникає при

$\chi = 120^\circ$. В інших випадках величина прискорення має менше значення. Найбільша періодичність зміни прискорення спостерігається при $\chi = 120^\circ$.

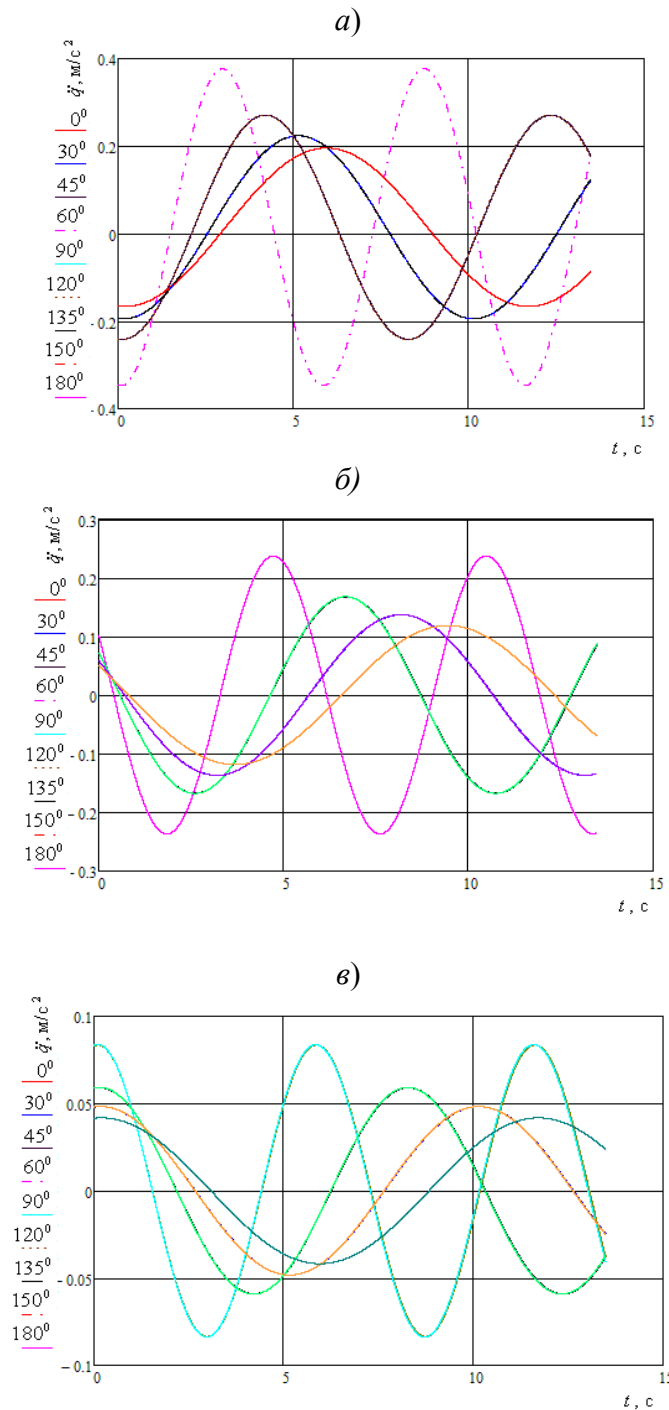


Рис. 4. Прискорення кузова вагону при кутових переміщеннях ЗП навколо повздовжньої вісі

а) для вагонів, розміщених на крайній від фальшборта колії верхньої палуби; б) для вагонів, розміщених на другій від фальшборта колії верхньої палуби; в) для вагонів, розміщених на середній колії верхньої палуби ЗП

На рис. 4, б) наведено прискорення вагонів, розміщених на другій від фальшборта колії верхньої палуби ЗП. Максимальні прискорення виникають при

$\chi = 60^\circ$. Найбільша періодичність прискорення виникає при $\chi = 60^\circ$.

На рис. 4, в), наведено прискорення

вагонів, розміщених на середній колії верхньої палуби ЗП. Максимальна величина прискорення виникає при $\chi = 120^\circ$. В інших випадках в початковий момент часу процесу прискорення має приблизно однакову величину. Найменша періодичність прискорення простежується при $\chi = 180^\circ$ та $\chi = 150^\circ$, а найбільша – при $\chi = 120^\circ$. Отже, величина прискорення кузовів вагонів при кутових переміщеннях ЗП навколо повздовжньої вісі залежить від розміщення їх відносно діаметральної площини.

Висновки

На підставі проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Розроблена математична модель щодо визначення характеру та особливостей переміщень кузовів вагонів при перевезенні на ЗП морем надає можливість визначення прискорень кузовів вагонів, розміщених на багатопалубних ЗП, з урахуванням курсових кутів хвилі по відношенню до корпусу та вітрового навантаження, що діє на надводну проекцію ЗП з кузовами вагонів, розміщеними на палубах;

2. Для дійсних умов хвилювання акваторії Чорного моря отримано величини максимальних прискорень, які діють на кузова вагонів, розміщених відносно палуб ЗП, які склали: при переміщенні кузова в вертикальному напрямку для вагона, розміщеного на верхній палубі – $8,2 \text{ м/с}^2$, при кутовому відносно поперечної вісі для крайнього від ахтерштевня кузова вагону – $0,6 \text{ м/с}^2$, при кутовому навколо повздовжньої вісі для крайнього від фальшборта кузова вагону – $2,4 \text{ м/с}^2$;

3. Проведені дослідження сприятимуть підвищенню безпеки руху вагонів на ЗП морем, а також розширенню п. 2.18 “Норм...” [15], з урахуванням внесення уточнених величин прискорень, які діють на кузова вагонів при перевезенні

різними типами ЗП та відповідних характеристик акваторій їх плавання.

Список літератури:

1. Землезин И. Н. Методика расчета и исследования сил, действующих на вагон при транспортировке на морских парамах / И. Н. Землезин – М.: Транспорт, 1970. – 104 с.

2. Наставление по креплению груза для т/х “Петровск” ПР. № 002CNF001 – ЛМПЛ – 805. – Офиц. изд. – Одесса: МИБ, 2005. – 52 с.

3. Візньак Р.І. Дослідження умов експлуатації вагонів при перевезенні їх залізнично-поромним судном / Р.І. Візньак, В.В. Шевченко, А.О. Ловська, О.А. Угніч // Залізничний транспорт України, 2009. – № 1 – С. 16 – 19.

4. Луговский В. В. Динамика моря: Избр. вопросы связ. с учением мореходности корабля: [Учебник для втузов по специальности “Гидроаэродинамика”] / В. В. Луговский. – Л.: Судостроение, 1976. – 199 с.

5. Шиманский Ю. А. Динамический расчет судовых конструкций / Ю. А. Шиманский. – Л.: Государственное издательство судостроительной промышленности, 1963. – 444 с.

6. Благовещенский С. Н. Справочник по статике и динамике корабля. В двух томах. Изд. 2 – е. перераб. и доп. Том 2. Динамика (качка) корабля / С. Н. Благовещенский, А. Н. Холодилин. – Л., “Судостроение”, 1975. – 176 с.

7. Маков Ю. Л. Качка судов / Ю. Л. Маков. – Калининград, “КГТУ”, 2007. – 321 с.

8. Визньак Р. И. Уточнение величин усилий, которые действуют на кузова вагонів при их перевозке железнодорожными парамами / Визньак Р. И., Ловская А. А. // Вестник ВНИИЖТа, 2013. – №2 – С. 20 – 27.

9. Наставление по креплению генеральных грузов при морской перевозке для т/х “Герои Шипки”. Cargo securing manual for m/v “Geroi Shipky” № 2512. 02. –

Офиц. изд. – Одесса: Мин. транспорта Украины. Гос. департамент морского и речного транспорта. 1997. – 51 с.

10. Васильев В. Железнодорожные паромы для линии Ильичевск – Варна / В. Васильев // Морской флот. – 1976. – №12. – С. 16.

11. Ветер и волны в океанах и морях: справочные данные [под ред. И.Н. Давидана] – Л.: Транспорт, 1974. – 360 с.

12. Суколенов А. Е. Международная паромная переправа Ильичевск – Варна / А. Е. Суколенов, Э. Захариев, И. Г. Гутин и др. – М.: Транспорт, 1989. – 103 с.

13. Дьяконов В. MATHCAD 8/2000: специальный справочник / В. Дьяконов. – СПб: Питер, 2000. – 592 с.

14. Кирьянов Д. В. Mathcad 13 / Д.В. Кирьянов. – СПб.: БХВ – Петербург, 2006. – 608 с.

15. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М.: ГосНИИВ – ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.

Анотації:

В статті наведені результати досліджень динаміки кузовів вантажних вагонів при перевезенні на залізничних паромках в умовах морської хитавиці

з урахуванням різних курсових кутів хвилі по відношенню до корпусу. Розглядаються основні види коливального руху вагона в умовах хвилювання моря, які впливають на міцність та стійкість його відносно палуби залізничного парому.

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

В статті представлені результати досліджень динаміки кузовів грузових вагонів при перевозке на железнодорожных паромках в условиях морской качки с учетом различных курсовых углов волны по отношению к корпусу. Рассматриваются основные виды колебательного движения вагона в условиях волнения моря, которые оказывают влияние на прочность и устойчивость его относительно палубы железнодорожного паромка.

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

The article deals with the freight 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.

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

УДК 621.512

ЧУБИКАЛО М.Б., к.т.н., доцент (УкрДАЗТ)
ЛОГВИНЕНКО О.А., к.т.н., доцент (УкрДАЗТ)

Динамічне дослідження двокамерного шибєрного компресора

Постановка проблеми

В нинішній час в системах повітропостачання рухомого складу Укрзалізниці і метрополітену в більшості застосовуються поршневі компресори (КТ-6, КТ-7, К-3, ПК-3,5, ПК-5,25, ЭК-4), які

при достатній продуктивності, тиску нагнітання та задовільній експлуатаційній надійності характеризуються досить великими масо-габаритними показниками, витратами потужності на привод, а також мають відносно малий термін безперервної роботи на номінальному режимі внаслідок швидкого досягнення деталями граничних