

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ВАГОНІВ-ЦИСТЕРН ПРИ ПЕРЕВЕЗЕННІ ЇХ ЗАЛІЗНИЧНО-ПОРОМНИМ СУДНОМ В УМОВАХ МОРСЬКОЇ КАЧКИ

У статті наведено результати дослідження динаміки вагона-цистерни при перевезенні його залізнично-поромним судном в умовах морської качки з урахуванням недоливу котла наливним вантажем та різних курсових кутів хвилі по відношенню до корпусу судна. Визначено величини прискорень, які виникають за даних умов експлуатації та спричиняють вплив на міцність та стійкість вагонів відносно палуби судна.

В статье представлены результаты исследований динамики вагона-цистерны при перевозке его железнодорожно-паромным судном в условиях морской качки с учетом недолива котла наливным грузом и различных курсовых углов волны по отношению к корпусу судна. Определены величины ускорений, которые возникают при данных условиях эксплуатации и оказывают воздействие на прочность и устойчивость вагонов относительно палубы судна.

The article is dealt with the results of dynamics research of cistern car while transporting it by the railway-ferry ship in conditions of sea rolling and pitching taking into account the incomplete filling of boiler by the bulk cargo and different wave route movement in relation to the ferry ship body. The acceleration values, which appear in the given conditions of its operation and make impact on the car strength and stability relative to the ship deck, have been determined.

### Постановка проблеми

У теперішній час, коли підвищення інтенсифікації взаємодії окремих галузей транспортного процесу України забезпечує прискорення інтегрування її складових у систему міжнародних транспортних коридорів, однією з важливих комбінацій у цьому напрямку є залізнично-поромні перевезення, тому покращенню ефективності їх експлуатації необхідно приділити особливу увагу з метою відпрацювання принципів нових технічних рішень.

Зараз в Україні експлуатуються чотири поромні маршрути: Тамань – Керч (Росія – Україна), Іллічівськ – Варна (Україна – Болгарія), Іллічівськ – Поті – Батумі (Україна – Грузія), Іллічівськ – Дериндже (Україна – Туреччина) і, враховуючи подальші темпи розвитку нових транспортних шляхів, це далеко не остання цифра.

Питанню розміщення та надійності закріплення вагонів відносно палуб залізнично-поромних суден необхідно приділяти особливу увагу, оскільки від цих факторів, головним чином, залежить остійність поромних суден, а також збереження залізничного рухомого складу і вантажів.

Аналіз статистичних даних аварійних ситуацій поромних суден з вагонами на борту дозволяє у першому наближенні зробити висновок, що головною причиною зниження остійності судна є зміщення вагонів зі своїх штатних

місць щодо заданого каргоплану в умовах морської качки судна.

### Аналіз останніх досліджень

Відомо, що залізнично-поромні переправи здійснюють перевезення широкої номенклатури вантажів, серед яких одним із найпоширеніших є наливні у вагонах-цистернах (наприклад, в 2007 р. обсяг перевезень наливних вантажів через Іллічівський поромний комплекс склав 79 тис. т, а через комплекс морської залізничної поромної переправи в порту «Крим» – 920 тис. т)<sup>1</sup>.

Вперше перевезення вагонів-цистерн через водну перешкоду відбулося під час Великої Вітчизняної війни, саме тоді у стратегічних цілях необхідно було здійснити переправу наливного вантажу через р. Волга, а за відсутності перехідного моста зчепи з котлів вагонів-цистерн спускали на воду і переправляли їх таким чином за допомогою буксира.

Пізніше почали перевозити вагони-цистерни за допомогою спеціально переобладнаних для цього суден, наприклад, в 1962 р. був переобладнаний однопалубний ліхтер «Ішимбай», який використовувався для перевезення залізничного рухомого складу із Баку в порти північного та східного прибережжя Каспію.

<sup>1</sup> частка наливного вантажу у загальному обсягу імпортованих перевезень через поромну переправу «Крим – Кавказ» у 2007 р. склала практично 100 %.

У зв'язку з розширенням географії поромного сполучення, підвищенням швидкостей руху, і таким чином, мінімізацією часу перевезень особливу увагу необхідно приділити дослі-

дженню динаміки вагонів-цистерн за умови знаходження на поромних судах при слідкуванні акваторією моря (рис. 1).

а)



б)



Рис. 1. Розміщення вагонів-цистерн на палубах залізнично-поромних суден під час руху морем: а) «Герои Одессы»; б) «Петровск»

### Викладення основного матеріалу

Суттєвий вплив на безпеку руху вагонів-цистерн і стійкість проти перекидання у складі поїзда має недолив котла наливним вантажем. Згідно досліджень проф. Г. І. Богомаза (ДІТ), величина недоливу в експлуатації складає приблизно  $0,1 \dots 0,5$  радіусу котла [1].

Тому вважаємо, що актуальним є дослідження динаміки вагонів-цистерн при перевезенні їх поромними суднами в умовах морського хвилювання з урахуванням недоливу котла наливним вантажем та різних курсових кутів хвилі по відношенню до корпусу поромного судна, що може суттєво вплинути на надійність перевізного процесу і експлуатації комбінованого транспорту.

При побудові наближеної до реальних умов фізичного процесу коливань математичної моделі було враховано технологію перевезення вагонів вітчизняними поромними суднами, прийнята на Іллічівському поромному комплексі, де для обмеження переміщень вагонів під надресорні балки встановлюються механічні упор-домкрати з метою обезвантаження елементів ресорного підвішування, згідно [2], а також технологія, що застосовується на ДП «ТИС-Крим», де для скорочення часу простою поромних суден закріплюють тільки крайні від ахтерштевня вагони, згідно [3].

При традиційному підході до розрахунку котла вагона-цистерни приймаються наступні припущення: основна маса наливного вантажу закріплюється ковзаючою по стінках котла кришкою, внаслідок чого стає можливим моделювати його як маятника на біфілярному<sup>1</sup> підвісі, що значно спрощує розрахунок [4].

З метою визначення величини прискорення вагонів-цистерн в умовах хвилювання моря були складені диференційні рівняння їх руху для основних видів морської качки (вертикальної (1), кільової (2) та бортової (3)) з урахуванням гідрометеорологічних умов акваторії плавання суден з використанням принципу Лагранжа II роду та їх розв'язання.

В якості узагальненої координати кожного члену диференційного рівняння враховувалися переміщення: 1) залізнично-поромного судна відносно поверхні моря; 2) переміщення, яке зумовлено наявністю вільної поверхні наливного вантажу; 3) котла вагона-цистерни посередництвом роботи ресорного підвішування, наливного вантажу та поромного судна.

Для визначення приєднаного моменту інерції наливного вантажу в умовах кільової та бортової видів качки використовувалася методика члена УАН, проф. С. Ф. Феценко [5].

Розв'язання рівнянь здійснювалося за допомогою програмного комплексу MathCad.

Результати проведеного дослідження наведено у вигляді графіків на рис. 2 – 6.

$$\begin{cases} a_{11}^z \ddot{q}_1 - b_{11}^z q_1 + c_{11}^z \dot{q}_1 = F_{nc}^z(t); \\ a_{22}^z (\ddot{q}_2 + \ddot{q}_1) + b_{22}^z (q_2 + q_1) + c_{22}^z (\dot{q}_2 + \dot{q}_1) = \\ = F_{nb}^z(t); \\ a_{33}^z (\ddot{q}_3 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_1) + b_{33}^z (q_3 + q_2 + q_1) + \\ + c_{33}^z (\dot{q}_3 + \dot{q}_2 + \dot{q}_1) = F_{vc}^z(t). \end{cases} \quad (1)$$

<sup>1</sup> біфілярний (від біфіляр (бі- + лат. «filum» – нитка)) – той, що складається із двох ниток (підвісів).

$$\begin{cases} a_{11}^x \times \ddot{\varphi}_1 - b_{11}^x \times \varphi_1 + c_{11}^x \times \dot{\varphi}_1 = F_{nc}^x(t); \\ a_{22}^x (\ddot{\varphi}_2 + \ddot{\varphi}_1) + b_{22}^x (\varphi_2 + \varphi_1) + c_{22}^x (\dot{\varphi}_2 + \\ + \dot{\varphi}_1) = F_{hb}^x(t); \\ a_{33}^x (\ddot{\varphi}_3 + \ddot{\varphi}_2 + \ddot{\varphi}_1) + b_{33}^x (\varphi_3 + \varphi_2 + \varphi_1) + \\ + c_{33}^x (\dot{\varphi}_3 + \dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_1) = F_{vc}^x(t). \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} a_{11}^y \times \ddot{\theta}_1 - b_{11}^y \times \theta_1 + c_{11}^y \times \dot{\theta}_1 = F_{nc}^y(t); \\ a_{22}^y (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_1) + b_{22}^y (\theta_2 + \theta_1) + c_{22}^y (\dot{\theta}_2 + \\ + \dot{\theta}_1) = F_{hb}^y(t); \\ a_{33}^y (\ddot{\theta}_3 + \ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_1) + b_{33}^y (\theta_3 + \theta_2 + \theta_1) + \\ + c_{33}^y (\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1) = F_{vc}^y(t), \end{cases} \quad (3)$$

де  $a_{11}^i, a_{22}^i, a_{33}^i$  – маса та моменти інерції (відносно поздовжньої та поперечної осей) поромного судна, наливного вантажу (бензин<sup>1</sup>) та вагона-цистерни;

$b_{11}^i, b_{22}^i, b_{33}^i$  – складові потенційної енергії поромного судна, наливного вантажу та вагона-цистерни при вертикальній, кільовій та бортовій видах качки;

$c_{11}^i, c_{22}^i, c_{33}^i$  – коефіцієнти опору вертикальній, кільовій та бортовій видам качки поромного судна, наливного вантажу та вагона-цистерни;

$q_{1,2,3}, \dot{q}_{1,2,3}, \ddot{q}_{1,2,3}, \varphi_{1,2,3}, \dot{\varphi}_{1,2,3}, \ddot{\varphi}_{1,2,3}, \theta_{1,2,3}, \dot{\theta}_{1,2,3}, \ddot{\theta}_{1,2,3}$  – відповідно, узагальнені координати, швидкості та прискорення при вертикальній, кільовій та бортовій видах качки;

$F_{nc}^i(t), F_{hb}^i(t), F_{vc}^i(t)$  – відповідно, збурюючі зусилля, які діють на поромне судно, наливний вантаж та вагон-цистерну при вертикальній, кільовій та бортовій видах качки.

При дослідженні динаміки вагонів-цистерн з урахуванням обезвантаження їх ресорного підвішування, зазначену вище систему доцільно звести до розв'язання двох диференціальних рівнянь руху, першим з яких описується переміщення поромного судна відносно поверхні моря, а другим – наливного вантажу:

$$\begin{cases} a_{11}^z \times \ddot{q}_1 - b_{11}^z \times q_1 + c_{11}^z \times \dot{q}_1 = F_{nc}^z(t); \\ a_{22}^z (\ddot{q}_2 + \ddot{q}_1) + b_{22}^z (q_2 + q_1) + \\ + c_{22}^z (\dot{q}_2 + \dot{q}_1) = F_{hb}^z(t), \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} a_{11}^x \times \ddot{\varphi}_1 - b_{11}^x \times \varphi_1 + c_{11}^x \times \dot{\varphi}_1 = F_{nc}^x(t); \\ a_{22}^x (\ddot{\varphi}_2 + \ddot{\varphi}_1) + b_{22}^x (\varphi_2 + \varphi_1) + \\ + c_{22}^x (\dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_1) = F_{hb}^x(t), \end{cases} \quad (5)$$

На рис. 2 наведено динаміку прискорень вагонів-цистерн при вертикальній качці залізнично-поромних суден «Петровск» (однопалубне судно, що здатне перевозити по 25 залізничних вагонів; на палубі порому даного типу є чотири залізничні колії для завантаження та розміщення вагонів) (рис. 2, а) та «Герои Шипки» (трьохпалубне судно, яке може прийняти на свій борт 108 залізничних вагонів; для подачі вагонів на верхню та трюмну палуби пором обладнаний гідравлічним ліфтом, а для встановлення їх на штатні місця передбачено судові локомотиви – унілоки) (рис. 2, б).

Отримані величини прискорень вагонів-цистерн в умовах кільової качки залізнично-поромного судна «Петровск» з урахуванням гідрометеорологічних факторів акваторії плавання, які враховувалися при побудові математичної моделі, мають невелике значення, тому їх графіки не наводяться.

На рис. 3 наведено прискорення вагонів-цистерн при бортовій качці залізнично-поромного судна «Петровск» для вагонів, розміщених на крайній та на другій від фальшборту коліях. Як видно з графіків, величини прискорень мають приблизно однакову величину.

Найбільша величина прискорень при вертикальній качці залізнично-поромного судна «Герои Шипки» приходить на вагони верхньої палуби судна (рис. 2, б), при кільовій та бортовій – на найбільш віддалені від точки дії збурюючої сили вагони (рис. 4, 5).

Загальна величина прискорення буде складатися з прискорення вагона відносно палуби поромного судна та складової прискорення вільного падіння.

Отримані величини прискорень вагонів-цистерн при перевезенні їх морем перевищують допустимі, які встановлені для експлуатаційних умов на залізничних коліях [6]. Наприклад, з урахуванням допустимої оцінки ходу вагона величина горизонтального прискорення кузова вантажного вагона в навантаженому стані складає 0,45g. В нашому випадку, при бортовій качці залізнично-поромного судна, загальна величина прискорення склала 0,53g, що перевищує допустиме значення на 15 %.

<sup>1</sup> Бензин є одним з найбільш обертових у залізнично-поромному сполученні наливних вантажів.

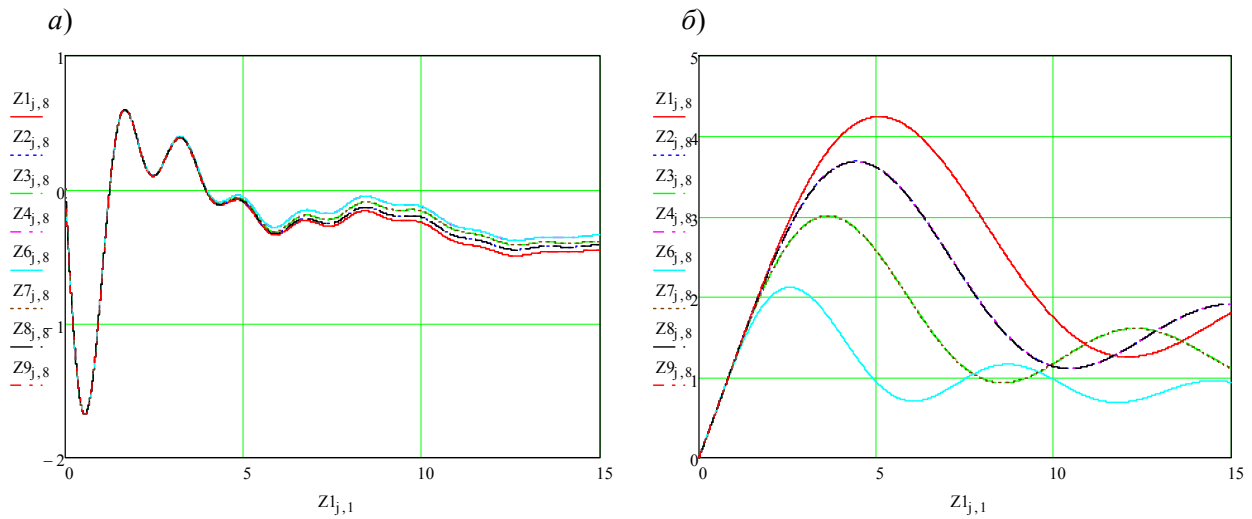


Рис. 2. Прискорення вагона-цистерни при вертикальній качці залізнично-поромного судна.

Курсові кути хвилі по відношенню до корпусу поромного судна:

$$Z1_{\gamma,8} = 0^{\circ}; Z2_{\gamma,8} = 30^{\circ}; Z3_{\gamma,8} = 45^{\circ}; Z4_{\gamma,8} = 60^{\circ}; Z5_{\gamma,8} = 90^{\circ}; Z6_{\gamma,8} = 120^{\circ}; Z7_{\gamma,8} = 135^{\circ}; Z8_{\gamma,8} = 150^{\circ};$$

$$Z9_{\gamma,8} = 180^{\circ}; Z1_{\gamma,1} - \text{час процесу:}$$

а) для вагона-цистерни, розміщеного на палубі поромного судна «Петровск»;

б) для вагона-цистерни, розміщеного на верхній палубі поромного судна «Герои Шипки»

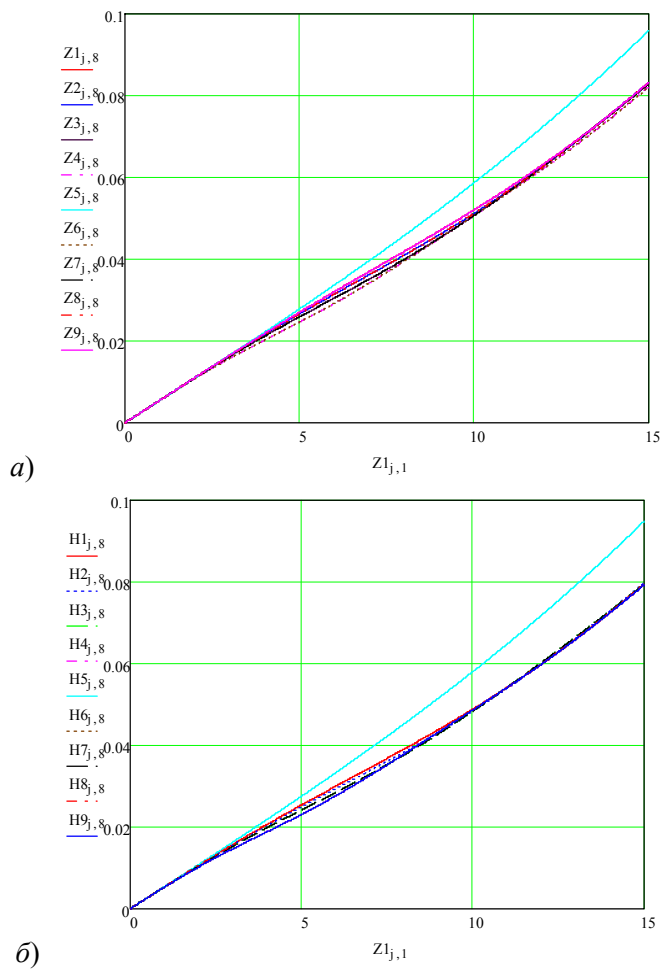


Рис. 3. Прискорення вагонів-цистерн при бортовій качці залізнично-поромного судна «Петровск»:

а) для крайнього від фальшборту вагона-цистерни; б) для другого від фальшборту вагона-цистерни

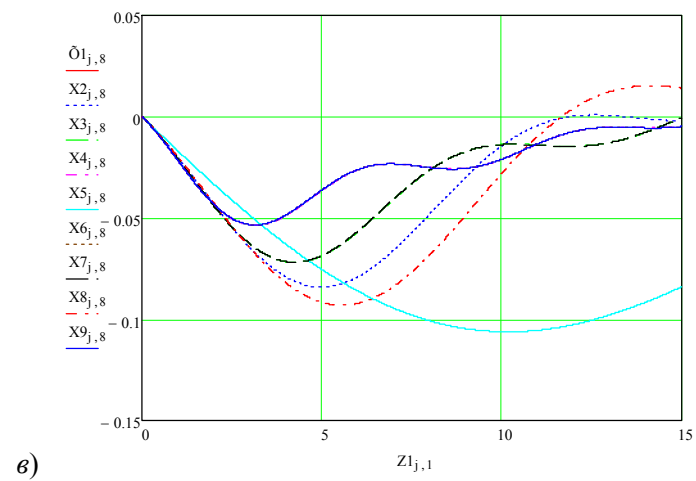
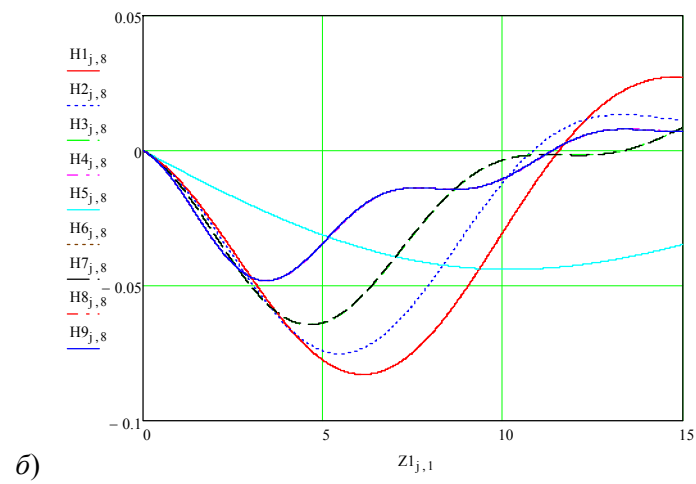
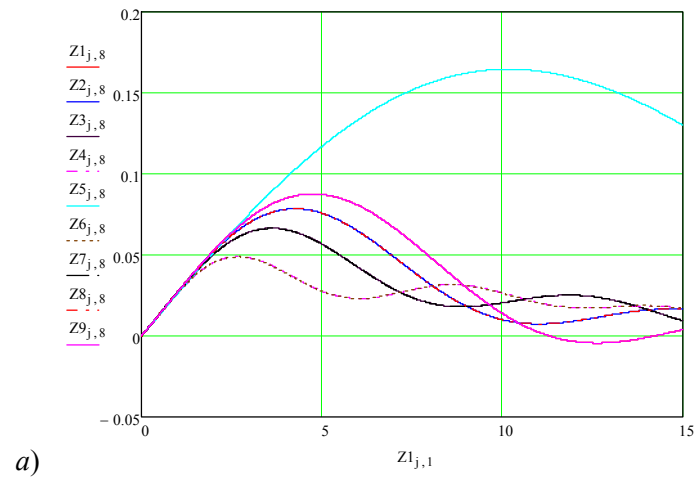


Рис. 4. Прискорення вагонів-цистерн при кільвій качці залізнично-поромного судна «Герои Шипки»:  
 а) для вагона-цистерни, який знаходиться в ахтерштевневій частині поромного судна;  
 б) для вагона-цистерни, який знаходиться в міделевій частині;  
 в) для вагона-цистерни, який знаходиться у форштевневій частині

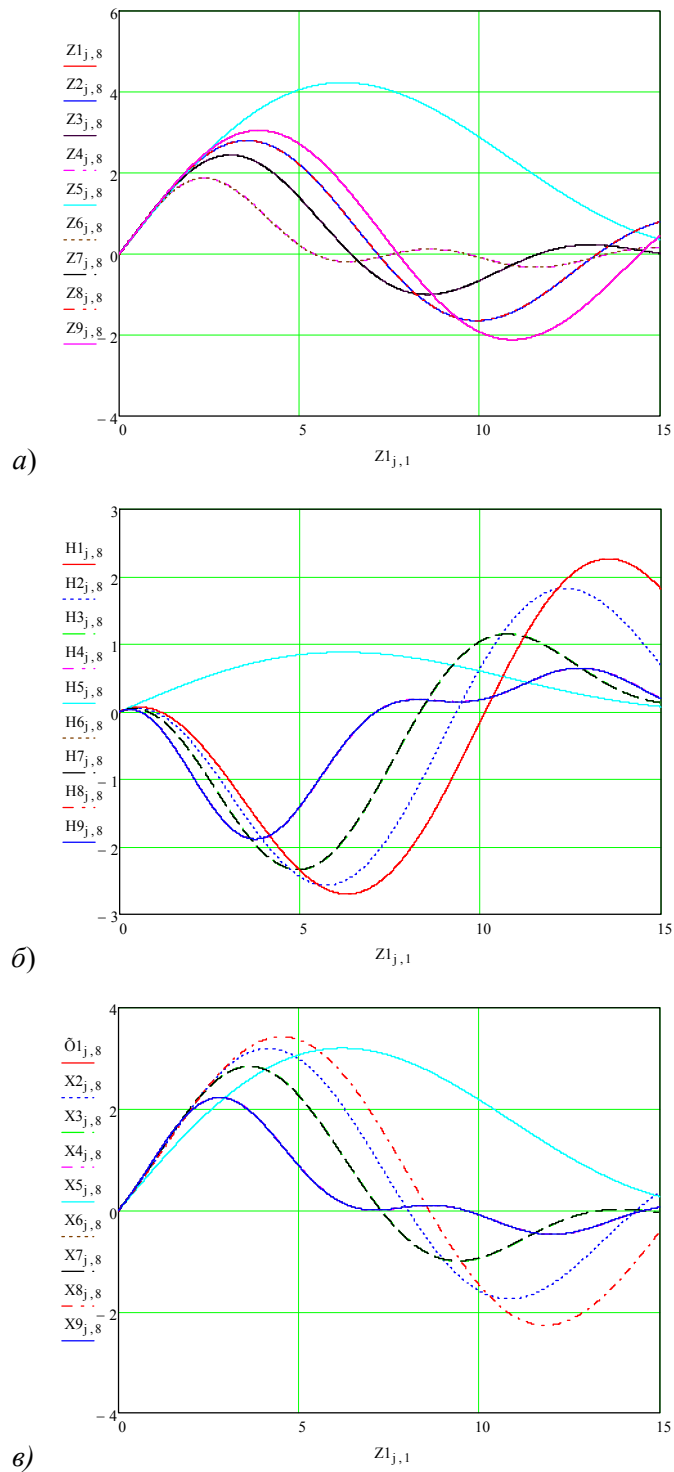


Рис. 5. Прискорення вагонів-цистерн при бортовій качці залізнично-поромного судна «Герои Шипки»:  
 а) для крайнього від фальшборта вагона-цистерни;  
 б) для другого від фальшборта вагона-цистерни;  
 в) для вагона-цистерни, розміщеного на середній колії поромного судна

### Висновки

Результати проведеного дослідження дозволяють оцінити загальну величину прискорень вагонів-цистерн при перевезенні їх поромним судном в умовах хвилювання моря та з урахуванням недоливу котлів наливним вантажем.

Завдяки чому стає можливим покращити коефіцієнт стійкості вагонів проти перекидання шляхом обирання найбільш сприятливого місця їх розміщення відносно палуби поромного судна.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Богомаз, Г. И. Динамика железнодорожных вагонов-цистерн [Текст] / Г. И. Богомаз. – К.: Наук. думка, 2004. – 224 с.
2. Единый технологический процесс работы берегового паромного комплекса Ильичевск [Текст]. – Д.: ДИИТ, 1987. – 126 с.
3. Технологический процесс работы станции Крым Приднепровской железной дороги и «Комплекса морской железнодорожной паромной переправы» в порту Крым [Текст]. – Керчь, 2004. – 56 с.
4. Черкашин, Ю. М. Динамика наливного поезда [Текст] / Ю. М. Черкашин // Тр. ЦНИИ МПС. – Вып. 543. – М.: Транспорт, 1975. – 136 с.
5. Методы определения присоединенных масс жидкости в подвижных полостях [Текст] / С. Ф. Фещенко и др. – К.: Наук. думка, 1969. – 250 с.
6. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) [Текст]. – М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.

Надійшла до редколегії 28.12.2009.

Прийнята до друку 14.01.2010.