

УДК 629.114.2

В. В. Глущенко, М. А. Подригало, Д. В. Абрамов

ОЦІНЮВАННЯ СТІЙКОСТІ АВТОМОБІЛІВ-ЦИСТЕРН ПРОТИ ПЕРЕКИДАННЯ В ПОПЕРЕЧНІЙ ПЛОЩИНІ

Наведені результати дослідження з підвищення стійкості автомобілів-цистерн проти перекидання в поперечній площині шляхом визначення діапазону допустимих значень коефіцієнта заповнення цистерн рідиною.

К л ю ч о в і с л о в а: автомобіль-паливозаправник, бічне прискорення, коефіцієнт заповнення об'єму цистерни, стійкість положення, енергія удару рідини, енергія стабілізації положення.

Постановка проблеми. Найбільш частим випадком втрати автомобілем-цистерною стійкості положення є перекидання в поперечній площині.

У цій статті, використовуючи раніше запропонований критерій – енергетичний коефіцієнт динамічної стійкості положення автомобіля, проведено дослідження умов стійкості автомобілів-цистерн в поперечній площині. На прикладі автомобіля-паливозаправника АПЗ-8-531605 (на шасі автомобіля МАЗ-531605) визначено, що у разі заправлення різними рідинами останній зберігає стійкість положення в поперечній площині, якщо ступінь заповнення об'єму цистерни η_0 більше 0,35 або менше 0,03.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню стійкості проти перекидання автомобілів-цистерн присвячено значну кількість наукових праць [1–5]. Досліджено динамічну навантаженість і стійкість автомобілів для перевезення рідких вантажів при гальмуванні [1, 3] і рівномірному русі [2]. Фундаментальні дослідження динамічного навантаження автомобілів-цистерн і їх стійкості руху наведені у праці [4]. Однак у зазначених дослідженнях [1–4] не запропоновано прості критеріальні вирази для оцінювання стійкості положення автомобілів-цистерн.

Для оцінювання курсової стійкості автомобіля проти заносу в статті [5] запропоновано критерій – коефіцієнт стійкості, що є відношенням моменту $M_{стаб}$, стабілізуючого занос, до моменту $M_{зб}$, що занос збурює

$$K_{уст} = \frac{M_{стаб}}{M_{зб}}. \quad (1)$$

У статті [6] поняття коефіцієнта стійкості узагальнено на стійкість положення автомобіля. Проте коефіцієнт стійкості використовувався у статтях [5, 6] для оцінювання стійкості автомобілів, що перевозять тверді вантажі. Він непридатний для оцінювання стійкості автомобілів-цистерн, оскільки не враховує енергії удару рідини, що має свободу переміщення відносно цистерни. З урахуванням цього у праці [7] запропоновано енергетичний коефіцієнт динамічної стійкості положення автомобіля цистерни

$$K_{едсн} = \frac{W_{стаб}}{W_{уд}}, \quad (2)$$

де $W_{стаб}$ – енергія стабілізації автомобіля при перекиданні, визначається збільшенням потенційної енергії машини до моменту втрати стійкості проти перекидання; $W_{уд}$ – енергія удару рідини об стінки цистерни.

$$W_{уд} = W_{кін} - W_{ном}, \quad (3)$$

де $W_{кін}$, $W_{ном}$ – зміни кінетичної і потенційної енергії рідини при розгоні або гальмуванні автомобіля.

Однак у праці [7] не розглянуті умови стійкості автомобіля-цистерни проти перекидання в поперечній площині.

Метою статті є дослідження підвищення стійкості автомобілів-цистерн проти перекидання в поперечній площині шляхом визначення діапазону допустимих значень коефіцієнта заповнення цистерн рідиною.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- визначити енергію удару рідини об стінки цистерни при дії на автомобіль бічних прискорень;
- визначити енергію стабілізації положення автомобіля в поперечній площині при дії бічних прискорень;
- на прикладі автомобіля-паливозаправника АПЗ-8-531605 визначити зону допустимих значень коефіцієнта заповнення об'єму цистерни, за яких $K_{едсн} \geq 1$.

Виклад основного матеріалу. На рис. 1 наведено вихідні розрахункові схеми для визначення положення центра мас рідини у разі появи і дії бічного прискорення на автомобіль при не повністю заповненій цистерні. Варіанти заповнення рідиною об'єму цистерни у випадку дії бічного прискорення, представлені на рис. 1, б; 1, в; 1, з, відрізняються від варіантів заповнення цистерни у разі дії поздовжнього прискорення [7], оскільки $H \approx B$. У праці [7] розглянуто варіант, при якому $A > H$ (розглянута поздовжня площина перетину цистерни).

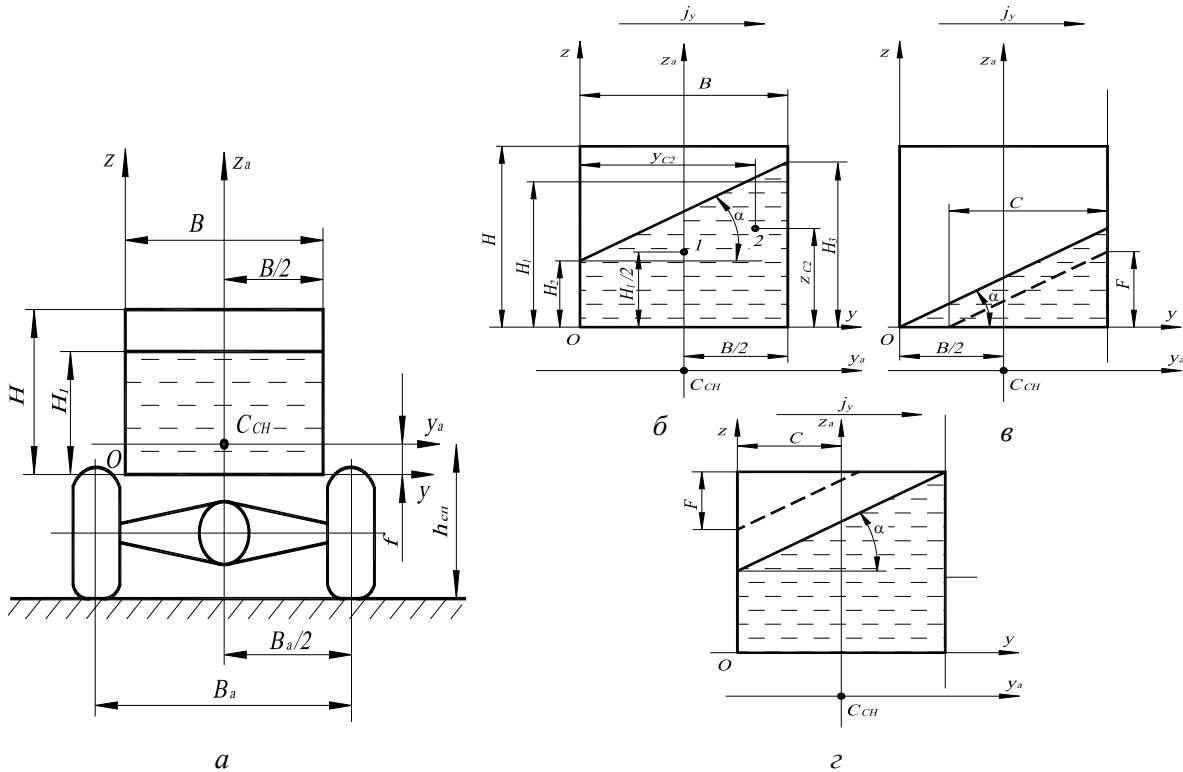


Рис. 1. Визначення центра мас рідини при виникненні бокового прискорення: а – розрахункова схема автомобіля; б – при $H_2 > 0$; в – при $H_2 = 0$; г – при $F = H$

Розглянемо варіант 1, б і визначимо координати центра мас рідини. При появі бічного прискорення центр мас рідини переміщується з точки 1 у точку 2 на такі величини:

$$\Delta y_p = \frac{B^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{12 \cdot \eta_0 \cdot H} \text{ – у горизонтальній площині;} \quad (4)$$

$$\Delta z_p = \frac{B^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha}{24 \cdot \eta_0 \cdot H} \text{ – у вертикальній площині,} \quad (5)$$

де B – поперечний внутрішній розмір прямокутної цистерни; H – вертикальний внутрішній розмір прямокутної цистерни; α – кут нахилу поверхні рідини до поверхні горизонту при появі прискорення (уповільнення) [3, 7].

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{j_y}{g}, \quad (6)$$

де j_y – прискорення (уповільнення) автомобіля в поперечній площині; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння.

Маса рідини в цистерні може бути визначена з рівняння

$$M_1 = \eta_0 \cdot \gamma \cdot V_0 = \eta_0 \cdot \gamma \cdot A \cdot B \cdot H, \quad (7)$$

де η_0 – коефіцієнт заповнення об'єму цистерни; γ – густина рідини; A – поздовжній внутрішній розмір прямокутної цистерни; V_0 – об'єм цистерни.

Швидкість руху рідини відносно цистерни в момент удару [7]

$$V_p = \sqrt{2 \cdot j_y \cdot \Delta y_p}. \quad (8)$$

Зміна потенційної енергії рідини

$$W_{nom} = \gamma \cdot V_0 \cdot g \cdot \frac{B^2 \cdot \text{tg}^2 \alpha}{24 \cdot H} \quad (9)$$

Зміна кінетичної енергії рідини з урахуванням виразів (7) та (8)

$$W_{кин} = \gamma \cdot V_0 \cdot g \cdot \frac{B^2 \cdot \text{tg}^2 \alpha}{12 \cdot H} \quad (10)$$

Енергія удару рідини об стінки цистерни, яка визначається за рівнянням (3) і з урахуванням співвідношення (6),

$$W_{y\delta} = \gamma \cdot V_0 \cdot g \cdot \frac{B^2}{24 \cdot H} \cdot \frac{j_y^2}{g^2} \quad (11)$$

Аналіз залежності (11) показує, що для варіанта, представленого на рис. 1, б, енергія удару рідини об стінки цистерни не залежить від коефіцієнта наповнення об'єму η_0 .

Розглянемо випадок, поданий на рис. 1, в. Такий варіант заповнення об'єму цистерни можливий при виконанні умови

$$\eta_0 \cdot \gamma \cdot V_0 \leq \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot A \cdot B \cdot F; \quad (12)$$

$$F = B \cdot \text{tg} \alpha. \quad (13)$$

Енергія удару рідини об стінки цистерни

$$W_{y\delta} = W_{кин} - W_{nom} = \frac{1}{2} \cdot \eta_0 \cdot \gamma \cdot V_0 \cdot g \cdot \left(B \cdot \frac{j_y}{g} + H \cdot \eta_0 - \frac{4}{3} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot V_0 \cdot \eta_0 \cdot j_y}{A \cdot g}} \right) \quad (14)$$

Випадок, представлений на рис. 1, з, можливий при виконанні умови

$$\eta_0 \geq 1 - \frac{B \cdot \text{tg} \alpha}{2 \cdot H} \quad (15)$$

Енергія удару рідини об цистерну

$$W_{y\delta} = W_{кин} - W_{nom} = \frac{1}{2} \cdot (1 - \eta_0) \cdot \gamma \cdot V_0 \cdot g \cdot \left(B \cdot \frac{j_y}{g} + H \cdot (1 - \eta_0) - \frac{4}{3} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot V_0 \cdot (1 - \eta_0) \cdot j_y}{A \cdot g}} \right) \quad (16)$$

Перекидання автомобіля можливе, коли лінія дії сили тяжіння буде перетинати опорну поверхню за крайньою опорною точкою K (рис. 2, а). При появі бічної сили (у даному випадку – бічної відцентрової сили) нестійке положення виникає раніше, оскільки автомобілю буде достатньо повернутися в поперечній площині на менший кут (рис. 2, б).

Радіус поворотання центра мас автомобіля в поперечній площині

$$R_c = \sqrt{h^2 + \left(\frac{B_a}{2} - a_y \right)^2} \quad (17)$$

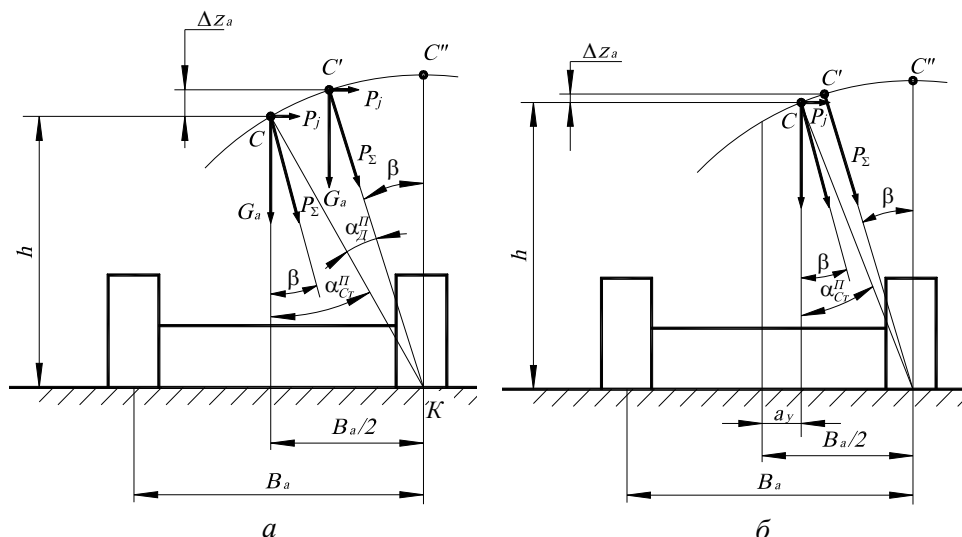


Рис. 2. Розрахункова схема для визначення вертикального переміщення центра мас автомобіля при перекиданні в поперечній площині: а – при $a_y = 0$; б – при $a_y \neq 0$

Зміна висоти центра мас автомобіля при повертанні на кут α'_D

$$\Delta z_a = R_c \cdot \cos \beta - h = \sqrt{\frac{h^2 + \left(\frac{B_a - a_y}{2}\right)^2}{1 + \frac{j_y^2}{g^2}}} - h, \quad (18)$$

де B_a – колія коліс автомобіля; h – висота центра мас автомобіля; β – кут між напрямками векторів сили тяжіння G_a та сумарної сили P_Σ .

$$\beta = \arctg \frac{P_j}{G_a} = \arctg \frac{j_y}{g}. \quad (19)$$

Зміна потенційної енергії автомобіля, що є енергією стабілізації положення

$$W_{cma\bar{o}} = (m_{cn} + M_1) \cdot g \cdot \Delta z_a, \quad (20)$$

де m_{cn} – маса спорядженого автомобіля.

З урахуванням співвідношень (7), (18) вираз (20) перетвориться на такий:

$$W_{cma\bar{o}} = (m_{cn} + \eta_0 \cdot \gamma \cdot V_0) \cdot g \cdot \left(\sqrt{\frac{h^2 + \left(\frac{B_a - a_y}{2}\right)^2}{1 + \frac{j_y^2}{g^2}}} - h \right). \quad (21)$$

Висота центра мас автомобіля h та його бічне зміщення визначаються положенням центра мас рідини C_p при появі бічного прискорення j_y автомобіля. Параметри a_y та h можуть бути визначені таким чином (див. рис. 1, а):

$$a_y = \frac{\frac{B^2}{12 \cdot H \cdot \eta_0} \cdot \frac{j_y}{g}}{1 + \frac{m_{cn}}{\eta_0 \cdot \gamma \cdot V_0}} \quad \text{— за умови } \frac{B \cdot j_y}{2 \cdot H \cdot g} \leq \eta_0 \leq 1 - \frac{B \cdot j_y}{2 \cdot H \cdot g}; \quad (22)$$

$$a_y = \frac{\frac{B}{2} - \frac{1}{3} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \eta_0 \cdot B \cdot H}{j_y}} \cdot g}{1 + \frac{m_{cn}}{\eta_0 \cdot \gamma \cdot V_0}} \quad \text{— за умови } \eta_0 \leq \frac{B \cdot j_y}{2 \cdot H \cdot g}; \quad (23)$$

$$a_y = \frac{\frac{1 - \eta_0}{\eta_0} \cdot \left(\frac{B}{2} - \frac{1}{3} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (1 - \eta_0) \cdot B \cdot H}{j_y}} \cdot g \right)}{1 + \frac{m_{cn}}{\eta_0 \cdot \gamma \cdot V_0}} \quad \text{— за умови } \eta_0 \geq 1 - \frac{B \cdot j_y}{2 \cdot H \cdot g}; \quad (24)$$

$$h = \frac{h_{cn} \cdot \frac{m_{cn}}{\eta_0 \cdot \gamma \cdot V_0} - f + \frac{H}{2} \cdot \eta_0 + \frac{B^2}{24 \cdot H \cdot \eta_0} \cdot \frac{j_y^2}{g^2}}{1 + \frac{m_{cn}}{\eta_0 \cdot \gamma \cdot V_0}} \quad \text{— за умови } \frac{B \cdot j_y}{2 \cdot H \cdot g} \leq \eta_0 \leq 1 - \frac{B \cdot j_y}{2 \cdot H \cdot g}; \quad (25)$$

$$h = \frac{h_{cn} \cdot \frac{m_{cn}}{\eta_0 \cdot \gamma \cdot V_0} - f + \frac{1}{3} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \eta_0 \cdot B \cdot H}{j_y}} \cdot \frac{j_y}{g}}{1 + \frac{m_{cn}}{\eta_0 \cdot \gamma \cdot V_0}} \quad \text{— за умови } \eta_0 \leq \frac{B \cdot j_y}{2 \cdot H \cdot g}; \quad (26)$$

$$h = \frac{h_{cn} \cdot \frac{m_{cn}}{\eta_0 \cdot \gamma \cdot V_0} - f + \frac{H}{2 \cdot \eta_0} \cdot (2 \cdot \eta_0 - 1) + \frac{1 - \eta_0}{3 \cdot \eta_0} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (1 - \eta_0) \cdot B \cdot H}{j_y}} \cdot \frac{j_y}{g}}{1 + \frac{m_{cn}}{\eta_0 \cdot \gamma \cdot V_0}} \quad \text{— за умови } \eta_0 \geq 1 - \frac{B \cdot j_y}{2 \cdot H \cdot g}. \quad (27)$$

Вихідні розрахункові дані, необхідні для оцінювання стійкості автомобіля-паливозаправника АПЗ-8-531605 з цистерною у формі паралелепіпеда: об'єм цистерни $V_0 = 8000 \text{ м}^3$; маса спорядженого автомобіля $m_{cn} = 11150 \text{ кг}$; база автомобіля $L = 4,6 \text{ м}$; колія $B_a = 1,97 \text{ м}$; горизонтальна координата центра мас спорядженого автомобіля $a_{cn} = 2,168 \text{ м}$; вертикальна координата центра мас спорядженого автомобіля $h_{cn} = 1,22 \text{ м}$; довжина, ширина, висота цистерни відповідно $A = 4,377 \text{ м}$, $B = 1,34 \text{ м}$, $H = 1,364 \text{ м}$; $f = -0,372 \text{ м}$.

На рис. 3 наведено графіки залежностей $a_y(\eta_0)$ та $h(\eta_0)$, побудовані з використанням формул (22–24) та (25–27), для випадків перевезення води ($\gamma = 1000 \text{ кг/м}^3$), моторної оливи ($\gamma = 910 \text{ кг/м}^3$), дизельного пального ($\gamma = 830 \text{ кг/м}^3$) та бензину ($\gamma = 710 \text{ кг/м}^3$) при $\frac{J_y}{g} = 0,8$.

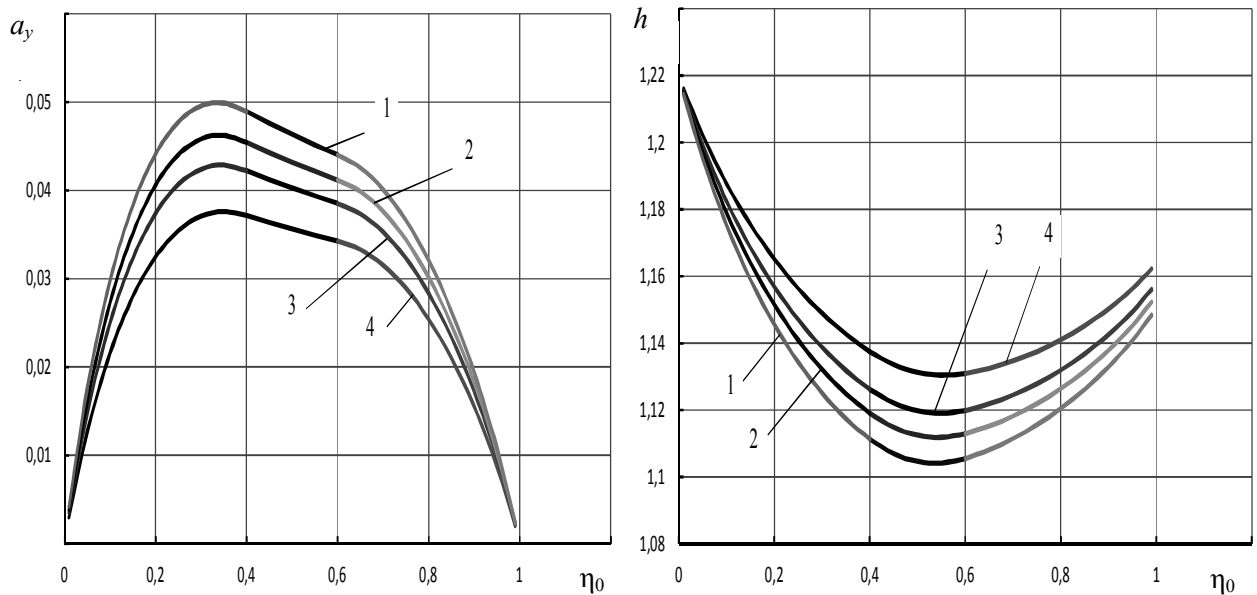


Рис. 3. Графіки залежностей $a_y(\eta_0)$ та $h(\eta_0)$ для АПЗ-8-531605 при перевезенні різних рідин: 1 – вода; 2 – моторна олива; 3 – дизельне пальне; 4 – бензин

На рис. 4 наведено графіки залежності $W_{y\partial}(\eta_0)$, отримані за допомогою виразів (11), (14), (16), та графіки залежності $W_{stab}(\eta_0)$, отримані з використанням співвідношень (21–27).

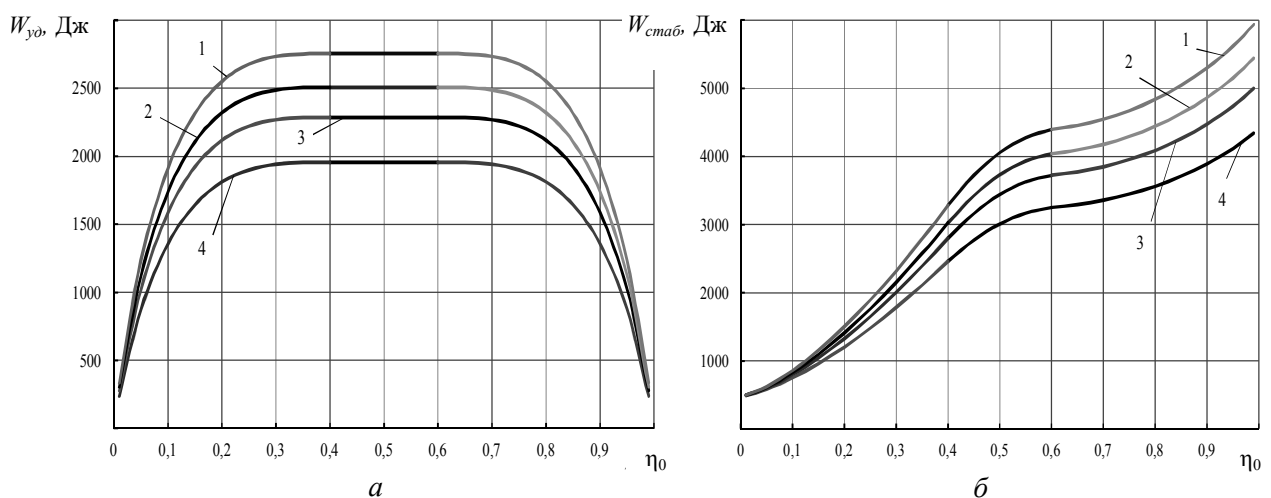


Рис. 4. Графіки залежності енергії удару (а) та енергії стабілізації (б) від ступеня заповнення цистерни: 1 – вода; 2 – моторна олива; 3 – дизельне пальне; 4 – бензин

У таблиці наведено результати розрахунку, а на рис. 5 графіки залежності енергетичного коефіцієнта динамічної стабільності положення $K_{едсн}$ від коефіцієнта заповнення цистерни η_0 .

Значення коефіцієнта енергетичної динамічної стійкості положення для різних видів рідини, що перевозиться, та для різного ступеня заповнення цистерни

η_0	Коефіцієнт енергетичної динамічної стійкості положення $K_{едсп}$			
	вода, $\gamma = 1000 \text{ кг/м}^3$	моторна олива, $\gamma = 910 \text{ кг/м}^3$	дизельне пальне, $\gamma = 830 \text{ кг/м}^3$	бензин, $\gamma = 710 \text{ кг/м}^3$
0,1	0,45	0,48	0,50	0,55
0,2	0,59	0,61	0,63	0,67
0,3	0,85	0,87	0,88	0,92
0,4	1,19	1,21	1,22	1,26
0,5	1,47	1,49	1,50	1,53
0,6	1,60	1,61	1,63	1,66
0,7	1,66	1,68	1,70	1,73
0,8	1,90	1,91	1,93	1,97
0,9	2,77	2,80	2,82	2,87

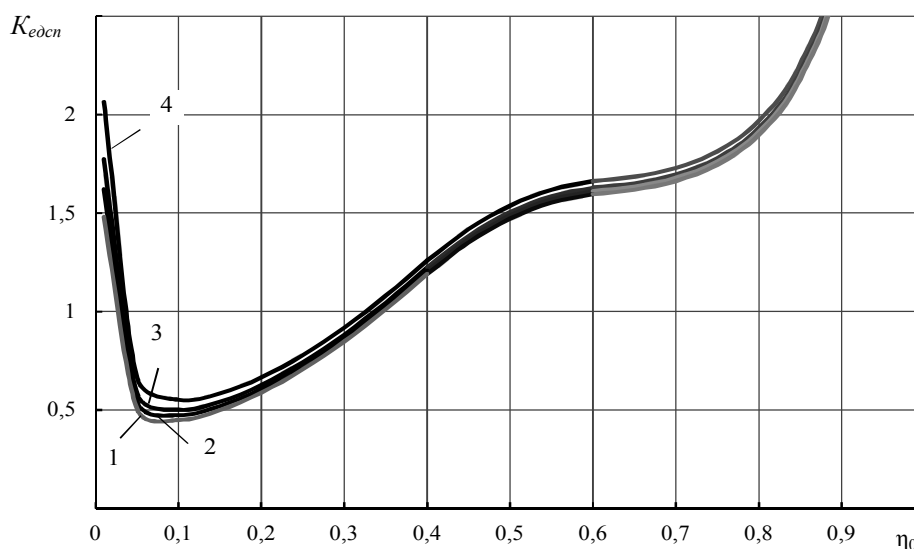


Рис. 5. Графіки залежності коефіцієнта енергетичної динамічної стійкості положення від ступеня заповнення цистерни: 1 – вода; 2 – моторна олива; 3 – дизельне пальне; 4 – бензин

Висновки

1. Отримані аналітичні вирази дозволяють оцінювати динамічну стійкість положення автомобілів-цистерн у поперечній площині.

2. Виконані для автомобіля-паливозаправника АПЗ-8-531605 розрахунки при максимальному значенні бокового прискорення $j_{y\max} = 0,8g$ дозволили визначити таке:

- при коефіцієнті заповнення об'єму цистерни η_0 , що знаходиться у межах від 0,4 до 0,6, величина енергії удару $W_{уд}$ є постійною та становить 1960 Дж;
- при значеннях коефіцієнта η_0 у межах $[0,03; 0,35]$ енергетичний коефіцієнт динамічної стабільності положення автомобіля АПЗ-8-531605 $K_{едсп} < 1$, що свідчить про відсутність стійкості його положення.

Список використаних джерел

1. Шимановский, А. О. Динамическая нагруженность конструкции цистерны при торможении [Текст] / А. О. Шимановский, Г. М. Куземкина // Автомобильный транспорт : сб. науч. тр. – Х. : ХНАДУ, 2006. – Вып. 19. – С. 32–34.

2. Власов, Ю. Л. Динамическая модель равномерного движения автоцистерны без перегородок с частичным заполнением [Текст] / Ю. Л. Власов, Н. А. Морозов, А. А. Гаврилов // Вестник ОГУ. – Оренбург : ОГУ, 2013. – № 9 (158). – С. 227–231.

3. Ходырев, С. Я. Оценка эффективности торможения автомобилей-шлаковозов [Текст] / С. Я. Ходырев // Автомобильный транспорт : респ. межвед. науч.-техн. сб. – К. : Техніка, 1981. – Вып. 18. – С. 99–100.

4 Kang X. D. Optimal tank design and directional dynamic analysis of liquid cargo vehicle under steering and braking. P.D. thesis department of Mechanical and Industrial Engineering, Concordia University, 2001. – 323 p.

5. Подригало, М. А. Устойчивость автомобиля против заноса в тяговом режиме движения [Текст] / М. А. Подригало, Д. М. Клец // Автомобильная промышленность. – 2009. – № 12. – С. 23–26.

6. Влияние расположения груза в кузове грузового автомобиля на устойчивость автомобиля в поворотах [Текст] / Ю. Л. Власов, Н. А. Морозов, И. А. Бочаров, А. А. Гаврилов // Вестник ОГУ. – Оренбург : ОГУ, 2011. – № 4/123. – С. 152–156.

7. Энергетический подход к оценке устойчивости автомобилей-цистерн против опрокидывания [Текст] / В. В. Глушенко, Р. О. Кайдалов, М. А. Подригало, С. А. Соколовский // Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України. – Х. : НА НГУ, 2015. – Вип. 2 (26). – С. 32–38.

Стаття надійшла до редакції 05.04.2016 р.

УДК 629.114.2

В. В. Глушенко, М. А. Подригало, Д. В. Абрамов

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ АВТОМОБИЛЕЙ-ЦИСТЕРН ПРОТИВ ОПРОКИДЫВАНИЯ В ПОПЕРЕЧНОЙ ПЛОСКОСТИ

Приведены результаты исследования по повышению устойчивости автомобилей-цистерн против опрокидывания в поперечной плоскости путем определения диапазона допустимых значений коэффициента заполнения цистерны жидкостью.

К л ю ч е в ы е с л о в а: автомобиль-топливозаправщик, боковое ускорение, коэффициент заполнения объема цистерны, устойчивость положения, энергия удара жидкости, энергия стабилизации положения.

UDC 629.114.2

V. V. Hlushchenko, M. A. Podrigalo, D. V. Abramov

EVALUATION OF TANK-TRUCK SUSTAINABILITY TO PREVENT TIPPING IN THE TRANSVERSE PLANE

The results of the study to improve the stability of tank-car to prevent tipping in the transverse plane by defining the acceptable range of the duty ratio of the tank liquid are presented.

К e y w o r d s: car-fueller, lateral acceleration, the filling factor of the tank volume, stability of position, energy of impact of fluid, energy of stabilization.

Глушенко Віталій Володимирович – заступник начальника Національної академії Національної гвардії України з тилу – начальник відділу тилового забезпечення.

Подригало Михайло Абович – доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник науково-дослідного центру службово-бойової діяльності НГУ Національної академії Національної гвардії України.

Абрамов Дмитро Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, докторант Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.