

УДК 629.114.2

В. В. Глущенко, Р. О. Кайдалов, М. А. Подригало, С. А. Соколовский

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ АВТОМОБИЛЕЙ-ЦИСТЕРН ПРОТИВ ОПРОКИДЫВАНИЯ

В статье предложен метод оценивания динамической устойчивости автомобилей, предназначенных для перевозки жидких грузов, при частичном заполнении объема цистерн. Предложен критерий оценки устойчивости – энергетический коэффициент динамической устойчивости положения автомобиля-цистерны. Для цистерны в форме параллелепипеда определено, что наиболее опасным является случай с наполовину заполненной цистерной.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** автомобиль-цистерна, динамическая устойчивость автомобилей, энергетический коэффициент динамической устойчивости положения автомобиля-цистерны, потеря устойчивости.

**Постановка проблемы.** При выполнении служебно-боевых задач подразделениями Национальной гвардии Украины и другими силовыми структурами для перевозки различных жидких грузов: топлива, масла, воды широко применяются специализированные транспортные средства, а именно, автомобили-цистерны.

Условия использования автомобилей-цистерн, особенно при движении в колонне, при прохождении опасных участков дороги характеризуются частыми изменениями скорости движения, сопровождаются поворотами, спусками, подъемами, что может привести к потере устойчивости. Особенно опасно опрокидывание транспортного средства при частичном заполнении ёмкости жидким грузом. Поэтому оценка динамической устойчивости автомобилей, предназначенных для перевозки жидких грузов, в случае частичного заполнения объема цистерн является актуальной научно-технической задачей.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Исследованию динамических нагрузок, действующих на автомобили для перевозки жидких грузов, и определению условий сохранения устойчивости их положения посвящены работы многих отечественных и зарубежных авторов [1–5].

В работе [2] разработана модель устойчивости автоцистерны, частично заполненной жидкостью, при ее движении на криволинейном участке дороги. Определены зависимости коэффициентов устойчивости автомобиля от объема жидкости и положения ее центра масс в цистерне. Однако в работе [2] рассмотрена устойчивость автомобиля-цистерны только в поперечной плоскости.

Как показывает анализ известных исследований [1, 3, 5], наибольшую опасность потери устойчивости автомобилем-цистерной в продольной плоскости представляет опрокидывание при разгоне или торможении. В работе [3] на примере автомобиля-шлаковоза (рис. 1) определено, что при торможении поверхность жидкости вследствие действия замедления наклоняется к поверхности горизонта на угол  $\alpha$ , который определяется зависимостью

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{j_x}{g}, \quad (1)$$

где  $j_x$  – замедление при торможении;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения.

Однако в работе [3] не рассматривалась устойчивость автомобиля-шлаковоза против опрокидывания в процессе торможения.

**Цель статьи.** Разработать метод оценивания устойчивости автомобилей для перевозки жидких грузов путем совершенствования конструкции и определения безопасного уровня заполнения цистерн.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– определить критерий динамической устойчивости автомобилей с частично заполненной цистерной при разгоне или торможении;

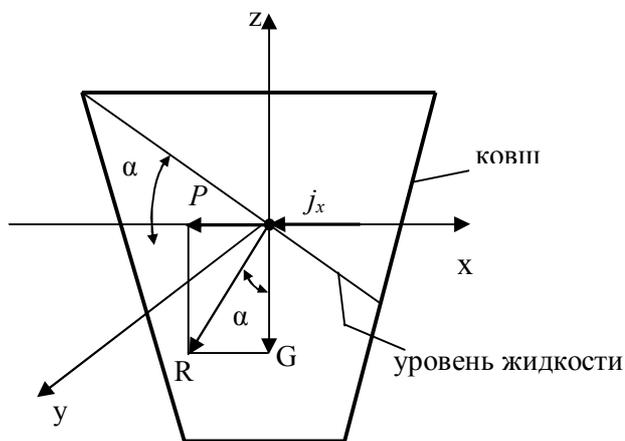


Рис. 1. Схема положения жидкости в ковше при торможении

- определить энергию удара жидкости о стенки цистерны при разгоне или торможении;
- проанализировать влияние степени заполнения цистерны на устойчивость положения автомобилей в продольной плоскости.

**Изложение основного материала.** *Определение критерия динамической устойчивости автомобилей-цистерн.* В работе [6] для оценки устойчивости предложен показатель – коэффициент устойчивости, представляющий собой отношение момента, стабилизирующего занос, к моменту, возмущающему его. Развивая указанный критерий, в работах [2, 7] предложено его использовать для оценки устойчивости положения грузовых автомобилей и автомобилей-цистерн при движении на повороте.

Рассмотрим возможность использования подобного критерия для оценки устойчивости положения в продольной плоскости автомобилей с частично заполненными цистернами. Причиной опрокидывания автомобилей во многих случаях является удар жидкости о стенки цистерны при разгоне или торможении машины. Введем энергетический коэффициент динамической устойчивости положения автомобилей-цистерн:

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

где  $W_{\text{уд}}$  – энергия удара жидкости о стенки цистерны;  $W_{\text{стаб}}$  – энергия, стабилизирующая положение машины.

$$W_{\text{стаб}} = mg \Delta z, \quad (3)$$

где  $m$  – масса автомобиля;  $\Delta z$  – изменение вертикальной координаты центра масс автомобиля при повороте в плоскости опрокидывания до предельного по условиям устойчивости положения (рис. 2).

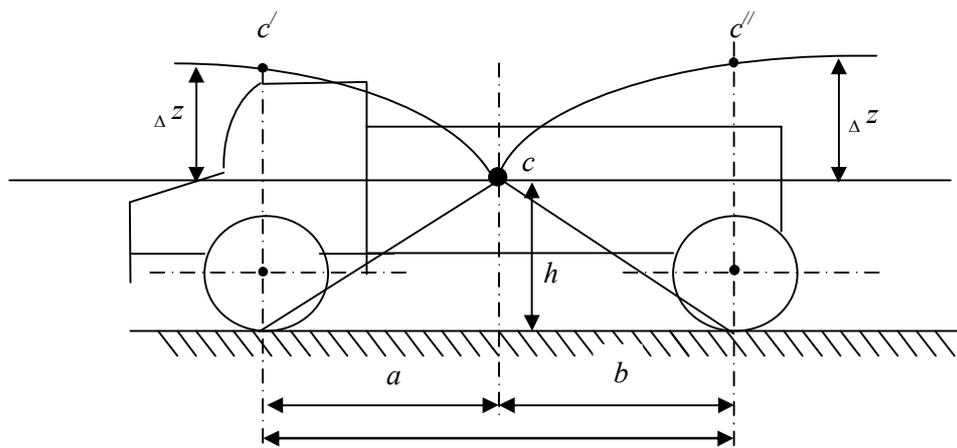


Рис. 2. Расчетная схема для определения  $\Delta z$

$$\Delta z = \begin{cases} \sqrt{h^2 + a^2} - h & \text{– при опрокидывании вокруг передней оси;} \\ \sqrt{h^2 + b^2} - h & \text{– при опрокидывании вокруг задней оси,} \end{cases} \quad (4)$$

$$\quad (5)$$

где  $h$  – высота центра масс автомобиля;  $a, b$  – соответственно расстояния от передней и задней осей автомобиля до проекции центра масс на горизонтальную плоскость.

После подстановки выражений (4) и (5) в уравнение (3) получим:

$$W_{\text{стаб}} = \begin{cases} mg(\sqrt{h^2 + a^2} - h) & \text{– при опрокидывании вокруг передней оси;} \\ mg(\sqrt{h^2 + b^2} - h) & \text{– при опрокидывании вокруг задней оси.} \end{cases} \quad (6)$$

$$\quad (7)$$

Опрокидывание вокруг передней оси происходит при торможении, а вокруг задней – при разгоне. Уравнения (6) и (7) преобразуем к такому виду:

$$W_{\text{стаб}} = \begin{cases} mgh \left( \sqrt{1 + \frac{a^2}{h^2}} - 1 \right) & \text{– при опрокидывании вокруг передней оси;} \\ mgh \left( \sqrt{1 + \frac{b^2}{h^2}} - 1 \right) & \text{– при опрокидывании вокруг задней оси.} \end{cases} \quad (8)$$

В общем виде уравнение для энергии, стабилизирующей положение, можно записать в виде

$$W_{\text{стаб}} = mgh \left( \sqrt{1 + \frac{d_0^2}{h^2}} - 1 \right), \quad (10)$$

где  $d_0$  – расстояние от проекции центра масс автомобиля на горизонтальную плоскость до оси опрокидывания.

*Определение энергии удара жидкости.* На рис. 3 приведена исходная расчетная схема для определения энергии удара жидкости. Масса жидкости полностью заполненной цистерны в форме параллелепипеда:

$$M_0 = \gamma \cdot A \cdot B \cdot H = \gamma \cdot V_0, \quad (11)$$

где  $\gamma$  – плотность жидкости;  $A, B, H$  – соответственно длина, ширина и высота цистерны;  $V_0$  – внутренний объем цистерны.

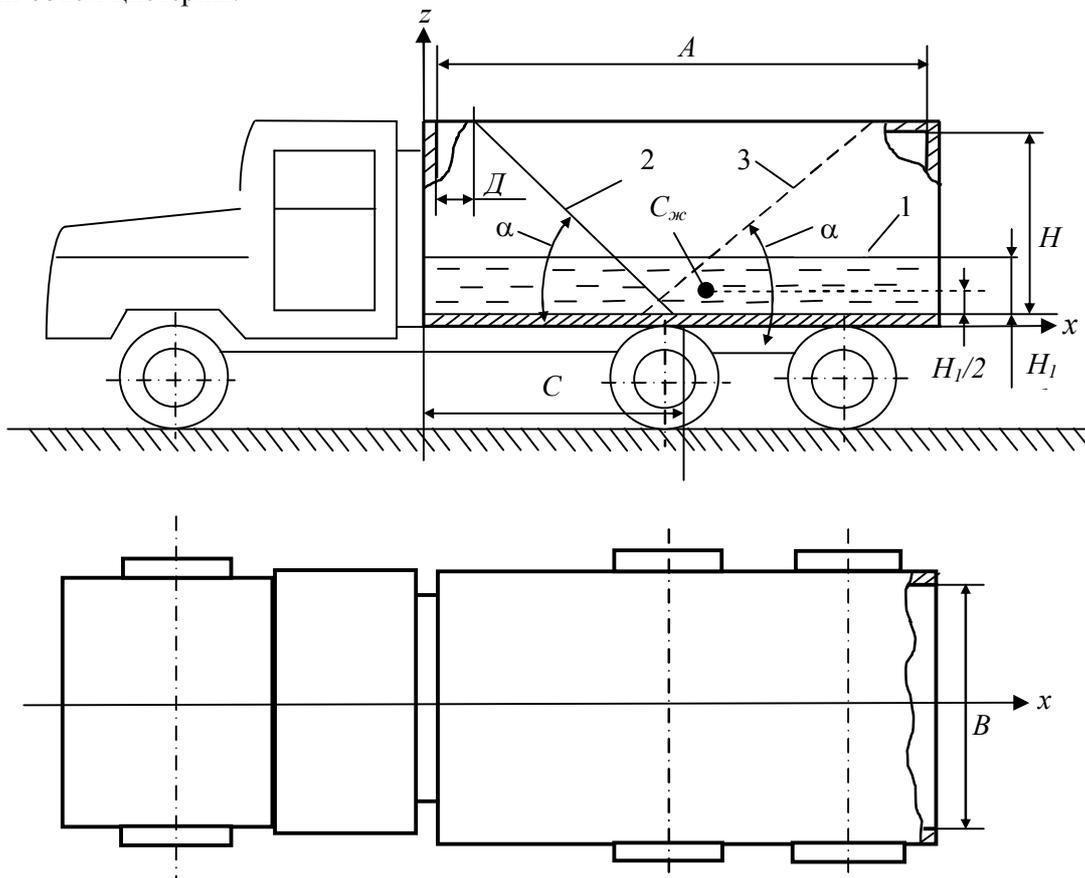


Рис. 3. Расчетная схема для определения энергии удара жидкости при незаполненной цистерне:  
 $C_{ж}$  – положение центра масс жидкости при отсутствии ускорения (замедления) автомобиля;  
 1 – поверхность жидкости при отсутствии замедления или ускорения; 2 – поверхность жидкости при замедлении автомобиля; 3 – поверхность жидкости при ускорении автомобиля

При незаполненной цистерне масса жидкости равна:

$$M_1 = \eta_0 M_0 = \eta_0 \gamma V_0 = \eta_0 \gamma \cdot A \cdot B \cdot H, \quad (12)$$

где  $\eta_0 = M_1 / M_0$  – коэффициент заполнения объема цистерны.

Из рис. 3 видно, что масса жидкости при незаполненной цистерне равна:

$$M_1 = \gamma \cdot A \cdot B \cdot H_1. \quad (13)$$

Приравнявая правые части выражений (12) и (13), определим:

$$\eta_0 = \frac{H_1}{H}. \quad (14)$$

В качестве примера рассмотрим торможение автомобиля при незаполненной цистерне. В этом случае поверхность жидкости расположена под углом  $\alpha$  [3], который определяется зависимостью (1).

У незаполненной автомобильной цистерны центр масс жидкости  $C_{жс}$  перемещается из точки 1, соответствующей положению  $C_{жс}$  при равномерном движении автомобиля, в точку 2 – при торможении автомобиля (рис. 4, а).

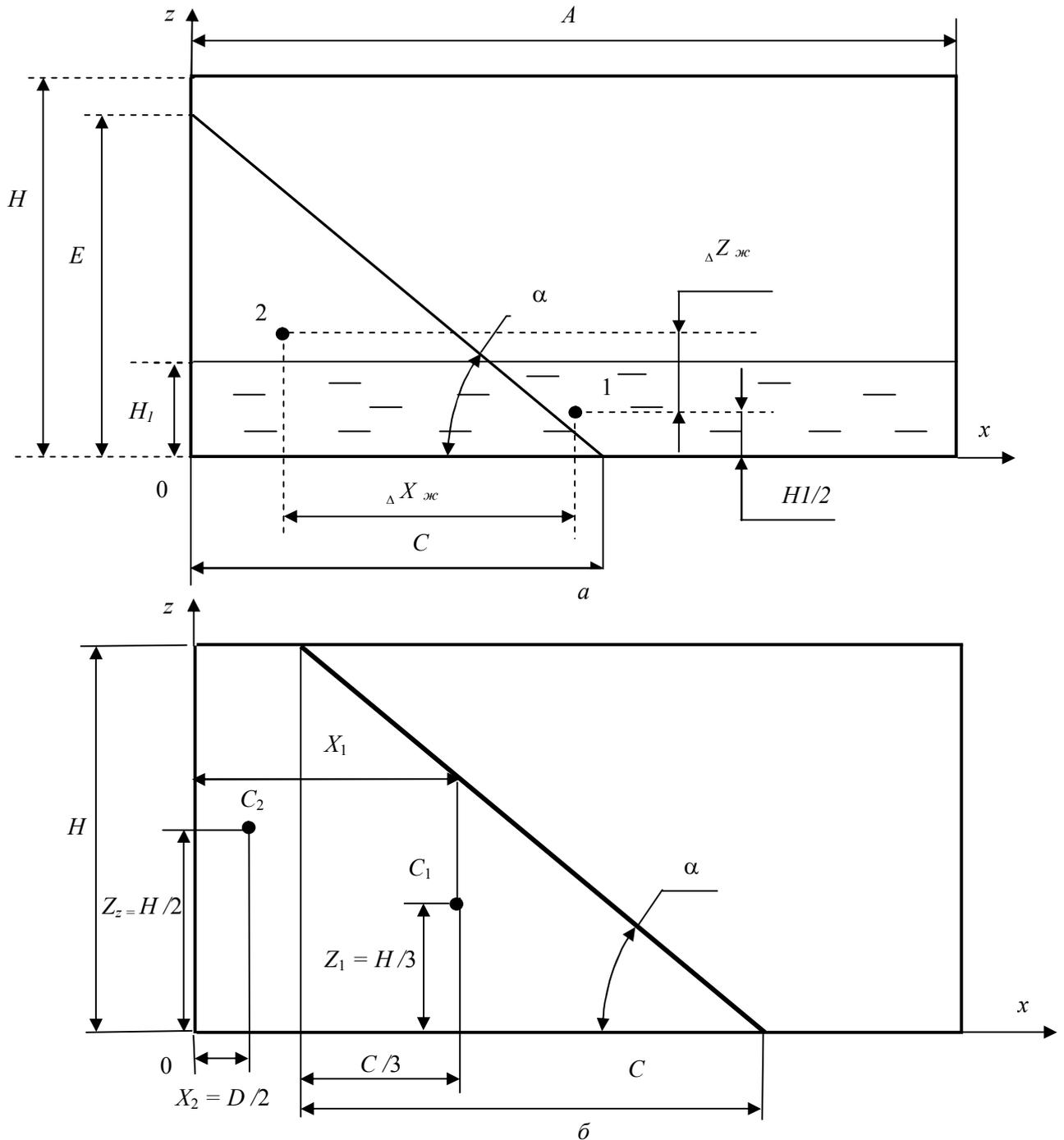


Рис. 4. Расчетные схемы для определения положения центра масс жидкости и его перемещения при торможении автомобиля: а – при  $E < H$  и  $D = 0$ ; б – при  $E = H$  и  $D > 0$

Перемещение жидкости относительно резервуара больше при незаполненной системе.

Энергия удара жидкости о стенки цистерны равна разности между кинетической энергией, полученной жидкостью при перемещении ее центра масс из точки 1 в точку 2, и потенциальной энергией, накопленной жидкостью при подъеме её центра масс на высоту  $\Delta z_{жс}$  (рис. 4, а):

$$W_{уд} = W_{кин} - W_{пот}, \quad (15)$$

где  $W_{кин}$  – кинетическая энергия жидкости при перемещении её центра масс  $C_{жс}$  из точки 1 в точку 2;  $W_{пот}$  – изменение потенциальной энергии жидкости при перемещении ее центра масс  $C_{жс}$  из точки 1 в точку 2.

$$W_{пот} = M_1 g \Delta z_{жс}; \quad (16)$$

$$W_{кин} = \frac{M_1 V_{жс}^2}{2}, \quad (17)$$

где  $V_{жс}$  – относительная скорость жидкости в цистерне, полученная в результате действия замедления (для жидкости – относительного ускорения).

Для дальнейшего исследования примем следующие допущения:

- вязкость жидкости отсутствует;
- отсутствует внешнее трение жидкости о стенки цистерны;
- замедление автомобиля является постоянной величиной в течение всего процесса торможения ( $j_x = \text{const}$ ).

С учетом принятых допущений определим скорость жидкости:

$$V_{жс} = j_x \cdot T, \quad (18)$$

где  $T$  – время торможения при  $j_x = \text{const}$ .

$$T = \sqrt{\frac{2 \Delta x_{жс}}{j_x}}. \quad (19)$$

Уравнение (18), учитывая выражение (19), примет такой вид:

$$V_{жс} = \sqrt{2 \Delta x_{жс} j_x}. \quad (20)$$

Вариант положения поверхности жидкости, представленный на рис. 4, б, является более вероятным, чем на рис. 4, а. Поэтому для варианта, представленного на рис. 4, б, определим параметры  $\Delta x_{жс}$  и  $\Delta z_{жс}$ . Координаты центра масс жидкости при равномерном движении:

$$X_{c1} = \frac{A}{2}; \quad (21)$$

$$Z_{c1} = \frac{H_1}{2} = \frac{\eta_0 H}{2}. \quad (22)$$

Координаты центра масс жидкости при торможении:

$$X_{c2} = \frac{M_{11} X_1 + M_{12} X_2}{M_1}; \quad (23)$$

$$Z_{c2} = \frac{M_{11} Z_1 + M_{12} Z_2}{M_1}. \quad (24)$$

где  $X_1, Z_1, X_2, Z_2$  – координаты центра масс треугольника (рис. 4, б);  $M_{11}, M_{12}$  – массы объемов жидкости, имеющие форму треугольной призмы и параллелепипеда, соответственно.

$$M_{11} + M_{12} = M_1 = \eta_0 \gamma A \cdot B \cdot H = \eta_0 \gamma V_0. \quad (25)$$

Определим  $M_{11}$  и  $M_{12}$  (рис. 4, б):

$$M_{11} = 0,5 \gamma \cdot H \cdot C \cdot B = 0,5 \gamma H^2 B \cdot \text{tg} \alpha; \quad (26)$$

$$M_{12} = \gamma \cdot H \cdot D \cdot B = M_1 - M_{11}, \quad (27)$$

где  $B$  – ширина полости цистерны.

Подставим выражения (25) и (26) в уравнение (27) и определим величину  $D$ :

$$D = \eta_0 A - 0,5 H \cdot \text{tg} \alpha. \quad (28)$$

Подставляя (28) в (27), определим:

$$M_{12} = \gamma H \cdot B(\eta_0 A - 0,5H \cdot \operatorname{tg} \alpha). \quad (29)$$

Из рис. 4, б определим:

$$X_1 = D + \frac{C}{3} = \eta_0 A - \frac{1}{6} H \cdot \operatorname{tg} \alpha; \quad (30)$$

$$X_2 = \frac{D}{2} = 0,5(\eta_0 A - 0,5H \cdot \operatorname{tg} \alpha); \quad (31)$$

$$Z_1 = \frac{H}{3}; \quad (32)$$

$$Z_2 = \frac{H}{2}. \quad (33)$$

После подстановки выражений (25), (26), (29), (30–33) в уравнения (23) и (24) определим координаты центра масс жидкости при торможении автомобиля:

$$X_{c_2} = 0,5 \left( A\eta_0 + \frac{H^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}{12A\eta_0} \right); \quad (34)$$

$$Z_{c_2} = 0,5H \left( 1 - \frac{H \operatorname{tg} \alpha}{6\eta_0 A} \right). \quad (35)$$

Горизонтальное и вертикальное перемещения центра масс жидкости (рис. 4):

$$\Delta X_{жс} = X_{c_1} - X_{c_2} = 0,5A - 0,5 \left( A\eta_0 + \frac{H^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}{12A\eta_0} \right) = \frac{A}{2}(1 - \eta_0) - \frac{H^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}{24A\eta_0}; \quad (36)$$

$$\Delta Z_{жс} = Z_{c_2} - Z_{c_1} = 0,5H \left( 1 - \frac{H \operatorname{tg} \alpha}{6\eta_0 A} \right) - \frac{\eta_0 H}{2} = \frac{H}{2}(1 - \eta_0) - \frac{H^2 \operatorname{tg} \alpha}{12A\eta_0}. \quad (37)$$

Скорость центра масс жидкости  $V_{жс}$  в точке 2 (рис. 4, а) определим после подстановки выражения (36) в уравнение (20):

$$V_{жс} = \sqrt{j_x \left[ A(1 - \eta_0) - \frac{H^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}{12A\eta_0} \right]}. \quad (38)$$

Уравнение (17) после подстановки в него (25) и (38) примет такой вид:

$$W_{кин} = \frac{\eta_0 \gamma ABH j_x}{2} \left[ A(1 - \eta_0) - \frac{H^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}{12A\eta_0} \right]. \quad (39)$$

Изменение потенциальной энергии жидкости определим после подстановки выражений (25) и (37) в формулу (16):

$$W_{ном} = \frac{\eta_0 \gamma ABHg}{2} \left[ H(1 - \eta_0) - \frac{H^2 \operatorname{tg} \alpha}{6A\eta_0} \right]. \quad (40)$$

Подставляя выражения (39) и (40) в уравнение (15), определим энергию удара жидкости о стенки цистерны:

$$W_{y\delta} = \frac{\eta_0 \gamma ABHg}{2} \left\{ \frac{j_x}{g} \left[ A(1 - \eta_0) - \frac{H^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}{12A\eta_0} \right] - H(1 - \eta_0) - \frac{H^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}{6A\eta_0} \right\}. \quad (41)$$

Учитывая соотношения (1) и (11), преобразуем формулу (41) к такому виду:

$$W_{y\delta} = \frac{\eta_0 \gamma V_0 g}{2} \left\{ \frac{j_x}{g} \left[ A(1 - \eta_0) - \frac{H^2 j_x^2}{12g^2 A\eta_0} \right] - H(1 - \eta_0) + \frac{H^2 j_x^2}{6g^2 A\eta_0} \right\}. \quad (42)$$

Уравнения (42) и (8) могут быть использованы для определения энергетического коэффициента динамической устойчивости положения автомобиля при частичном заполнении цистерны.

*Анализ влияния коэффициента заполнения цистерны на устойчивость положения автомобиля.* После подстановки выражений (8) и (42) в уравнение (2) получим:

$$K_{\text{эдын}} = \frac{2mgh \left( \sqrt{1 + \frac{a^2}{h^2}} - 1 \right)}{\gamma V_0 \left[ (1 - \eta_0) \eta_0 \left( A \frac{j_x}{g} - H \right) + \frac{H^2 j_x^2}{6Ag^2} \left( 1 - \frac{j_x}{2g} \right) \right]}. \quad (43)$$

При  $K_{\text{эдын}} \geq 1$  условие устойчивости положения выполняется. При  $K_{\text{эдын}} < 1$  автомобиль неустойчив.

Исследуем функцию (43) на наличие экстремума. Из условия  $\delta K_{\text{эдын}} / \delta \eta_0 = 0$  определим точку экстремума:

$$\eta_0 = 0,5. \quad (44)$$

При  $\eta_0 = 0,5$  в нашем случае  $\delta^2 K_{\text{эдын}} / \delta \eta_0^2 > 0$ . Следовательно, в указанной точке имеем минимум. Таким образом, при наполовину заполненной цистерне (при прочих равных условиях) мы получим наименьшее значение энергетического коэффициента динамической устойчивости положения автомобиля.

### **Выводы**

Предложенный критерий – энергетический коэффициент динамической устойчивости положения, позволяет оценивать динамическую устойчивость автомобилей для перевозки жидких грузов с частичным заполнением цистерн.

Минимальное значение энергетического коэффициента динамической устойчивости положения автомобиля цистерны реализуется при коэффициенте  $\eta_0$  заполнения объема, равном 0,5.

Учитывая высокую вероятность эксплуатации автомобилей с наполовину заполненными цистернами ( $\eta_0 = 0,5$ ), последние целесообразно выполнять состоящими из двух герметичных отсеков. С увеличением числа отсеков устойчивость автомобилей-цистерн повышается.

Вопрос рационального взаимного размещения секций требует дополнительного исследования при проектировании новых транспортных средств для обеспечения подразделений Национальной гвардии Украины и других силовых структур специализированными транспортными средствами, к которым относятся автомобили-цистерны.

### **Список использованных источников**

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. : Техника, 1981. – Вып. 18. – С. 99–100.
4. Winkler, C. The dynamics of Tank-Vehicle Rollover and the Implications for Rollover-Protection Devices [Текст] / C. Winkler, S. Bogard, Y. Zhen // The University of Michigan, 1998. – 194 p.
5. Kand, X. D. Optimal tank Gesugu and directional dynamic analysis of ligud cargo vehicle undes steering and brabring. P. D. thesis Department of Mechanical and Industrial Engineering, Concordia University, 2001. – 323 p.
6. 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.
7. 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.

*Стаття надійшла до редакції 28.11.2015 р.*