

УДК 629.114.456.2.073

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПОЖАРНОЙ АВТОЦИСТЕРНЫ ПРОТИВ ОПРОКИДЫВАНИЯ И ЗАНОСА

Кулаковский Б.Л., к.т.н., доцент, Лахвич В.В., к.т.н., Казутин Е.Г.
Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

e-mail: mail@kii.gov.by

Рассмотрены два этапа поведения пожарной автоцистерны: при замедленном скольжении в заносе и ударе колес автомобиля о препятствие с последующим опрокидыванием. С применением уравнения Лагранжа составлена система дифференциальных уравнений движения автоцистерны в процессе опрокидывания. Учтены деформация шин в горизонтальной плоскости, поворот кузова относительно центра крена и перемещение жидкого груза в емкости. Выполнен анализ устойчивости автоцистерны.

Two phases of behavior of fire tank have been considered: during slow slide in the drift and by impact of car wheels on the obstacle followed by turnover. Using Lagrange equations, the system of differential equations of motion of tank in process of overturning has been drawn up. The deformation of tyres in the horizontal plane, the rotation of body relative to the center of the roll and the movement of liquid cargo in the vessel have been taken into account. The analysis of stability of fire tank has been carried out.

(Поступила в редакцию 10 декабря 2013 г.)

Введение

Большое количество дорожно-транспортных происшествий с опрокидыванием происходит из-за удара колес пожарной автоцистерны (АЦ) в бордюрный камень или подобного рода препятствие [1]. Такой случай чаще возникает при движении АЦ по дороге с малым коэффициентом сцепления, т. е. при условии $K \geq \varphi$, где K – коэффициент поперечной устойчивости против опрокидывания; φ – коэффициент сцепления колеса с дорогой.

Процесс бокового скольжения при заносе АЦ и, в связи с этим, ее устойчивость, имеет отличие от грузового автомобиля. Если в грузовом автомобиле груз имеет неподвижный центр тяжести относительно кузова, то в емкости АЦ жидкость перемещается в направлении заноса, создавая дополнительный опрокидывающий момент и тем самым ухудшая устойчивость автомобиля. В связи с этим задача исследования устойчивости АЦ при заносе является весьма актуальной.

При решении задачи принимаются следующие допущения:

1. При заносе АЦ движется боком и поступательно.
2. Коэффициент сцепления колеса с дорогой не зависит от скорости перемещения АЦ.
3. Передние и задние колеса ударяются в упор одновременно.

Основная часть

Процесс заноса с последующим ударом колес АЦ с ее опрокидыванием можно разделить на два этапа:

первый этап – замедленное скольжение колес по поверхности дороги до удара в препятствие с начальной скоростью движения V_3 (рис. 1);

второй этап – удар колес АЦ в препятствие при скорости движения V_0 с опрокидыванием автомобиля (рис. 2).

На первом этапе АЦ при заносе начинает двигаться боком со скоростью V_3 .

Процесс заноса происходит с замедлением равным $j = \varphi \cdot g$, где φ – коэффициент сцепления колес с дорогой. При этом скорость автоцистерны уменьшается до момента удара в препятствие до величины V_0 .

Для определения величины скорости движения автомобиля массой m в момент удара о бордюр составим уравнение:

$$\frac{mV_3^2}{2} - \frac{mV_D^2}{2} = S_3 \cdot m \cdot g \cdot \varphi, \quad (1)$$

где $\frac{mV_3^2}{2} - \frac{mV_D^2}{2} = S_3$ – кинетическая энергия АЦ в начале заноса;

$\frac{mV_D^2}{2}$ – кинетическая энергия АЦ в момент удара в препятствие;

$S_3 \cdot m \cdot g \cdot \varphi$ – работа сил трения колес АЦ о поверхность дорожного покрытия при заносе.

Выполнив преобразования, получим формулу по определению скорости движения АЦ в момент удара в бордюрный камень:

$$V_D = 3,6 \cdot \sqrt{(V_3^2 - 2 \cdot S_3 \cdot g \cdot \varphi)} \text{ (км/ч)}, \quad (2)$$

где V_3 – начальная скорость движения;

φ – коэффициент сцепления колес с дорогой;

S_3 – расстояние от начала заноса до препятствия.

Расчетная схема, соответствующая боковому заносу автоцистерны (первый этап) показана на рис. 1.

При стоянке автомобиля центр тяжести жидкого груза находился в точке O_1 , а свободная поверхность занимала положение 1. Центр тяжести кузова находился в точке $O_{Ж1}$.

При заносе под действием бокового замедления, равного $j = \varphi \cdot g$ кузов повернется вокруг центра крена (точки M) на угол крена Ψ_1 . В результате такого поворота центр тяжести кузова $O_{Ж1}$ переместится в точку $O_{Ж2}$. На схеме показано перемещение центра тяжести «зафиксированной» жидкости из точки O_1 в точку O_2 , а верхняя часть груза будет занимать положение 2. При наличии свободной поверхности центр тяжести жидкости переместится в точку O_3 и будет иметь смещение относительно точки O_2 в горизонтальной y_1 и в вертикальной z_1 плоскостях. Свободная поверхность жидкости будет занимать положение 3 с наклоном к горизонту под углом $\alpha = \arctg \varphi$. Величину смещения центра тяжести жидкости в горизонтальной плоскости y_1 можно определить по формуле [2]:

$$y_1 = \frac{b_{ц}^2(\varphi + tg\Psi_1)}{12h(1 - \varphi \cdot tg\Psi_1)} \cos \Psi_1, \quad (3)$$

где $b_{ц}^2$ – ширина цистерны;

Ψ_1 – угол крена кузова;

h – глубина заполнения цистерны жидким грузом.

Подъем центра тяжести жидкости в вертикальной плоскости z_1 можно определить по формуле:

$$z_1 = \frac{b_{ц}^2(\varphi + tg\Psi_1)^2}{24h(1 - \varphi \cdot tg\Psi_1)^2} \cos \Psi_1. \quad (4)$$

Угол крена кузова грузового автомобиля массой m_k при заносе определяется по формуле:

$$\Psi_1 = \frac{m_k \cdot \varphi \cdot h_\psi}{C_\psi - m_k \cdot g \cdot h_\psi}, \quad (5)$$

где m_k – масса кузова;
 h_ψ – плечо крена кузова;
 C_ψ – суммарная угловая жесткость подвески автомобиля.

Крен кузова автоцистерны за счет смещения центра тяжести жидкости будет больше по сравнению с грузовым автомобилем и равным:

$$\Psi_1^ц = \frac{m_k \cdot \varphi \cdot g \cdot h_\psi + m_r \cdot g \cdot y_1 + m_r \cdot g \cdot z_1}{C_\psi - m_k \cdot g \cdot h_\psi}, \quad (6)$$

где m_r – масса жидкого груза.

На втором этапе заноса при ударе колес автомобиля в бордюрный камень происходит поворот кузова вокруг центра крена и опрокидывание относительно точки A . Для выяснения качественной картины этого процесса рассмотрим модель (рис. 2). Тело массой m_n с пружиной жесткостью $C_{ш}$ при заносе ударяется в препятствие. Тело m_n имитирует неподдресоренную массу автомобиля, а сжатие пружины – деформацию шин при ударе о препятствие. В верхней части неподдресоренной массы закреплены пружины, имеющие общую угловую жесткость C_ψ , на которых установлена неподдресоренная масса (кузов) массой m_k . Пружины имитируют действие рессор подвески автомобиля, а тело m_k – массу кузова автоцистерны без учета жидкого груза. Кузов имеет форму сосуда, в котором перемещается жидкий груз массой m_r . Для имитации перемещения с подъемом центра тяжести жидкости в цистерне установлена пружина жесткостью C_r . Массы m_n , m_k , m_r считаются точечными массами, а массой пружины пренебрегаем. Массы m_n , m_k , m_r находятся на высоте относительно дороги соответственно h_n , h_k , h_r . При ударе колес о бордюрный камень пружина C_n сжимается на величину x_1 . Под действием силы инерции равной $m_n \ddot{\theta}_n$ возникает поворачивающий момент, равный $M_n = m_n \ddot{\theta}_n h_n$ вокруг точки A . Под действием замедления $\ddot{\theta}_n$ на пружинах подвески кузов поворачивается вокруг центра крена (точки N) с замедлением $\ddot{\Psi}$ на угол φ . Одновременно центр тяжести кузова m_k переместится в горизонтальной плоскости на величину x_1 за счет деформации шин. Жидкий груз m_r в цистерне имеет три перемещения: в горизонтальной плоскости за счет деформации шин на величину x_1 , вокруг центра крена N на угол φ и на величину x_2 за счет смещения центра тяжести жидкого груза m_r . Между жидким грузом и цистерной действует жидкостное трение.

При решении задачи делаем допущение, что потеря устойчивости при опрокидывании возникает когда величина опорной реакции в точке B равна нулю. Такое допущение сделано на основании результатов экспериментальных исследований устойчивости модели цистерны с жидким грузом. Эти исследования показали, что при предельно допустимом крене модели цистерны происходит перемещение жидкого груза и опрокидывание модели.

При достижении предельного замедления величина опорной реакции в точке B становится равной нулю, после чего происходит быстрое опрокидывание модели.

У модели с твердым грузом на подвеске, имитирующей грузовой автомобиль, по сравнению с жидким грузом, происходит под действием замедления сначала отрыв опорных точек с обратным возвратом без опрокидывания. Модель с твердым грузом без учета подвески при действии замедления более устойчива к опрокидыванию. Устойчивость модели

по опрокидыванию повышается за счет увеличения работы по подъему центра тяжести автомобиля. При этом происходит поворот центра тяжести модели вокруг опорных точек колес с подъемом центра тяжести на высоту Δh :

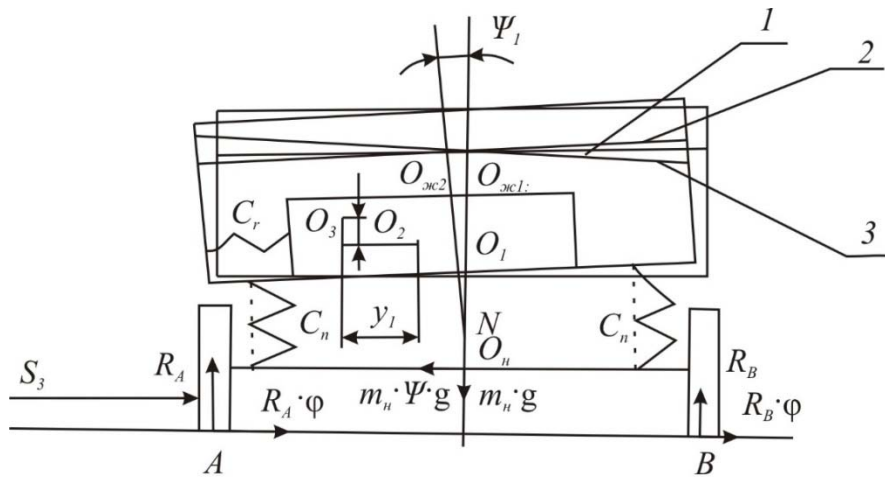


Рисунок 1 – Модель автоцистерны в начальный момент заноса

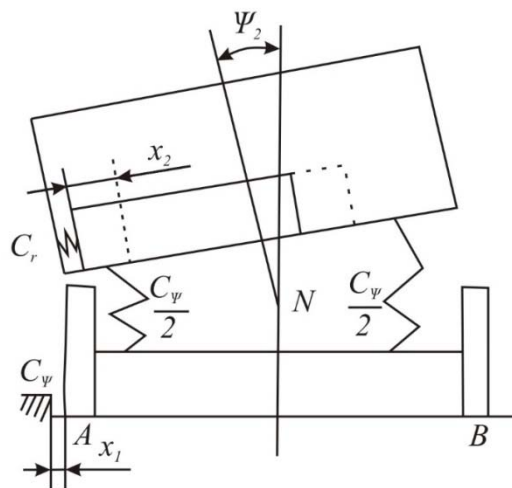


Рисунок 2 – Расчетная модель автоцистерны при заносе и ударе колес в упор

$$\Delta h = \sqrt{\frac{B^2}{4} + h_a^2} - h_a, \quad (7)$$

где B – колея автомобиля;
 h_a – высота центра тяжести автомобиля.

Для определения Δh , при котором происходит опрокидывание АЦ, необходимо ввести значение коэффициента поперечной устойчивости против опрокидывания K , который равен $K=B/2h_a$, где $B=2h_a \cdot K$.

Выполнив подстановку в формулу (7) значение B :

$$\Delta h = h_a(\sqrt{1 + K^2} - 1). \quad (8)$$

Для рассмотрения устойчивости автоцистерны с учетом крена кузова и перемещением жидкого груза рассмотрим следующую систему.

Система имеет три степени свободы и для определения положения материальных точек необходимо задать три независимых параметра. Эти параметры должны определять положение центра тяжести непрессоренной массы при деформации шины в горизонтальной плоскости на величину x_1 ; положение центра тяжести кузова O_{K1} при повороте кузова вокруг центра крена (точки N) на угол Ψ и положение жидкого груза относительно цистерны при перемещении на величину x_2 .

Для составления дифференциальных уравнений движения системы применим уравнение Лагранжа:

$$\frac{d\partial T}{dt\partial q_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial q_i} = Q_i, \quad (9)$$

где T ; Π – соответственно кинетическая и потенциальная энергия системы;
 Φ – функция рассеивания;
 Q_i – обобщенная сила, действующая вдоль обобщенных координат.

Полная кинетическая энергия системы равна:

$$T = \frac{m_n x_1^2}{2} - \frac{I_\varphi \Psi^2}{2} + \frac{m_r x_1^2}{2} + \frac{I_r \Psi^2}{2} + \frac{m_r x_2^2}{2} + \frac{m_k x_1^2}{2}. \quad (10)$$

Сделав упрощение, получим:

$$T = \frac{m_a x_1^2}{2} + \frac{I_n \Psi^2}{2} + \frac{m_r x_2^2}{2}. \quad (11)$$

В этом равенстве x_1 ; x_2 – соответственно скорость центров тяжести автомобиля и жидкого груза в горизонтальной плоскости; I_n – момент инерции непрессоренной массы.

Потенциальная энергия при деформации пружин будет равна:

$$\Pi = \frac{C_n x_1^2}{2} + \frac{C_\Psi \Psi^2}{2} + \frac{C_r x_2^2}{2}. \quad (12)$$

Функция рассеивания определяется из равенства:

$$\Phi = \frac{K_1 x^2}{2} + \frac{K_2 \Psi^2}{2} + \frac{K_3 x_2^2}{2}, \quad (13)$$

где K_1 ; K_2 – соответственно коэффициенты сопротивления шин и амортизаторов подвески автомобиля;

K_3 – коэффициент жидкостного трения.

Произведем дифференцирование полученных выражений кинетической, потенциальной энергий и функции рассеивания по принятым обобщенным координатам с применением уравнения Лагранжа:

$$I_n \ddot{\Psi} + C_\Psi \dot{\Psi} + K_2 \Psi = 0;$$

$$\begin{aligned} m_a \ddot{x}_1 + C_H x_1 + K_1 \dot{x}_1 &= 0; \\ m_r \ddot{x}_2 + C_r x_2 + K_3 \dot{x}_2 &= 0. \end{aligned} \quad (14)$$

В рассматриваемой системе дифференциальных уравнений первое уравнение характеризует поведение подвески при повороте вокруг центра крена (точки N) на угол крена Ψ , второе – перемещение ПАСА за счет деформации шин на величину x_1 и третье – перемещение жидкого груза на величину x_2 .

Если груз в цистерне неподвижен, то движение автомобиля с учетом подвески при опрокидывании описывается системой первых двух уравнений (14).

Если пренебречь влиянием подвески и рассматривать груз в автомобиле неподвижным, то условием предельно допустимого состояния автомобиля по опрокидыванию будет:

$$\frac{m_a V_g^2}{2} = m_a g \Delta h. \quad (15)$$

Делая подстановку значения Δh из (8) в равенство (15) и выполнив преобразования, можно определить предельно допустимую скорость движения АЦ при заносе и последующем ударе колес с опрокидыванием:

$$V_d = \sqrt{2gh_a(\sqrt{1+K^2}-1)}. \quad (16)$$

Анализируя формулы (2) и (15) можно сделать вывод, что формула (2) определяет значение скорости движения АЦ в момент удара в препятствие V_d в зависимости от скорости начала заноса V_3 , расстояния движения автомобиля в заносе и коэффициента сцепления колес с дорогой. Формула (16) определяет значение предельно допустимой скорости движения АЦ по ее опрокидыванию V_d с учетом величин высоты центра тяжести и коэффициента поперечной устойчивости против опрокидывания.

Приравнявая значения V_d в формулах (2) и (16), выполнив преобразования, получим формулу по определению предельно допустимой скорости движения АЦ на повороте:

$$\begin{aligned} \sqrt{V_3^2 - 2S'_3 g \varphi} &= \sqrt{2gh_a(\sqrt{1+K^2}-1)}, \\ \text{откуда } V_3 &= \sqrt{2gh_a(\sqrt{1+K^2} + S'_3 \varphi) - 1}. \end{aligned} \quad (17)$$

Для решения системы дифференциальных уравнений второго порядка (14) обозначим $\dot{x}_1 = \alpha$; $\dot{\psi} = \beta$; $\dot{x}_2 = \gamma$ и сведем ее к системе первого порядка. Тогда система уравнений примет вид:

$$\begin{aligned} \dot{\beta} &= -\frac{(C_\psi \psi + K_2 \beta)}{I_n}; & \dot{x}_1 &= \alpha; \\ \dot{\alpha} &= -\frac{(C_H x_1 + K_1 \alpha)}{m_a}; & \dot{x}_2 &= \gamma; \end{aligned} \quad (18)$$

$$\dot{\gamma} = -\frac{(C_r x_2 + K_3 \gamma)}{m_r}; \quad \dot{\psi} = \beta.$$

Систему уравнений (17) можно решить с помощью одного из существующих численных методов, например, методом Рунге-Кутты.

Поскольку в рассматриваемой модели пружина C_r имитирует подъем центра тяжести жидкости, то необходимо определить значение жесткости пружины в пересчете на смещение жидкого груза. Смещение в вертикальной плоскости жидкого груза можно определить по формуле [2]:

$$z = \frac{b_u^2 \omega_x^2}{24hg^2}. \quad (19)$$

Исходя из условия равенства потенциальной энергии сжатой пружины и потенциальной энергии поднятого центра тяжести жидкого груза, получим уравнение:

$$\frac{m_r g b_u^2 \omega_x^2}{24hg^2} = \frac{C_r x_2^2}{2}, \quad (20)$$

отсюда определим значение C_r :

$$C_r = \frac{m_r b_u^2 \omega_x^2}{12hg x_2^2}. \quad (21)$$

Принимая $m_r = 4000$ кг; $b_u = 1,4$ м; $h = 0,9$ м; $x_2 = 0,2$ м; $\omega_x = 7,38$ м/с² получим, что $C_r = 7200$ кг/м.

Начальными условиями второго этапа опрокидывания будут:

$$t_2 = \sqrt{\frac{2S_3}{\varphi \cdot g}};$$

$$x_1 = 0; \quad \Psi = \frac{m_k \cdot \varphi \cdot g \cdot h \psi + m_r \cdot g \cdot y_1 + m_r \cdot g \cdot z}{C_\psi - m_k \cdot g \cdot h \psi}, \quad (22)$$

$$x_1 = g_3 - \varphi g \sqrt{\frac{2S_3}{\varphi \cdot g}}; \quad \dot{\psi} = 0;$$

$$x_2 = 0; \quad x_2 = \frac{b_u^2 (\varphi + tg \Psi_1)}{12h(1 - \varphi \cdot tg \Psi_1)} \cos \Psi_1. \quad (23)$$

В первоначальный момент удара величины $\dot{\psi}$ и \dot{x}_2 будут иметь максимальное значение и при $\psi = \max$ становятся равными нулю.

Так как принималось, что условием опрокидывания согласно рис. 2 будет $R_B = 0$, т. е. при наличии предельно допустимого крена ψ_{\max} , который равен из работы [3]:

$$\Psi_2^u = \frac{m_k \cdot \eta_u \cdot h \psi + m_r \cdot g \cdot y_1 + m_r \cdot \eta_u \cdot z_1}{C_\psi - m_k \cdot g \cdot h \psi}, \quad (24)$$

где η_y – коэффициент поперечной устойчивости автоцистерны, определяемый по формуле:

$$\eta_y = \frac{G_a \frac{B}{2} (C_\psi - G_k h_\psi) - G_r y C_\psi}{G_a h_a (C_\psi - G_k h_\psi) + G_k^2 h_\psi^2 + G_r z C_\psi}, \quad (25)$$

где G_a – полный вес автомобиля (Н);

G_k – полный вес кузова (Н).

При решении задачи определяется значение η_y и ψ_2^H . Затем методом Рунге-Кутты определяются необходимые параметры оценки устойчивости АЦ по опрокидыванию в процессе заноса.

Заключение

На основании анализа полученных зависимостей можно сделать следующие выводы:

1. На устойчивость против заноса пожарной автоцистерны оказывают влияние:

- скорость движения автомобиля при движении на повороте;
- радиус поворота;
- коэффициент сцепления колеса с дорогой;
- степень износа протектора шины.

2. На устойчивость против опрокидывания оказывают влияние:

- колея автомобиля;
- высота центра тяжести автомобиля;
- высота центра крена подрессоренной массы;
- суммарная угловая жесткость подвески автомобиля;
- величина горизонтального и вертикального смещения центра тяжести жидкого

груза;

- скорость бокового движения при заносе автомобиля в момент удара о препятствие.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джонс, И.С. Влияние параметров автомобиля на дорожно-транспортные происшествия / И.С. Джонс; пер. с англ. С.Р. Майзельс; под ред. Р.В. Ротенберга. – М.: Машиностроение, 1979. – 207 с.
2. Кулаковский, Б.Л. Определение смещения центра тяжести жидкости в цистерне прямоугольной формы / Б.Л. Кулаковский // Сб. научных трудов БелНИТИАТ. – Мн., 1975. – С. 129-140.
3. Кулаковский, Б.Л. Устойчивость автоцистерны / Б.Л. Кулаковский // Пожарное дело. – 1979. – № 11. – С. 24.
4. Кулаковский, Б.Л. Эксплуатационные свойства пожарных автоцистерн / Б.Л. Кулаковский. – Мн.: «Минсктиппроект», 2006. – 210 с.