

## УСТОЙЧИВОСТЬ АВОЦИСТЕРНЫ ПРОТИВ ЗАНОСА И ОПРОКИДЫВАНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО КРУГУ С ПОПЕРЕЧНЫМ УКЛОНОМ

Кулаковский Б.Л., к. т. н., доцент, Максимов П.В.  
Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь  
e-mail: [mail@kii.gov.by](mailto:mail@kii.gov.by)

*Проведено исследование устойчивости автоцистерны против заноса и опрокидывания при движении по кругу с поперечным уклоном дороги. Рассмотрено действие сил на автоцистерну при движении на повороте. Определены зависимости предельного радиуса поворота автоцистерны от скорости движения, степени заполнения, коэффициента сцепления колеса с дорогой и скорости поворота управляемых колес.*

*The analysis of stability is carried out of tank truck to the drift and the tilting in circular movement with the side rake of road. The action of forces on the tank truck during the movement on the turning is examined. The dependences of the maximum turning radius of the tank truck on the rate of movement, degree of filling, coefficient of adhesion of wheel and of the speed of controlled wheels are determined.*

(Поступила в редакцию 25 декабря 2009 г.)

Устойчивость автомобильной цистерны против заноса и опрокидывания при движении на повороте является важным эксплуатационным свойством автомобиля, влияющим на его безопасность. На способность автомобиля к заносу как при движении на повороте, так и при торможении оказывает влияние величина его момента инерции относительно вертикальной оси. В результате наличия жидкости в емкости автоцистерны величина момента инерции относительно вертикальной оси этого автомобиля будет меньше по сравнению с грузопассажирским транспортом, имеющим равные весовые и размерные параметры [1]. Для получения оценки влияния жидкого груза на устойчивость автоцистерны против заноса необходимо выполнить комплекс теоретических и экспериментальных исследований.

Для проведения теоретических исследований рассмотрим схему поведения автомобильной цистерны на повороте (рис. 1).

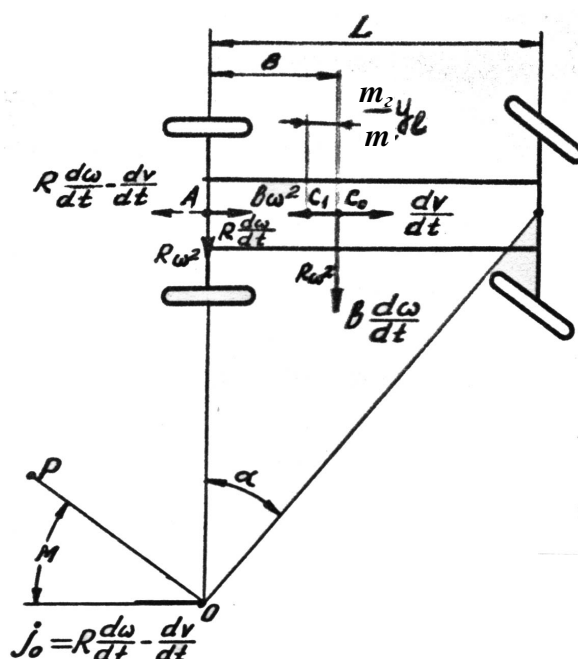


Рисунок 1 – Схема ускорений, действующих на автомобильную цистерну

Как показано в [2], величина ускорения любой точки шасси автомобиля на повороте определяется выражением

$$j = R \frac{d\omega}{dt} + \frac{dv}{dt}, \quad (1)$$

где  $R$  – радиус поворота;  
 $\omega$  – угловая скорость автомобиля;  
 $\frac{d\omega}{dt}$  – угловое ускорение;  
 $\frac{dv}{dt}$  – поступательное ускорение.

На автомобильную цистерну действуют силы инерции, направленные вдоль ее продольной оси  $S_x$  и перпендикулярно к ней  $S_y$ , значения которых можно определить с помощью следующих формул:

$$S_x = m_a \left( \frac{dv}{dt} - b \frac{v^2}{R^2} \right); \quad (2)$$

$$S_y = m_a \left( \frac{v^2}{R} + \frac{b}{R} \frac{dv}{dt} + \frac{bv}{L} \frac{d\theta}{dt} \right), \quad (3)$$

где  $m_a$  – масса автомобиля;  
 $b$  – расстояние по горизонтали от центра тяжести автомобиля до оси заднего моста;  
 $v$  – скорость движения;  
 $L$  – база автомобиля;  
 $\frac{d\theta}{dt}$  – изменение скорости поворота управляемых колес.

При ускоренном или замедленном движении на повороте автоцистерны происходит смещение центра тяжести жидкого груза вдоль продольной оси из точки  $C_0$  в точку  $C_1$  на величину  $y_l$ . Вследствие этого меняется и положение центра тяжести автоцистерны, величину смещения которого можно представить в виде  $m_r : m_a \cdot y_l$ , где  $m_r$  – масса жидкого груза. Тогда текущее положение центра тяжести до заднего моста равно:

$$b_g = b - \frac{m_r}{m_a} y_l. \quad (4)$$

На поперечную устойчивость автомобилей оказывает наибольшее влияние поперечная инерционная сила. В связи с этим рассмотрим ее значение. С учетом (4) величина поперечной силы, действующей на автомобиль, будет равна:

$$S_y = \frac{m_a}{L} (v^2 \theta + (b - \frac{m_r}{m_a} y_l) \theta) \frac{dv}{dt} + (b - \frac{m_r}{m_a} y_l) v \frac{d\theta}{dt}. \quad (5)$$

Для вычисления поперечной устойчивости автомобиля необходимо знать значение положения центра тяжести груза  $y_l$  в зависимости от величины поперечной силы. Для определения этой величины применим методику расчета, изложенную в работе [3]. Обозначим глубину заполнения цистерны  $h$ , высоту цистерны  $h_0$  и длину цистерны  $l$ .

При заполнении  $h < h_0 - \frac{l}{2} \frac{dv}{dt} \frac{1}{g}$ :

$$y_l = \frac{l^2 \frac{du}{dt}}{12hg}, \quad (6)$$

при заполнении  $h > h_0 - \frac{l}{2} \frac{dv}{dt} \frac{1}{g}$ :

$$y_l = \frac{3l(h_0 - h) - 2(h_0 - h) \sqrt{\frac{(h_0 - h)2lg}{\frac{dv}{dt}}}}{6h}. \quad (7)$$

Указанные зависимости отражают процесс перемещения жидкого груза и оценки устойчивости автоцистерны при движении по горизонтальному участку дороги. На практике часто движение автомобиля происходит при наличии поперечного уклона дороги, усложняя оценку по устойчивости.

Рассмотрим устойчивость автоцистерны на повороте, считая, что полотно дороги имеет поперечный уклон (угол  $\beta$ ). Схема сил, действующих на автоцистерну, показана на рис. 2.

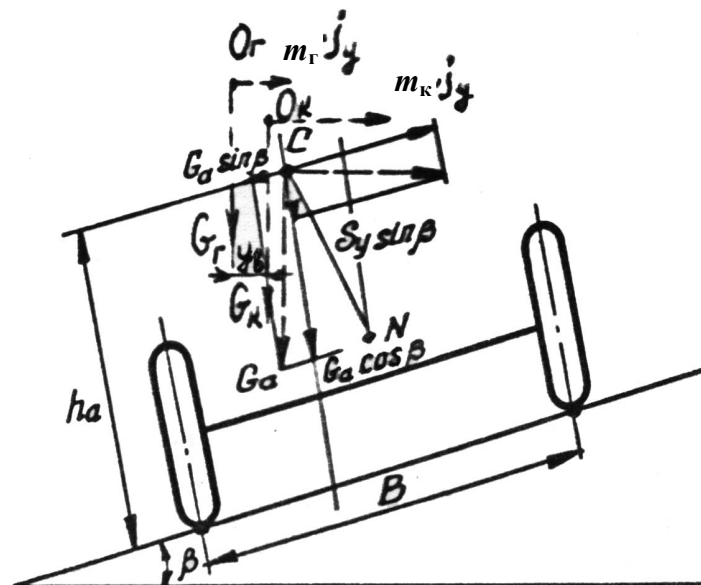


Рисунок 2 – Схема сил, действующих на автомобильную цистерну при движении на уклоне

В результате действия поперечной  $y$ -составляющей силы инерции центр тяжести жидкого груза смещается относительно емкости и находится в точке  $O_r$ , а центр тяжести кузова поворачивается вокруг центра крена (точки  $N$ ) и находится в точке  $O_k$ . Смещение центров тяжести  $O_r$  и  $O_k$  оказывает основное влияние на перемещение центра тяжести автоцистерны, который будет находиться в точке  $C$ .

В соответствии с рис. 2, условием поперечной устойчивости автоцистерны против опрокидывания будет уравнение

$$S_y \cos \beta h_a - G_a \sin \beta h_a - G_a \cos \beta \frac{B}{2} + G_k h_\psi \sin \psi \cos \beta + G_r y_b \cos \beta +$$

$$+ S_y \sin \beta \frac{B}{2} + S_y \sin \beta h_\psi \sin \psi + S_y \sin \beta y_b \frac{G_r}{G_a} = 0, \quad (8)$$

где  $h_a$  – высота центра тяжести автомобиля;

$B$  – колея;

$h_\psi$  – плечо крена кузова;

$\psi$  – угол крена кузова.

Смещение центра тяжести автоцистерны в поперечном направлении из-за перемещения жидкого груза  $y_b$  относительно емкости представлено в виде  $y_b \frac{G_r}{G_a}$ .

В уравнении (8) величину  $y_b$  можно определить с применением зависимостей, использованных в работе [3], и получить следующие формулы:

при  $h < h_0 - \frac{b}{2} \operatorname{tg} \left( \left( \frac{R\omega^2 + b \frac{d\omega}{dt}}{g} \right) + \psi - \beta \right)$ :

$$y_b = \frac{b^2 \operatorname{tg} \left( \left( \frac{R\omega^2 + b \frac{d\omega}{dt}}{g} \right) + \psi - \beta \right) \cos(\psi - \beta)}{12h}, \quad (9)$$

при  $h > h_0 - \frac{b}{2} \operatorname{tg} \left( \left( \frac{R\omega^2 + b \frac{d\omega}{dt}}{g} \right) + \psi - \beta \right)$ :

$$y_b = \frac{(3b(h_0 - h) - 2(h_0 - h)) \sqrt{\frac{(h_0 - h)2b}{\operatorname{tg} \left( \left( \frac{R\omega^2 + b \frac{d\omega}{dt}}{g} \right) + \psi - \beta \right) \cos(\psi - \beta)}}}{6h}. \quad (10)$$

Из формул (9) и (10) видно, что с увеличением угла уклона  $\beta$  смещение  $y_b$  уменьшается и при большой величине уклона может иметь отрицательное значение, т. е. создавать опрокидывающий момент в сторону уклона.

Из уравнения (8) после преобразований можно определить предельно допустимый поперечный уклон дороги на повороте автоцистерны при заданной величине поперечной силы  $S_y$ :

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{S_y h_a - G_a \frac{B}{2} + G_k h_\psi \sin \psi + G_r y_b}{S_y \left( \frac{B}{2} - h_\psi \sin \psi - y_b \frac{G_r}{G_a} \right) + G_a h_a}. \quad (11)$$

Если же заданы угол  $\beta$ , скорость  $v$ , ускорение  $\frac{dv}{dt}$  и  $\frac{d\theta}{dt}$ , то предельно допустимый радиус поворота можно определить из (8) и (5) по формуле

$$R = \frac{m_a \vartheta^2 + (b - \frac{m_z}{b_a} y_l) m_a \frac{d\nu}{dt}}{G_a \operatorname{tg} \beta h_a + G_a \frac{B}{2} - G_k h_\psi \Psi - G_z y_b - \frac{m_a (b - \frac{m_z}{m_a} y_l) \nu \frac{d\theta}{dt}}{L}} \quad (12)$$

$$\frac{h_a - \operatorname{tg} \beta \frac{B}{2} + \operatorname{tg} \beta h_\psi \Psi + \operatorname{tg} \beta y_b \frac{G_z}{G_a}}{L}$$

Из схемы (рис. 2) условием поперечной устойчивости против заноса автоцистерны будет:

$$S_y \cos \beta - G_a \sin \beta - (G_a \cos \beta + S_y \sin \beta) \varphi = 0.$$

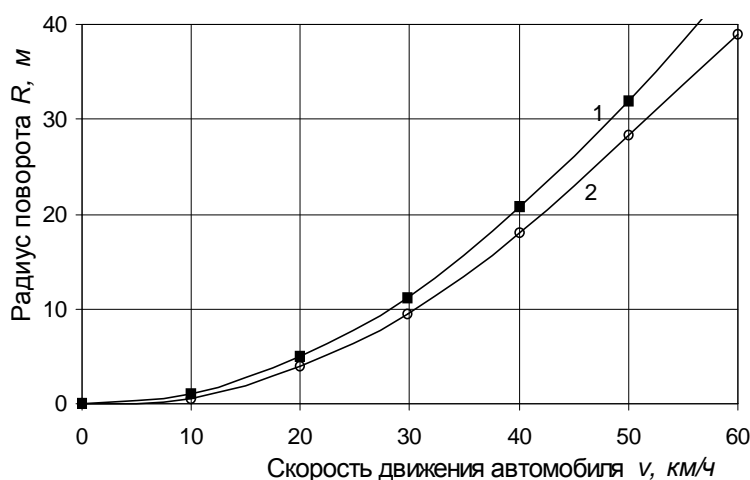
После преобразования получим формулу определения угла предельно допустимого поперечного уклона дороги при заданной величине силы:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{S_y - G_a \varphi}{S_y \varphi + G_a}. \quad (13)$$

Решая совместно равенства (5) и (13), можно при заданном угле  $\beta$ , скорости  $\nu$ , ускорениях  $\frac{d\nu}{dt}$  и  $\frac{d\theta}{dt}$  определить предельно допустимый радиус поворота по заносу автоцистерны:

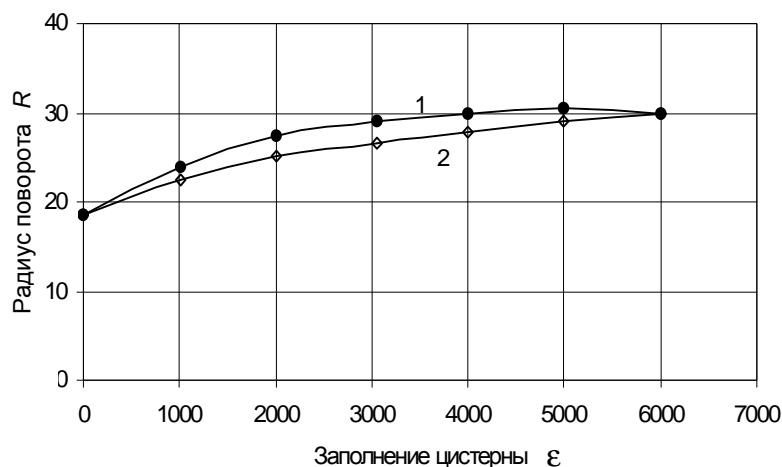
$$R = \frac{m_a \vartheta^2 + (b - \frac{m_r}{m_a} y_l) m_a \frac{d\nu}{dt}}{\frac{G_a (\operatorname{tg} \beta + \varphi)}{1 - \operatorname{tg} \beta \varphi} - \frac{m_a (b - \frac{m_r}{m_a} y_l) \nu \frac{d\theta}{dt}}{L}} \quad (14)$$

На рис. 3 и 4 показаны результаты расчета величины предельно допустимого радиуса поворота из условия опрокидывания поливомоечной машины на шасси МАЗ-5337 (АПМ-7) в зависимости от скорости движения и массы груза. Там же приведены расчетные величины для грузового автомобиля, имеющего аналогичные размерные и весовые параметры.



1 – автоцистерна с жидким грузом; 2 – автоцистерна с «твердым» грузом

**Рисунок 3 – Зависимость предельно допустимого радиуса поворота АПМ-7 (5337) по опрокидыванию от скорости движения**



1 – автоцистерна с жидким грузом; 2 – автоцистерна с «твердым» грузом

**Рисунок 4 – Зависимость предельно допустимого радиуса поворота по опрокидыванию автоцистерны АПМ-7 (5337) от заполнения емкости жидким грузом**

На рис. 3 приведены результаты расчета предельно допустимого радиуса при движении автоцистерны по кругу с постоянной скоростью и заполнением жидким грузом на 2/3 емкости. Анализ графика показывает, что устойчивость автоцистерны ниже по сравнению с грузовым автомобилем.

С увеличением скорости движения происходит увеличение смещения центра тяжести жидкости в емкости и ухудшение поперечной устойчивости автоцистерны. Причем разница между предельно допустимыми радиусами автоцистерны и грузового автомобиля увеличивается.

Зависимость поперечной устойчивости автоцистерны от степени заполнения жидким грузом определялась при скорости движения  $v = 50$  км/ч (рис. 4).

Как видно из графика, с увеличением заполнения цистерны поперечная устойчивость автомобиля ухудшается. Предельно допустимые радиусы поворота порожней и полной цистерны равны предельно допустимым радиусам грузового автомобиля, т. к. в первом случае подвижный груз отсутствует, а во втором случае имеется неподвижный центр тяжести жидкости. При малом заполнении смещение центра тяжести в продольном и поперечном направлениях достигает больших величин, но ввиду того, что масса груза относительно массы кузова незначительна, влияние перемещения жидкости относительно цистерны на поперечную устойчивость автомобиля незначительно. При заполнении емкости на 50 % устойчивость автоцистерн низка по сравнению с грузовым автомобилем, и разница величин предельно допустимого радиуса довольно велика. С дальнейшим увеличением заполнения цистерны разница устойчивости автоцистерны и грузового автомобиля уменьшается до нуля.

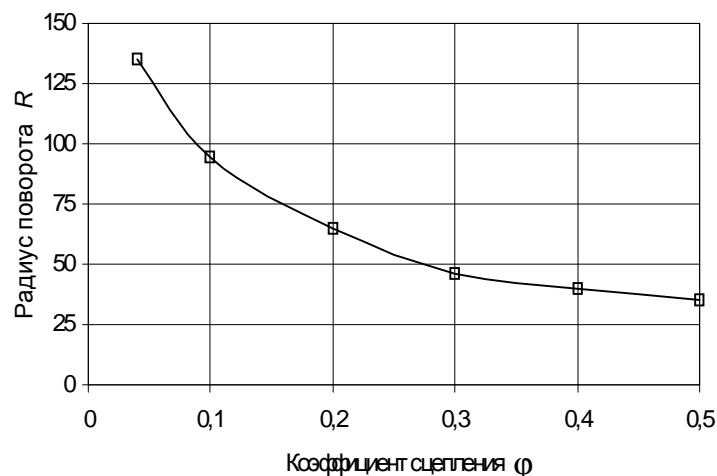
Расчет радиуса поворота при различных углах обратного наклона дороги показал, что с увеличением поперечного угла наклона дороги поперечная устойчивость автоцистерны повышается больше по сравнению с грузовым автомобилем, т. к. с увеличением угла уклона поперечное смещение центра тяжести уменьшается. Происходит это потому, что, с одной стороны, на жидкий груз и кузов цистерны действует центробежная сила, увеличивающая поперечное смещение жидкого груза и крен кузова, а с другой стороны, поперечный уклон дороги создает условия для уменьшения крена кузова и перемещения (перетекания) жидкости в обратную сторону. Исходя из большего эффекта повышения устойчивости пожарной автоцистерны при наличии обратного угла наклона дороги по сравнению с грузопассажирским транспортом, было проведено исследование устойчивости автоцистерны при выполнении системы обратного крена подрессоренной массы [4]. Исследование показало целесообразность конструктивного исполнения системы, обеспечивающей обратный крен кузова, и значительное повышение устойчивости пожарной автоцистерны с применением этой системы.

Расчеты показали, что скорость поворота управляемых колес автоцистерны весьма существенно влияет на ее поперечную устойчивость. Анализ формулы (12) и результатов расчета предельно допустимого радиуса поворота показывает, что резкий поворот рулевого колеса приводит к большому перераспределению нормальных реакций передних и задних колес автоцистерны вследствие действующих сил инерции и перемещения жидкого груза вдоль оси. Это особенно опасно с точки зрения потери управляемости, снижения устойчивости при движении автоцистерны на повороте, когда необходимо резко изменить направление ее движения. Такой маневр приводит к неожиданной для водителя потере управляемости или устойчивости автомобиля. С увеличением скорости поворота управляемых колес устойчивость и управляемость автоцистерны резко ухудшаются.

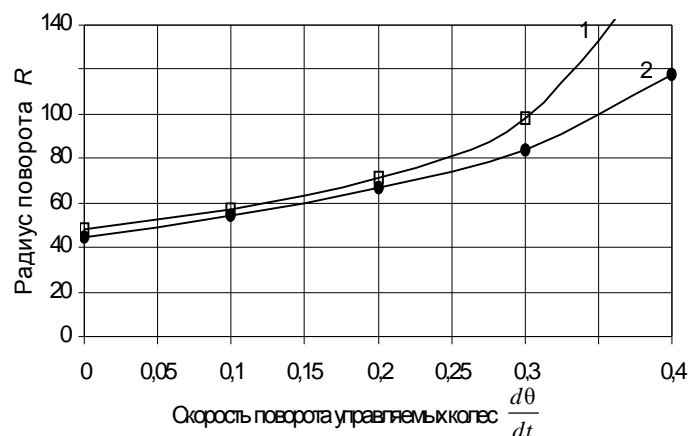
Проведенный расчет допустимого радиуса поворота автоцистерны по формуле (14) показал его зависимость от коэффициента сцепления (рис. 5) и скорости поворота управляемых колес (рис. 6).

С уменьшением коэффициента сцепления (гололед) предельно допустимый радиус поворота автоцистерны резко увеличивается.

Если коэффициент поперечной устойчивости автоцистерны против опрокидывания  $\eta_{\beta\psi}^u$  будет выше коэффициента сцепления  $\phi$ , т. е.  $\eta_{\beta\psi}^u > \phi$ , то возникает опасность заноса. С увеличением коэффициента сцепления до значения  $\phi > \eta_{\beta\psi}^u$  возникает опасность опрокидывания.



**Рисунок 5 – Зависимость предельно допустимого радиуса поворота  $R$  по заносу автоцистерны АПМ-7 (5337) от коэффициента сцепления  $j$ ; заполнение цистерны – 75 %**



**Рисунок 6 – Зависимость предельно допустимого радиуса поворота  $R$  автоцистерны АПМ-7 (5337) от скорости поворота управляемых колес; заполнение цистерны – 75 %**

При изменении скорости поворота управляемых колес автоцистерны более склонна к заносу по сравнению с грузовым автомобилем, имеющим аналогичные размерные и весовые параметры. С увеличением скорости управляемых колес разница между предельно допустимыми радиусами движения автоцистерны и грузового автомобиля увеличивается (см. рис. 6). Происходит это из-за перемещения жидкого груза к передней части автоцистерны и увеличения значения  $b$ .

При движении автоцистерны по кругу величина бокового ускорения имеет прямо пропорциональную зависимость от квадрата скорости движения и обратно пропорциональную – от радиуса поворота. Применяв полученные зависимости, можно определить величины предельно допустимой скорости движения от коэффициента сцепления, радиуса поворота, скорости поворота рулевого колеса и степени заполнения емкости жидким грузом.

С помощью указанных аналитических зависимостей можно определить устойчивость автоцистерны против заноса с учетом возможного перемещения жидкости в поперечном и продольном направлениях.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Автоцистерны с частичным заполнением емкости жидким грузом при движении на повороте имеет худшую поперечную устойчивость против опрокидывания по сравнению с грузовым автомобилем, имеющим аналогичные размеры и весовые параметры. Эта разница возрастает с увеличением крена кузова, высоты центра тяжести автомобиля, поперечного смещения жидкого груза, степени заполнения цистерны, скорости поворота управляемых колес и замедления движения.

Расчет радиуса поворота управляемых колес при различных углах обратного наклона дороги (косогора) показал, что с увеличением этого угла поперечная устойчивость автоцистерны повышается более эффективнее по сравнению с грузовым автомобилем. Полученные аналитические зависимости позволяют выполнять оценку устойчивости автоцистерн при движении по различным траекториям.

2. Поперечная устойчивость автоцистерны против заноса ниже по сравнению с грузовым автомобилем и зависит от коэффициента сцепления, скорости движения и поворота управляемых колес, радиуса кривизны траектории и не зависит от высоты центра тяжести, величины крена кузова и смещения центра тяжести жидкого груза в поперечном направлении цистерны.

С увеличением скорости движения и поворота управляемых колес, уменьшением радиуса кривизны траектории и коэффициента сцепления колеса с дорогой устойчивость автоцистерны снижается в большей степени по сравнению с грузовым автомобилем, имеющим аналогичные весовые и размерные параметры. Такое сравнительное ухудшение устойчивости автоцистерны против заноса происходит из-за процессов перемещения жидкого груза в емкости и снижения величины момента инерции автомобиля относительно вертикальной оси.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кулаковский, Б.Л. Исследование поведения модели цистерны цилиндрической формы с жидкостью при вращении вокруг вертикальной оси / Б.Л. Кулаковский, П.Н. Конон // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация : сб. науч. тр./ НИИ ПБ и ЧС. – 2008. – № 1 (23). – С. 96–104.
2. Гришкевич, А.И. Автомобили. Теория. / А.И. Гришкевич. – Минск : Выш. шк., 1986. – 207с.
3. Кулаковский, Б.Л. Методика оценки устойчивости пожарной автоцистерны против опрокидывания / Б.Л. Кулаковский // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация : сб. науч. тр. / НИИ ПБ и ЧС. – 2006. – № 1 (19). – С. 91–102.
4. Кулаковский, Б.Л. Исследование устойчивости автомобильной цистерны с жидким грузом при наличии обратного крена кузова / Б.Л. Кулаковский // Сб. науч. тр. – Минск : БелНИИТИАТ, 1985. – С. 76–78.