

Научная статья

УДК 629.114.2:531

EDN JSXHEE

DOI: 10.22450/19996837_2023_3_105

Исследование динамики криволинейного движения автоцистерны с частичным заполнением

Елена Сергеевна Поликутина¹, Зоя Федоровна Кривуца²,
Сергей Васильевич Щитов³, Евгений Евгеньевич Кузнецов⁴,
Наталья Владимировна Соболева⁵

¹ Благовещенский политехнический колледж, Амурская область, Благовещенск, Россия

^{2,3,4,5} Дальневосточный государственный аграрный университет

Амурская область, Благовещенск, Россия

² zfk20091@mail.ru, ³ shitov.sv1955@mail.ru, ⁴ ji.tor@mail.ru, ⁵ soboleva.07@mail.ru

Аннотация. Исследовано влияние дополнительных нагрузок на динамику криволинейного движения автоцистерны в зависимости от степени заполнения жидкостью. Установлено, что при изменении скоростного режима огромное значение приобретают дополнительные нагрузки, обусловленные следующими факторами: уровнем заполняемости, размерами резервуара, наличием устройств для гашения колебаний жидкости, смещением центра тяжести. При исследовании движения жидкости в резервуаре цистерны учитывалось, что поверхность равного давления является наклонной плоскостью, поскольку на жидкость действуют поверхностные силы, силы инерции и тяжести. Проведен анализ действия сил инерции при движении автоцистерны с частично заполненной жидкостью. Критерием устойчивости автоцистерны в зависимости от степени заполняемости резервуара жидкостью выбран коэффициент устойчивости автомобиля. Установлено, что на управляемость автоцистерны с частичным заполнением жидкостью при криволинейном движении влияют возникающие составляющие силы инерции, приложенные к центру масс, пропорциональные массе автомобиля, скорости движения и его ускорению, степени заполняемости резервуара жидкостью. Представленные расчеты коэффициента устойчивости автоцистерны с частичным заполнением жидкостью при криволинейном движении в зависимости от степени заполняемости резервуара жидкостью при скорости движения 45 км/ч показывают, что устойчивость автоцистерны наименьшая при заполнении резервуара от 35 до 55 %, что обусловлено максимальным смещением центра масс. В диапазоне от 20 до 40 % значения коэффициента устойчивости автоцистерны для исследуемых жидкостей воды и молока совпадают. Использование полученных зависимостей дает возможность прогнозировать поперечную устойчивость автоцистерны от степени заполняемости резервуара жидкостью при криволинейном движении. Предложенные исследования позволят разработать дополнительное корректирующее устройство, включающееся автоматически и обеспечивающее безопасность движения автоцистерны на переходе с прямолинейного дороги на криволинейную траекторию с учетом возникающих дополнительных нагрузок.

Ключевые слова: автомобиль, жидкость, стабилизирующий момент, возмущающий момент, автоцистерна, коэффициент устойчивости, центр масс

Для цитирования: Поликутина Е. С., Кривуца З. Ф., Щитов С. В., Кузнецов Е. Е., Соболева Н. В. Исследование динамики криволинейного движения автоцистерны с частичным заполнением // Дальневосточный аграрный вестник. 2023. Том 17. № 3. С. 105–117. doi: 10.22450/19996837_2023_3_105.

Original article

Study of the dynamics of the curvilinear movement of a tank truck with partial filling

Elena S. Polikutina¹, Zoya F. Krivutsa²,
Sergey V. Shchitov³, Evgeniy E. Kuznetsov⁴, Natalya V. Soboleva⁵

¹ Blagoveshchensk Polytechnic College, Amur region, Blagoveshchensk, Russia

^{2, 3, 4, 5} Far Eastern State Agrarian University, Amur region, Blagoveshchensk, Russia

² zfk20091@mail.ru, ³ shitov.sv1955@mail.ru, ⁴ ji.tor@mail.ru, ⁵ soboleva.07@mail.ru

Abstract. The effect of additional loads on the dynamics of curved movement of the tanker truck was studied depending on the degree of filling with liquid. It was found that when the speed regime changes, additional loads were of great importance due to the following factors: the level of occupancy, the size of the tank, the presence of devices for suppressing liquid vibrations, and the displacement of the center of gravity. When studying the movement of liquid in the tanker truck, it was taken into account that the surface of equal pressure was an inclined plane, since surface forces, forces of inertia and gravity acted on the liquid. An analysis of the action of inertia forces during the movement of the tanker truck with partially filled liquid was carried out. The criterion for stability of the tanker truck depending on the degree of filling of the reservoir with liquid was the coefficient of stability of the car. It has been found that on the controllability of the tanker truck with partial filling with liquid during curvilinear movement, the emerging components of inertia forces applied to the center of mass are proportional to the mass of the car, the speed of movement and its acceleration, the degree of filling of the reservoir with liquid. The presented calculations of the stability coefficient of the tanker truck with partial filling with liquid during curvilinear movement depending on the degree of filling of the tank with liquid at a speed of 45 km/h show that the stability of the tanker truck is the smallest when filling the tank from 35 to 55 %, which is due to the maximum displacement of the center of mass. In the range from 20 to 40 %, the values of the stability coefficient of the tank truck for the investigated water and milk liquids coincide. The use of the obtained dependencies makes it possible to predict the transverse stability of the tanker truck from the degree of filling of the tank with liquid during curvilinear movement. The proposed studies will make it possible to develop an additional correcting device, which is automatically turned on, ensuring the safety of the tanker truck at the transition from a straight road to a curved trajectory, taking into account the additional loads that arise.

Keywords: car, liquid, stabilizing moment, disturbing moment, tanker truck, stability factor, center of mass

For citation: Polikutina E. S., Krivutsa Z. F., Shchitov S. V., Kuznetsov E. E., Soboleva N. V. Issledovanie dinamiki krivolineynogo dvizheniya avtotsterny s chastichnym zapolneniem [Study of the dynamics of the curvilinear movement of a tank truck with partial filling]. *Dal'nevostochnyy agrarnyy vestnik. – Far Eastern Agrarian Bulletin*. 2023; 17; 3: 105–117. (in Russ.). doi: 10.22450/19996837_2023_3_105.

Введение. На динамику движения автоцистерны на криволинейной траектории при изменении скоростного режима огромное влияние оказывают дополнительные нагрузки, обусловленные следующими факторами: уровнем заполнения, размерами резервуара, наличием устройств для гашения колебаний жидкости, смещением центра тяжести. Движение автоцистерны с частичным заполнением может происходить и при частичном сливе жидкости потребителю, что приводит к изменению динамических

качеств автоцистерны за счет уменьшения отношения массы перевозимой жидкости к массе порожней цистерны. При движении автоцистерны с различной степенью загрузки увеличивается вероятность опасных ситуаций.

В многочисленных исследованиях, проведенных отечественными и зарубежными учеными, изучались вопросы динамики, где объектом исследования выступали транспортные средства, перевозимые закрепленные твердые грузы [1–5]. В связи с этим возникает необходимость разра-

ботать дополнительно корректирующее устройство, включающееся автоматически и позволяющее обеспечить безопасность движения, повысить маневренность автоцистерны на переходе с прямолинейного дороги на криволинейную траекторию с учетом возникающих дополнительных нагрузок.

Материалы и методы исследования. Для оценки эффективности разрабатываемого устройства целесообразно проанализировать влияние дополнительных нагрузок на динамику криволинейного движения автоцистерны в зависимости от степени заполнения жидкостью, поскольку увеличение вероятности возникновения аварийной ситуации на рассматриваемых участках дорог обусловлено образованием колебаний жидкости внутри резервуара, приводящим к значительному снижению поперечной устойчивости автоцистерны.

В рассматриваемой задаче необходимо учитывать, что на движущуюся с постоянной скоростью при повороте си-

стему, включающую автоцистерну и жидкость, действуют силы инерции автоцистерны и жидкости, поверхностные силы жидкости. Возникающие при криволинейном движении силы инерции, поверхностные силы жидкости создают возмущающий момент относительно точки колеса. Стабилизирующий момент создают силы тяжести, составляющие исследуемую систему.

При анализе движения жидкости в резервуаре цистерны необходимо учитывать, что поверхность равного давления является наклонной плоскостью, поскольку на жидкость действуют поверхностные силы, силы инерции и тяжести (рис. 1).

В соответствии с рисунком 1, давление в любой точке жидкости при криволинейном движении автоцистерны с частично заполненной жидкостью определяется выражением (1):

$$p = p_0 + \rho(gz + a_c x) \quad (1)$$

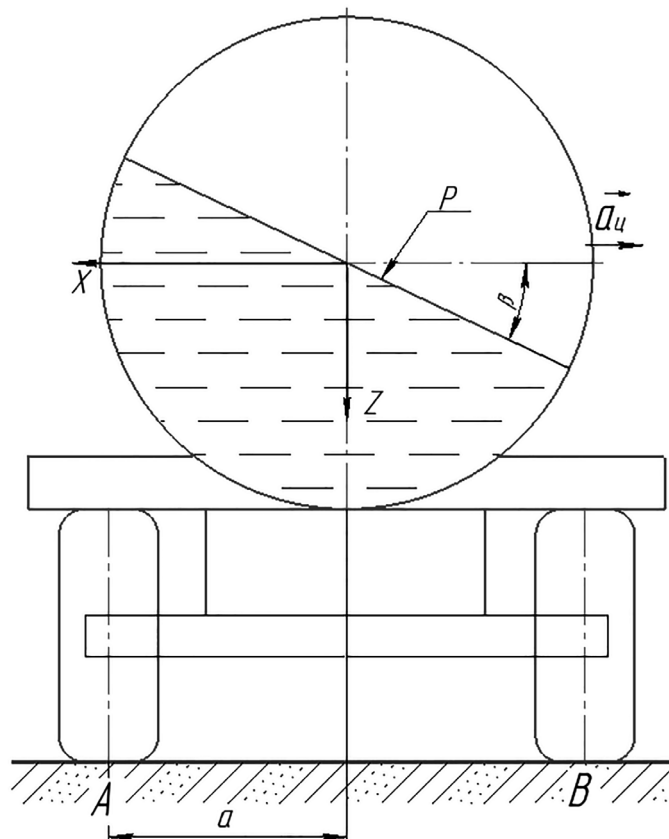


Рисунок 1 – Расчетная схема автоцистерны при криволинейном движении
Figure 1 – Calculation scheme of the tanker truck with curvilinear motion

где p – гидростатическое давление в произвольной точке жидкости, Па;

p_0 – гидростатическое давление, действующее на свободную поверхность жидкости, Па;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

a_u – центробежное ускорение, м/с²;

z, x – координаты точки от пьезометрической плоскости.

Выразим центробежное ускорение через угловую скорость и линейную скорость движения автоцистерны, соответственно выражениями (2) и (3):

$$a_{ц} = \omega^2 R \quad (2)$$

$$a_{ц} = \frac{v^2}{R} \quad (3)$$

где ω – угловая скорость, рад/с;

v – линейная скорость, м/с;

R – радиус кривизны траектории, м.

В рассматриваемом случае движения автоцистерны для свободной поверхности жидкости выполняется условие $p=p_0$. Следовательно, уравнение (1) имеет вид:

$$gz = -a_{ц}x \Rightarrow \operatorname{tg} \beta = \frac{z}{x} = -\frac{a_{ц}}{g} = -\frac{v^2}{gR} \quad (4)$$

где β – угол наклона свободной поверхности жидкости к горизонту, рад.

В случае, когда гидростатическое давление, действующее на свободную поверхность жидкости, не превышает атмосферного давления, выполняется условие $p_0=p_{атм}$, позволяющее рассчитать избыточное давление p_u в любой точке жидкости по формуле (5):

$$p_u = \rho g \left(z + \frac{v^2}{gR} x \right) \quad (5)$$

Следовательно, глубина погружения H по вертикали от пьезометрической плоскости до точки с избыточным давлением рассчитывается по выражению (6):

$$H = z + \frac{v^2}{gR} x \quad (6)$$

Таким образом, угол наклона свободной поверхности жидкости к горизонту, избыточное давление в любой точке жидкости прямо пропорциональны квадрату скорости движения автоцистерны на повороте и обратно пропорциональны радиусу кривизны траектории движения.

В рамках данного исследования при движении автоцистерны с частично заполненной жидкостью возникает значительная дополнительная нагрузка за счет действия сил инерции. В случае неизменности среднего угла поворота обоих ведущих колес движение автоцистерны с частично заполненной жидкостью можно рассматривать как вращение в плоскости вокруг мгновенного полюса вращения O . При движении по криволинейной траектории положение полюса может меняться, но незначительно.

С целью определения влияния кинематических характеристик движения на значения сил инерции автоцистерны рассмотрим схему сил, представленную на рисунке 2.

Учитывая исследования, проведенные авторами работ [6–8], и в соответствии с представленной схемой (рис. 2), положение мгновенного центра ускорения O можно определить выражениями (7), (8):

$$\cos \beta = \frac{\omega^2}{\sqrt{\omega^4 + (\varepsilon)^2}}, \quad (7)$$

$$a = OB = \frac{1}{\omega} \frac{dR}{dt} \cos \beta = \frac{1}{\omega} \frac{dR}{dt} \frac{\omega^2}{\sqrt{\omega^4 + (\varepsilon)^2}} \quad (8)$$

где β – угол поворота мгновенного центра ускорения, рад;

α – угол поворота автоцистерны, рад;

ω – угловая скорость автомобиля, рад/с;

ε – угловое ускорение автомобиля, рад/с²;

R – радиус кривизны поворота, м.

Выразим радиус кривизны поворота, отнесенный к середине задней оси автомобиля R через базу автомобиля L :

С учетом выражения (14), полное ускорение произвольной точки автомобиля, например N , определяется формулой (15):

$$j_N = d\sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2} \quad (15)$$

Полное ускорение мгновенного полюса вращения O может быть записано в следующем виде:

$$j_o = a\sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2} = R\varepsilon - \frac{dv}{dt} \quad (16)$$

Ускорение центра масс C относительно точки A определяется геометрической суммой тангенциального ускорения и нормального ускорения, как показано выражением (17):

$$j_c = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2} = b\sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2} \quad (17)$$

где b – расстояние от центра тяжести до задней оси автомобиля, м.

Для анализа влияния центробежной силы инерции F_m на коэффициент устойчивости автомобиля μ_A , рассмотрим влияние тангенциальной и нормальной составляющих силы инерции на возникающие моменты сил при криволинейном движении, воспользовавшись рисунком 3.

Согласно рисунку 3, тангенциальная составляющая центробежной силы инерции F_x определяется выражением (18):

$$F_x = G \left(\frac{dv}{gdt} - \frac{b\omega^2}{g} \right) \quad (18)$$

Нормальная составляющая силы инерции связана с радиусом поворота R , угловой скоростью автоцистерны ω и линейной скоростью v следующей формулой:

$$F_y = G \left(\frac{R\omega^2}{g} + \frac{b\varepsilon}{g} \right) = \frac{G}{g} \left(\frac{v^2}{R} + b\varepsilon \right) \quad (19)$$

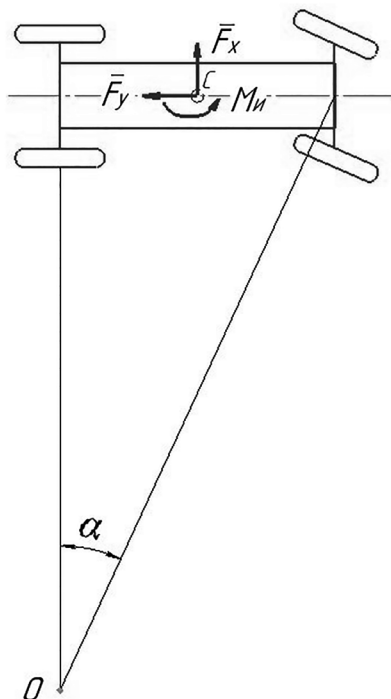


Рисунок 3 – Расчетная схема динамики криволинейного движения автоцистерны
Figure 3 – Calculation scheme of the dynamics of the curvilinear movement of the tanker truck

Таким образом, результирующая сила инерции имеет следующий вид:

$$F = \frac{G}{g} \sqrt{\left(\frac{dv}{dt} - b\omega^2\right)^2 + \left(\frac{v^2}{R} + b\varepsilon\right)^2} \quad (20)$$

где G – вес автомобиля без груза, Н;
 g – ускорение силы тяжести, м/с².

Анализируя уравнения (18)–(20), видим, что составляющие силы инерции, приложенные к центру масс, пропорциональны массе автомобиля, скорости движения и его ускорению.

При движении автоцистерны, частично заполненной жидкостью, по криволинейной траектории, возникающая результирующая сила инерции стремится сместить центр масс в сторону и тем самым снизить поперечную устойчивость автомобиля (рис. 4). В этом случае результирующая сила инерции возрастает и определяется формулой (21):

$$F = \frac{(G + M)}{g} \sqrt{\left(\frac{dv}{dt} - b\omega^2\right)^2 + \left(\frac{v^2}{R} + b\varepsilon\right)^2} \quad (21)$$

где M – вес жидкости, Н.

Наиболее оптимальным критерием для исследования поперечной устойчивости движения автоцистерны при криволинейном движении, согласно исследованиям авторов работ [9–11], является коэффициент устойчивости автомобиля μ_A , который позволяет определить основные кинематические характеристики движения (22):

$$\mu_A = \frac{M_{\text{ст}(A)}}{M_{\text{воз}(A)}} \quad (22)$$

где $M_{\text{ст}(A)}$ – стабилизирующий момент относительно точки А, Н·м;

$M_{\text{воз}(A)}$ – возмущающий момент относительно точки А, Н·м.

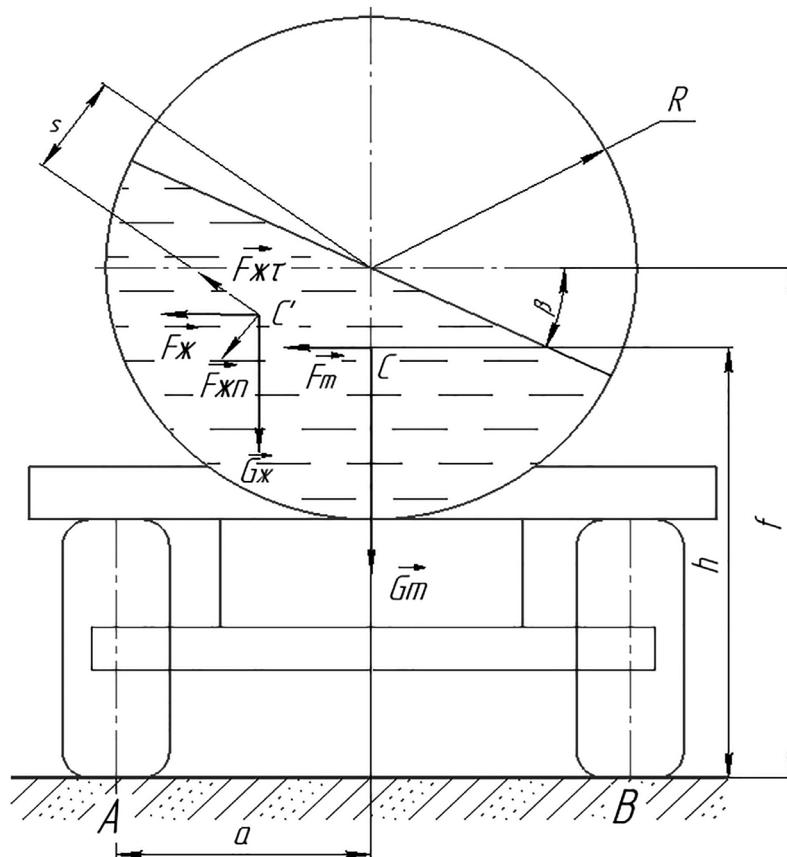


Рисунок 4 – Расчетная схема сил, действующих на автоцистерну при повороте
 Figure 4 – Calculation diagram of the forces acting on the tanker truck when turning

Расчетная схема для определения кинематических характеристик движения автоцистерны с частично заполненной жидкостью по криволинейной траектории представлена на рисунке 4.

Пользуясь данной схемой, значение коэффициента устойчивости автомобиля μ_A относительно точки A , учитывая принцип Даламбера, можно записать в виде выражения (23):

$$\mu_A = \frac{G_T \cdot a + G_{ж}(a - s \sin \beta) + F_{жн} \cdot a \cos \beta}{F_T \cdot h + F_{ж}(f - s \cos \beta) + F_{жн} \cdot f \sin \beta + F_{жт}(f \cos \beta + a \sin \beta - s)} \quad (23)$$

где G_T – сила тяжести транспортного средства, Н;

$G_{ж}$ – сила тяжести жидкости в резервуаре, Н;

F_T – сила инерции транспортного средства, Н;

$F_{ж}$ – сила инерции жидкости в резервуаре, Н;

$F_{жн}$ – нормальная составляющая силы инерции жидкости в резервуаре, Н;

$F_{жт}$ – тангенциальная составляющая силы инерции жидкости в резервуаре, Н;

a, s, h, f – расстояния в соответствии со схемой, м;

β – угол наклона свободной поверхности жидкости к горизонту, рад.

Выразим значения тригонометрических функций угла наклона свободной

поверхности жидкости к горизонту через скорость движения автоцистерны и радиус кривизны траектории движения, используя рисунок 1.

В соответствии с проведенными расчетами, учитывая формулы (2)–(4), получим формулы косинуса и синуса угла наклона свободной поверхности жидкости к горизонту (24):

$$\cos \beta = \frac{v^2}{R \sqrt{\frac{v^4}{R^2} + g^2}}; \sin \beta = \frac{g}{\sqrt{\frac{v^4}{R^2} + g^2}} \quad (24)$$

Учитывая формулы (24), выражение (23) принимает вид:

$$\mu_A = \frac{G_T \cdot a + G_{ж}(a - s \frac{g}{\sqrt{\frac{v^4}{R^2} + g^2}}) + F_{жн} \cdot a \frac{v^2}{R \sqrt{\frac{v^4}{R^2} + g^2}}}{F_T \cdot h + F_{ж}(f - s \frac{v^2}{R \sqrt{\frac{v^4}{R^2} + g^2}}) + F_{жн} \cdot f \frac{g}{\sqrt{\frac{v^4}{R^2} + g^2}} + F_{жт}(f \frac{v^2}{R \sqrt{\frac{v^4}{R^2} + g^2}} + a \sin \frac{g}{\sqrt{\frac{v^4}{R^2} + g^2}} - s)} \quad (25)$$

Результаты исследований и их обсуждение. Таким образом, выражение (25) позволяет установить зависимость коэффициента устойчивости автоцистерны μ_A относительно точки A от кинематических характеристик движения по криволинейной траектории, что показано на рисунке 5.

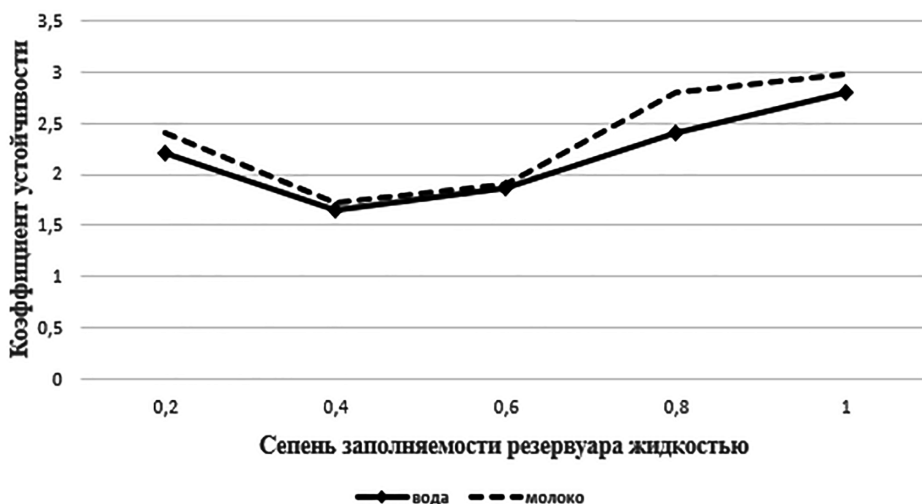


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента устойчивости автоцистерны от степени заполнения резервуара жидкостью

Figure 5 – Dependence of the stability coefficient of the tanker truck on the degree of filling the reservoir with liquid

На данном рисунке даны расчеты коэффициента устойчивости автоцистерны с частичным заполнением при криволинейном движении в зависимости от степени заполняемости резервуара жидкостью при скорости движения 45 км/ч. Расчеты проведены для воды и молока.

Анализ графика показывает, что устойчивость автоцистерны наименьшая при заполнении резервуара от 35 до 55 %, что обусловлено максимальным смещением центра масс. В диапазоне от 20 до 40 % значения коэффициента устойчивости автоцистерны для исследуемых жидкостей совпадают.

Согласно принципу Даламбера, автоцистерна по криволинейной траектории будет двигаться равномерно, при условии равенства нулю геометрической суммы моментов сил, действующих на систему, включающих действующие моменты активных сил и возникающие моменты сил инерции. Следовательно, *сумма моментов активных сил транспортного средства, сил жидкости в резервуаре, сил инерции транспортного средства и сил инерции жидкости в резервуаре равна нулю*, что показано выражением (26):

$$\vec{M}_T + \vec{M}_ж + \vec{M}_{ит} + \vec{M}_{иж} = 0 \quad (26)$$

Используя рисунок 4, можно установить, учитывая выражения (23)–(26), следующую зависимость:

$$\begin{aligned} G_T \cdot a + G_ж(a - s \frac{g}{\sqrt{\frac{v^4}{R^2} + g^2}}) + F_{жн} \cdot a \frac{v^2}{R\sqrt{\frac{v^4}{R^2} + g^2}} = \\ = F_T \cdot h + F_ж \left(f - s \frac{v^2}{R\sqrt{\frac{v^4}{R^2} + g^2}} \right) + F_{жн} \cdot \\ \cdot f \frac{g}{\sqrt{\frac{v^4}{R^2} + g^2}} + F_{жт} \left(f \frac{v^2}{R\sqrt{\frac{v^4}{R^2} + g^2}} + a \sin \frac{g}{\sqrt{\frac{v^4}{R^2} + g^2}} - s \right) \end{aligned} \quad (27)$$

Анализируя уравнения (3), (21), (27), видим, что составляющие силы инерции, приложенные к центру масс, пропорциональны массе автомобиля, скорости движения и его ускорению.

Для определения значения центростремительного ускорения воспользуемся выражениями (3), (27) и, проведя ряд математических преобразований, получим формулу (28):

$$a_{ц} = \frac{m_1 a g + m_2 g (a - s \cos \beta)}{m_1 h + m_2 (f - s \cos \beta)} + \frac{F_{жн} g (a \cos \beta - f \sin \beta)}{m_1 h + m_2 (f - s \cos \beta)} - \frac{F_{жт} g (f \cos \beta + a \sin \beta - s)}{m_1 h + m_2 (f - s \cos \beta)} \quad (28)$$

где m_1 – масса резервуара цистерны и масса жидкости, кг;

m_2 – масса системы «автоцистерна плюс жидкость», кг.

Учитывая выражения (24) и (28), установим зависимость центростремительного ускорения от кинематических характеристик движения автоцистерны по криволинейной траектории (29):

$$a_{ц} = \frac{m_1 a g + m_2 g \left(a - s \frac{v^2}{R\sqrt{\frac{v^4}{R^2} + g^2}} \right) + F_{жн} g \left(a \frac{v^2}{R\sqrt{\frac{v^4}{R^2} + g^2}} - f \frac{g}{\sqrt{\frac{v^4}{R^2} + g^2}} \right)}{m_1 h + m_2 \left(f - s \frac{v^2}{R\sqrt{\frac{v^4}{R^2} + g^2}} \right)} - \frac{F_{жт} g \left(f \frac{v^2}{R\sqrt{\frac{v^4}{R^2} + g^2}} + a \frac{g}{\sqrt{\frac{v^4}{R^2} + g^2}} - s \right)}{m_1 h + m_2 \left(f - s \frac{v^2}{R\sqrt{\frac{v^4}{R^2} + g^2}} \right)} \quad (29)$$

Определим зависимость основных кинематических характеристик движения автоцистерны с частично заполненной жидкостью от рода перевозимой жидкости и степени заполнения ее резервуара.

Используем зависимость (30):

$$m_1 = m_p + m_ж \quad (30)$$

Таким образом, выразим массу перевозимой жидкости $m_ж$ от степени ее заполняемости k и плотности жидкости ρ , в виде выражения (31):

$$m_ж = k \rho V_{max} \Leftrightarrow k = \frac{V}{V_{max}} \quad (31)$$

где k – степень заполняемости резервуара жидкостью;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

V – объем жидкости, м³;

V_{\max} – объем резервуара, м³.

Расчеты центробежного ускорения в зависимости от кинематических характеристик движения автоцистерны по криволинейной траектории, выполненные в программной среде Mathcad, представлены на рисунке 6.

Они позволяют сделать вывод, что с возрастанием скорости движения автоцистерны происходит увеличение центробежного ускорения за счет смещения центра тяжести жидкости в резервуаре, что приводит к ухудшению поперечной устойчивости транспортного средства. При одновременном уменьшении радиуса кривизны дороги центробежное ускорение возрастает значительно и вероятность поперечного опрокидывания автомобиля увеличивается при повороте под влиянием возникающей центробежной силы инерции.

Заключение. На управляемость автоцистерны с частичным заполнением жидкостью при криволинейном движении возникающие составляющие силы

инерции, приложенные к центру масс, пропорциональны массе автомобиля, скорости движения и его ускорению, степени заполняемости резервуара жидкостью, поскольку результирующая сила инерции стремится сместить центр масс в сторону и тем самым снизить поперечную устойчивость автомобиля.

Представленные расчеты коэффициента устойчивости автоцистерны с частичным заполнением жидкостью при криволинейном движении в зависимости от степени заполняемости резервуара жидкостью при скорости движения, составляющей 45 км/ч, показывают, что устойчивость автоцистерны наименьшая при заполнении резервуара от 35 до 55 %, что обусловлено максимальным смещением центра масс. В диапазоне от 20 до 40 % значения коэффициента устойчивости автоцистерны для исследуемых жидкостей (воды и молока) совпадают.

Вероятность поперечного опрокидывания автомобиля возрастает при повороте под влиянием возникающей центробежной силы инерции. В случае

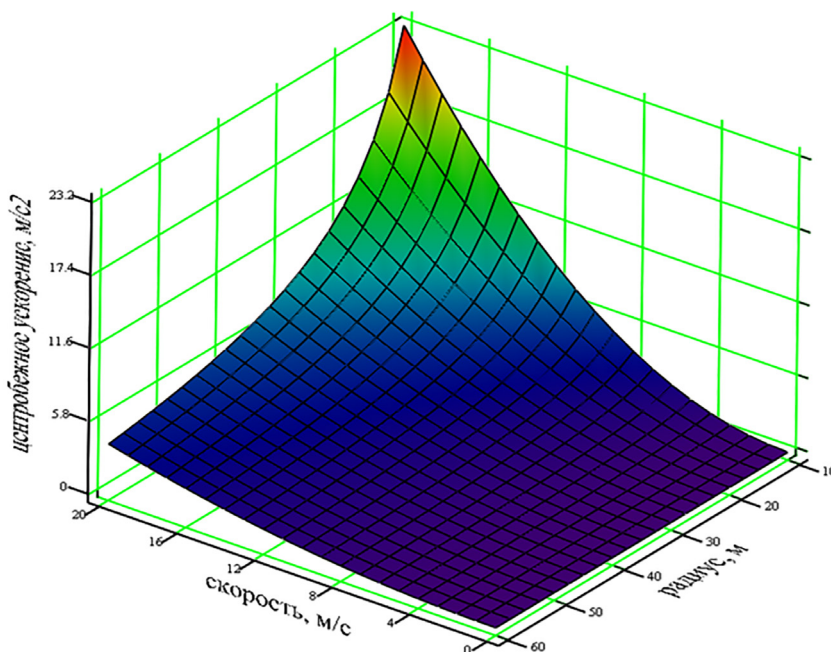


Рисунок 6 – Влияние скорости движения автоцистерны и радиуса кривизны траектории на центробежные ускорения автоцистерны при 50 % заполнении жидкостью

Figure 6 – Influence of the speed of the tanker truck and the radius of curvature of the trajectory on the centrifugal accelerations of the tanker truck at 50 % liquid filling

значительного поперечного уклона дороги составляющая силы тяжести может способствовать поперечному опрокидыванию и при прямолинейном движении автомобиля.

Использование полученных зависимостей дает возможность прогнозировать поперечную устойчивость автоцистерны от степени заполняемости резервуара жид-

костью при криволинейном движении. Предложенные исследования позволят разработать дополнительное корректирующее устройство, включающееся автоматически и обеспечивающее безопасность движения автоцистерны на переходе с прямолинейной дороги на криволинейную траекторию с учетом возникающих дополнительных нагрузок.

Список источников

1. Кузнецов Е. Е., Щитов С. В., Поликутина Е. С. Повышение продольно-поперечной устойчивости и снижение техногенного воздействия на почву колесных мобильных энергетических средств : монография. Благовещенск : Дальневосточный государственный аграрный университет, 2020. 148 с.
2. Кузнецов Е. Е., Щитов С. В. Повышение эффективности использования мобильных энергетических средств в технологии возделывания сельскохозяйственных культур : монография. Благовещенск : Дальневосточный государственный аграрный университет, 2017. 272 с.
3. Кузнецов Е. Е., Кривуца З. Ф., Курков Ю. Б., Двойнова Н. Ф., Соболева Н. В. Обоснование параметрической устойчивости автомобиля на склонной поверхности // Дальневосточный аграрный вестник. 2022. № 2 (62). С. 151–157.
4. Fruhauf M., Mainel T., Belyaev V. I. Ecological consequences of conversion of steppe to arable land in Western Siberia // *Europa Regional*. 2004. Vol. 1. No. 4. P. 13–21.
5. Пономарев Н. В., Беляков Д. В., Кривуца З. Ф., Щитов С. В., Кузнецов Е. Е. Повышение эффективности использования грузовых транспортных средств при перевозке наливных грузов // Дальневосточный аграрный вестник. 2022. № 4 (16). С. 117–122.
6. Пономарев Н. В., Кривуца З. Ф., Щитов С. В., Кузнецов Е. Е., Худовец В. И., Шарипова Т. В. [и др.]. Обоснование режимов конструкции для повышения поперечной устойчивости грузовых автомобилей в повороте // *АгроЭкоИнфо*. 2023. № 1.
7. Kucher V., Krivutsa Z. F., Shchitov S. V., Kuznetsov E. E., Samuilo V. V., Evdokimov V. G. Ways of adapting motor transport for the transportation of cargoes in low temperatures // *International Scientific Siberian Transport Forum – TransSiberia: E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 402. P. 01002. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340201002>.
8. Щитов С. В., Кузнецов Е. Е., Кривуца З. Ф., Евдокимов В. Г., Иванов С. А. Влияние скорости движения автомобиля на эффективность его использования // Дальневосточный аграрный вестник. 2020. № 1 (53). С. 104–111. DOI: 10.24411/1999-6837-2020-11014.
9. Кривуца З. Ф., Щитов С. В., Кузнецов Е. Е. Повышение эффективности перевозки грузов автомобильным транспортом за счет оптимизации скоростных характеристик движения // *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. 2020. № 3. С. 119–125.
10. Slepnev A. E., Polikutina E. S., Shchitov S. V., Kuznetsov E. E., Krivutsa Z. F. Increasing the efficiency of use of wheeled harrow units in regions of risk farming // *Innovative Technologies in Environmental Engineering and Agroecosystems (ITEEA 2021): E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 262. P. 01003. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126201003>.
11. Кузнецова О. А., Кривуца З. Ф., Щитов С. В., Кузнецов Е. Е., Евдокимов В. Г., Поликутина Е. С. [и др.]. Расширение функциональных возможностей колесной энергетики // Дальневосточный аграрный вестник. 2021. № 1 (57). С. 87–98.

References

1. Kuznetsov E. E., Shchitov S. V., Polikutina E. S. *Povyshenie prodol'no-poperechnoi ustoichivosti i snizhenie tekhnogennogo vozdeistviya na pochvu kolesnykh mobil'nykh energeticheskikh sredstv: monografiya [Increasing the longitudinal-transverse stability and*

reducing the technogenic impact on the soil of wheeled mobile power vehicles: monograph, Blagoveshchensk, Dal'nevostochnyj gosudarstvennyj agrarnyj universitet, 2020, 148 p. (in Russ.).

2. Kuznetsov E. E., Shchitov S. V. *Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya mobil'nyh energeticheskikh sredstv v tekhnologii vozdeystviya sel'skohozyajstvennykh kul'tur: monografiya [Improving the efficiency of using mobile energy resources in the technology of cultivation of agricultural crops: monograph]*, Blagoveshchensk, Dal'nevostochnyj gosudarstvennyj agrarnyj universitet, 2017, 272 p. (in Russ.).

3. Kuznetsov E. E., Krivutsa Z. F., Kurkov Yu. B., Dvoynova N. F., Soboleva N. V. Obosnovanie parametricheskoi ustoichivosti avtomobilya na sklonovoi poverkhnosti [Substantiation of the car parametric stability on the inclined surface]. *Dal'nevostochnyi agrarnyi vestnik – Far Eastern Agrarian Bulletin*, 2022; 2 (62): 151–157 (in Russ.).

4. Fruhauf M., Mainel T., Belyaev V. I. Ecological consequences of conversion of steppe to arable land in Western Siberia. *Europa Regional*, 2004; 1: 13–21.

5. Ponomarev N. V., Belyakov D. V., Krivutsa Z. F., Shchitov S. V., Kuznetsov E. E. Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya gruzovykh transportnykh sredstv pri perevozke nalivnykh gruzov [Efficiency improving of the cargo vehicles use in the bulk freight transportation]. *Dal'nevostochnyi agrarnyi vestnik – Far Eastern Agrarian Bulletin*, 2022; 4 (16): 117–122 (in Russ.).

6. Ponomarev N. V., Krivutsa Z. F., Shchitov S. V., Kuznetsov E. E., Khudovets V. I., Sharipova T. V. [et al.]. Obosnovanie rezhimov konstrukcii dlya povysheniya poperechnoj ustojchivosti gruzovykh avtomobilej v povorote [Substantiation of design modes for increasing the transverse stability of trucks in a turn]. *AgroEcoInfo*, 2023; 1 (in Russ.).

7. Kucher V., Krivutsa Z. F., Shchitov S. V., Kuznetsov E. E., Samuilov V. V., Evdokimov V. G. Ways of adapting motor transport for the transportation of cargoes in low temperatures. Proceedings from International Scientific Siberian Transport Forum – TransSiberia: E3S Web of Conferences. (PP. 01002). 2023; 402. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340201002>.

8. Shchitov S. V., Kuznetsov E. E., Krivutsa Z. F., Evdokimov V. G., Ivanov S. A. Vliyanie skorosti dvizheniya avtomobilya na effektivnost' ego ekspluatatsii [Influence of vehicle speed on its efficiency]. *Dal'nevostochnyj agrarnyj vestnik. – Far Eastern Agrarian Bulletin*, 2020; 1 (53): 104–111. DOI: 10.24411/1999-6837-2020-11014 (in Russ.).

9. Kuznetsov E. E., Shchitov S. V., Krivutsa Z. F. Povyshenie effektivnosti perevozki gruzov avtomobil'nym transportom za schet optimizatsii skorostnykh kharakteristik dvizheniya [Improving the efficiency of cargo transportation by optimization of speed characteristics of movement]. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii. – Intellect. Innovations. Investments*, 2020; 3: 119–125 (in Russ.).

10. Slepnev A. E., Polikutina E. S., Shchitov S. V., Kuznetsov E. E., Krivutsa Z. F. Increasing the efficiency of use of wheeled harrow units in regions of risk farming. Proceedings from Innovative Technologies in Environmental Engineering and Agroecosystems (ITEEA 2021): E3S Web of Conferences. (PP. 01003). 2021; 262. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126201003>.

11. Kuznetsova O. A., Krivutsa Z. F., Shchitov S. V., Kuznetsov E. E., Evdokimov V. G., Polikutina E. S. [et al.]. Rasshirenie funktsional'nykh vozmozhnostei kolesnoi energetiki [Expansion of wheeled power functional capabilities]. *Dal'nevostochnyj agrarnyj vestnik. – Far Eastern Agrarian Bulletin*, 2021; 1 (57): 87–98 (in Russ.).

© Поликутина Е. С., Кривуца З. Ф., Щитов С. В., Кузнецов Е. Е., Соболева Н. В., 2023

Статья поступила в редакцию 01.08.2023; одобрена после рецензирования 22.08.2023; принята к публикации 30.08.2023.

The article was submitted 01.08.2023; approved after reviewing 22.08.2023; accepted for publication 30.08.2023.

Информация об авторах

Поликутина Елена Сергеевна, кандидат технических наук, преподаватель специальных дисциплин, Благовещенский политехнический колледж;

Кривуца Зоя Федоровна, доктор технических наук, доцент, Дальневосточный государственный аграрный университет, zfk2009@rambler.ru;

Щитов Сергей Васильевич, доктор технических наук, профессор, Дальневосточный государственный аграрный университет, shitov.sv1955@mail.ru;

Кузнецов Евгений Евгеньевич, доктор технических наук, доцент, Дальневосточный государственный аграрный университет, ji.tor@mail.ru;

Соболева Наталья Владимировна, старший преподаватель, Дальневосточный государственный аграрный университет, soboleva.07@mail.ru

Information about authors

Elena S. Polikutina, Candidate of Technical Sciences, Lecturer of Special Disciplines, Blagoveshchensk Polytechnic College;

Zoya F. Krivutsa, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Far Eastern State Agrarian University, zfk20091@rambler.ru;

Sergey V. Shchitov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Far Eastern State Agrarian University, shitov.sv1955@mail.ru;

Evgeniy E. Kuznetsov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Far Eastern State Agrarian University, ji.tor@mail.ru;

Natalya V. Soboleva, Senior Lecturer, Far Eastern State Agrarian University, soboleva.07@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.