

ПОДХОДЫ К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ДИНАМИКИ АВТОЦИСТЕРН ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ИХ УСТОЙЧИВОСТИ И УПРАВЛЯЕМОСТИ

М. Г. КУЗНЕЦОВА, А. О. ШИМАНОВСКИЙ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Потеря устойчивости и управляемости автоцистерны возможна при неплавных разгоне и торможении, переезде неровностей, резкой смене полосы движения и движении по дуге в повороте, особенно в случаях неполного заполнения резервуара цистерны, характерных для технологических процессов многих сельскохозяйственных, топливозаправочных, пожарных и иных машин. Особенность математического моделирования движения автомобилей с транспортируемыми жидкими грузами заключается в необходимости анализа динамики мультифизических систем, включающих твердые тела и жидкость со свободной поверхностью.

При резких разгоне или торможении автоцистерны изменяются значения нормальных реакций в точках касания колес с дорогой, что обусловлено относительным смещением центра масс жидкости и ведет к изменению значений сил трения между колесами передней и задней оси/осей. Вследствие возникает необходимость рассмотрения четырех режимов торможения для двухосных автомобилей и восьми для трехосных, учитывающих наличие/отсутствие проскальзывания между колесами каждой из осей в отдельности и попарно. Выполненные различными авторами исследования малых колебаний жидкости со свободной поверхностью, приведенные, например, в [1, 2], показали, что они могут быть приближенно учтены путем использования эквивалентной механической модели, которая предполагает замену жидкости сосредоточенной массой (ее относительное перемещение – s), связанной с кузовом транспортного средства при помощи упругой связи (пружины). Модель может применяться при анализе резервуаров с одним или несколькими несообщающимися отсеками правильной геометрической формы. При этом не вся масса жидкости участвует в колебаниях по форме n . Для адекватного описания ситуации, когда свободная поверхность жидкости достигает потолка емкости, можно применить подход, предложенный в работе [3], предполагающий, что центр масс жидкости в процессе ее колебаний не может оказаться смещенным от равновесного положения на величину s_{\max} , большую, чем при случае, когда вся жидкость сосредоточена у одного из концов резервуара, и ее свободная поверхность вертикальна. Жесткость упругой связи определяется по формулам

$$\begin{cases} c = c_{s \leq s_0} = 8m_{\text{ж}} \frac{gth^2 \left[(2n-1)\pi \frac{h}{l} \right]}{h(2n-1)^2 \pi^2} & \text{при } s \leq s_0, \\ c = c_{s > s_0} \cdot e^{\frac{s-s_0}{3(s_{\max}-s)}} & \text{при } s > s_0, \end{cases} \quad (1)$$

где $m_{\text{ж}}$ – масса транспортируемой жидкости, кг; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; h – высота уровня жидкости, м; l – ширина основания резервуара, м; s_0 – значение координаты x , при котором жидкость достигает потолка, м.

При движении центра масс автомобиля массы m_a по дуге транспортируемая жидкость смещается в сторону боковой стенки резервуара, тем самым вызывая опасность опрокидывания автоцистерны. Кинестатический подход предполагает, что предельный угол, при котором начинается отрыв верхних колес от поверхности земли, определяется исходя из равенства нулю суммы моментов относительно оси, вокруг которой происходит опрокидывание (на рисунке 1, a эта ось проходит через точку O перпендикулярно плоскости рисунка). Указанное уравнение имеет вид

$$\Sigma M_{iO} = m_a g \cdot \frac{b_a}{2} - m_a a_x \cdot h_a + m_{\text{ж}} g \left(\frac{b_a}{2} - x_{\text{ж}} \right) - m_{\text{ж}} a_{\text{жx}} (H + z_{\text{ж}}) = 0, \quad (2)$$

где b_a – ширина автомобиля, м; a_x , $a_{\text{жx}}$ – ускорение центра масс автомобиля и жидкости соответственно, в проекции на ось x , м/с^2 ; h_a – высота центра масс автомобиля, м; $x_{\text{ж}}$ – относительное смещение жидкости вдоль оси x , м; H – высота шасси автомобиля, м; $z_{\text{ж}}$ – высота центра масс жидкости относительно шасси, м.

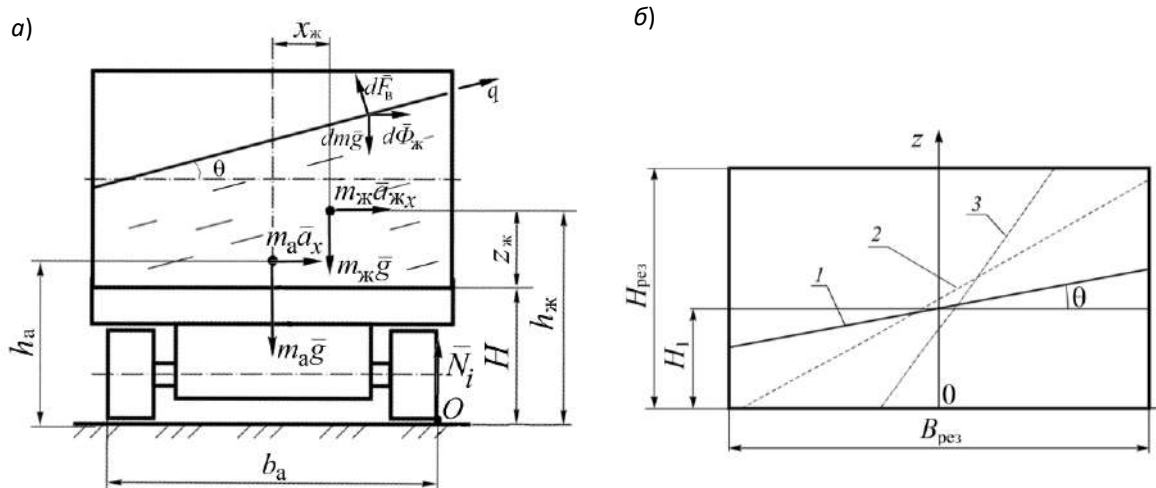


Рисунок 1 – Расчетная схема автомобиля при опрокидывании (а) и варианты расположения свободной поверхности жидкости в цистерне при ее заполнении менее чем наполовину (б)

В этом уравнении $x_{ж}(\theta)$ и $z_{ж}(\theta)$ – координаты центра тяжести жидкости, м. Они зависят от угла наклона свободной поверхности жидкости по отношению к дну резервуара. Полагая, что резервуар имеет форму прямоугольного параллелепипеда, выражения координат центра тяжести жидкости могут быть определены исходя из схемы, приведенной на рисунке 1, б. На ней показаны возможные варианты расположения свободной поверхности жидкости при разных значениях угла θ , который определяется из уравнений динамического равновесия частицы жидкости на свободной поверхности при движении автомобиля со скоростью v_0 по дуге радиуса ρ , на ось q (см. рисунок 1, а):

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{v_0^2}{\rho}. \quad (3)$$

Соответствующие выражения координат центра тяжести жидкости приведены в [4].

Для более точного определения сил инерции, действующих на автомобиль и транспортируемую жидкость, также рассмотрена динамическая схема вхождения автоцистерны в поворот.

Таким образом, разработаны математические модели движения автоцистерны по прямолинейной и криволинейной траекториям, учитывающие наличие резервуара с относительно перемещающейся жидкостью.

Результаты работы показали, что для приближенной оценки вероятности опрокидывания цистерны с сообщающимися отсеками достаточно применения кинестатической модели. Если же требуется уточненный анализ поведения автомобиля с транспортируемой жидкостью, то в качестве первого приближения можно использовать уравнения, построенные на основе эквивалентных моделей. Более полный учет гидродинамических эффектов и геометрических особенностей конструкции цистерны требует выполнения численного моделирования колебаний жидкого груза в резервуаре в инженерном пакете ANSYS или аналогичных программах.

Список литературы

- 1 Li, Y. C. Modeling problem of equivalent mechanical models of a sloshing fluid / Y. C. Li, H. L. Gou // Shock and Vibration. – 2018. – Vol. 2018 – 13 p.
- 2 Experimental and theoretical investigation on the sloshing of a two-liquid system with free surface / M. La Rocca [et al.] // Physics of Fluids. – 2005. – № 17. – P. 062101-1–062101-17.
- 3 Шимановский, А. О. Модифицированная дискретно-массовая модель цистерны с жидкостью / А. О. Шимановский // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки : междунар. сб. науч. тр. – 2011. – Вып. 5. – С. 163–165.
- 4 Высоцкий, М. С. Динамика автомобильных и железнодорожных цистерн / М. С. Высоцкий, Ю. М. Плескачевский, А. О. Шимановский. – Минск : Белавтотракторостроение, 2006. – 320 с.