

## ДИНАМИКА ЦИСТЕРНЫ, ЧАСТИЧНО ЗАПОЛНЕННОЙ ЖИДКОСТЬЮ, ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО ЗАКРУГЛЕНИЮ

*Белорусский государственный университет транспорта  
Гомель, Беларусь*

Среди большого количества грузов, перевозимых транспортными средствами, значительную долю составляют жидкие грузы, причем особое место занимают опасные. Аварии, происходящие при эксплуатации подвижного состава, перевозящего жидкие грузы, приводят не только к повреждению подвижного состава и железнодорожного пути, но и к нанесению значительного ущерба окружающей среде.

Цистерны при погрузке не заполняются доверху во избежание разрывов оболочек их котлов, вызванных значительным ростом внутреннего давления при внешних тепловых воздействиях. Уровень заполнения зависит от вида перевозимой жидкости. Кроме того, при раздаче груза потребителям и нарушении герметичности сливного оборудования возможны ситуации, при которых котлы цистерн оказываются заполненными наполовину или даже меньше.

Жидкость, заполняющая котел, перемещается в нем в течение всего процесса движения. Поскольку масса перевозимой жидкости сопоставима с массой незагруженного транспортного средства, ее относительные перемещения оказывают существенное влияние на параметры движения цистерны. В то же время цистерны должны отвечать повышенным требованиям обеспечения безопасности движения вследствие опасности большинства перевозимых грузов.

В связи с перечисленными причинами возникает необходимость исследования движения цистерн, частично заполненных жидкостью. Наибольший интерес здесь представляет изучение характера их движения при переходных режимах движения.

Анализ публикаций показал, что в литературе содержится очень мало информации о расчетах переходных процессов в системах твердых тел, некоторые из которых частично заполнены жидкостью. В монографиях [2, 4] рассматривается движение свободного твердого тела, имеющего полости, частично заполненные жидкостью. Приведенные в опубликованных научных работах результаты исследований дают возможность сделать вывод о том, что теория, позволяющая изучить влияние относительно движения жидкости на колебания цистерн, частично заполненных жидкостью, практически не разработана.

Например, в работе [1] предлагается метод решения задачи о продольных колебаниях цистерны с жидкостью. В книге [3] рассматривается устойчивость цистерн при малых боковых колебаниях.

При исследовании переходных режимов движения цистерн нельзя ограничиваться случаем малых колебаний. Для точного описания движения жидкости в котле цистерны должны быть использованы уравнения динамики сплошной среды. Причем, особенностью задачи является наличие постоянно изменяющей свое положение свободной поверхности. Существующие подходы к решению задач гидромеханики, основанные на применении методов конечных разностей, конечных и граничных элементов требуют значительных вычислительных затрат. Поэтому применен вариационный подход, позволяющий при аппроксимации свободной поверхности жидкости плоскостью получить результаты, имеющие приемлемую для технических расчетов точность [5]. С использованием этого приема выполнены расчеты движения цистерны по закруглению, а также переход ее с прямолинейного участка пути на криволинейный.

Положение жидкости в котле цистерны задавалось двумя углами  $\varphi$  и  $\theta$ , первый из которых равен углу наклона свободной поверхности жидкости по отношению к продольной оси котла, а второй определяет поворот той же поверхности в поперечной плоскости цистерны, как это показано на рис. 1.

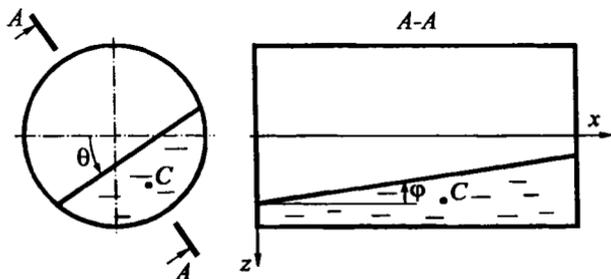


Рис. 1. Обобщенные координаты, определяющие положение жидкости в котле цистерны

При определении параметров движения цистерны деформациями ее конструктивных элементов можно пренебречь по сравнению с перемещениями транспортного средства и жидкости. Тогда выражения кинетической  $T$  и потенциальной  $\Pi$  энергий цистерны с жидкостью имеют вид:

$$T = \left( m_1 + \frac{J_1}{\rho^2} \right) \frac{\dot{s}^2}{2} + \frac{m_2}{2} \left( \left( \frac{\dot{s}}{\rho} (\rho + z_C(\varphi) \sin \theta) + \frac{dx_C(\varphi)}{dt} \right)^2 + \left( \frac{dz_C(\varphi)}{dt} \right)^2 + (\dot{\theta} - z_C(\varphi))^2 \right);$$

$$\Pi = -m_2 g z_C(\varphi) \cos \theta,$$

где  $m_1$ ,  $m_2$  – массы цистерны и жидкости;  $J_1$  – моменты инерции цистерны относительно вертикальной оси;  $s$  – закон изменения пройденного цистерной пути;  $\rho$  – радиус кривизны траектории цистерны;  $x_C$ ,  $z_C$  – координаты центра масс  $C$  жидкости в ее относительном движении;  $g$  – ускорение свободного падения.

Координаты  $x_c, z_c$  являются в общем случае неявными нелинейными функциями угла  $\varphi$ , вид которых определяется исходя из того, что объем жидкости остается постоянным в течение всего времени движения.

Заметим, что в выражении кинетической энергии системы нельзя пренебречь слагаемым  $z_c(\varphi) \sin \theta$  по сравнению с радиусом кривизны  $\rho$ , так как именно оно учитывает действие на транспортное средство нормальных сил инерции.

Подстановка выражений кинетической и потенциальной энергий в уравнения Лагранжа II рода позволила получить дифференциальные уравнения движения системы. Применяя к ним стандартный алгоритм метода Рунге-Кутты четвертого порядка, необходимо было рассчитывать значения обобщенных ускорений на каждом шаге интегрирования. Попытка получить их аналитические выражения показала, что последние чрезвычайно громоздки. Поэтому в качестве подпрограммы на каждом временном шаге выполнялось решение системы линейных уравнений относительно обобщенных ускорений. Исследования показали, что описанный подход позволил значительно упростить процесс составления программы и уменьшить время расчетов.

Имея законы изменения углов  $\varphi$  и  $\theta$  можно оценить, появляются ли условия для возникновения аварийных ситуаций при переходе транспортного средства с прямолинейной траектории движения на криволинейную. На рис. 2 приведена схема сил, действующих на исследуемую систему в этом случае.

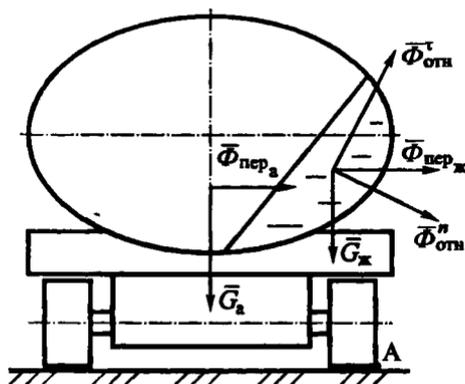


Рис. 2. Расчетная схема цистерны при движении по кривой.

Вследствие движения автомобиля по кривой возникают переносные силы инерции автомобиля  $\vec{\Phi}_{\text{пер } a}$  и жидкости  $\vec{\Phi}_{\text{пер } j}$ . Перетекание жидкости в цистерне приводит к появлению относительных сил инерции  $\vec{\Phi}_{\text{отн}}^t$  и  $\vec{\Phi}_{\text{отн}}^n$ . Все названные силы создают опрокидывающий момент относительно точки А колеса. Препятствуют опрокидыванию моменты сил тяжести  $\vec{G}_a$  и  $\vec{G}_j$ .

Переносные силы инерции зависят от скорости движения автомобиля  $v$  и радиуса кривизны траектории  $\rho$ . Они определяются по формуле

$$\Phi_n = ma_n = \frac{mv^2}{\rho},$$

где  $a_n$  – нормальное ускорение автомобиля.

На примере цистерны ОТА-3,8Н рассчитаны значения максимального нормального ускорения, при которых обеспечивается устойчивость цистерны. Построена его зависимость от отношения объема перевозимой жидкости  $V_x$  к объему котла  $V$ . Она представлена на рис. 3. Линия 1 на графике соответствует случаю расположения жидкости, изображенному на рис. 2, а линия 2 – варианту, предполагающему, что жидкость не перемещается относительно котла.

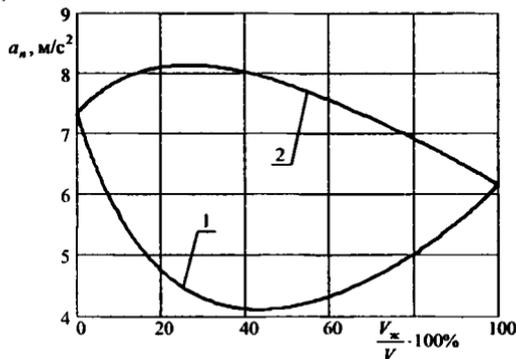


Рис. 3. Зависимость допустимого нормального ускорения автомобиля от уровня заполнения цистерны

Результаты расчетов показывают, что учет перетекания жидкости приводит к существенному уменьшению допустимого нормального ускорения, а с ним и скорости движения по кривой. Наиболее неблагоприятные условия складываются при заполнении котла цистерны на 30-60% его объема.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Беспалько С. В. К вопросу о моделировании продольных колебаний цистерны, частично заполненной жидкостью // Вестник ВНИИЖТ.– 1999.– № 4.– С. 35-40.
2. Моисеев Н.Н., Румянцев В.В. Динамика тела с полостями, содержащими жидкость.– М.: Наука, 1965.– 439 с.
3. Черкашин Ю. М. Динамика наливного поезда.– М.: Транспорт, 1975.– 136 с.
4. Черноусько Ф.Л. Движение твердого тела с полостями, содержащими вязкую жидкость.– М.: Вычислительный центр АН СССР, 1968.– 230 с.
5. Shimanovsky A. O., Krakova I. E. Application of the programs of computer algebra for a research of motion of material systems // Computer algebra in fundamental and applied research and education. Proceeding of second international scientific conference, September 20-24 1999.– Minsk, 1999.– P. 70-73.