

УДК 621.3

*М. Г. КУЗНЕЦОВА, М. А. БОЙКАЧЕВ**Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь***КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ МАШИНЫ С НАВЕСНЫМ РЕЗЕРВУАРОМ ДЛЯ ЖИДКОСТИ**

Разработана компьютерная модель транспортного средства, оборудованного навесной емкостью с жидкими минеральными удобрениями в среде инженерного пакета ADAMS. Выполнено исследование зависимости амплитуд относительных скорости и ускорения центра масс жидкости в зависимости от высоты переезжаемой неровности, наличия/отсутствия рессор и их жесткости.

**Ключевые слова:** сельскохозяйственная машина, навесная емкость, колебания жидкости, моделирование, MSC.ADAMS.

Для выполнения ряда технологических операций, например внесения жидких удобрений, сельскохозяйственные машины и агрегаты оборудуются навесными емкостями. В процессе работы такой машины уровень заполнения емкости постепенно уменьшается, что становится причиной колебаний жидкости, которые могут приводить к ухудшению динамических качеств машины.

Сложность анализа динамики машин, транспортирующих жидкие грузы, заключается в необходимости учета особенностей взаимодействия твердых тел и жидкостей со свободной поверхностью. Различными авторами из стран СНГ и зарубежья подобные задачи решались с использованием различных моделей. Обычно, авторы исследовали либо отдельно динамику транспортного средства, например в [1], либо колебания жидкостей внутри резервуара, как в [2]. Также некоторые исследователи проводили подобный анализ для статических объектов [3] или же отдельно рассматривалась конструкция навесной емкости для жидких удобрений без динамических расчетов [4]. В работе [5] нами проанализирована устойчивость прямолинейного движения транспортного средства с навесной емкостью для жидкости. Задачи динамики сельскохозяйственных машин с навесными емкостями для жидкости при переходных режимах движения в известной нам литературе не рассматривались.

Целью представленной работы является анализ влияния относительного движения жидкости внутри навесной емкости на динамику и устойчивость транспортного средства при движении по поверхности с неровностями.

Анализ перетекания вязкой жидкости в резервуаре требует решения уравнений Навье-Стокса. Получение численного решения в этом случае весьма трудоемко [6]. Поэтому при разработке компьютерной модели в среде инженерного пакета ADAMS использована дискретно-массовая модель, в которой жидкость заменялась эквивалентным твердым телом (рисунок 3), а сила ее взаимодействия с емкостью  $F$  принималась прямо пропорциональной относительному перемещению тела  $s$

$$F = cs, \quad (1)$$

где  $c$  – коэффициент жесткости связи между емкостью и телом, Н/м.

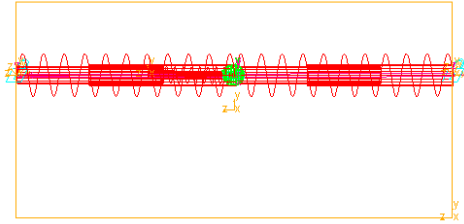


Рисунок 3 – Модель жидкости внутри навесной емкости

При этом считается, что часть массы, находящаяся в нижней области емкости, не участвует в колебаниях. Масса жидкости, участвующая в колебаниях с формой, соответствующей номеру  $n$ , определяется по формуле [7]

$$m_n = 8m_{\text{ж}} \frac{l}{h} \frac{\text{th} \left[ (2n-1)\pi \frac{h}{l} \right]}{(2n-1)^3 \pi^3}, \quad (2)$$

где  $l$  – ширина основания резервуара, м;  $h$  – высота уровня жидкости, м;  $m_{\text{ж}}$  – масса транспортируемой жидкости, кг.

Коэффициент жесткости эквивалентной пружины можно определить по формуле [7]:

$$c_n = 8m_{\text{ж}} \frac{g}{h} \frac{\text{th}^2 \left[ (2n-1)\pi \frac{h}{l} \right]}{(2n-1)^2 \pi^2}, \quad (3)$$

где  $c_n$  – коэффициент жесткости пружины, Н/м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Центр масс колеблющейся жидкости не может оказаться смещенным от равновесного положения на величину  $x_{\text{max}}$ , большую, чем при случае, когда вся жидкость сосредоточена у одного из концов резервуара, и ее свободная поверхность вертикальна. Реально такое состояние не может быть достигнуто, так как в этом случае навесная емкость должна иметь бесконечно большое ускорение. Поэтому при компьютерном моделировании колебаний жидкости приведенное в формуле (3) значение коэффициента жесткости определялось по формуле, предложенной в работе [8],

$$\begin{cases} c = c_n & \text{при } x \leq x_0, \\ c = c_n e^{\frac{x-x_0}{3(x_{\text{max}}-x)}} & \text{при } x > x_0, \end{cases} \quad (4)$$

где  $x_0$  – значение координаты  $x$ , при котором жидкость достигает потолка,  $m$ ;  $x_{\max}$  – максимальная величина, на которую может быть смещен центр тяжести колеблющейся жидкости от равновесного положения,  $m$ .

Проведенные нами расчеты [9] показали, что использование формулы (4) позволяет получить более адекватные результаты расчета динамики торможения автомобиля по сравнению с исходной формулой (3).

Разработана компьютерная модель рассматриваемого транспортного средства в среде инженерного пакета ADAMS, представленная на рисунке 1. Модель принимает во внимание движущие силы ведущих колес, силы сопротивления перекачиванию ведомых колес, силы сопротивления движению, колебания центра масс жидкости в навесном резервуаре, причем в качестве переносного движения принято перемещение этой точки вместе с агрегатом, в качестве относительного – колебания жидкости относительно емкости.

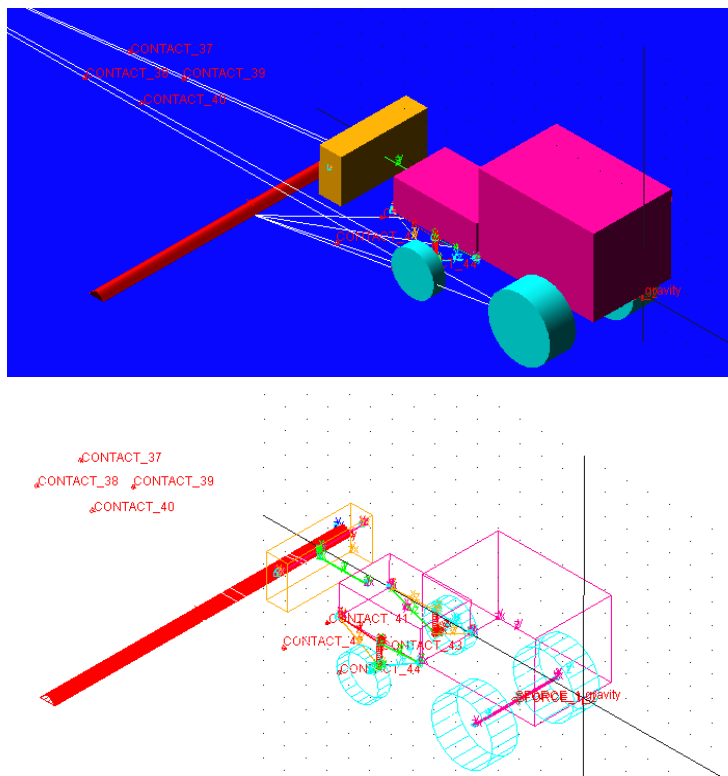


Рисунок 1 – Компьютерная модель транспортного средства с навесной емкостью для жидкого груза в MSC ADAMS

Выполнено исследование переезда транспортного средства с навесной ёмкостью через одиночную неровность (рисунок 2), имеющей форму волны синусоиды. В качестве исходных данных для этого исследования принято: масса транспортного средства – 8 тонн, масса емкости для жидкости – 100 кг, масса транспортируемой жидкости – 650 кг. Предполагалось, что к ведущим колесам с радиусом 70 см приложены вращающие моменты 10 кНм. Массово-геометрические характеристики основных узлов транспортного средства принимались в соответствии с техническими характеристиками трактора Беларус 80.1 отечественного производства [10].

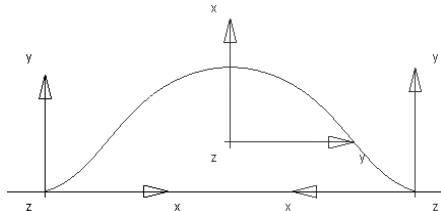


Рисунок 2 – Модель единичной неровности

Выполнено исследование зависимости амплитуд относительных скорости и ускорения центра масс жидкости в зависимости от высоты переезжаемой неровности, расположенной перпендикулярно направлению движения. Графики зависимостей максимальных амплитуд обозначенных величин представлены на рисунке 3.

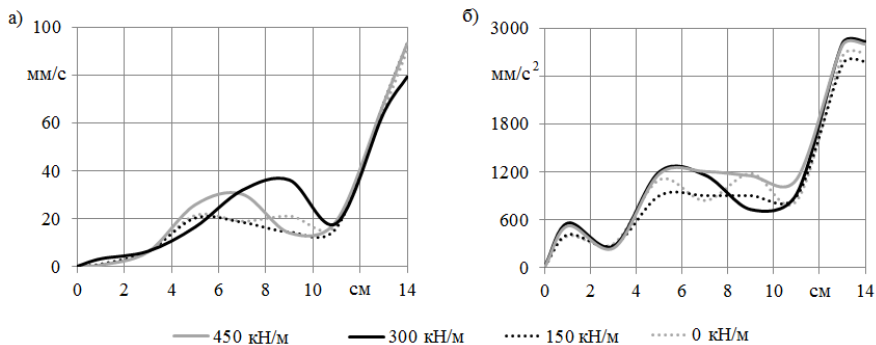


Рисунок 3 – График зависимости максимальных амплитуд относительной скорости (а) и ускорения (б) свободной поверхности жидкости от высоты препятствия на пути следования без и с применением рессор различной жесткости

Результаты расчетов, выполненные как с учетом рессорного подвешивания на ведомых колесах, так и без него, показали, что при высотах неровностей, не превышающих 3 см, амплитуды скоростей и ускорений рассматриваемой точки, а также трактора, малы. При увеличении высоты неровностей с 4 до 9 см наблюдается существенный рост скоростей и ускорений, после

чего они достигают локального минимума при высоте неровности 10–11 см, а затем резко возрастают, независимо от жесткости рессорного подвешивания.

При этом наименьшие значения амплитуд относительных скоростей и ускорений жидкого груза внутри навесной емкости достигаются при применении рессор с коэффициентом жесткости 150 кН/м. Более жесткое рессорное подвешивание передней оси транспортного средства при высотах неровностей до 11 см приводит к увеличению амплитуд ускорений до 40 %.

Графики относительной скорости и ускорения центра жидкости при переезде подрессоренным трактором (жесткость рессор 150 кН/м) одиночной неровности высотой 7 см представлен на рисунке 4. При данной высоте неровности максимальные амплитуды относительной скорости и ускорения при ее переезде соответственно равны 16,6 мм/с и 932,1 мм/с<sup>2</sup>.

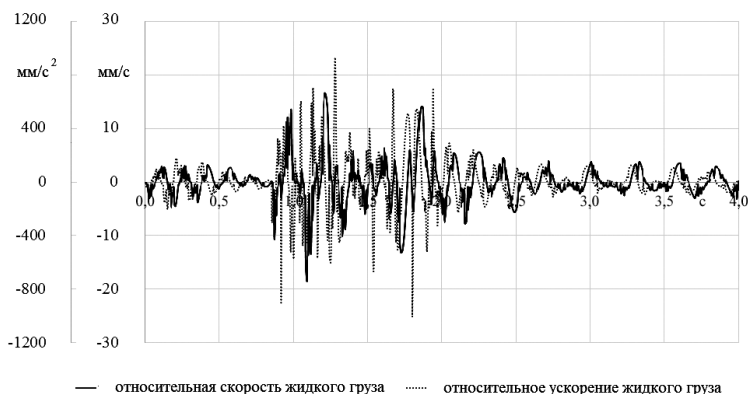


Рисунок 4 – Относительная скорость и ускорение центра масс жидкости при переезде одиночной неровности высотой 7 см

Полученные результаты показывают, что при малых размерах неровностей на дороге наличие колебаний жидкости в навесной емкости не приводит к существенному изменению динамики транспортного средства.

Увеличение высоты неровности ведет к повышению амплитуд колебаний транспортируемого жидкого груза в несколько десятков раз, а также резким изменениям скорости и ускорения относительного движения центра масс жидкости. Инерционные силы, возникающие в резервуаре с жидкостью, имеют колебательный характер, что, в свою очередь, влияет на усилия, возникающие в элементах крепления навесного резервуара, а также прочность конструкции транспортного агрегата. При этом наличие жестких рессор может привести к повышению до 40 % амплитуд относительной скорости и ускорения транспортируемых жидких удобрений в зависимости от высоты переезжаемой неровности. На вертикальных колебаниях трактора перемещения жидкости внутри емкости сказываются незначительно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Modeling and simulation of power steering system for agricultural tractors / I. Y. Gültekin [et al.] // International Journal of Advances on Automotive and Technology. – 2017. – Vol. 1, No. 3. – P. 109–113.
- 2 Fluid-Structure-Soil Interaction of Cylindrical Liquid Storage Tank Subjected to Horizontal Earthquake Loading / K. Kotrasova [et al.] // Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava. Civil Engineering Series. – 2019. – Vol. 19, No. 1. – P. 8–14.
- 3 An experimental investigation on the dynamics of liquid sloshing in a rectangular tank and its interaction with an internal vertical pole / V. S. Sanapala [et al.] // Journal of Sound and Vibration. – 2019. – Vol. 449. – P. 43–63.
- 4 Design and Development of Fertilizer Metering System for Tractor drawn Liquid Fertilizer Applicator / P. K. Sundaram [et al.] // Journal of AgriSearch. – 2019. – Vol. 6, No. 4. – P. 211–214.
- 5 **Бойкачев, М. А.** Анализ устойчивости прямолинейного движения комбинированного агрегата при транспортировке бака с жидкостью / М. А. Бойкачев, А. О. Шимановский // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки. – 2013. – Вып. 7. – С. 11–17.
- 6 **Moffatt, H. K.** Towards a finite-time singularity of the Navier–Stokes equations. Part 1. Derivation and analysis of dynamical system / H. K. Moffatt, Y. Kimura // Journal of Fluid Mechanics. – 2019. – Vol. 861. – P. 930–967.
- 7 **Dodge, F. T.** The new “Dynamic behavior of liquids in moving containers” / F. T. Dodge. – San Antonio, Texas : Southwest Research Institute, 2000. – 195 p.
- 8 **Шимановский, А. О.** Модифицированная дискретно-массовая модель цистерны с жидкостью / А. О. Шимановский // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки. – 2011. – Вып. 5. – С. 163–165.
- 9 **Шимановский, А. О.** Компьютерное моделирование движения автоцистерн по дорогам с неровностями разных типов / А. О. Шимановский, М. Г. Кузнецова // Актуальные вопросы машиноведения. – 2013. – Вып. 2. – С. 255–260.
- 10 Belarus 80-1. Технические характеристики [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.belarus-tractor.com/catalog/belarus-80-1/belarus-80-1/>. – Дата доступа : 05.09.2019.

*M. G. KUZNIATSOVA, M. A. BAIKACHOU*  
*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus*

## COMPUTER MODELING OF DYNAMICS OF A VEHICLE WITH A HANGED RESERVOIR FOR LIQUID MEDIA

There was created a computer model of a vehicle equipped with a hanged tank with liquid mineral fertilizers in the environment of the ADAMS engineering package. The amplitudes of the liquid mass center relative velocities and accelerations were analyzed depending on the height of the road unevenness, the presence/absence of springs and their stiffness.

Получено 26.11.2019