

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ЖИДКОСТИ В ТРАНСПОРТНОМ РЕЗЕРВУАРЕ С ПЕРЕГОРОДКАМИ

А.О. Шимановский, к.т.н., доцент, А.В. Путято, к.т.н., м.н.с.,  
УО «Белорусский государственный университет транспорта»

*Аннотация.* Выполнен конечноэлементный расчет перетекания жидкости в резервуаре автоцистерны при торможении. Рассмотрено влияние размеров внутренней перегородки на значения гидродинамических давлений на элементы конструкции резервуара.

*Ключевые слова:* автоцистерна, перегородка, торможение, гидродинамическое давление.

### Введение

При проектировании резервуаров автоцистерн большое внимание уделяется их прочности, так как большую часть перевозимых грузов составляют жидкости, утеря которых оказывает крайне неблагоприятное воздействие на окружающую среду. Подвижность жидкости относительно резервуара цистерны приводит к существенным изменениям значений сил, действующих на конструкцию при колебаниях. Этот факт необходимо учитывать при проектировании конструкции цистерн. Поэтому задача определения значений сил, действующих на резервуары автоцистерн при переходных режимах движения, актуальна.

### Анализ публикаций

Сложность математического описания движения жидкости со свободной поверхностью стала причиной того, что в первых теоретических работах, посвященных динамике цистерн, не учитывалось относительное движение перевозимого груза в резервуарах. Эффекты, связанные с влиянием движения жидкости на динамику и прочность конструкции автомобиля, исследовались экспериментальными методами [10]. В дальнейшем для моделирования перетекания жидкости в резервуарах цистерн стали использовать системы твердых тел, состоящие из подрессоренных сосредоточенных масс или маятников, учитывающих главные формы колебаний [3].

Однако описанный подход, связанный с применением моделей эквивалентных твердых тел, имеет весьма ограниченную область применения, что связано со сложностью расчета параметров эквивалентной модели при сложной конфигурации резервуара, а также с необходимостью учета в ряде случаев явлений демпфирования. Кроме то-

го, названная модель адекватно описывает динамику жидкости только при малых амплитудах колебаний свободной поверхности по сравнению с глубиной резервуара.

Для полного учета явлений, происходящих в резервуаре транспортного средства при торможении с большими ускорениями, необходимо использовать модель жидкости как сплошной среды. В настоящее время для этого используют два основных подхода: Эйлера и Лагранжа, различие между которыми заключается в представлении расчетной модели жидкости. Основным средством для решения задач гидромеханики на сегодняшний день являются нелинейные дифференциальные уравнения в частных производных Навье – Стокса, записываемые как в форме Эйлера, так и Лагранжа [2]. Аналитическое решение названных уравнений до настоящего времени не получено, поэтому для анализа перетекания вязкой жидкости в резервуарах используют численные методы. Работы, в которых при исследовании колебаний цистерн для описания движения жидкости используются полные уравнения Навье – Стокса, появились лишь в последние несколько лет [5, 6, 9].

Опыт эксплуатации рассматриваемых транспортных средств показывает, что цистерны без перегородок обладают значительно худшими динамическими качествами по сравнению с автомобилями, перевозящими твердые грузы. Основными средствами для снижения влияния колебаний жидкости на динамику автоцистерн в настоящее время являются установка перегородок, и разбиение резервуара на отдельные отсеки.

Серьезное экспериментальное исследование, касающееся влияния вида перегородок на динамику криогенных цистерн, выполнено в работе [7].

В результате анализа спектральных характеристик колебаний автоцистерн с перегородками различной конфигурации предложено при создании новых конструкций использовать перфорированные перегородки. Отдельные аспекты названной проблемы рассматриваются также в работах [1, 8, 11]. Однако теория, позволяющая обеспечить наиболее рациональную схему установки перегородок в резервуарах транспортных средств, до настоящего времени не разработана.

### Цель и постановка задачи

Целью представленных исследований является определение влияния геометрических параметров перегородок на гидродинамическую нагруженность конструктивных элементов резервуара. Она достигается путем конечно-элементного моделирования процесса перетекания жидкости в емкости при торможении автоцистерны.

### Теоретическое исследование

Рассматриваемый резервуар автоцистерны представляет собой прямоугольный параллелепипед. Его длина 5 м, а высота 2 м. Посередине резервуара возможна установка перегородки, высота которой  $l$  (рис. 1).

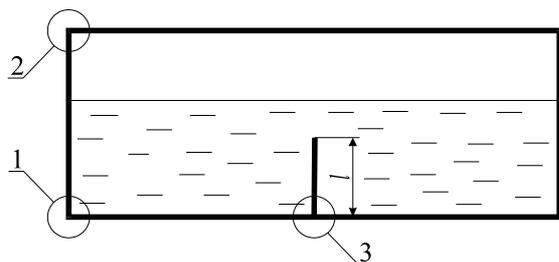


Рис. 1. Схема резервуара автоцистерны

Для описания перетекания жидкости в резервуаре использована стандартная ( $k$ - $e$ ) модель турбулентности, как наиболее распространенная, которая основана на двух уравнениях: турбулентной кинетической энергии  $k$  и скорости диссипации турбулентной энергии  $e$  [4]. При создании геометрической модели течения жидкости использована детальная сетка конечных элементов, так как из-за больших размеров ячеек возможна потеря точности решения в местах с большими градиентами давления и скорости. Поскольку рассматривается упрощенная геометрическая форма резервуара (нет люка-лаза, сливного прибора), то целесообразно использовать четырехугольные конечные элементы с регулярным разбиением области жидкости. Их применение предпочтительнее треугольных, так как приводит к более устойчивому решению. Полученная конечноэлементная модель включает 10000 элементов.

Принималось, что в начальный момент жидкость находилась в состоянии относительного покоя, и

ее свободная поверхность была плоской. В качестве кинематического граничного условия использовалось условие прилипания. Шаг по времени был принят равным 0,003 с. Расчеты перетекания жидкости внутри резервуара автоцистерны проводились при ее торможении с замедлением, равным 0,6g.

На первом этапе устанавливалась гидродинамическая нагруженность частично заполненного (60%) резервуара при отсутствии в его конструкции перегородок.

В результате численного решения задачи получено, что наиболее нагруженными областями резервуара являются зоны сочленения нижнего и верхнего его поясов с дном, где значения давлений составляют 32,9 кПа и 24,3 кПа соответственно, причем эти максимальные значения достигаются спустя небольшой промежуток времени после начала торможения автоцистерны.

С целью снижения гидродинамической нагруженности резервуара и амплитуд колебаний жидкого тела выполнен анализ влияния размеров перегородки на значения давлений жидкости и кинематические параметры ее колебательного движения. Зависимости максимальных значений давления жидкости, действующего на различные места резервуара, от высоты перегородки приведены на рис. 2.

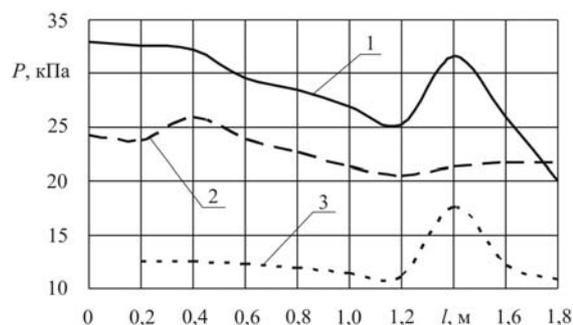


Рис. 2. Зависимости максимальных давлений от высоты перегородки: 1 – область сочленения дна с нижним поясом; 2 – область сочленения дна с верхним поясом; 3 – область сочленения перегородки с нижним поясом

В ходе выполнения расчетов установлено, что при небольшой высоте перегородки (до 20 % высоты резервуара) значения давлений жидкости незначительно снижаются (на 2 %) в месте расположения области 1 (рис. 1), причем максимумы давлений имеют место в моменты времени 0,72–0,74 с. В то же время значения давлений в зоне соединения дна с верхним поясом резервуара (область 2) сначала несколько снижаются, а затем возрастают на 9 % к моменту времени 0,45 с. В свою очередь, нагруженность области соедине-

ния перегородки с нижним поясом резервуара (область 3) незначительно возрастает.

Из рассмотрения следующего интервала высот перегородки 0,4–1,15 м установлено, что значения давлений жидкости в рассматриваемых областях понижаются: область 1 – на 21,7 %, область 2 – на 21,2 %, область 3 – на 11,6 %.

В интервале 1,15–1,4 м в рассматриваемых областях значения давлений увеличиваются, причем в областях 1 и 3 отмечается высокий градиент роста. Так, в области 1 давление возрастает на 21 %, в области 2 – на 4 %, в области 3 – на 36,7 %. Кроме того зависимости, значений давления жидкости от времени для областей 1 и 3 имеют несколько ярко выраженных экстремумов (рис. 3), и максимальные значения соответствуют второй волне набегания жидкости.

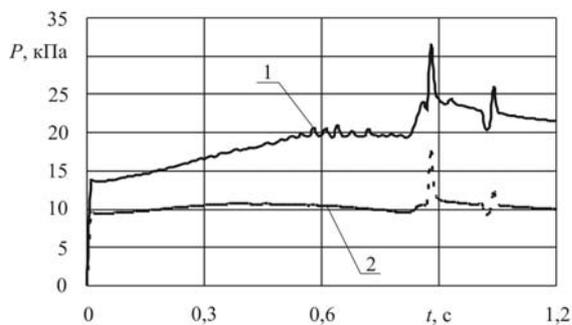


Рис. 3. Временные зависимости давлений жидкости: 1 – область сочленения днища с нижним поясом; 2 – область сочленения перегородки с нижним поясом

При последующем увеличении высоты перегородки нагруженность областей 1 и 3 снижается, а области 2 несколько увеличивается.

### Выводы

Разработанная математическая модель перетекания жидкости позволяет определять значения гидродинамического давления на элементы конструкции транспортного резервуара с перегородками при его частичном заполнении.

Установлено, что оптимальное значение высоты перегородки, исходя из критерия минимальных значений давления жидкого груза на конструкцию резервуара, находится в пределах 55–60 % от его высоты.

### Литература

1. Гавриленко В.В., Сокульский О.Е. Методика определения характеристик демпфирующих

устройств в частично заполненных жидкостью резервуарах транспортных систем // Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту і експлуатації автомобілів / 36. наук. пр. – Київ: НТУ, ТАУ. – 2002. – Вып. 15. – С. 56–58.

2. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2-х ч. – Ч. 2. – М.: Мир, 1991. – 552 с.
3. Черкашин Ю.М. Динамика наливного поезда // Труды ВНИИЖТа. – 1975. – Вып. 543. – 137 с.
4. Шимановский А.О., Путято А.В. Гидродинамическая нагруженность котла железнодорожной цистерны при соударении вагонов // Материалы, технологии, инструменты, 2005. – Т. 10. – №3. – С. 45–48.
5. Шимановский А.О., Путято А.В. Моделирование перетекания жидкости в резервуаре с использованием программных комплексов ANSYS и STAR-CD // Вестник Уральского государственного технического университета – УПИ. Компьютерный инженерный анализ. – 2005. – №11 (63). – С. 103–110.
6. Aliabadi S., Johnson A., Abedi J. Comparison of finite element and pendulum models for simulation of sloshing // Computers and Fluids. 2003. – Vol. 32. – № 4. – P. 535–545.
7. Lloyd N., Vaiciurgis E., Langrish T. A. G. The effect of baffle design on longitudinal liquid movement in road tankers: An Experimental Investigation // Transactions of the Institutions of Chemical Engineering. – 2002. – Vol. 80. – № B4. – P. 181–185.
8. Popov G., Sankar S., Sankar T. S. Dynamics of Liquid Sloshing in Baffled and Compartmented Road Containers // Journal of Fluids and Structures. – 1993. – 7 (7). – P. 803–821.
9. Rumold W. Modeling and Simulation of Vehicles Carrying Liquid Cargo // Multibody System Dynamics. – 2001. – № 5. – P. 351–374.
10. Strandberg L. Lateral Stability of Road Tankers. Volume 1. Main report // VTI Report №138A. – Linköping (Sweden): National Road & Traffic Research Institute. – 1978. – 73 p.
11. Wang Z., Rakheja S., Cunzhen S. Influence of partition location on directional stability performance of a partially-filled tank truck // Journal of Commercial Vehicles, Transactions of Society of Automotive Engineers, 1995. – Section 2. – P. 592–601.

Рецензент В.Н. Варфоломеев, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 1 сентября 2006 г.