

А. О. Шимановский, канд. техн. наук, доц.; М. Г. Кузнецова
УО «БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Гомель, Беларусь

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ЖИДКОСТЕЙ В РЕЗЕРВУАРАХ СТРОИТЕЛЬНЫХ И ДОРОЖНЫХ МАШИН

Рассматривается применение метода оптимизации конструкции перегородок в резервуарах цистерн, используемых при проведении строительных и дорожных работ, который основан на максимизации диссипации энергии жидкости за один цикл ее колебаний. На основе компьютерного моделирования перетекания жидкости через несплошную поперечную перегородку установлен размер отверстий перфорации, при котором достигается наименьшее влияние колебаний транспортируемой жидкости на динамику автотранспортного средства.

При производстве строительных и дорожных работ возникает необходимость транспортировки жидкостей. Основное применение в таком случае находят специализированные машины-цистерны:

- поливочные и поливомоечные машины;
- автобетоносмесители – грузовые автомобили, оборудованные вращающейся ёмкостью для перевозки бетона;
- гудронаторы.

Рабочая скорость движения названных машин, как правило, принимает значение от 2 до 20 км/ч. Транспортная скорость варьируется от 60 до 80 км/ч. Особенностью рабочего процесса поливочных машин и гудронаторов является постепенное расходование транспортируемой жидкости в процессе работы. Поэтому для предотвращения раскачки груза, при разгонах и торможениях, внутренняя полость цистерны разделяется волнорезами на несколько сообщающихся отсеков.

Как правило, в условиях Республики Беларусь температура воды, которой заполняются резервуары коммунальных машин, изменяются в пределах от 10 до 40 °С. При этом кинематическая вязкость жидкости может уменьшиться с 1,307 мм²/с до 0,658 мм²/с [1]. Плотность в этом случае меняется весьма незначительно – менее, чем на 1 %. Гудрон, как правило, используется при температурах 80 °С и выше. Его плотность близка к плотности воды и составляет 0,95–1,03 г/см³. В то же самое время, кинематическая вязкость гудрона существенно большая и лежит в пределах от 90 до 5000 мм²/с. Поэтому динамические свойства автомобилей-гудронаторов и поливочных машин существенно различаются. Отличительной особенностью транспортируемой бетонной смеси является широкий диапазон изменения вязкости, которая может различаться в несколько сот или даже тысяч раз в зависимости от значений приложенных внешних сил.

Различие в физических свойствах транспортируемого жидкого груза, которое проявляется, в том числе, при изменениях температуры, приводит к необходимости разработки конструкций перегородок, обеспечивающих

наименьшие колебания транспортного средства при транспортировке конкретного вида жидкости.

Выполненные различными исследователями работы показали, что максимальное влияние относительного перемещения жидкости в резервуарах цистерн на их колебания и устойчивость имеет место при заполнении цистерн на 40–80 % [2].

В ряде зарубежных работ [3–5] с целью изучения влияния продольных колебаний жидкости на динамику торможения автоцистерны предложена кинетостатическая модель для учета движения жидкостей в частично-заполненном резервуаре. Эта модель предполагает, что движению автомобиля с некоторым ускорением соответствует угол наклона свободной поверхности жидкости (которая принимается плоской), тангенс которого равен отношению названного ускорения к ускорению свободного падения. Выполненные в работе [6] расчеты показали, что для цистерны с одной поперечной перегородкой наилучшие динамические качества имеют место при выравнивании длин отсеков.

Однако примененная авторами статьи [6] модель не позволяет установить как должны располагаться отверстия в перегородках и какую они должны иметь форму с целью минимизации влияния перетекания жидкости на колебания и устойчивость цистерн, так как она никак не учитывает вязкость транспортируемой жидкости. Поэтому с целью оценки эффективности демпфирования колебаний авторами предложен энергетический подход [7], связанный с нахождением суммарной диссипации энергии жидкости в резервуаре. В представленной работе поставлена задача по определению зависимости диссипации энергии для нескольких различных конфигураций поперечной перфорированной перегородки в резервуаре, заполненном водой.

Описание перетекания жидкости в резервуаре выполнено на основе использования стандартной (k – ε) модели турбулентности, реализация которой предполагает вычисление турбулентной кинетической энергии k и скорости диссипации турбулентной энергии ε каждого конечного элемента жидкости на каждом шаге по времени [8, 9]. Наибольшие динамические нагрузки проявляются при торможениях цистерны в период первого цикла колебаний жидкости внутри резервуара. Поэтому диссипация энергии определялась именно за время одного колебания.

Выполнены расчеты, при которых определялась зависимость диссипации энергии от времени для различных уровней заполнения цистерн при изменении диаметра отверстия, находящегося в центре перегородки, размещенной посередине резервуара цистерны, имеющего форму параллелепипеда.

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, то использованы четырехугольные конечные элементы с регулярным разбиением области жидкости. Их применение предпочтительнее треугольных, так как приводит к более устойчивому решению. Полученная модель включает около 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 рис. 1 показан график для заполнения 50 %, из которого видно, что расстояния между кривыми, соответствующими разного размера перегородкам, изменяются с течением времени, что обусловлено особенностями поля скоростей течения жидкости. Причем диссипация энергии оказалась наибольшей при диаметре перегородки 90 см. Подробный анализ кривых диссипации дает возможность оптимизации конструкции демпфирующих устройств.

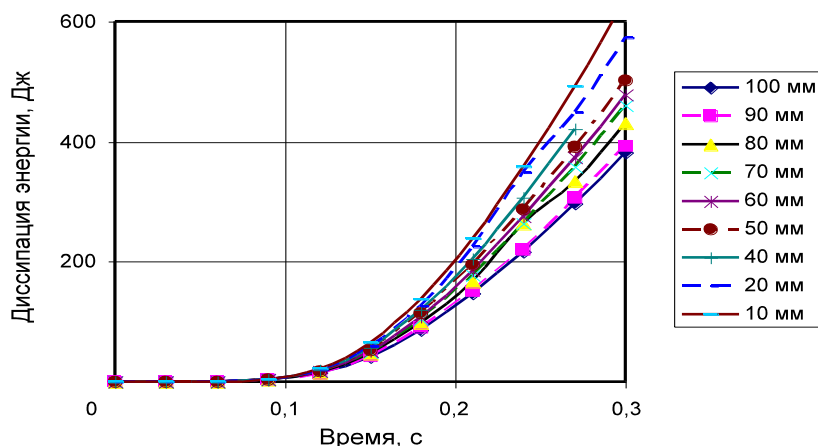


Рис. 1. Зависимость диссипации энергии от времени при разных размерах единственного отверстия в перегородке (заполнение цистерны 60 %)

С помощью описанной методики выполнено компьютерное моделирование перетекания жидкости в цистерне при ее торможении с учетом установки поперечной перфорированной перегородки. Схема ее установки приведена на рис. 2.

Выполнены расчеты зависимости диссипации энергии в функции от размера отверстий перфорации перегородок. Их результаты показали, что существует некоторое значение диаметра перфорации, при котором диссипация энергии за первый цикл колебаний жидкости в резервуаре максимальна.

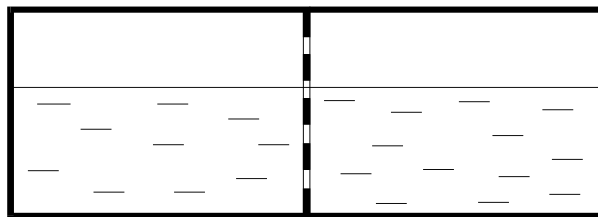


Рис. 2. Схема расположения перегородки в резервуаре

На рис. 3 приведен график зависимости потерь кинетической энергии при прохождении через перегородки от диаметра перфорации для емкости, имеющей размеры 2×5 м. Из приведенного графика видно, что для рассматриваемого случая максимальное демпфирование колебаний жидкости имеет место в случае, если отверстия перфорации имеют диаметр 11 мм и в общей сложности диаметр отверстий составляет 60 % от площади перегородки. В этом случае влияние жидкости на динамику цистерны будет наименее существенным по сравнению с иными вариантами перегородок.

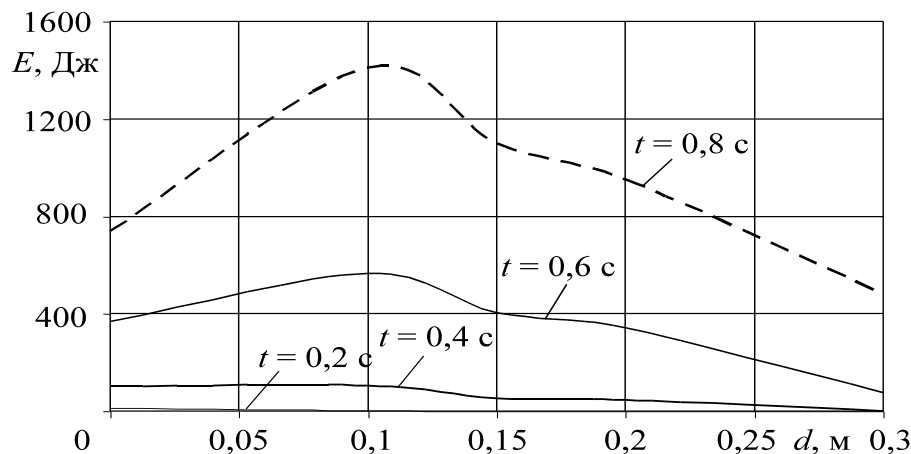


Рис. 3. Зависимость диссипации энергии жидкости в функции от диаметра отверстий перфорации

Подобный анализ может быть выполнен для резервуаров различной формы, для разных схем установки перегородок и с учетом различных вариантов перфорирования. Возможен учет таких свойств транспортируемой жидкости, как плотность и вязкость. Кроме того, могут рассматриваться различные схемы движения резервуаров, соответствующие особенностям эксплуатации строительных и дорожных машин. В конечном счете, возможно создание конструкций цистерн, свойства которых будут аналогичны динамическим качествам автомобилей, транспортирующих твердый груз той же массы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ривкин, С. Л.** Теплофизические свойства воды и водяного пара / С. Л. Ривкин, А. А. Александров. – М. : Энергия, 1980. – 423 с.
2. **Высоцкий, М. С.** Динамика автомобильных и железнодорожных цистерн / М. С. Высоцкий, Ю. М. Плескачевский, А. О. Шимановский. – Минск : Белавтотракторостроение, 2006. – 320 с.
3. **Rakheja, S.** Field Testing and Validation of Directional Dynamics Model of a Tank Trucks / S. Rakheja, R. Ranganathan, S. Sankar // International Journal of Vehicle Design. – 1992. – Vol. 13. – № 3. – P. 251–275.
4. **Ranganathan, R.** Kineto-static roll plane analysis of articulated tank vehicles with arbitrary tank geometry / S. Rakheja, R. Ranganathan, S. Sankar // International Journal of Vehicle Design. – 1989. – Vol. 10. – № 1. – P. 89–111.
5. **Strandberg, L.** Lateral Stability of Road Tankers. Volume 1. Main report // VTI Report № 138A. – Linköping (Sweden): National Road & Traffic Research Institute, 1978. – 73 p.
6. **Wang, Z.** Influence of partition location on directional stability performance of a partially-filled tank truck / Z. Wang, S. Rakheja, S. Cunzhen // Journal of Commercial Vehicles, Transactions of Society of Automotive Engineers, Section 2. – 1995. – P. 592–601.
7. **Шимановский, А. О.** Анализ эффективности демпфирования колебаний жидкости в резервуарах цистерн / А. О. Шимановский, А. В. Путято, О. И. Якубович // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки: междунар. сб. науч. тр. – Гомель: БелГУТ, 2009. – Вып. 3. – С. 144–149.
8. **Aliabadi, S.** Free-surface flow simulations using parallel finite element method / S. Aliabadi, K. Shujaee // Simulation. – 2001. – Vol. 76. – № 5. – P. 257–262.
9. **Rebouillat, S.** Fluid-structure interaction in partially filled liquid containers: A comparative review of numerical approaches / S. Rebouillat, D. Liksonov // Computers & Fluids. – 2010. – Vol. 39. – № 5. – P. 739–746.