

УДК 629.114.2

М.С. ВЫСОЦКИЙ, акад. НАН Беларуси

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

Ю.М. ПЛЕСКАЧЕВСКИЙ, чл.-кор. НАН Беларуси

Президиум Гомельского филиала НАН Беларуси

А.О. ШИМАНОВСКИЙ, д-р техн. наук; М.Г. КУЗНЕЦОВА

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ АВОЦИСТЕРН НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ КУЗОВА

Рассмотрены возможные пути модернизации конструкций кузовов автоцистерн, позволяющие снизить влияние перетекания жидкости на колебания и устойчивость автоцистерн, а также прочность их конструкций. Приведены некоторые результаты конечноэлементных расчетов перетекания жидкости в цистернах с перегородками, а также нагруженности перегородок и оболочки резервуара цистерны.

Ключевые слова: автоцистерна, резервуар, перегородки, диссипация энергии, напряженно-деформируемое состояние

Введение. Особенностью транспортных средств для перевозки жидкостей является возможность перемещения транспортируемого груза относительно резервуара цистерны. Другой их особенностью является высокое расположение центра масс груза над дорогой [1]. Колебания жидкого груза внутри резервуара приводят к существенному снижению продольной и поперечной устойчивости и управляемости и увеличивают нагрузки на конструкцию цистерны [2].

Наибольшее влияние на управляемость и пределы устойчивости автоцистерн оказывают такие факторы, как геометрия резервуара, высота центра тяжести, уровень загрузки, поперечное и продольное смещение центра тяжести груза при движении по кривой, торможении, маневрах смены полосы движения, а также свойства динамического взаимодействия жидкости с конструкцией. Влияние перемещения жидкости на динамику транспортного средства существенно растет при увеличении массы транспортного средства и его размеров.

В результате аварий, происходящих при эксплуатации подвижного состава, перевозящего жидкие грузы, наносится значительный ущерб подвижному составу и грузам, окружающей среде и здоровью людей. Поэтому проблема обеспечения безопасности движения транспортных средств, перевозящих жидкости, весьма актуальна. В связи с этим разрабатываются мероприятия по снижению влияния колебаний жидкости внутри резервуаров на динамику транспортного средства. Первый способ предполагает установку внутренних перегородок. Второй заключается в изменении формы резервуара цистерны. Третий вариант основан на введении в подвеску базового шасси или в крепление цистерн к раме автомобиля специальных элементов с целью изменения жесткости.

В представленной работе выполнен анализ методов модернизации конструкции кузова цистерны, направленных на обеспечение безопасности их эксплуатации.

Методы демпфирования колебаний жидкости в резервуарах цистерн. Основным способом ограничения подвижности жидкости в цистернах является установка внутренних перегородок. Целью их введения является демпфирование продольных и поперечных колебаний жидкости.

Устройства, предназначенные для гашения колебаний жидкости, отличаются схемами установки перегородок. Существуют технические решения, в которых перегородки предполагается устанавливать горизонтально, вертикально либо под углом к продольной оси цистерны. Одни авторы предлагают жестко крепить перегородки к резервуару цистерны, другими разработаны варианты с подвижным их креплением. Сами перегородки могут быть жесткими либо гибкими.

Опытом эксплуатации автоцистерн установлено, что наилучшие динамические качества имеют цистерны, внутри резервуаров которых установлена система продольных и поперечных волнорезов. Однако введенные конструкции обладают весьма существенным недостатком: из-за большого количества внутренних перегородок усложняется техническая эксплуатация резервуаров. Поэтому разрабатываются технические решения по обеспечению демпфирования колебаний жидкости путем постановки небольшого количества дополнительных элементов.

На начальном этапе создания конструкций цистерн внутри их резервуаров устанавливали плоские перегородки. Простота изготовления предопределила широкое их применение вплоть до настоящего времени. Однако недостаточная эффективность плоских перегородок обусловила создание конст-

рукций, в которых с целью повышения эффективности гашения колебаний используются перфорированные перегородки, имеющие специально подобранный профиль.

Например, в цистерне [3] с целью повышения эффективности гашения колебаний каждый волнорез выполнен гофрированным, причем к каждому гребню 4 гофра прикреплена вертикальная пластина 7, как это показано на рисунке 1. Такая конструкция позволяет увеличить сопротивление движению жидкости и тем самым обеспечить увеличенное гашение ее кинетической энергии.

Другой подход при установке перегородок связан с перенаправлением потока жидкости при торможениях и разгонах цистерн. Он связан с установкой различного вида наклонных или закругленных перегородок. Так, в патенте [4] для гашения колебаний жидкости в резервуаре цистерны предлагается внутри корпуса устанавливать специальное приспособление, выполненное в виде Ω -образных жестких или гибких обечаек, как показано на ри-

сунке 2. Цель их использования состоит в увеличении турбулентности жидкости, что в конечном счете позволяет погасить ее движение.

Существует целый ряд конструкций, в которых с целью смягчения гидравлических ударов внутри резервуаров цистерн предлагается устанавливать гибкие перегородки из материалов с малой жесткостью либо вводить специальные гасители, соединенные с резервуаром с помощью гибких связей. Например, в патенте [5] предлагается перегородку делать съемной. Ее детали, изготовленные из полимерных материалов либо из мягкой стали, с одной стороны прикрепляются к стенке резервуара, а с другой — соединяются между собой в его центре. Преимущество данной конструкции состоит в возможности ее установки в существующих цистернах. Еще один вариант установки специального подвижного устройства, предназначенного для гашения продольных и поперечных колебаний при гидроударах, рассмотрен в [6]. Здесь эффект достигается за счет поглощения энергии при ударе жидкости о пла-

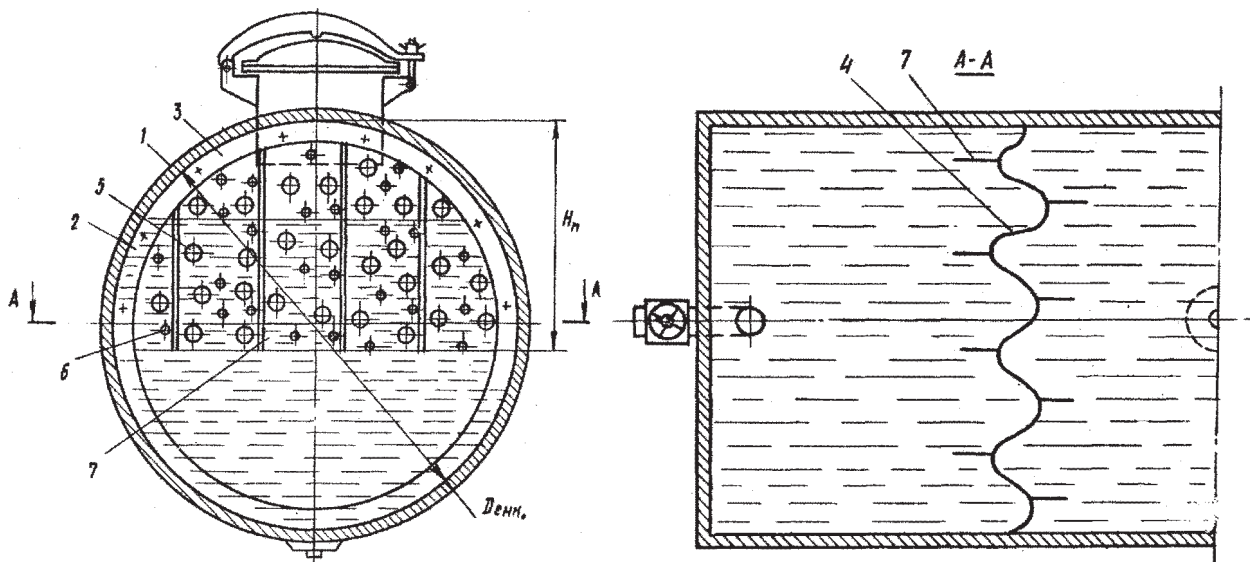


Рисунок 1 — Цистерна с гофрированными волнорезами SU 0981121 [3]

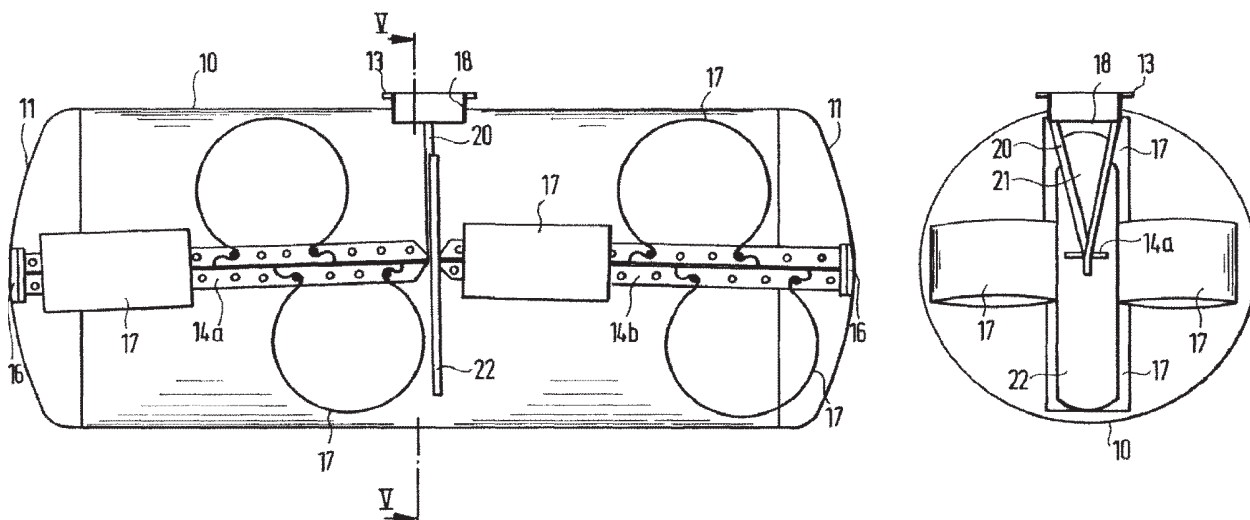


Рисунок 2 — Цистерна с Ω -образными обечайками по патенту EP 212653 [4]

стины и затраты части энергии гидроудара на раздвижение названных пластин.

Имеются технические решения, цель которых уменьшить колебания свободной поверхности жидкости или вовсе их прекратить. Например, в авторском свидетельстве SU 1270056 [7] с целью снижения нагрузок на корпус цистерны, возникающих вследствие колебаний жидкости, перфорированные перегородки предлагается шарнирно прикреплять к боковым стенкам корпуса и соединять между собой посредством пружинно-натяжных приспособлений, как представлено на рисунке 3. Использование шарниров позволяет уменьшить напряжения в местах крепления перегородок к резервуару. Эффективность гашения кинетической энергии жидкости увеличивается за счет перетекания жидкости через отверстия в перегородках и деформации упругих элементов пружинно-натяжного приспособления.

К числу недостатков последних устройств следует отнести наличие подвижных деталей, которые могут преждевременно выйти из строя при транспортировке химически активных жидкостей, к которым относится большинство транспортируемых грузов.

Как отмечалось выше, одним из способов улучшения динамических качеств цистерн является изменения формы их резервуаров. Чтобы зафиксировать объем жидкости, в патенте DE 10251966 [8] предлагается через смотровой люк вставлять резиновую оболочку, которая при частичном заполнении цистерны надувается и предотвращает перетекание жидкости за счет наложения связи на ее свободную поверхность.

Один из подходов связан с подбором оптимальной формы резервуара цистерны, при которой обеспечивается ее устойчивость в широком диапазоне уровней заполнения. Анализ, выполненный в ряде зарубежных работ и наших исследованиях [9, 10], позволил оптимизировать форму резервуара цистер-

ны. В качестве целевой функции выбран опрокидывающий момент, действующий на цистерну при ее движении по повороту. На рисунке 4 представлены результаты минимизации выбранной функции, соответствующие различным уровням заполнения резервуара, в сравнении с используемым в настоящее время цилиндрическим резервуаром.

Однако изменением конструкции резервуара и его формы не исчерпываются возможности по улучшению динамических качеств транспортных средств. В числе способов улучшения эксплуатационных свойств автомобиля имеются предложения, связанные с оптимизацией крепления цистерны к раме. Например, техническое предложение [11] для снижения динамических воздействий и предотвращения расслоения перевозимой бетонной смеси предполагает соединение резервуара с рамой с помощью пружины со специально подбираемой жесткостью. Однако выполненные в работе [12] расчеты показали, что изменением жесткости крепления резервуара к раме не удастся добиться существенного изменения динамических качеств цистерн.

Развернутое описание особенностей различных технических решений резервуаров цистерн приведено в статье [13]. Большое количество различных конструктивных решений показывает, что к настоящему времени создана широкая гамма конструкций, предназначенных для улучшения динамических качеств цистерн, особенностью которых является перемещение транспортируемого груза внутри резервуаров. Эти конструкции могут удовлетворить самому широкому диапазону требований транспортных предприятий. Однако такое многообразие говорит и о том, что до настоящего времени не выработан оптимальный способ демпфирования колебаний жидкости в цистернах. Обусловлено это, по нашему мнению, сложностью математического описания динамики систем твердых и жидких тел.

Поскольку для производства автоцистерн используются базовые шасси грузовых автомобилей, то изменение свойств подвески требует сложных конструкторских решений и процедур согласования. Поэтому дальнейшее усовершенствование

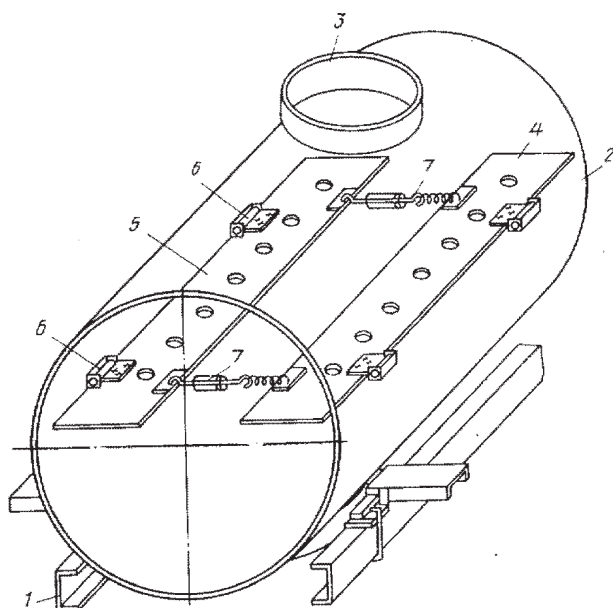


Рисунок 3 — Цистерна с шарнирно закрепленными горизонтальными перегородками по изобретению SU 1270056 [7]

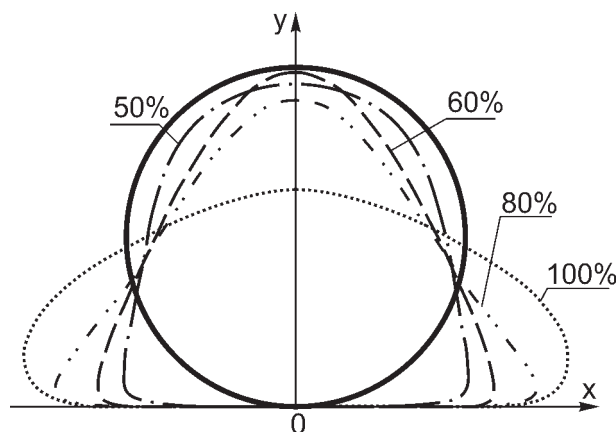


Рисунок 4 — Результаты оптимизации формы резервуара цистерны при различных уровнях заполнения

конструкций цистерн может быть осуществлено путем оптимизации формы резервуара и разработки теории оптимального демпфирования колебаний жидкости в транспортном резервуаре.

Решение задач об оптимизации динамических свойств и прочности автоцистерн. Созданная к настоящему времени теоретическая база позволяет решать сложные задачи механики твердых и деформируемых тел, к числу которых относится исследование движения цистерн [14, 15].

Для полного учета явлений, происходящих при переходных режимах движения автоцистерн, необходимо использовать модель жидкости как сплошной среды. 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. Аналитическое решение названных уравнений до настоящего времени не получено, поэтому для анализа перетекания вязкой жидкости в резервуарах используют численные методы.

Система дифференциальных уравнений движения жидкости внутри резервуара цистерны включает уравнения Навье-Стокса и неразрывности:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{f} - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \Delta v \vec{v};$$

$$\text{div } \vec{v} = 0,$$

где $\vec{v}$ — вектор скорости частицы жидкости; $\vec{f}$ — плотность распределения внешних объемных сил, действующих на частицу жидкости: $\vec{f} = \vec{g} - \vec{a}_{\text{пер}} - \vec{a}_{\text{кор}}$; $\vec{g}$ — ускорение свободного падения; ρ — плотность жидкости; p — давление жидкости в рассматриваемой точке; Δ — оператор Лапласа; v — кинематическая вязкость жидкости.

Наличие в уравнениях переносного $\vec{a}_{\text{пер}}$ и кориолисова $\vec{a}_{\text{кор}}$ ускорений обусловлено движением резервуара цистерны, приводящим к появлению сил инерции. Выражения этих ускорений имеют вид:

$$\vec{a}_{\text{пер}} = \vec{a}_O + \frac{d\vec{\omega}_k}{dt} \times \vec{r} + \vec{\omega}_k \times (\vec{\omega}_k \times \vec{r}); \quad \vec{a}_{\text{кор}} = 2 \left(\vec{\omega}_k \times \frac{d\vec{r}}{dt} \right),$$

где $\vec{a}_O$ — ускорение начала подвижной системы отсчета O , связанной с котлом; $\vec{\omega}_k$ — вектор угловой скорости котла цистерны; $\vec{r}$ — радиус-вектор частицы жидкости, проведенный из точки O .

Действие жидкости на котел учитывается через распределенные силы давления. Их главный вектор $\vec{F}$ и главный момент $\vec{M}_O$ определяются путем интегрирования по смоченной поверхности котла Σ :

$$\vec{F} = - \int_{\Sigma} p \vec{n} dS; \quad \vec{M}_O = - \int_{\Sigma} (\vec{r} \times \vec{n}) p dS,$$

где $\vec{n}$ — единичный вектор нормали к поверхности.

В свою очередь, динамика конструкции транспортного средства описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений [14, 15]

$$[m]\{\ddot{x}\} = \{F(t)\},$$

где $[m]$ — матрица масс; $\{\ddot{x}\}$ — вектор ускорений точек; $\{F(t)\}$ — вектор сил, который включает, в том числе, и гидродинамические силы.

Алгоритм решения записанной системы уравнений содержится, например, в [16].

Нами предложен принципиально новый метод, позволяющий оценить способность перегородок демпфировать колебания, основанный на анализе уменьшения суммарной кинетической энергии жидкости (диссипации энергии) за время одного ее колебания [17]. Именно в течение указанного периода развиваются явления, которые могут стать причиной больших динамических нагрузок на элементы конструкции либо опрокидывания цистерны. Таким образом, оптимизация конструкций перегородок может быть выполнена на основе максимизации диссипации энергии с учетом ограничения на прочность элементов конструкции резервуара.

Конечноэлементное моделирование перетекания жидкости в резервуарах с перфорированными перегородками. С целью выяснения особенностей перетекания жидкости в резервуаре рассмотрены случаи движения с постоянным замедлением. Применялся программный комплекс конечноэлементного анализа ANSYS.

Выполнялись расчеты для резервуара цистерны длиной 4 м и диаметра 2 м с центрально расположенной поперечной перфорированной перегородкой, имеющей различные размеры отверстий, для 50 % и 60 % уровня заполнения цистерны. Конечноэлементные модели включали от 150 до 300 тысяч конечных элементов. На рисунке 5 представлена модель резервуара автоцистерны с размером перфорации перегородки 20 см, включающей 303185 конечных элементов. Шаг по времени принимался равным 0,015 с. Начальная скорость движения автомобиля составила 15 м/с, после чего движение происходило с замедлением 0,6 g. На рисунке 6 изображено положение жидкого груза в момент 0,06 с после начала торможения автоцистерны.

Анализ полученных результатов показал, что при значительном уменьшении размера перфорации, поведение жидкости в цистерне с перфорированной перегородкой практически не отличается от аналогичного расчета для случая со сплошной перегородкой, разделяющей резервуар цистерны на два отдельных отсека.

Время одного расчета превышает 15 часов, поэтому оптимизация конструкции требует больших затрат времени высокопроизводительных компьютеров.

На практике встречаются случаи, когда цистерна совершает не отдельные маневры как переадресация, поворот и торможение, но и два маневра одновременно. Для случая торможения резервуара цистерны при входе в поворот была создана конечноэлементная модель цистерны с водой (рисунки 7), имеющая три перегородки сферической формы с отверстием по центру. Модель включает более 110 тысяч конечных элементов. Прототипом

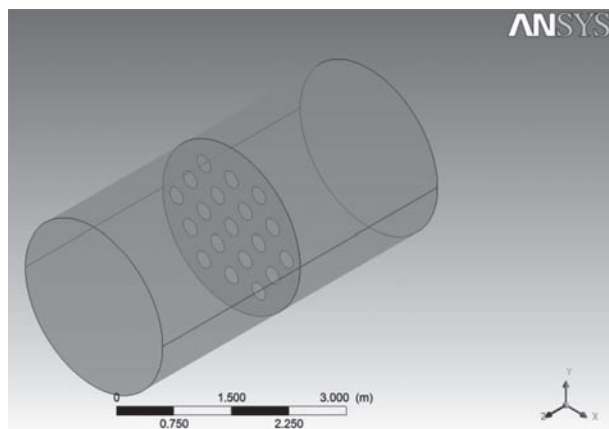


Рисунок 5 — Модель резервуара цистерны с перфорированной перегородкой

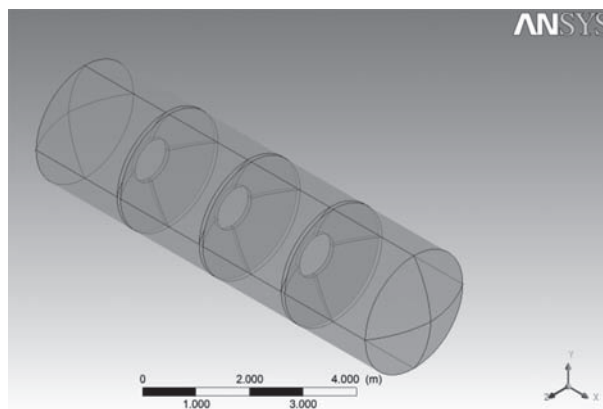


Рисунок 7 — Модель резервуара цистерны с перегородками сферической формы

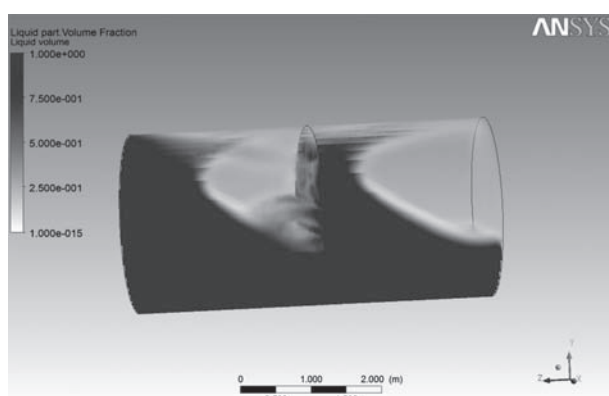


Рисунок 6 — Перетекание жидкости через перфорированную перегородку

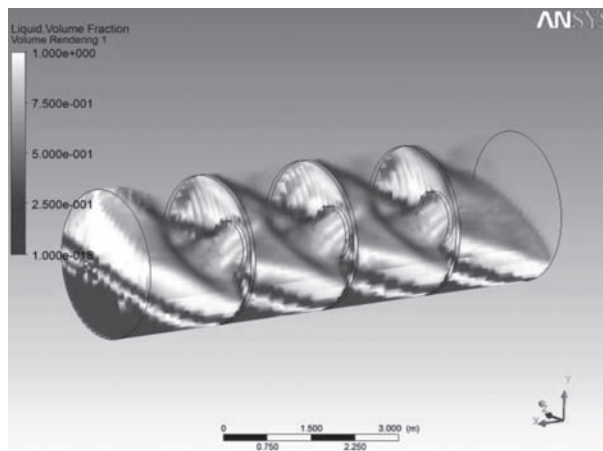


Рисунок 8 — Перетекание жидкости через отверстия в перегородках при одновременном повороте и торможении в момент 0,75 с после начала движения цистерны

этой модели является модель, представленная в [18]. Уровень заполнения цистерны принимался 60 %. Коэффициент поверхностного натяжения воды был принят равным 0,072 Н/м. При выполнении расчетов линейное ускорение цистерны вдоль продольной оси x было равно 0,3g, вдоль поперечной оси z — 0,25g.

Из рисунка 8 видно, что жидкость совершает движение в двух направлениях одновременно: прямолинейное вдоль продольной оси симметрии цистерны и поперечное к боковой стенке. Сравнение полученных нами результатов определения давлений жидкости на стенки резервуара с теоретическими и экспериментальными значениями, приведенными в работе [18], показали их хорошее совпадение, что подтверждает адекватность разработанных нами моделей реальным процессам.

Анализ прочности перегородок резервуаров цистерн. Помимо улучшения эксплуатационных качеств частично заполненной автоцистерны внутренние перегородки увеличивают прочность и жесткость цистерны, что позволяет снизить общую массу емкости за счет применения более тонких стенок.

При эксплуатации цистерн через некоторое время начинают появляться трещины в местах соединения перегородок с оболочкой резервуара. В случае, если перевозимый груз был слит из

одной внутренней емкости, соседняя емкость по-прежнему оставалась заполненной, при резком торможении цистерны вследствие сжимаемости жидкости происходит гидроудар, приводящий к кратковременному значительному увеличению давления жидкости на перегородку. Именно оно может вызвать усталостное разрушение оболочки резервуара.

В связи с этим целью работы стал выбор конструкции перегородки, обеспечивающей минимум напряжений в конструкции.

Для расчета сил давления жидкости на котел цистерны, вызванных гидравлическим ударом, необходимо рассматривать процесс распространения волн в полностью загруженной цилиндрической емкости с учетом сжимаемости жидкости. Оценка сил давления на котел может быть получена в результате использования одномерной модели течения с учетом акустического приближения [19].

Выполнен анализ прочности конструкции резервуара цистерны при различных конфигурациях перегородки. Первая созданная нами геометрическая модель была основана на чертеже перегородки, изготавливаемой на Гродненском механическом за-

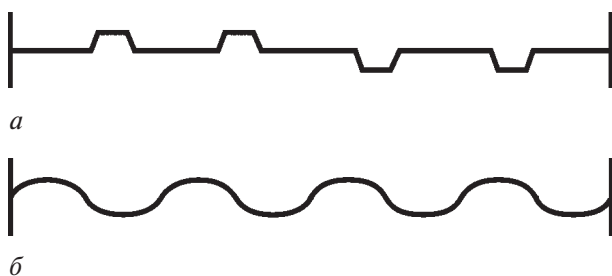


Рисунок 9 — Варианты перегородок

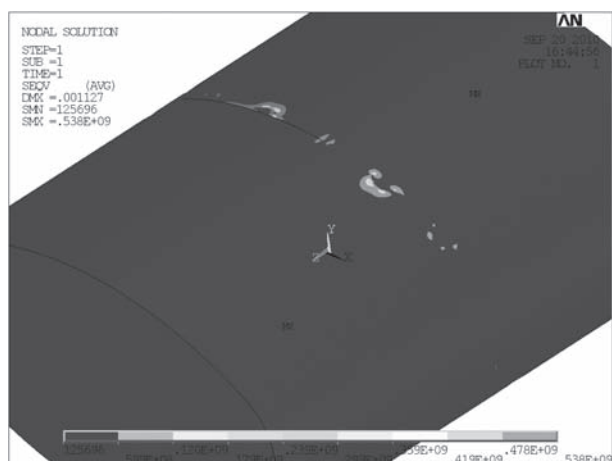


Рисунок 10 — Схема распределения напряжений в резервуаре с перегородкой, изготавливаемой на ГМЗ в настоящее время

воде из листа металла толщиной 4 мм. Особенностью этой перегородки является наличие гофр, которые увеличивают глубину перегородки до 10 см (рисунок 9 а). Это значение обусловлено нормативами, накладываемыми на конструкции цистерн.

К числу недостатков этой перегородки можно отнести малые радиусы закруглений в местах расположения гофр, что может приводить к возникновению больших напряжений. В связи с этим было принято решение о разработке дополнительной модели перегородки, представляющей собой гофрированную поверхность, при наблюдении с торца имеющую форму

синусоиды с амплитудой 5 см с целью обеспечения требований упомянутого ранее норматива (рисунок 9 б).

Для создания конечноэлементной модели в среде пакета программы ANSYS использовался оболочечный конечный элемент Shell 291, имеющий 8 узлов с 6 степенями свободы в каждом узле, поддерживающий опцию больших деформаций. Общее число элементов модели, построенной на основе заводского чертежа, — 50 000 элементов, модели с волнистой перегородкой — 3300 элементов. Большое число элементов модели перегородки по заводскому чертежу обусловлено наличием закруглений малого радиуса (4 мм), в областях которых для получения решения с приемлемой точностью понадобилось создание весьма мелкой сетки.

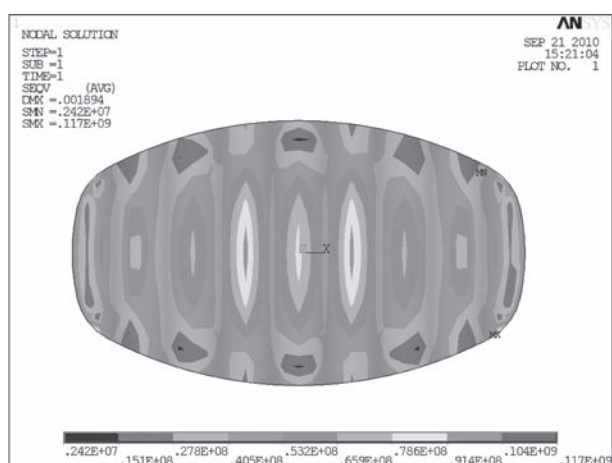
На рисунке 10 представлена схема распределения напряжений в оболочке резервуара. Их максимум наблюдается в нижней части вогнутой (по отношению к жидкости) гофры. Причем значение напряжений превышает предел текучести материала.

Результаты вычисления для предлагаемой волнистой перегородки, имеющей толщину 3 мм (на 1 мм тоньше существующей), показали, что максимум напряжений в ней наблюдается в центре этой перегородки, и его значение в 4 раза меньше, чем для существующей перегородки (рисунок 11). Кроме того, деформация волнистой перегородки оказалась в 2 раза меньшей по сравнению с существующей перегородкой.

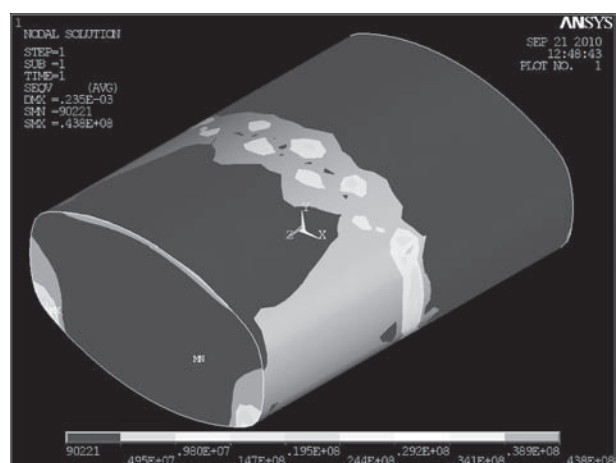
Таким образом, предложенная конструкция перегородки позволяет обеспечить прочность конструкции при действии гидродинамических нагрузок.

Заключение. Выполненный анализ показывает, что обеспечение безопасности эксплуатации цистерн связано с оптимизацией конструкции, направленной на снижение амплитуд колебаний жидкости и снижение напряжений в перегородках и оболочке резервуара.

Комплексная оптимизация конструкции кузов-



а



б

Рисунок 11 — Схема распределения напряжений в резервуаре с волнистой перегородкой: а — в перегородке; б — в оболочке резервуара

ва связана с максимизацией диссипации энергии колебаний жидкости, выполненной с учетом ограничения, наложенного на максимальные напряжения в конструкции.

Список обозначений

$\vec{v}$ — вектор скорости частицы жидкости;
 $\vec{f}$ — плотность распределения внешних объемных сил, действующих на частицу жидкости;
 $\vec{g}$ — ускорение свободного падения;
 ρ — плотность жидкости;
 p — давление жидкости в рассматриваемой точке;
 Δ — оператор Лапласа;
 ν — кинематическая вязкость жидкости;
 $\vec{a}_O$ — ускорение начала подвижной системы отсчета O , связанной с котлом;
 $\vec{\omega}_\kappa$ — вектор угловой скорости котла цистерны;
 $\vec{r}$ — радиус-вектор частицы жидкости, проведенный из точки O ;
 $\vec{n}$ — единичный вектор нормали к поверхности;
 $[m]$ — матрица масс;
 $\{\ddot{x}\}$ — вектор ускорений точек;
 $\{F(t)\}$ — вектор сил, который включает, в том числе, и гидродинамические силы.

Список литературы

- Агабабян, Ю.Н. Положение центра масс пожарного автомобиля // Ю.Н. Агабабян / Повышение эффективности автотранспортных средств. — М., 1982. — С. 115—119.
- Ranganathan, R. Influence of liquid load shift on the dynamic response of articulated tank vehicles / R. Ranganathan, S. Rakheja, S. Sankar // Vehicle System Dynamics. — 1990. — Vol. 19, No 4. — Pp. 177—200.
- Цистерна для жидкости: а.с. 0981121 СССР: МПКЗ В 65 D 88/12 В 60 P 3/22 / В.Е. Тройнин [и др.]. — Заявл. 02.02.81, опубл. 15.12.82. — 4 с.
- Pat. 212653 Europäische Patentanmeldung, B65D 90/52, B60P 3/24, B61D 5/00. Transporttank mit Schwallselementen, Herhard H. — Appl. No.: 810615, Anmeldetag: 25.08.86, Date: 04.03.87. — 12 p.
- Pat. 2005/002993 World Intellectual Property Organization, B65D 90/52, B60P 3/22, Tank Provided with Partition / Van Opstal J., Reijtenbach F. — Filling Date: 02.07.2004, Publication Date: 13.01.05. — 15 p.
- Автоцистерна: а.с. 1004210 СССР: МПКЗ В 60 P 3/22 В 65 D 88/12 F 16 F 13/00 / И.Ф. Кадыров [и др.]. — Заявл. 27.03.81, опубл. 15.03.83. — 6 с.
- Автомобильная цистерна: а.с. 1270056 СССР: МПКЗ В 65 D 88/12, В 60 P3/22, А 62 С 27/00 / А.В. Макеев, В.В. Роевко. — заявл. 03.07.84, опубл. 15.11.86. — 5 с.
- Hilfsmittel zur Erhöhung der Transportsicherheit bei Flüssigkeitstransporten in Tankfahrzeugen: pat. 10251966 DE: В 60 P 3/22 / M. Enders — Anmeldetag 08.11.02; Offenlegungstag 19.05.04. — 3 p.
- Ziarani, M.M. Optimisation of liquid tank geometry for enhancement of static roll stability of partially-filled tank vehicles / M.M. Ziarani, M.J. Richard, S. Rakheja // International Journal of Heavy Vehicle Systems. — 2004. — Vol. 11. — Pp. 155—173.
- Шимановский, А.О. Перспективы использования генетического алгоритма при исследовании динамики транспортных средств / А.О. Шимановский // Механика. Теория, задачи, учебно-методические разработки: сб. науч. тр. — Гомель: БелГУТ, 2006. — С. 107—118.
- Автобетоновоз: а.с. 1076334 СССР: МПКЗ В 60 P 1/16 / Е.П. Плавельский [и др.]. — заявл. 24.12.82, опубл. 28.02.84. — 3 с.
- Коваленко, А.В. Моделирование движения автоцистерны с подпрессоренным в вертикальной плоскости резервуаром / А.В. Коваленко // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки: междунар. сб. науч. тр. — Гомель: БелГУТ, 2011. — Вып. 5. — С. 65—69.
- Шимановский, А.О. Конструктивные решения, обеспечивающие безопасность движения цистерн (обзор) / А.О. Шимановский // Проблемы машиностроения и автоматизации. — № 1. — 2009. — С. 44—59.
- Высоцкий, М.С. Грузовые автомобили: Проектирование и основы конструирования / М.С. Высоцкий, Л.Х. Пилелес, С.Г. Херсонский. — М.: Машиностроение, 1995. — 256 с.
- Высоцкий, М.С. Динамика автомобильных и железнодорожных цистерн / М.С. Высоцкий, Ю.М. Плескачевский, А.О. Шимановский. — Минск: Белавтотракторостроение, 2006. — 320 с.
- Шимановский, А.О. Перспективы исследований динамики цистерн для транспортировки жидких грузов / А.О. Шимановский, Ю.М. Плескачевский, М.С. Высоцкий // Механика машин, механизмов и материалов. — 2007. — № 1(1). — С. 38—42.
- Shimanovsky, A.O. Computer Modeling of Liquid Sloshing in Road Tanker Reservoirs / A.O. Shimanovsky, Yu.M. Pleskachevskii, M.G. Kuzniatsova // Proceedings of the XXXIX Summer School — Conference “Advanced problems in mechanics” St. Petersburg (Repino) July 1—5, 2011. — St. Petersburg: Russian Academy of Sciences, Institute for Problems in Mechanical Engineering, 2011. — Pp. 412—417.
- Kandasamy, T. An Analysis of Baffles Designs for Limiting Fluid Slosh in Partly Filled Tank Trucks / T. Kandasamy, S. Rakheja, A.K.W. Ahmed // The Open Transportation Journal. — 2010. — Vol. 4. — Pp. 23—32.
- Шимановский, А.О. Математическое моделирование гидравлического удара в котле цистерны для транспортировки жидкостей / А.О. Шимановский // Вестн. Белорус. гос. ун-та транспорта: Наука и транспорт. — 2002. — № 1. — С. 22—23.

Vysotski M.S., Pleskachevsky Yu.M., Shimanovsky A.O., Kuzniatsova M.G.

Provision of road tanker traffic safety on the base of body optimisation

The work presents the possible ways of tank body design modernization that reduces the fluid sloshing impact on the vibrations and stability of the tank as well as the strength of its design. Some obtained results of finite element computations of the liquid flow in the tanks with baffles and the loading of the baffles and tank body are listed.

Поступила в редакцию 14.08.2012.