

УДК 539.319

А. Р. МИЛЯНЫЧ, старший преподаватель, Львовский филиал Днепродзержинского национального университета железнодорожного транспорта имени акад. В. Лазаряна (ЛФ ДНУТ), Украина

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ЗАПОЛНЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЦИСТЕРН ПО КРИТЕРИЮ НАПРЯЖЕНИЯ В ЛОГИСТИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ ПЕРЕВОЗОК

Представлены комплексные дифференциальные уравнения напряженного состояния оболочки свободно опирающегося, замкнутого, цилиндрического котла железнодорожной цистерны, внутренняя поверхность которой испытывает влияние равномерной, внутренней радиальной линейной нагрузки для определения оптимального заполнения цистерн в логистических цепях перевозок.

**Введение.** Задачами логистики является планирование, организация и контролирование всех видов деятельности по перемещению и складированию, которые обеспечивают прохождение материального потока от пункта закупки сырья до пункта конечного потребления [1].

Транспортировка грузов при оптимальном заполнении вагонов-цистерн, а также удачно продуманная логистика играют немаловажную роль в цепочке производство – реализация. Именно от этого зависят сохранность качества груза и срок эксплуатации цистерн.

Железнодорожные вагоны-цистерны предназначены для транспортировки различных по своим свойствам грузов и, в первую очередь, жидкостей: нефти и продуктов ее переработки, химически активных и агрессивных жидких веществ (кислоты, щелочи и другие химически сложные вещества), сжиженного газа (пропан-бутан, кислород), воды, молока, патоки, вина и т. п. Вагоны-цистерны используются также для перевозки муки и цемента. Кроме того, для транспортировки быстротвердеющих грузов функционирует специализированный парк вагонов-цистерн, перевозящих органические продукты, способные быстро твердеть, среди которых пек, жидкая сера, нефтебитум, капролактан, паста сульфанола, суперфосфорная кислота, олеум, желтый фосфор и др.

Котел цистерны состоит из цилиндрической части и двух днищ. Цилиндрическая часть котла составлена из продольно расположенных листов, из которых нижний – броневой лист – имеет большую толщину, чем верхние. Днища котла имеют эллиптическую форму с отношением высоты выпуклой части к диаметру, равным 0,2 [2].

В цистернах, в которых котел укладывается на раму, воспринимающую продольные нагрузки, возникающие в составе, емкость в передаче этих нагрузок к другим вагонам состава не влияет (рисунок 1. а).

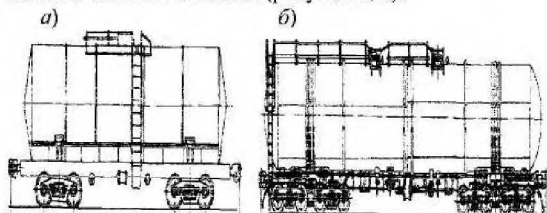


Рисунок 1 – Конструкции цистерн:  
а – рамная; б – безрамная

В вагонах-цистернах безрамной конструкции емкость котла является сплошь несущей конструкцией, воспринимает и передает продольные тяговые и ударные усилия и выполняет функции рамы. Для повышения прочности и жесткости емкости котлов вагонов-цистерн большего диаметра и длины цилиндрическая балка подкрепляется кольцами-шпангоутами, которые устанавливаются на внешней поверхности данного транспортного средства (рисунок 1. б).

**Постановка задачи.** В процессе транспортировки жидких грузов, при формировании грузовых железнодорожных составов на сортировочных горках и ударов при автосцепке происходят резкие толчки вагонов-цистерн, которые приводят к возникновению в котлах цистерн гидравлического удара, который способствует образованию кольцевых внутренних напряжений.

Характерной особенностью возникновения и распространения данных кольцевых внутренних напряжений является то, что конструктивно форма цистерн не является сплошным цилиндром, а представляет собой цилиндр, имеющий круглое отверстие, которое служит как смотровым люком, так и для заполнения и разгрузки (для отдельных конструкций цистерн и типа груза) транспортируемой жидкости.

Проводя данное исследование, мы рассматривали предыдущие научные разработки [3, 4], а именно – уравнение Доннелла для незначительной цилиндрической круговой оболочки с целью получения приближенного решения вопроса образования внутренних напряжений в бесконечно длинной круговой цилиндрической оболочке с круглым отверстием, в котором действуют равновесные нагрузки. В приведенных работах для выполнения краевых условий было расширено определенное решение дифференциального уравнения в форме ряда, который имеет полномочия и продукты полномочия отдельных элементов, влияющих на внутренние напряжения характеристик. Однако полученное не дает полного представления о возникновении кольцевых напряжений в цистернах различных конструкций: цистерн рамной конструкции и вагонов-цистерн безрамной конструкции.

**Результаты исследований.** Рассмотрены два способа установки вагонов-цистерн на вагонные рамы.

**С п о с о б 1.** Котел содержится в состоянии равновесия усилиями, которые равномерно распределены вдоль двух образующих опор (рисунок 2).

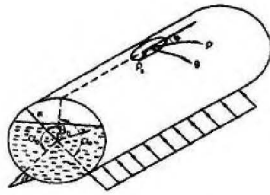


Рисунок 2 – Котел цистерны, уравновешенный двумя равномерно распределенными усилиями (способ I)

С п о с о б II. Котел установлен на двух кольцевых опорах. Условная цистерна без отверстия в котле. Рассмотрим сначала цилиндрическую цистерну без круглого отверстия, частично наполненную жидкостью. Напряжения в таком резервуаре возникают под давлением:

- а) на цилиндрическую поверхность котла;
- б) боковые (торцевые) поверхности.

Согласно уравнениям В. В. Новожилова [4] напряжения части а приблизительно приняты равными напряжениям в длинном цилиндрическом резервуаре, полученные в замкнутом виде методом, который подобен приведенному в работе [3]. Для части б влияние давления на каждую боковую поверхность заменено силой и моментом  $M$  в центре боковины.

Таким образом, применяется классическим методом расчета. Чтобы не загромождать эту статью сложным математическим аппаратом, приводим лишь конечные результаты распределения усилий в цилиндрическом резервуаре без круглого отверстия (номинальные усилия). Эти номинальные усилия на периферии круга с малым радиусом  $\rho_0$  в полярных координатах  $\rho, \varphi$ , имеют вид

$$\left. \begin{aligned} N_p &= 0,5 \cdot \left( \bar{\gamma} R^2 \Lambda_1 + \frac{F}{2\pi R} + \frac{M}{\pi \cdot R^2} \right) (1 + \cos 2\varphi) + \\ &+ 0,5 \bar{\gamma} R^2 \Lambda_2 (1 - \cos 2\varphi); \\ N_{\varphi\varphi} &= -0,5 \cdot \left[ \bar{\gamma} R^2 \cdot (\Lambda_1 - \Lambda_2) + \frac{F}{2\pi R} + \frac{M}{\pi \cdot R^2} \right] \cdot \sin 2\varphi; \\ M_p &= 0,5 \cdot \bar{\gamma} R^2 \Lambda_3 \cdot [1 + \nu + (\nu - 1) \cdot \cos 2\varphi]; \\ Q_p^* &= -\bar{\gamma} R^2 \left[ 0,5 \cdot \Lambda_4 + \frac{R}{\rho_0} (1 - \nu) \Lambda_5 \cdot \cos 2\varphi \right], \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $R, \nu, \bar{\gamma}$  – средний радиус вагона-цистерны, коэффициент Пуассона и плотность транспортируемой жидкости;  $N_p, N_{\varphi\varphi}, M_p, Q_p^*$  – соответственно, усилия, момент и поперечное усилие согласно Кирхгофу.

Умножив на (-1) величины, приведенные в отношениях (1) при  $\rho = \rho_0$ , и применяя методы комплекса дифференциальных уравнений для цилиндрических оболочек [5], получаем искомое решение.

Напряжения в вагоне-цистерне с круглым отверстием (именно таким является железнодорожный вагон-цистерна) равны сумме номинальных и наложенных напряжений. Далее приведены безразмерные кольцевые напряжения  $\sigma_\varphi / 2\bar{\gamma}R$  вокруг края отверстия на наружной и внутренней поверхностях котла цистерны:

$$\bar{\sigma}_\varphi = \frac{\sigma_\varphi}{2\bar{\gamma}R} = \bar{\sigma}_1 \pm \bar{\sigma}_2. \quad (2)$$

Получено 27.05.2014

**A. R. Milyanych.** Determination of optimal filling of rail tank cars the stress criterion the logistics chain transportation.

Presents a comprehensive differential equations the stress state of the membrane freely resting, closed, cylindrical boiler tank wagons, the internal surface of which was influenced by a well-dimensional, internal radial linear load to determine the optimal filling of the tanks in the logistics chain transportation.

Другие напряжения, такие как радиальное напряжение  $\sigma_r$  и напряжение сдвига  $\sigma_{r\varphi}$  равны нулю при  $\rho = \rho_0$ , поскольку считается, что отсутствуют усилия по краям круглого отверстия.

На рисунке 3 приведены графики  $\sigma_\varphi / 2\bar{\gamma}R$  в зависимости от угла при различных уровнях заполнения вагона-цистерны жидкостным грузом.

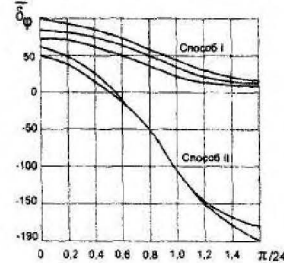


Рисунок 3 – Значения  $\bar{\sigma}_\varphi$  на внутренней поверхности ( $\rho = \rho_0$ ) в зависимости от  $\varphi$  при различных  $\Theta_0$

В качестве примера принимаем:  $t/R = 0,1$ ;  $\rho_0/R = 0,1$ ;  $\nu = 0,3$ ;  $l/R = 5$  рад для способа I и  $l/R = 2,5$  рад для способа II. Заметим, что при различных конструкциях и геометрических размерах цистерн [6] кривая  $\Theta = 0,1$  соответствует случаю полного заполнения емкости котла цистерны железнодорожного вагона.

**Вывод.** Приведенный комплекс дифференциальных уравнений определения напряженного состояния цилиндрических оболочек – железнодорожных цистерн, которые свободно опираются на раму грузового вагона при конструкции котла с отсутствием в нем отверстий и с круглыми отверстиями. В статье теоретически доказано, что величины внутренних напряжений напрямую зависят от характеристик жидкого материала груза и уровня заполнения вагона-цистерны жидкостным грузом. Наличие в котле цистерны круглого отверстия и вокруг него зонной области является концентратором напряжений, который необходимо учитывать на этапах проектирования и изготовления данного вида грузовых средств транспорта.

#### Список литературы

- 1 Гаджинский, А. М. Логистика : учеб. / А. М. Гаджинский. – 2-е изд. – М. : Информационно-внедренческий центр "Маркетинг", 1999. – 228 с.
- 2 Вагоны : учеб. / Л. А. Шадур [и др.]; под ред. Л. А. Шадура. – М. : Транспорт, 1980. – 439 с.
- 3 Naghdi, A. K. An Approximate Solution to the Problem of a Circular Cylindrical Shell With a Circular Hole Subjected to an Arbitrary Self-Equilibrating Edge Loading / A. K. Naghdi // Ing - Arch. – Vol. 38. – 1989. – P. 380.
- 4 Новожилов, В. В. Теория тонких оболочек / В. В. Новожилов. – СПб. : Изд-во СПб. ун-та, 2010. – 380 с.
- 5 Mizoguchi, K., Stress in and Deformation of a Horizontal Reservoir Supported at Both Ends and Partially Filled With a Liquid / K. Mizoguchi, K. Inone // Bulletin of the JSME. – Vol. 7. – No. 26. – May 1984. – P. 318–328.
- 6 Цистерны (Устройство, эксплуатация, ремонт) : справочное пособие / В. К. Губенко [и др.]. – М. : Транспорт, 1990. – 151 с.