

## К ВОПРОСУ РАСЧЕТА ОБОЛОЧКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РЕЗЕРВУАРА

**В.И. Тоньшин** - магистр, **Д.Е. Молочников** – к.тех.н., доцент  
ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ, г. Ульяновск, Россия, e-mail: denmol@yandex.ru

**Аннотация.** В статье рассматривается методика расчета загрузки оболочки (стенки) резервуара по двум критериям, симметричной вертикальной нагрузкой и гидростатическим давлением жидкости. Расчет оболочки проводят как бесконечной балки на упругом основании, являющейся проекцией кольцевого усилия на ее радиус.

**Ключевые слова:** резервуар, расчет, оболочка, нагрузка, кольцевое усилие, давление, жидкость, деформация, нагружение.

Загружение оболочки (стенки) резервуара симметричной вертикальной нагрузкой и гидростатическим давлением жидкости вызывает в ней двухосное напряженное состояние (рисунок 1а), характеризующееся осевым меридианом и кольцевыми усилиями [1, 2].

Меридианное погонное усилие в произвольном сечении оболочки резервуара равно

$$N_{1(x)} = \sum P_x, \quad (1)$$

где  $\sum P_x$  – суммарная вертикальная погонная нагрузка от собственного веса отсеченной части стенки, собственного покрытия и снега, влаги.

Кольцевое усилие в этом же сечении вычисляется по формуле

$$N_{2(x)} = P_x \cdot r = [\gamma_{f1} \cdot \gamma \cdot (I - x) + \gamma_{f2} \cdot P_{изб}] \cdot r, \quad (2)$$

где  $P_x$  – гидростатическое давление жидкости с учетом избыточного давления паровоздушной смеси ( $P_{изб}$ );

$\gamma$  – удельная масса жидкости;

$\gamma_{f1}, \gamma_{f2}$  – коэффициенты надежности по нагрузке для жидкости и избыточного давления соответственно;

$I$  – уровень (высота) жидкости в резервуаре;

$r$  – радиус резервуара;

$x$  – координата рассчитываемого сечения.

Жесткое соединение стенки резервуара с днищем и покрытием вследствие стеснения деформации и криволинейности элементов нарушает безмоментное состояние оболочки и в этих местах возникает так называемый «краевой эффект».

В этом случае расчет оболочки производят как бесконечной балки на упругом основании (рисунок 2а). При этом для оболочки таким упругим основанием является проекция кольцевого усилия на ее радиус. Если балка бесконечная, что имеет место при отношении высоты резервуара к характеристике жесткости края оболочки ( $H/S$ ) большем 2,5...3, то исключается взаимное влияние деформаций концов балки друг на друга, и расчет нижнего и верхнего краев стенки можно производить отдельно. В этом случае для определения изгибающего момента ( $M_0$ ) и поперечной силы ( $Q_0$ ), возникающих в краевых зонах (например, нижней – рисунок 2б), используют метод сил [3, 4].

Согласно этому методу, канонические уравнения при условии нерастяжимости днища имеют вид:

$$\delta_{11}M_0 + \delta_{12}Q_0 + \Delta_{1p} = 0 \quad (3)$$

$$\delta_{21}M_0 + \delta_{22}Q_0 + \Delta_{2p} = 0 \quad (4)$$

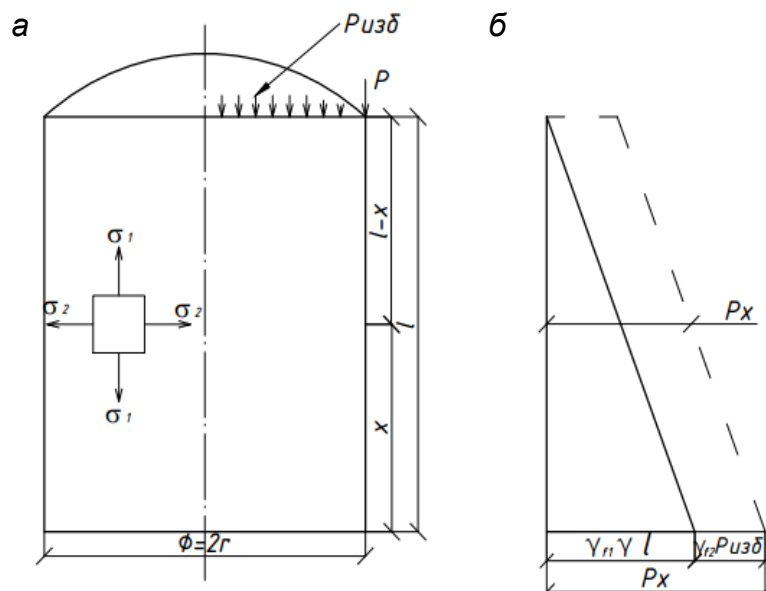


Рисунок 1. Схема загрузки стенки резервуара (а) и эпюра бокового давления от нагрузок (б)

где  $\delta_{11}$  – угол поворота сечения оболочки от  $M_0 = 1$ ;  $\delta_{12}$  – угол поворота сечения от силы  $Q_0 = 1$  по направлению  $M_0$ ;  $\delta_{22}$  – перемещение силы  $Q_0$ ;  $\delta_{21}$  – перемещение по направлению  $Q_0$  от момента  $M_0 = 1$ ;  $\Delta_{1p}$  – угол поворота сечения по направлению  $M_0$  от внешних нагрузок в основной системе;  $\Delta_{2p}$  – перемещение по направлению  $Q_0$  от внешних нагрузок в основной системе.

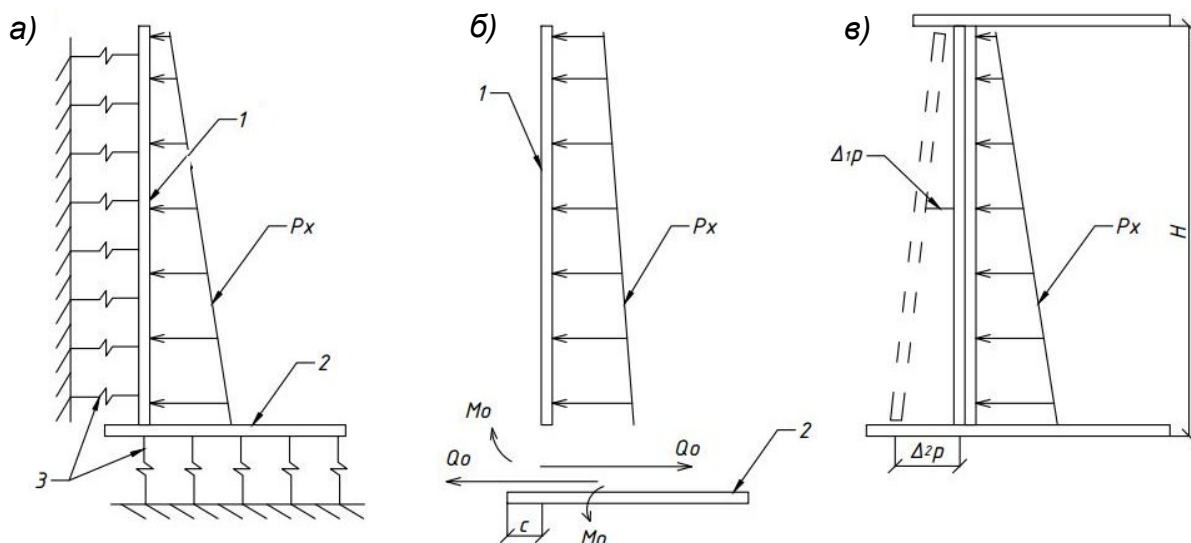


Рисунок 2. Сопряжение стенки резервуара с дном: а – расчетная схема; б – основная система; в – деформации стенки высотой  $H$ ; 1 – стенка высотой  $H$ ; 2 – дно; 3 – упругое основание

Для цилиндрической оболочки значения единичных перемещений, увеличенные в  $D$  раз ( $D$  – цилиндрическая жесткость), будут

$$\delta_{11} = S; \delta_{22} = \frac{S^3}{2}; \delta_{12} = \delta_{21} = -\frac{S^2}{2} \quad (5)$$

В выражениях (5) характеристика жесткости края оболочки (для стали)

$$S = 0,78\sqrt{r \cdot t} \quad (6)$$

Грузовые коэффициенты (в случае нагрузки, нарастающей вниз по линейному закону (рисунок 2а), для верха цилиндрической оболочки ( $x = H$ ))

$$\Delta_{1p} = \frac{PS^4}{4l}; \Delta_{2p} = 0. \quad (7)$$

Для нижней части цилиндрической оболочки ( $x = 0$ )

$$\Delta_{1p} = \frac{PS^4}{4!}; \Delta_{2p} = -\frac{PS^4}{4} \quad (8)$$

После нахождения единичных значений  $M_0$  и  $Q_0$  формулы краевых изгибающих моментов и поперечных сил для произвольного сечения оболочки примут вид

$$M_x = M_0 \eta_1 + (M_0 - Q_0 S) \eta_2; \quad (9)$$

$$Q_x = \left( Q_0 - \frac{2M_0}{S} \right) \eta_2 - Q_0 \eta_1. \quad (10)$$

А кольцевое усилие  $N_2$ , с учетом влияния краевых сил находим по формуле

$$N_{2x} = N_{2(x)} + \frac{2r}{S^2} [(M_0 - Q_0 S) \eta_1 - M_0 \eta_2]. \quad (11)$$

Изгибающий момент представляет собой затухающую периодическую знакопеременную функцию, которая при  $x = 0$  имеет максимальное значение и при  $x = (\pi S)/4$  – нулевое. Поэтому влияние краевого эффекта на величину кольцевых усилий практически учитывают только в интервале  $0 \leq x \leq \pi S$ .

Проверку стенки резервуаров на прочность производят по формулам [2, 5]

$$\sigma_1 = \frac{N_1}{t} \leq R_y \gamma_c, \quad \sigma_2 = \frac{N_2}{t} \leq R_y \gamma_c, \quad (12)$$

где  $R_y$  – расчетное сопротивление стали сжатию или растяжению по пределу текучести.

Так как под воздействием внешних нагрузок стенка резервуара может потерять устойчивость, то ее устойчивость в меридианном направлении считают обеспеченной при выполнении условия

$$\sigma_1 = \frac{N_1}{t} \leq \gamma_c \sigma_{cr1}. \quad (13)$$

Критические напряжения  $\sigma_{cr1}$  вычисляют по формуле

$$\sigma_{cr1} = CE \frac{t_{min}}{r}, \quad (14)$$

В случае воздействия на оболочку резервуара вакуума проверку на потерю устойчивости стенки в кольцевом направлении проводят по формуле

$$\sigma_2 = \frac{N_2}{t} \leq \gamma_c \sigma_{cr2}. \quad (15)$$

В формуле (15) критические кольцевые напряжения  $\sigma_{cr2}$  при  $0,5 \leq H/r \leq 10$  находят из выражения

$$\sigma_{cr2} = 0,55 \frac{Er}{H} \sqrt{\left( \frac{t_m}{r} \right)^3}, \quad (16)$$

где  $t_m$  – среднее значение толщины принимаемой стенки.

При вычислении  $\sigma_{cr2}$  по надо иметь виду, что при стенке постоянной толщины ее высоту принимают равной  $H$ , а при стенке с переменной толщиной  $H_1 = H - 0,33 \square_{nep}$ , где  $\square_{nep}$  высота стенки с переменной толщиной.

### Библиографический список

1. Яковлев С.А., Замальдинов М.М., Молочников Д.Е., Дудиков М.Ю. Способы повышения жесткости емкостей для перевозки нефтепродуктов автомобильным транспортом // Достижения техники и технологий в АПК: материалы Международной научно-практической конференции, 15 ноября 2018. Ульяновск: Ульяновский ГАУ, 2018. С. 355-360.
2. Молочников Д.Е., Яковлев С.А., Голубев С.В., Сотников М.В., Козловский Ю.В. Прогнозирование ресурса вертикальных резервуаров // Достижения техники и технологий в АПК: Материалы Международной научно-практической конференции, 15 ноября 2018. Ульяновск: Ульяновский ГАУ, 2018. С. 309-313.
3. Молочников Д.Е., Мустякимов Р.Н., Голубев В.А., Козловский Ю.В., Пальмов М.Ю. Особенности коррозии вертикальных резервуаров для нефтепродуктов // Наука в современных условиях: от идеи до внедрения: материалы Национальной научно-практической конференции. Том II. Димитровград, ТИ - филиал УлГАУ, 2018. С. 215-220.
4. Молочников Д.Е., Яковлев С.А., Мустякимов Р.Н. Прогнозирование ресурса вертикальных резервуаров для нефтепродуктов при циклическом нагружении // Материалы Всероссийской научно-практической конференции посвященной 40-летию со дня организации

студенческого конструкторского бюро (СКБ), Рязань, 11 февраля 2020 года. Рязань: Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева, 2020. С. 63-67.

5. Яковлев С.А., Молочников Д.Е. Повышение долговечности емкостей для перевозки нефтепродуктов автомобильным транспортом увеличением их жесткости при ремонте // Ремонт. Восстановление. Модернизация. №2. 2019. С. 46-48.