

УДК 624.953.046

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЕМКостей ИЗ КРУПНОРАЗМЕРНЫХ СТАЛЬНЫХ ПОЛОТНИЩ

*С.А. Ращепкина*

Рассматривается инженерная методика по определению высоты и толщины стенки цилиндрической емкости из стальных полотнищ, разработанная на основе безмоментной теории расчета оболочек с учетом воздействия массы сыпучего материала с представлением числовых примеров и анализом полученного решения.

*Ключевые слова:* емкость; высота и толщина стенки; сталь; графики; анализ.

## DESIGN OF VERTICAL CYLINDRICAL VESSELS OF LARGE SIZE STEEL BILLETS

*S.A. Rashchepkina*

The paper considers the engineering methodology for the determination of the height and thickness of the walls of a cylindrical container of steel sheets developed on the basis of membrane theory of shell analysis considering the effect of the mass of granular material with the presentation of the numerical examples and the analysis of the obtained solutions.

*Keywords:* capacity; height and wall thickness; steel; and graphics; analysis.

При решении задачи оптимизации металлических резервуаров низкого давления для нефтепродуктов за основной критерий принимается условие устойчивости цилиндрической опорожненной емкости [1]. В данной статье рассмотрен вопрос проектирования стальных емкостей, предназначенных для хранения инертных материалов [2], где, кроме нагрузок от действия ветра, снега, массы покрытия и оборудования, действуют нагрузки от сил трения сыпучего материала о стенку, существенно влияющих на устойчивость оболочки из крупноразмерных стальных полотнищ. Кроме того, в емкостях для сыпучих материалов отсутствует стальное днище, оболочка опирается на железобетонный фундамент, примыкая к закладной с помощью сварки.

При построении расчетной модели использована безмоментная теория расчета тонких оболочек. В качестве определяющих параметров приняты:  $P_i$  и  $P_j$  – соответственно вертикальные и горизонтальные нагрузки на стенку силосной оболочки;  $s_i$  и  $s_j$  – соответственно меридиональные и кольцевые напряжения в цилиндрической оболочке;  $H$  – высота стенки силоса;  $t_b$  – толщина верхнего пояса стенки;  $t_x$  – усредненная толщина стенки.

**Основные соотношения.** При осесимметричной форме потери устойчивости цилиндрической оболочки с учетом трения сыпучего материала о стенку [1, 2] условие устойчивости имеет вид:

$$\frac{\sigma_{ic}}{\sigma_{\#i}} + \frac{\sigma_j}{\sigma_{\#j}} \leq \gamma_c, \quad (1)$$

где  $\sigma_j$  – кольцевые напряжения от горизонтальных нагрузок;  $\sigma_{cri}$ ,  $\sigma_{crj}$  – критические напряжения, соответственно продольные и кольцевые, определяемые по [1];  $\sigma_{ic}$  – продольные напряжения, вычисляемые по формуле:

$$\sigma_{ic} = \sigma_i + \sigma_i',$$

где  $\sigma_i$  – напряжения от расчетных нагрузок на кровлю;  $\sigma_i'$  – напряжения, вызванные силами трения сыпучего материала о стенку.

Используя подход, указанный в работе [3], были найдены выражения для определения оптимальной высоты и усредненной толщины стенки тонкостенной вертикальной цилиндрической емкости без учета и с учетом поддерживающего влияния сыпучего материала [2].

Подставив в (1) значения кольцевых расчетных и критических напряжений и преобразовав полученное выражение, усредненная толщина стенки определится как

$$t_{cp} \geq \left( \frac{P_j}{E} \right)^{2/5} r \left[ \frac{H}{0,55r} \left( 1 + \frac{\sigma_{crj}}{\sigma_j} \cdot \frac{\sigma_i + \sigma_i'}{\sigma_{cri}} \right) \right]^{2/5}. \quad (2)$$

Введя обозначение

$$\xi = \left[ \frac{H}{0,55r} \cdot \left( 1 + \frac{\sigma_{j\text{cri}}}{\sigma_j} \cdot \frac{\sigma_i + \sigma'_i}{\sigma_{\text{cri}}} \right) \right]^{0,4}, \quad (3)$$

выражение усредненной толщины стенки представится в виде:

$$t_{cp} \geq \left( \frac{P_j}{E} \right)^{\frac{2}{5}} r \xi, \quad (4)$$

где  $r$  – радиус емкости; значение параметра  $x$  можно принять равным  $\xi = 2 \dots 2,1$  при  $V < 3000 \text{ м}^3$  и  $\xi = 1,9$  при  $V > 3000 \text{ м}^3$  [4].

Высоту стенки предлагается определять по выражению:

$$H_\xi = a \cdot \left( \frac{E}{P_j} \right)^{0,16} \cdot (V \Delta_\xi^2)^{0,2}, \quad (6)$$

где  $V$  – объем стальной емкости;  $D_x$  – приведенная толщина покрытия и опорного кольца; при практических расчетах она может быть принята равной  $\Delta_\xi = \Delta_{kp}$ ;  $\Delta_{kp}$  – приведенная толщина кровли;  $a$  – параметр, который при достаточно большом диапазоне возможных значений объемов емкостей можно принять равным,  $a = 0,55 \dots 0,85$ .

Подставив в (4) значение радиуса емкости  $r^2 = V / \pi H_\xi$  и приведенной толщины кровли  $\Delta_{kp}$ , а также заменив  $t_{cp}$  на  $t_\xi$ , получим окончательно выражение усредненной толщины стенки:

$$t_\xi = \xi \cdot \left( \frac{P_j}{E} \right)^{0,4} \cdot \left( \frac{V}{\pi H_\xi} \right)^{0,5}. \quad (7)$$

Предложенные выражения для определения высоты и усредненной толщины стенки емкости минимальной массы позволяют определить габариты емкости, а также найти массу стенки.

**Исследование сходимости методики.** Рассмотрим расчет стальной цилиндрической емкости для инертных материалов при следующих исходных данных: вместимость  $V = 1 \dots 7$  тыс.  $\text{м}^3$ ; приведенная толщина кровли и нижнего опорного кольца  $D_x = 0,006 \text{ м}$ ; материал стенки – сталь с  $R_y = 270 \text{ МПа}$ ; модуль упругости стали  $E = 2,06 \times 10^5 \text{ МПа}$ ; нормативное значение нагрузок, действующих на емкость: собственный вес кровли – 420 Па, теплоизоляция стен и покрытия – 450 Па, снеговая нагрузка на кровлю – 1000 Па, ветровой скоростной напор – 450 Па. Высота стенки принималась равной 6; 9; 10,5; 12; 13,5; 15; 18 м.

Анализ результатов численного эксперимента показал хорошую сходимость усредненной толщины стенки (рисунок 1), найденной по результатам полного расчета по СП [2] и выражению (6). Однако расчет по предложенной методике проще. Можно, не рассчитывая стенку на прочность и устой-

чивость, найти приближенно размеры и массу оболочки из крупноразмерных стальных полотнищ.

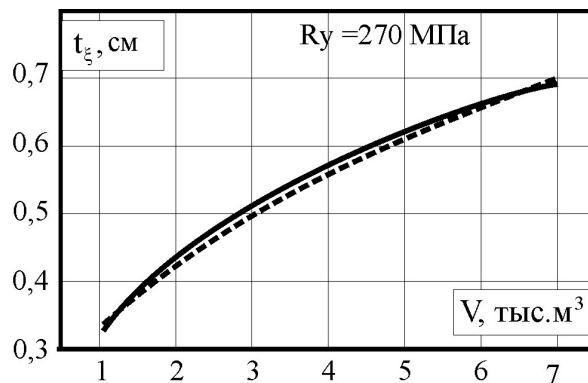


Рисунок 1 – Зависимость усредненной толщины стенки от объема: ..... – согласно [2];

————— – по формуле (6)

С увеличением объема высота  $H_x$  увеличивается (рисунок 2). Причем, для каждого заданного значения  $V$  высота стенки минимальной массы имеет нижние и верхние предельные границы, в диапазоне которых она может варьироваться от  $H_{x\text{min}}$  ( $a = 0,55$ ) до  $H_{x\text{max}}$  ( $a = 0,8$ ) при практически неизменном удельном расходе металла.

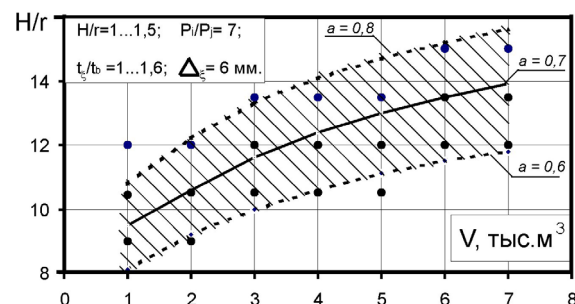


Рисунок 2 – Зависимость оптимальной высоты стенки от объема:

● – расчет согласно [2]; — – по формуле (6)

Следует отметить, что имеется хорошая сходимость результатов расчета по предлагаемой методике и согласно полному расчету емкости по [2].

Расчеты показали, что при определении высоты стенки по предложенным выражениям можно определить размеры оболочки, при которых вес ее минимальный. С увеличением или уменьшением отношения  $H/r$  (по сравнению с оптимальным) удельная масса металла растет (рисунок 3). На графиках видно, что все экстремальные точки кривых соответствуют значением отношения  $H/r = 1 \dots 2$ , при которых расход металла на  $1 \text{ м}^3$  емкости минимальный. Высота стенки в точках экстремума имеет достаточную сходимость в сравнении с высотой,

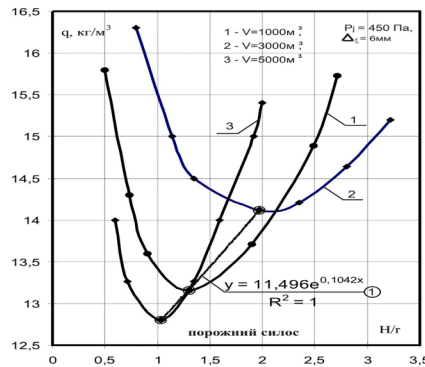


Рисунок 3 – Отношение  $H/r$  – удельный расход стали

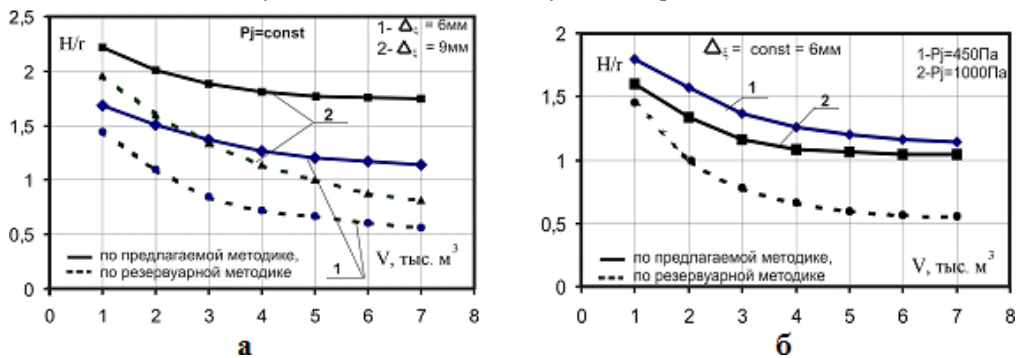


Рисунок 4 – Отношение  $H/r$  – объем: а – при  $P_j = \text{const}$ ; б – при  $\Delta\xi = \text{const}$

вычисленной по выражению (6). Точки экстремума описываются экспоненциальным уравнением регрессии вида:

$$y = 11,496 e^{0,1042x}, \text{ где } x = H/r, y = q.$$

При изменении высоты стенки на  $\pm 1,5$  м (по отношению к оптимальной) удельный расход металла  $q$  практически не увеличивается. Например, для емкости объемом  $V = 3000 \text{ м}^3$  имеем: при высоте стенки  $H_x = 10,5 \text{ м}$  –  $q = 13,2 \text{ кг/м}^3$ ; при  $H = 12 \text{ м}$  –  $q = 13,1 \text{ кг/м}^3$ ; при  $H = 13,5 \text{ м}$  –  $q = 13,3 \text{ кг/м}^3$ .

Кривые зависимости отношения высоты стенки к радиусу оболочки от объема при вычислении оптимальной высоты стенки по методике расчета резервуаров [3] и предложенным выражениям представлены на рисунке 4.

Анализ графиков показывает, что отношение  $H/r$  при объемах  $V = 1...3 \text{ тыс. м}^3$  изменяется незначительно, а при  $V > 3 \text{ тыс. м}^3$  отношение  $H/r$  практически постоянно, в отличие от значений, определяемых по известной формуле [3]:

$$\frac{H_{opt}}{r} = \frac{H_{opt}}{r} = \frac{(\gamma_c R_{\omega y} \Delta / (\gamma_f \gamma_c))^{0,5}}{r}, \quad (7)$$

предназначенной для определения оптимальной высоты стенки металлических цилиндрических резервуаров.

Здесь  $\gamma_c$  – коэффициент условий работы;  $R_{\omega y}$  – расчетное сопротивление сварных швов на растяжение при физическом контроле;  $\gamma_f$  – коэффициент надежности по нагрузке;  $\gamma$  – удельный вес жидкости.

Постоянство отношения  $H/r$  при различных объемах емкостей дает возможность правильно подойти к определению габаритных размеров цилиндрических емкостей из крупноразмерных стальных полотнищ – высоты и толщины стенки, радиуса, и легко оптимизировать расчетный процесс. Расчет высоты и усредненной толщины стенки по предложенным выражениям позволяет учитывать район строительства, то есть воздействие ветровой нагрузки на цилиндрическую оболочку, являющейся решающей при расчете емкостей на устойчивость.

В качестве примера, иллюстрирующего влияние ветровой нагрузки на величину высоты стенки, рассчитана емкость объемом  $2000 \text{ м}^3$ . Нормативные значения скоростного напора ветра принимались равными  $q_o = 170; 450; 600; 850 \text{ Па}$ .

На графиках, представленных на рисунке 5, видно, что с увеличением скоростного ветрового напора высота стенки минимальной массы уменьшается. При  $q_o = 850 \text{ Па}$  высота стенки –  $9 \text{ м}$ , а при  $q_o = 170 \text{ Па}$  –  $12 \text{ м}$ . Расчеты гладкой емкости, проведенные согласно полному расчету [2] хорошо

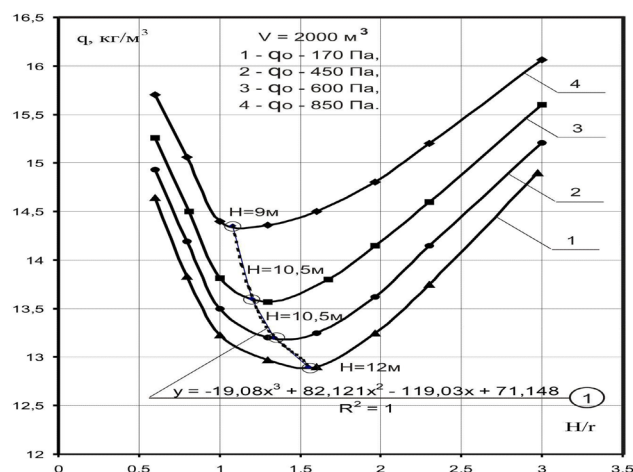


Рисунок 5 – К определению высоты стенки минимальной массы

согласуются с расчетами по предложенным выражениям, причем при  $a = 0,68$  имеется хорошая сходимость результатов расчета. Точки экстремума аппроксимируются кубическим полиномом.

**Заключение.** Анализ результатов численного эксперимента показал, что расчет усредненной толщины и высоты стенки по найденным выражениям имеет хорошую сходимость с расчетом по СП [2]. Расчет емкости по предложенной методике позволяет запроектировать цилиндрическую емкость минимальной массы. При этом методика позволяет:

- определить на начальной стадии проектирования высоту, толщину и массу стенки с высокой степенью точности в сравнении с расчетом по СП;
- учесть район строительства при определении высоты и толщины стенки стальной оболочки;
- существенно снизить трудоемкость вычислений при проектировании цилиндрических емкостей.

Разработанную методику можно рекомендовать для использования в практике проектирования емкостей из крупноразмерных стальных полотниц, предназначенных для хранения инертных материалов.

#### Литература

1. Свод правил СП 16.13330.2011. Стальные конструкции. М.: ФГУП ЦПП, 2010.
2. Свод правил СП 108.13330.2012. Предприятия, здания и сооружения по хранению и переработке зерна. М.: ФГУП ЦПП, 2012.
3. *Соболев Ю.В.* Проектирование металлических вертикальных цилиндрических резервуаров минимальной массы / Ю.В. Соболев, С.М. Купреишвили // *Строительная механика и расчет сооружений.* 1986. № 1. С. 17–19.
4. *Ращепкина С.А.* Металлические емкости из легких конструкций повышенной транспортабельности / С.А. Ращепкина. Саратов: РИЦ Саратов. гос. техн. ун-та, 2007. 288 с.