

Щербин Сергей Анатольевич,

к.т.н., доцент, Ангарский государственный технический университет,

e-mail: dekan_ftk@angtu.ru

Глотов Валерий Андреевич,

студент гр. ТМ-24-1, Ангарский государственный технический университет,

e-mail: valera.glotov.2002@mail.ru

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕРОВ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ

Shcherbin S.A., Glotov V.A.

THE METHOD OF OPTIMIZING THE SIZE OF VERTICAL STEEL CYLINDRICAL TANKS

Аннотация. Описана и применена методика оптимизации геометрических размеров вертикальных цилиндрических стальных резервуаров из условия минимальной материалоемкости.

Ключевые слова: вертикальный цилиндрический стальной резервуар, металлоемкость, оптимальные размеры.

Abstract. The article describes and applies a technique for optimizing the geometric dimensions of vertical cylindrical steel tanks based on the condition of minimum material consumption.

Keywords: vertical cylindrical steel tank, metal consumption, optimal dimensions.

Вертикальные цилиндрические резервуары работают под наливом жидкости и используются в нефтехимической промышленности для хранения нефти и нефтепродуктов. Конструкция резервуара зависит от свойств хранимой в нем среды, особенностей технологического процесса и характеристик строительной площадки.

При конструировании цилиндрических резервуаров необходимо учитывать ряд особенностей, касающихся их конструкции и технологии изготовления некоторых элементов.

По конструктивным особенностям можно выделить четыре типа резервуаров: резервуар вертикальный стальной со стационарной крышей без понтона (РВС); резервуар вертикальный стальной со стационарной крышей и понтоном (РВСП); резервуар вертикальный стальной с плавающей крышей (РВСПК); резервуар вертикальный стальной с защитной стенкой (РВСЗС) [1].

Крыша резервуара может быть стационарной, то есть опирающейся на стенку резервуара, и плавающей на поверхности жидкости. С целью уменьшения потерь хранимой среды за счет ее испарения в резервуарах со стационарной крышей используются понтоны. Необходимость установки понтонов определяется характеристиками хранимого вещества и технологическими особенностями эксплуатации резервуарного парка.

В аппаратах, заполненных жидкими средами, при увеличении высоты столба жидкости возрастает гидростатическое давление. Существенное повышение давления приводит к необходимости увеличения толщины цилиндриче-

ской стенки сосуда и, соответственно, к увеличению расхода материала. Поэтому, для уменьшения металлоемкости резервуаров большого объема их изготавливают из нескольких цилиндрических поясов с разной толщиной, изменяющейся по высоте сосуда от максимального значения в нижней части резервуара (в нижнем поясе) до минимального – в верхней части. Минимальные величины конструктивной толщины листов стенки резервуаров указаны в [1].

Конструктивные и технологические особенности имеют и днища резервуаров. Для производства днищ резервуаров применяется сталь толщиной не менее 4 мм. В резервуарах объемом до 1000 м³ включительно днище, как правило, выполняется плоской формы. Для емкостей объемом более 1000 м³ днище изготавливается с уклоном от центра или в центр. Уклон делается в отношении 1:100, наиболее часто выполняется коническое основание с уклоном от центра для предотвращения отложений донного осадка.

Днища резервуаров объемом более 1000 м³ должны иметь центральную часть и кольцевые окрайки. Минимальная конструктивная толщина окрайки днища резервуара принимается по данным [2], при этом выступ окраек за внешнюю поверхность стенки следует принимать 50-100 мм. Наличие в рулонном полотнище днища листов различной толщины не допускается. Номинальная толщина листов центральной части днища или днища без окраек за вычетом припуска на коррозию должна составлять 4 мм для резервуаров объемом менее 2000 м³ и 6 мм – для резервуаров объемом 2000 м³ и более.

Вертикальные цилиндрические резервуары отличаются большим внутренним объемом (до 120 тыс. м³), который, в свою очередь, зависит от производственной мощности и особенностей технологического процесса. При этом емкости одного и того же объема могут существенно отличаться размерами. При сооружении резервуара неизбежны крупные капитальные затраты на приобретение большого количества металла и монтаж конструкции. Поэтому большой практический интерес представляет оптимизация размеров резервуаров с целью снижения их металлоемкости. Такой подход может привести к существенной экономии конструкционных материалов и, соответственно, к уменьшению стоимости оборудования [3].

Определим оптимальные размеры (внутренний диаметр D и высоту H) вертикального цилиндрического резервуара с днищем и крышкой (крышей) из условия минимальной металлоемкости, или массы корпуса.

В соответствии с законом Паскаля, графическая иллюстрация которого приведена на расчетной схеме (рисунок 1), в аппаратах, заполненных жидкими средами, при увеличении высоты столба жидкости $H_{\text{ж}}$ возрастает гидростатическое давление $p_{\text{г}}$:

$$p_{\text{г}} = p_0 + \rho_{\text{ж}} g H_{\text{ж}}, \quad (1)$$

где p_0 – давление на свободной поверхности жидкости, Па; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

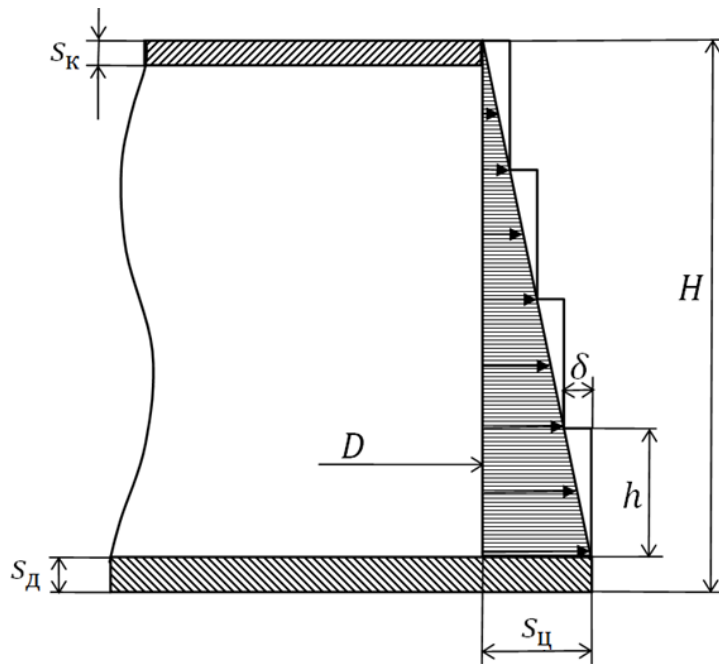


Рисунок 1 – Схема для расчета оптимальных размеров цилиндрического резервуара

Выразим массу сосуда:

$$m = \rho_m (V_{\text{мц}} + V_{\text{мд}} + V_{\text{мк}}) , \quad (2)$$

где ρ_m – плотность конструкционного материала, кг/м³; $V_{\text{мц}}$, $V_{\text{мд}}$ и $V_{\text{мк}}$ – соответственно объем конструкционного материала боковой поверхности цилиндрической части, дна и крышки, м³.

Чтобы учесть переменную по высоте сосуда толщину цилиндрической стенки (рисунок 1), представим объем материала $V_{\text{мц}}$ в виде двух составляющих – объема $V_{\text{мц1}}$, соответствующего заштрихованной части стенки треугольного сечения, и объема $V_{\text{мц2}}$, равного объему незаштрихованной части стенки:

$$V_{\text{мц}} = V_{\text{мц1}} + V_{\text{мц2}}. \quad (3)$$

Выразим $V_{\text{мц1}}$:

$$V_{\text{мц1}} = \pi D H s_{\text{ц}} / 2, \quad (4)$$

где D и H – соответственно внутренний диаметр и высота цилиндрической части сосуда, м; $s_{\text{ц}}$ – толщина цилиндрической стенки нижнего пояса, м.

Полный объем сосуда с плоским дном и крышкой:

$$V = \pi D^2 H / 4 , \quad (5)$$

тогда высота цилиндрической части резервуара:

$$H = 4V / (\pi D^2) , \quad (6)$$

и

$$V_{\text{мц1}} = 2V s_{\text{ц}} / D . \quad (7)$$

Расчетная толщина цилиндрической стенки нижнего пояса по упрощенному выражению:

$$s_{\text{ц}} = pD / (2[\sigma]\varphi) , \quad (8)$$

где $p = \rho_{\text{ж}} g H_{\text{ж}}$ – расчетное давление, Па; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение конструкционного материала при расчетной температуре, Па; φ – коэффициент прочности сварного шва.

Для резервуаров, работающих под наливом, можно принять $H_{\text{ж}} = H$. Тогда, учитывая (6) и (8), толщина цилиндрической стенки нижнего пояса с учетом изменяющегося по высоте p_r составит:

$$s_{\text{ц}} = 2\rho_{\text{ж}} g V / (\pi[\sigma]\varphi D) . \quad (9)$$

Для упрощения выражения (9) используем расчетный комплекс, учитывающий плотность жидкости и прочность конструкционного материала:

$$f_s = 2\rho_{\text{ж}} g / (\pi[\sigma]\varphi) , \quad (10)$$

тогда

$$s_{\text{ц}} = f_s V / D , \quad (11)$$

и

$$V_{\text{мц1}} = 2f_s V^2 / D^2 . \quad (12)$$

Выразим $V_{\text{мц2}}$:

$$V_{\text{мц2}} = \pi D h \delta n / 2 , \quad (13)$$

где h – высота горизонтальных цилиндрических поясов резервуара, м; $n = H/h$ – количество поясов, шт.; $\delta = s_{\text{ц}}/n$ – изменение толщины стенки поясов, м.

С учетом (11) запишем:

$$V_{\text{мц2}} = \pi h f_s V / 2 . \quad (14)$$

Тогда по (3), (12) и (14):

$$V_{\text{мц}} = 2f_s V^2 / D^2 + \pi h f_s V / 2 . \quad (15)$$

Выразим объем конструкционного материала плоского днища и крышки:

$$V_{\text{мд}} = \pi D^2 s_{\text{д}} / 4 ; \quad (16)$$

$$V_{\text{мк}} = \pi D^2 s_{\text{к}} / 4 , \quad (17)$$

где $s_{\text{д}}$ и $s_{\text{к}}$ – толщина стенок днища и крышки резервуара соответственно, м.

Подставив (15), (16) и (17) в (2), получим:

$$m = \rho_{\text{м}} [2f_s V^2 / D^2 + \pi h f_s V / 2 + (s_{\text{д}} + s_{\text{к}}) \pi D^2 / 4] . \quad (18)$$

Для определения оптимального диаметра, соответствующего минимальной материалоемкости корпуса резервуара, найдем производную полученной функции по диаметру:

$$dm/dD = (s_{\text{д}} + s_{\text{к}}) \pi D / 2 - 4f_s V^2 / D^3 . \quad (19)$$

Проверим выполнение условия минимума функции:

$$d^2 m / dD^2 > 0 ; \quad (20)$$

$$(s_{\text{д}} + s_{\text{к}}) \pi / 2 + 12f_s V^2 / D^4 > 0 - \text{условие выполняется.} \quad (21)$$

Приравняем первую производную к нулю и выразим оптимальный диаметр:

$$(s_{\text{д}} + s_{\text{к}}) \pi D / 2 - 4f_s V^2 / D^3 = 0 ; \quad (22)$$

$$D_{\text{опт}} = \{8f_s V^2 / [\pi(s_d + s_k)]\}^{0,25}. \quad (23)$$

Используя (6) и (23) выразим оптимальную высоту цилиндрической части резервуара:

$$H_{\text{опт}} = [2(s_d + s_k) / (\pi f_s)]^{0,5}. \quad (24)$$

Анализируя полученное выражение можно сделать вывод, что оптимальная высота цилиндрического резервуара не зависит от его объема.

По полученным выражениям были рассчитаны оптимальные размеры и масса вертикального цилиндрического резервуара с плоскими днищем и крышкой, предназначенного для хранения жидкости, поступающей с температурой до $t = 60$ °С, плотностью не более $\rho_{\text{ж}} = 820$ кг/м³. Объем хранимой жидкости $V = 50000$ м³, материал корпуса – листовой прокат из стали 09Г2С ($[\sigma] = 186,5$ МПа), коэффициент прочности сварных швов $\varphi = 1$. Величина расчетного комплекса по (10) $f_s = 27,44 \cdot 10^{-6}$ м⁻¹.

По результатам расчета оптимальные масса, диаметр и высота резервуара составили соответственно $m = 600$ т, $D_{\text{опт}} = 61,8$ м и $H_{\text{опт}} = 16,4$ м. Расчетная толщина цилиндрической стенки нижнего пояса резервуара по формуле $s_{\text{ц}} = 22,6$ мм. В соответствии с [1], минимальная конструктивная толщина листов стенки резервуаров диаметром от 40 м до 65 м составляет 10 мм.

Диаметр и высота резервуара также нормируются и принимаются по [1]. Полученные расчетные значения оптимального внутреннего диаметра и высоты цилиндрической части резервуара очень близки к размерам стандартного цилиндрического резервуара номинальным объемом 50000 м³, которые составляют соответственно $D = 60,7$ м и $H = 18$ м. Фактическая масса резервуара такой вместимости со стационарной выпуклой крышей может достигать 1000 т и более [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 31385-2016. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2016. – 91 с.
2. РД 16.01-60.30.00-КТН-026-1-04. Нормы проектирования стальных вертикальных резервуаров для хранения нефти объемом 1000-50000 м³.
3. **Shcherbin, S.A.** Industrial equipment sizes optimization / S.A. Shcherbin, A.A. Glotov // Journal of Physics: Conference Series. – Volume 1680 (2020) 012045.
4. **Щербин, С.А.** Оптимизация размеров сосудов и аппаратов / С.А. Щербин. – Ангарск: АНГТУ, 2021. – 55 с.