

Оптимизация размеров стального вертикального резервуара

И.З. Трифунович, Л.Ю. Рыбакова

Самарский государственный технический университет

Аннотация: Хранение легкоиспаряющихся и горючих жидкостей осуществляют, как правило, в вертикальных стальных резервуарах. В общем объеме хранения они составляют более 80%. Именно поэтому исследования в данном направлении имеют большое значение в промышленности. Крайне актуален вопрос снижения стоимости изготовления резервуаров и уменьшения материалозатрат при сооружении. На основе зависимостей оптимального диаметра, высоты и массы корпуса от объема сосуда, были произведены расчеты для существующего РВС-10.000.

Ключевые слова: вертикальный стальной резервуар, большое значение в промышленности, снижение стоимости изготовления, уменьшение материалозатрат, оптимизация размеров, метод оптимизации размеров, минимальная материалоемкость.

Введение. В настоящее время в нефтехимической промышленности используется большое количество резервуаров, различных по объему и размерам. Однако в их строительстве присутствуют определенные системотехнические проблемы, в их числе: организационные, экономические, управленческие, а главное – технические, ключевую роль в которых играет оптимальное проектирование конструкций [1-3]. В данной работе был рассмотрен метод оптимизации размеров резервуара из условия минимальной материалоемкости корпуса [4-6]. Мы выбрали для расчета резервуар вертикальный стальной объемом 10.000 м^3 (далее РВС-10.000), который активно используется для хранения продуктов промышленного производства [7, 8].

Исследование. Исходя из закона Паскаля, проиллюстрированного на рис.1, в сосудах, заполненных жидкими средами, при увеличении высоты столба жидкости $h_{ж}$ возрастает гидростатическое давление p_z .

$$p_z = p_0 + p_{ж} g h_{ж}$$

где p_0 – давление на свободной поверхности жидкости, Па; $p_{ж}$ – плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$.

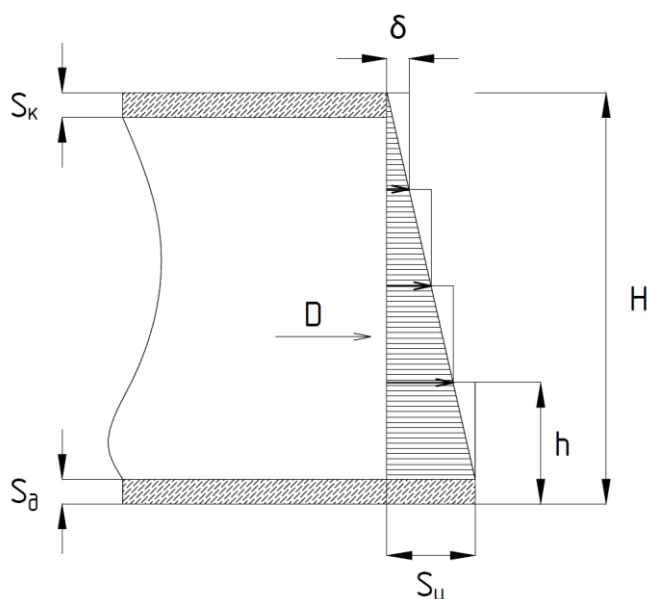


Рис. 1. – Расчетная схема

Из условия минимальной массы корпуса, определяются оптимальные диаметр и высота [9, 10]. Масса сосуда:

$$m = \rho_m (V_{мц} + V_{мд} + V_{мк})$$

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

Разложим объем материала $V_{мц}$ на две составляющие – объем $V_{мц1}$, который равен заштрихованной части стенки треугольного сечения, и объем $V_{мц2}$, соответствующий объему незаштрихованной части стенки, таким образом, учтем переменную по высоте резервуара толщину стенки:

$$V_{мц} = V_{мц1} + V_{мц2}$$

Зная полный объем резервуара и высоту цилиндрической части, получаем расчетную толщину цилиндрической стенки по упрощенному выражению.

Полный объем резервуара:

$$V = \pi D^2 H / 4$$

Высота цилиндрической части:

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

Расчётная толщина цилиндрической стенки:

$$S_{ц} = pD / (2[\sigma]\varphi)$$

где $p = p_{жс}gh_{жс}$ – расчетное давление для резервуара, работающего под наливом, Па; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение конструкционного материала при расчетной температуре, Па; φ – коэффициент прочности сварного шва.

Для резервуаров, работающих под наливом, можно принять $h_{жс} = H$. Учитывая изменяющееся гидростатическое давление, представим толщину цилиндрической нижней части резервуара следующим выражением:

$$S_{ц} = 2p_{жс}gV / (\pi[\sigma]\varphi D)$$

Чтобы упростить выражение, вводим расчетный комплекс, который учитывает плотность жидкости и прочность конструкционного материала и после всех преобразований получаем следующие значения объемов конструкционного материала.

Расчетный комплекс:

$$f_s = 2p_{жс}g / (\pi[\sigma]\varphi)$$

Полученные объемы конструкционного материала:

$$V_{мц} = V_{мц1} + V_{мц2} = 2f_s V^2 / D^2 + \pi h f_s V / 2$$

$$V_{мд} = \pi D^2 S_{д} / 4$$

$$V_{мк} = \pi D^2 S_{к} / 4$$

где $S_{д}$ и $S_{к}$ – толщина стенки соответственно днища и крышки резервуара, м.

Подставляя полученные выражения, получаем минимальную материалоемкость:

$$m = \rho_m (2f_s V^2 / D^2 + \pi h f_s V / 2 + (S_{д} + S_{к})\pi D^2 / 4)$$

В качестве исходных данных были выбраны, соответствующие существующему РВС диаметр: $D = 34200$ мм и высота стенки: $H = 12000$ мм.

Также высота столба жидкости: $h_{жс} = 11200$ мм, её плотность: $\rho_{жс} = 900$ кг/м³. Высота горизонтальных цилиндрических поясов: $h = 1500$ мм. Полный объем сосуда равен: $V = 10000$ м³. Материал РВС – низколегированная сталь марки 10ХСНД, у которой удельный вес равен: $\rho_m = 7850$ кг/м³, а допускаемое напряжение: $\sigma = 220$ МПа.

Величины S_δ , S_κ выбираются в соответствии с нормативной литературой (ГОСТ 31385-2016, РД 16.01-60.30.00-КТН-026-1-04). Толщину стенок днища и стенок крышки принимаем: $S_\delta, S_\kappa = 5$ мм.

Принимая давление на свободной поверхности жидкости близким к атмосферному, получаем значение гидростатического давления:

$$p_z = p_0 + \rho_{жс} g h_{жс} = 101325 + 900 \cdot 9,81 \cdot 11,2 = 2,002 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

В свою очередь принятый расчетный комплекс:

$$f_s = 2 p_{жс} g / (\pi [\sigma] \varphi) = 2 \cdot 900 \cdot 9,81 / (3,14 \cdot 220 \cdot 10^6 \cdot 0,95) = 2,691 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$$

Выражая массу через диаметр получаем:

$$\begin{aligned} m &= \rho_m (2 f_s V^2 / D^2 + \pi h f_s V / 2 + (S_\delta + S_\kappa) \pi D^2 / 4) = \\ &= 7850 (2 \cdot 2,691 \cdot 10^{-5} \cdot 10000^2 / 34,2^2 + 3,14 \cdot 1,5 \cdot 2,691 \cdot 10^{-5} / 2 + \\ &+ (0,005 + 0,005) \cdot 3,14 \cdot 34,2^2 / 4) = 1,132 \cdot 10^5 \text{ кг} \end{aligned}$$

Чтобы определить оптимальный диаметр, который соответствует минимальной материалоемкости корпуса резервуара, найдем производную полученной функции по диаметру и проверим условие:

$$dm / dD_m = (S_\delta + S_\kappa) \pi D_m / 2 - 4 f_s V^2 / D_m^3$$

$$d^2 m / dD_m^2 > 0$$

$$(S_\delta + S_\kappa) \pi / 2 + 12 f_s V^2 / D_m^4 > 0$$

Условие выполняется.

Приравнивая к нулю, выражаем оптимальный диаметр:

$$\begin{aligned} D_m &= [8 f_s V^2 / ((S_\delta + S_\kappa) \pi)]^{0,25} = [8 \cdot 2,691 \cdot 10^{-5} \cdot 10000^2 / ((0,005 + 0,005) \cdot 3,14)]^{0,25} = \\ &= 28,774 \text{ м} \end{aligned}$$

Используя данное выражение, определяем оптимальную высоту цилиндрической части резервуара:

$$H_m = [2(S_\delta + S_\kappa) / (f_s \pi)]^{0.5} = [2(0,005 + 0,005) / (2,691 \cdot 10^{-5} \cdot 3,14)]^{0.5} = 15,386 \text{ м}$$

Принимая диаметр равным: $D_{onm} = 28,8$ м. Высоту стенки: $H_{onm} = 28,8$ м. Количество поясов равное: $n = 8$, высотой: $h_{onm} = 2$ м, получу объем конструкционного материала боковой поверхности цилиндрической части:

$$V_{ми} = 2f_s V^2 / D_{onm}^2 + \pi h_{onm} f_s V / 2 = 2 \cdot 2,691 \cdot 10^{-5} \cdot 10000^2 / 28,8^2 + 3,14 \cdot 2 \cdot 2,691 \cdot 10^{-5} \cdot 10000 / 2 = 7,333 \text{ м}^3$$

Тогда толщина цилиндрической стенки нижнего пояса равна, округляя до целых: $S_y = 10$ мм, а ее изменение по высоте возможно до 1,168 мм:

$$S_y = f_s V / D_{onm} = 2,691 \cdot 10^{-5} \cdot 10000 / 28,8 = 9,343 \text{ мм}$$

$$\delta = S_y / n = 9,343 / 8 = 1,168 \text{ мм}$$

Для данного вида воздействия статической нагрузки, рассмотренного в работе, произошло уменьшение материалозатрат на цилиндрическую стенку, крышку и днище приблизительно в два раза: 113,2 тонны < 207,528 тонн проектных.

Литература

1. Касьянов В.Е., Котесов А.А., Котесова А.А. Аналитическое определение параметров закона Вейбулла для генеральной совокупности конечного объема по выборочным данным прочности стали // Инженерный вестник Дона, 2012, №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/804

2. Василькин А.А., Рахмонов Э.Х. Системотехника оптимального проектирования элементов строительных конструкций // Инженерный вестник Дона, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2203

3. Mosesov M., Rybakova L., Adykova E. Problems of tank roofs resistance to corrosive attacks // Matec web of conferences, 2018. URL: elibrary.ru/item.asp?id=35728289

4. Москалев Н.С., Пронозин Я.А. Металлические конструкции. М.: АСВ, 2007. 344 с.

5. Шухов В.Г. Строительная механика. Избранные труды. М.: Наука, 1977. С. 30-43.

6. Металлические конструкции. Стальные конструкции зданий и сооружений: справочник проектировщика в 3-х т. / Под общ. ред. Кузнецова В. В. М.: Изд-во АСВ, 1998. Т.2. 512 с.

7. Sap2000® integrated finite element analysis and design of structures// Steel design manual. Computers and Structures, Inc. Berkeley, California, USA. Revision May 2000. 161 pp.

8. Analysis, design and realization of space frames: a state-of-the-art report. // Bulletin of the International Association of Shell and Spacial Structures, Special Issue, 1984, 15, pp.84-85.

9. Щербин С.А., Внуков Б.Г., Гордеев К.И. Оптимизация размеров сосудов из условия минимальной материалоемкости корпуса // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. Ангарск: АнГТУ, 2018. №14. С. 64-67.

10. Щербин С.А., Горбач П.С. Оптимальные размеры сосудов, работающих под наливом жидкости // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. Ангарск: АнГТУ, 2019. №16. С. 153-156.

References

1. Kas'yanov V.E., Kotesov A.A., Kotesova A.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/804

2. Vasil'kin A.A., Rakhmonov E.Kh. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2203



3. Mosesov M., Rybakova L., Adykova E. Matec web of conferences, 2018.
URL: elibrary.ru/item.asp?id=35728289
4. Moskalev N.S., Pronozin Ya.A. Metallicheskie konstruktsii. [Metal structures]. Moskva, 2007. 344 p.
5. Shukhov V. G. Inzhener. Zhurnal Ministerstva putey soobshcheniya. 1883. v. III. b. 13, 14. rel. 1.
6. Metallicheskie konstruktsii. Stal'nye konstruktsii zdaniy i sooruzheniy: spravochnik proektirovshchika v 3-kh t. [Metal structures. Steel structures of buildings and erections: civil designer reference]. Pod obshch. red. Kuznetsova V. V. Moskva, 1998. v.2. 512 p.
7. Sap2000® integrated finite element analysis and design of structures. Steel design manual. Computers and Structures, Inc. Berkeley, California, USA. Revision May, 2000. 161 pp.
8. Analysis, design and realization of space frames: a state-of-the-art report. Bulletin of the International Association of Shell and Spacial Structures, Special Issue, 1984, 15, pp.84-85.
9. Shcherbin S.A., Vnukov B.G., Gordeev K.I. Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Angarsk: AnGTU 2018. №14. pp. 64-67.
10. Shcherbin S.A., Gorbach P.S. Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Angarsk: AnGTU, 2019. №16. pp. 153-156.