

Портнова София Эдуардовна, студент,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II
Portnova Sofia Eduardovna, student,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ DETERMINATION OF GEOMETRIC PARAMETERS OF VERTICAL STEEL TANKS

Аннотация. Рассмотрена методика определения номинальной толщины стенки поясов вертикального стального резервуара РВС-20000 по ГОСТ 31385-2023. Выполнены расчёт толщин поясов при эксплуатации и гидравлических испытаниях, проверка стенки на прочность при гидростатическом давлении с учётом хрупкого разрушения и оценка остаточного ресурса стенки при малоцикловом нагружении с учётом коррозии. Определены остаточный ресурс в числе циклов и остаточный срок службы резервуара.

Abstract. A procedure for determining the nominal wall thickness of the courses of a vertical steel tank RVS-20000 according to GOST 31385-2023 is considered. The course thicknesses under operation and hydraulic testing were calculated, the wall strength under hydrostatic pressure with account for brittle fracture was checked, and the residual life of the wall under low-cycle loading with account for corrosion was assessed. The residual life in number of cycles and the residual service life of the tank were determined.

Ключевые слова: Вертикальный стальной резервуар, толщина стенки, пояс, гидростатическое давление, кольцевые напряжения, остаточный ресурс.

Keywords: Vertical steel tank, wall thickness, course, hydrostatic pressure, hoop stresses, residual life.

Вертикальные стальные резервуары (РВС) – основной тип оборудования для хранения нефти и нефтепродуктов на нефтебазах. В процессе эксплуатации стенка резервуара испытывает напряжения растяжения и сжатия, обусловленные гидростатическим давлением продукта, весом крыши, температурными деформациями, операциями «вдоха» и «выдоха», ветровыми и сейсмическими воздействиями. В стенке возникают напряжения двух видов: кольцевые, действующие в сосуде под давлением, и меридиональные – в срединной поверхности каждого пояса. При превышении допустимых напряжений или накоплении усталостных повреждений возможны деформация стенки и образование трещин, поэтому назначение толщин поясов, проверка прочности и оценка ресурса являются обязательными элементами проектирования и диагностики резервуаров [1, 6].

Расчёт толщины стенки по пункту 6.1.4 ГОСТ 31385-2023 сводится к определению минимальных толщин при эксплуатации и гидравлических испытаниях, учёту минусового допуска на прокат, вычислению номинальной толщины листа, проверке прочности и устойчивости и назначению толщины для каждого пояса. Расчёт выполнен для резервуара РВС-20000 из стали СтЗсп, предназначенного для хранения дизельного топлива плотностью $0,86 \text{ т/м}^3$ при температуре $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Диаметр резервуара составляет 39,9 м, коэффициент заполнения – 90 %, ширина пояса – 2 м.

Расчётную толщину i -го пояса при эксплуатации и при гидравлических испытаниях определяют, соответственно, по формулам



$$t_{di} = [0,001 \cdot \rho_d \cdot g \cdot (H_d - z_i) + 1,2 \cdot p] \cdot \frac{r}{R} \quad (1)$$

$$t_{gi} = [0,001 \cdot \rho_g \cdot g \cdot (H_g - z_i) + 1,25 \cdot p] \cdot \frac{r}{R} \quad (2)$$

где ρ_d, ρ_g – плотности продукта и воды; H_d, H_g – уровни налива; z_i – расстояние от днища до нижней кромки пояса; r – радиус; p – избыточное давление под крышей. Расчётный параметр R учитывает нормативное сопротивление стали и коэффициенты условий работы, надёжности по материалу и по ответственности:

$$R = \frac{R_{yn} \cdot \gamma_c \cdot \gamma_t}{\gamma_m \cdot \gamma_n} \quad (3)$$

Для стали ($R_{yn} = 255$ МПа) при $\gamma_t = 1$, $\gamma_m = 1,05$, $\gamma_n = 1,1$ и $\gamma_c = 0,7$ (первый пояс) расчётный параметр составил $R = 154,55$ МПа в условиях эксплуатации и $R = 198,70$ МПа при гидравлических испытаниях. Избыточное давление под крышей вычислено как $p = m_k \cdot g / S_k = 0,000831$ МПа. Высота налива продукта $H = V_{pvc} \cdot k_3 / (100 \% \cdot \pi \cdot r^2) = 14,4$ м, число поясов $n = H/b = 8$, высота пояса $h = 1,8$ м.

Для каждого пояса из значений t_d и t_g с учётом минусового допуска на прокат Δt_m и минимальной конструктивной толщины назначается номинальная толщина по сортаменту ГОСТ 19903-2015. Так, для первого пояса $t_d = 15,79$ мм, $t_g = 14,27$ мм, расчётная толщина 16,59 мм, принятая – 17 мм. Результаты по всем поясам сведены в таблице 1; для поясов со 2-го по 8-й определяющим оказалось значение при гидравлических испытаниях, а для поясов с 5-го по 8-й принята минимальная конструктивная толщина 8 мм [1, 4].

Таблица 1

Значения толщины стенки для поясов резервуара

Пояс	t_d , мм	t_g , мм	Δt_m , мм	Расчётная t , мм	Принятая t , мм
1	15,79	14,27	0,80	16,59	17,00
2	12,10	12,50	0,80	13,30	13,50
3	10,39	10,73	0,80	11,53	12,00
4	8,68	8,96	0,80	9,76	10,00
5	6,96	7,19	0,60	7,79	8,00
6	5,25	5,42	0,50	5,92	8,00
7	3,54	3,65	0,50	4,15	8,00
8	1,83	1,87	0,50	2,37	8,00

Далее выполнена проверка стенки на прочность при гидростатическом давлении с учётом возможного хрупкого разрушения. Условие прочности требует, чтобы кольцевые растягивающие напряжения не превышали допускаемых:

$$\sigma = \frac{[n_1 \cdot g \cdot \rho \cdot (H - x) + n_2 \cdot p_u] \cdot r}{\delta} \leq [\sigma] \quad (4)$$

где $n_1 = 1,1$ и $n_2 = 1,2$ – коэффициенты надёжности по нагрузке; x – расстояние от сопряжения стенки с днищем до расчётной точки; p_u – избыточное давление в газовом пространстве; δ – фактическая толщина стенки. Допускаемое напряжение с учётом хрупкого разрушения $[\sigma] = m \cdot \beta \cdot \sigma_v / \gamma_u$, где $\beta = 0,85$, $\gamma_u = 1,3$. Для первого пояса при $\delta = 17$ мм кольцевые напряжения $\sigma = 156,23$ МПа не превышают $[\sigma] = 164,77$ МПа, то есть условие выполняется. Результаты проверки по всем поясам приведены в таблице 2; для всех поясов условие прочности соблюдается.



Таблица 2

Результаты проверки прочности стенки по поясам

Номер пояса	Толщина δ , мм	σ , МПа	$[\sigma]$, МПа
1	17	156,23	164,77
2	15	154,85	164,77
3	14	142,13	188,31
4	13	127,46	188,31
5	12	110,34	188,31
6	11	90,10	188,31
7	10	65,82	188,31
8	9	36,15	188,31

Наряду с прочностью для стенки резервуара выполняется проверка на устойчивость, поскольку в верхних поясах помимо растяжения возникают сжимающие меридиональные напряжения от веса крыши, снеговой и ветровой нагрузок, а также разрежения при «выдохе». Потеря устойчивости проявляется в образовании местных вмятин и гофр стенки; для её предотвращения назначают минимальную конструктивную толщину листов в зависимости от диаметра резервуара и при необходимости устанавливают кольца жёсткости. В рассмотренном резервуаре условие устойчивости обеспечивается принятыми толщинами поясов и минимальной конструктивной толщиной 8 мм для верхних поясов, где расчётные толщины оказались меньше допустимых [1, 5].

Помимо статической прочности, для резервуаров нормируется остаточный ресурс – остаточный срок службы до момента, когда резервуар потребует ремонта или замены. Он определяется физическим износом, коррозией и механическими повреждениями; наиболее опасно малоцикловое нагружение, возникающее при значительных изменениях напряжений «наполнение – слив» при небольшом числе повторений. Оценка выполнена для резервуара объёмом 5000 м³ (сталь Ст3, остаточная толщина 8 мм) по методике РД 153-112-017-97.

Величина напряжений в расчётной точке составила $\sigma_n = \rho \cdot g \cdot (H_{\max} - x) \cdot r / \delta = 143,06$ МПа, коэффициент концентрации $K_\sigma = \sigma_t / \sigma_n = 1,71$, амплитуда напряжений $\sigma_a = 0,5 \cdot K_\sigma \cdot \sigma_n = 122,5$ МПа. Число циклов до образования макротрещины принимается как минимальное из двух условий и составило $N_0 = 12217$ циклов. С учётом коэффициента влияния коррозионной среды $\beta_{kc} = \lambda \cdot \lg N_0 = 0,41$ ($\lambda = 0,1$) остаточный ресурс равен

$$N_{oc} = N_0 \cdot (1 - \beta_{kc}) = 12217 \cdot (1 - 0,41) = 7224 \text{ цикла} \quad (5)$$

а при годовой оборачиваемости $n_0 = 300$ циклов в год остаточный срок службы стенки $T = N_{oc} / n_0 \approx 24$ года [6].

Таким образом, по методике ГОСТ 31385-2023 определена номинальная толщина стенки по всем восьми поясам резервуара РВС-20000, подтверждено выполнение условия прочности при гидростатическом давлении с учётом хрупкого разрушения и оценён остаточный ресурс стенки – 7224 цикла, что соответствует примерно 24 годам эксплуатации. Полученные результаты и приведённая последовательность расчёта могут использоваться при проектировании новых и диагностике эксплуатируемых вертикальных стальных резервуаров.

Список литературы:

1. ГОСТ 31385-2023. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. – Москва: Стандартинформ, 2023.



2. ГОСТ 27772-2021. Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия. – Москва: Стандартинформ, 2021.
3. ГОСТ 27751-2014. Надёжность строительных конструкций и оснований. Основные положения. – Москва: Стандартинформ, 2015.
4. ГОСТ 19903-2015. Прокат листовой горячекатаный. Сортамент. – Москва: Стандартинформ, 2016.
5. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. – Москва: Минстрой России, 2017.
6. РД 153-112-017-97. Инструкция по диагностике и оценке остаточного ресурса вертикальных стальных резервуаров.
7. Коршак А. А. Нефтебазы и АЗС: учебное пособие / А. А. Коршак, Г. Е. Коробков, Е. М. Муфтахов. – Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2006. – 416 с.
8. Землеруб Л. Е. Проектирование и эксплуатация резервуаров для нефти и нефтепродуктов / Л. Е. Землеруб. – Москва: Недра, 2019. – 264 с.

