

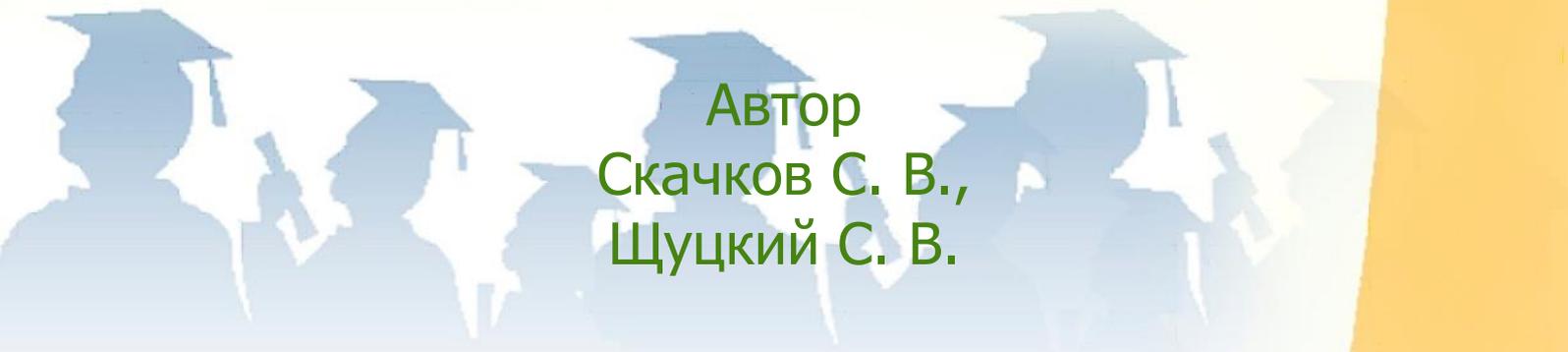


ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Металлические, деревянные и пластмассовые
конструкции»

Методические указания
по выполнению курсовой работы
по дисциплине
«Спецкурс»

**«Расчет вертикальных
цилиндрических резервуаров»**



Автор
Скачков С. В.,
Щуцкий С. В.

Ростов-на-Дону, 2018

Аннотация

Расчет вертикальных цилиндрических резервуаров: методические указания по выполнению курсовой работы по дисциплине «Спецкурс».

Представлены методы проектирования и расчета вертикальных цилиндрических резервуаров. Дан пример расчета и конструирования резервуара вместимостью 5000 м³ для хранения жидкости с низкой упругостью паров. Предназначены для студентов дневного и заочного отделений направления подготовки 08.03.01 «Строительство».

Автор

доцент, к.т.н., доцент кафедры «МДиПК» Скачков С.В.,
доцент, к.т.н., доцент кафедры «МДиПК» Щуцкий С.В.





Оглавление

Наземные вертикальные цилиндрические резервуары	4
Литература	21

НАЗЕМНЫЕ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ РЕЗЕРВУАРЫ

Наземные вертикальные цилиндрические резервуары проектируют, как правило, с плоским днищем, располагаемым на песчаной насыпной подушке. Типовые резервуары разработаны для нефтепродуктов объёмом 100-5000 м³. Имеются проекты резервуаров вместимостью на 10000, 20000 и до 100000 м³. Основными расчётными конструктивными элементами наземного резервуара являются стенка (корпус) и покрытие. Днище испытывает только сжатие от давления жидкости и назначается обычно по конструктивным соображениям из листов толщиной не менее 4 мм. Однако в стыке днища со стенкой требуется проверка местных напряжений, возникающих при действии опорных моментов.

Толщину стенки резервуара определяют по расчёту на прочность и назначают не менее 4 мм. По высоте резервуара листы стенки можно располагать встык (при толщине 6 мм и более), телескопически или ступенчато (рис. 1). Листы соединяют соответственно сплошными стыковыми или угловыми швами. Кромки листов, соединяемых встык, строгают на 5 мм и более с каждой стороны. Монтажные соединения полотнищ днища и корпуса осуществляют внахлёстку. В типовых резервуарах вместимостью до 5000 м³ все листы стенки и днища приняты размером 1500x6000 мм независимо от их толщины. При вместимости 10000-100000 м³ высоту резервуара назначают 14-22 м, а размер листов – до 2200x8000 мм. Для экономии металла нижние пояса таких резервуаров целесообразно проектировать из низколегированной стали повышенной прочности.

Покрытие резервуаров выполняют коническим, висячим (в опытном порядке), сферическим и сфероцилиндрическим (рис. 2). При выборе типа покрытия учитывают назначение и условия эксплуатации резервуара. Если преобладают нагрузки, действующие сверху вниз (масса покрытия и теплоизоляции, снег, вакуум, аппаратура и оборудование на покрытии), то применяют коническое или сферическое покрытие; если преобладают нагрузки, действующие снизу вверх (внутренне избыточное давление паровоздушной смеси), то применяют, как правило, сфероцилиндрическое покрытие. В типовых резервуарах разработано сборное покрытие из крупногабаритных металлических щитов заводского изготовления. Щиты состоят из тонких листов толщиной 2,5-3 мм, уложенных на каркас, выполняемый из двутавров, швеллеров и уголков.

Оборудование резервуара, включающее в себя арматуру и приспособления для заполнения и выпуска жидкости, предохранительные клапаны, лестницы, лазы, световые и замерные люки и т.д., располагают в соответствующих местах на корпусе и крыше резервуара. Центральную стойку (трубчатую или решётчатую) предусматривают в висячих покрытиях и из сборных щитов; в коническом покрытии по фермам или балкам стойка является монтажным элементом.

В резервуарах специальных типов вместимостью 10000-100000 м³ для хранения легкоиспаряющихся жидкостей (бутана, сырой нефти и др.) применяют плавающие крыши или понтоны и стационарные покрытия, позволяющие значительно сократить потери жидкостей при испарении.

Расчет вертикальных цилиндрических резервуаров

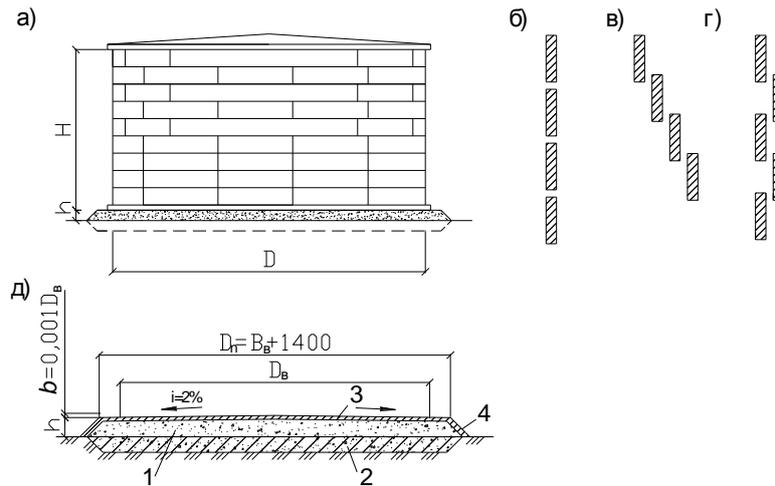


Рис. 1. Наземный цилиндрический резервуар:

а – общий вид; б-г – типы соединений поясов по высоте стенки соответственно: встык, телескопическое и ступенчатое; д – сечение основания, где D_n – диаметр подушки, D_b – диаметр днища резервуара; в – высота конуса; 1 – песчаная подушка; 2 – насыпной уплотненный грунт; 3 – изоляционный слой (грунт пропитанный битумом); 4 – отмостка гравийная, бутовая или бутобетонная

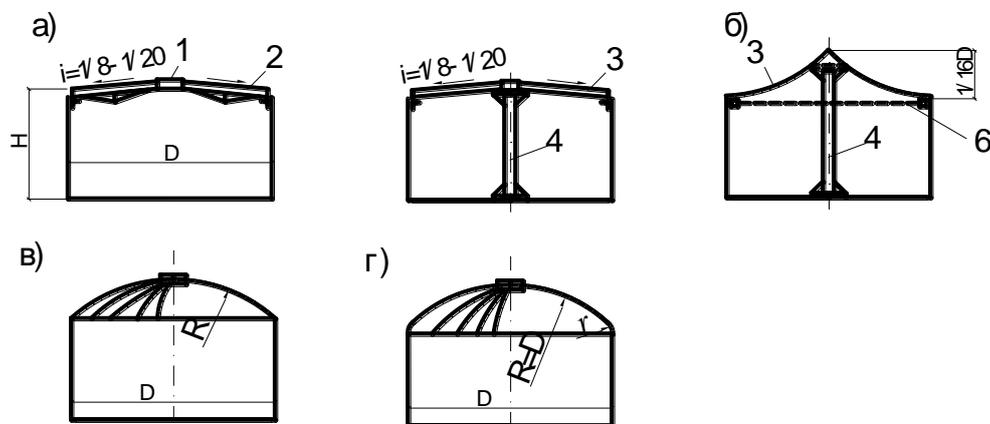


Рис. 2. Типы покрытий вертикальных цилиндрических резервуаров:

а – коническое б – висячее; в – сферическое; г – сфероцилиндрическое; 1 – опорное кольцо; 2 – балка; 3 – щиты покрытия; 4 – центральная стойка; 5 – листовая кровля толщиной 2,5 мм; 6 – коробчатое кольцо жесткости

Пример

Задание: Рассчитать и сконструировать стенку, днище и покрытие вертикального цилиндрического резервуара вместимостью 5000 м^3 для хранения жидкости с низкой упругостью паров. Плотность жидкости $\rho = 0,0009 \text{ кг/см}^3$. Место строительства – II район по снеговому покрову, расчетная нагрузка – 1.2 кН/м^2 . Материал резервуара – сталь марки ВСтЗпс6 ГОСТ 380-71*, $R_y = 225 \text{ МПа}$; сварка листов – электродами марки

Э42. Избыточное давление паров испаряющейся жидкости, направленное наружу, принять $p_0 = 2$ кПа, а вакуум (нагрузку внутрь резервуара) – 250 Па. Коэффициент надёжности по назначению $\gamma_n = 1$.

Решение

Назначение размеров резервуара. Наиболее выгодное соотношение между высотой резервуара H и диаметром D (по данным академика В. Г. Шухова) при заданном объёме устанавливается следующими двумя правилами: 1) резервуар с переменной толщиной стенки имеет минимальный вес, если объём стали в днище и покрытии равен стали в стенке; 2) резервуар с постоянной толщиной стенки имеет наименьший вес при условии, что объём стали в днище и покрытии в 2 раза меньше объёма стали в стенке. Исходя из этих правил, оптимальную форму резервуаров назначают при следующих соотношениях H/D : для объёма 100-600 м³ принимают $H/D = 1/1...1/4$; для объёма до 10000 м³ – $H/D = 1/2...1/5$. При этом высота резервуара должна быть кратна ширине листов (1400 или 1500). Наибольшая оптимальная высота больших резервуаров (до 10000 м³) составляет около 12 м, восемь поясов по 1500 мм.

Принимаем: номинальные размеры $H = 12$ м и $D = 23$ м, отношение $H/D \approx 1/2$; в типовом резервуаре объёмом 5000 м³ конструктивные размеры по высоте $H = 11845$ мм, внутренний диаметр $D_0 = 22\,790$ и наружный диаметр $D = 22\,810$ мм (укладывается по длине окружности 12 листов длиной по 6 м).

Крышу резервуара проектируем в виде щитов, состоящих из листов толщиной $t = 2,5$ мм, уложенных на каркас из двутавров, швеллеров и уголков. Щиты опираются на центральную трубчатую стойку и корпус резервуара.

Днище, расположенное на песчаном основании, испытывает только сжатие от давления жидкости, поэтому толщину его листов назначаем по конструктивным соображениям: при $D < 18$ м принимают $t = 4$ мм, при $D = 18...25$ м $t = 5$ мм и при $D > 25$ м $t = 6$ мм. В данном примере при $D = 22,81$ м назначаем днище из листов $t = 5$ мм; диаметр днища $D_b = D + 90 = 22810 + 90 = 22\,900$ мм (выступ днища за пределы стенки принимают не более 50 мм).

Расчет стенки резервуара. Принимаем высоту уровня залива резервуара $H_0 = 11,5$ м, а с учетом избыточного давления $p_0 = 2$ кПа условная высота $H = H_0 + p_0/\rho = 11,5 + 2(100)/0,0009 \cdot 10^6 = 11,7$ м. Расчетная схема стенки корпуса резервуара показана на рис. 3. По высоте резервуара стенка состоит из восьми поясов высотой по 1500 мм. Расчетное сечение каждого пояса расположено на 300 мм выше его нижней кромки, т.е. в сечении, где не учитывается влияние кольцевых швов смежного пояса.

Пояс стенки резервуара из условия обеспечения прочности (по первой группе предельных состояний) рассчитываем по формуле:

$$\sigma = [(\gamma_{f1}\rho x + \gamma_{f2}p_0)r]/t \leq \gamma_c R_{wy} \quad (1)$$

или

$$t \geq [(\gamma_{f1}\rho x + \gamma_{f2}p_0)r]/\gamma_c R_{wy}, \quad (2)$$

Расчет вертикальных цилиндрических резервуаров

где γ_{f1} – коэффициент надежности по нагрузке для гидростатического давления, равный 1,1;

γ_{f2} – то же, для внутреннего избыточного давления, $\gamma_{f2} = 1,15$;

γ_c – коэффициент условий работы, равный для стенки резервуара 0,8;

R_{wy} – расчетное сопротивление сварного шва встык растяжению; для конструкций из стали марки ВСтЗпс6 при автоматической или полуавтоматической и ручной сварке с физическим контролем качества шва $R_{wy} = R_y = 225$ МПа, а без физического контроля $R_{wy} = 0,85 \cdot 225 = 191$ МПа;

ρ – плотность нефтепродуктов, принимаемая обычно $0,0009$ кг/см³ ($0,0009 \cdot 10^6$ кг/м³).

Расчет поясов стенки по формуле (2) сведен в табл. 1. Для первого пояса (нижнего) расчет толщины листов для полосы длиной 1 см выполнен следующим образом:

При $R_{wy} = 225$ МПа

$$t = [(\gamma_{f1} \rho x + \gamma_{f2} p_0) r] / \gamma_c R_{wy} = [1,1 \cdot 0,0009(10)^* 1120 + 1,150,002(100)^*] 1140 / 0,8225(100)^* = (11 + 0,23) 1140 / 0,822500 = 0,72 \text{ см}$$

(здесь числа $(10)^*$ и $(100)^*$ введены для приведения размерностей в систему СИ; $r = D_0 / 2 = 22790 / 2 \approx 11400$ мм = 1140 см);

при $R_{wy} = 191$ МПа толщина листов пояса будет $t = 8,5 \approx 9$ мм.

Аналогично выполнен расчет для других поясов. Принятые в табл. 1 толщины поясов для конструирования резервуара соответствуют $R_{wy} = 191$ МПа, т.е. для случая полуавтоматической сварки. Для поясов 5-8 назначена толщина листов $t = 5$ мм по конструктивным соображениям.

Расчет вертикальных цилиндрических резервуаров

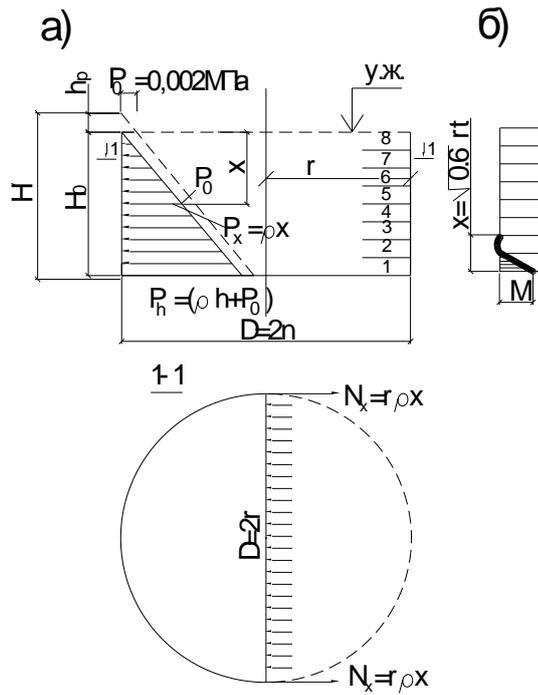
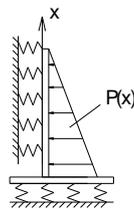


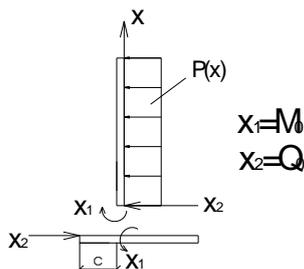
Рис.3. Расчетные эпюры давлений на стенку резервуара:
 а – эпюра давления жидкости; б – эпюра момента в месте стыка дна со стенкой

Расчет соединения стенки с дном.

Расчетная схема соединения стенки с дном



Основная система



Расчет вертикальных цилиндрических резервуаров

В развернутом виде каноническое уравнение имеет вид:

$$\begin{cases} (\delta_{11}^{CT} + \delta_{11}^{DH})x_1 + \delta_{12}^{CT}x_2 + \Delta_{1p}^{CT} + \Delta_{1p}^{DH} = 0 \\ \delta_{21}^{CT}x_1 + \delta_{22}^{CT}x_2 + \Delta_{2p}^{CT} = 0 \end{cases}$$

Определяем единичные перемещения и грузовые члены стенки:

$$\delta_{11}^{CT} = \frac{1}{m_{CT}D_{CT}} = \frac{1}{0,038 \cdot 192308} = 1,368 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{кгс}}$$

Коэффициент деформации стенки:

$$m_{CT} = \sqrt[4]{k_{CT}/4D_{CT}} = \sqrt[4]{1,616/4 \cdot 192308} = 0,038 \frac{1}{\text{см}}$$

Коэффициент постели стенки:

$$k_{CT} = Et_{CT}^3/r^2 = 2,1 \cdot 10^6 \cdot 1^3/1140^2 = 1,616 \text{ кгс/см}^3$$

Цилиндрическая жесткость стенки:

$$D_{CT} = Et_{CT}^3/12(1 - \mu^2) = 2,1 \cdot 10^6 \cdot 1^3/12(1 - 0,3^2) = 192308 \text{ кгс} \cdot \text{см}$$

$$\delta_{12}^{CT} = \delta_{21}^{CT} = \frac{1}{2m_{CT}^2D_{CT}} = \frac{1}{2 \cdot 0,038^2 \cdot 192308} = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ см/кгс.}$$

$$\delta_{22}^{CT} = \frac{1}{2m_{CT}^3D_{CT}} = \frac{1}{2 \cdot 0,038^3 \cdot 192308} = 0,0474 \text{ см}^2/\text{кгс.}$$

$$\Delta_{1p}^{CT} = \rho/k_{CT} = 9 \cdot 10^{-4}/1,616 = 5,57 \cdot 10^{-4}$$

$$\Delta_{1p}^{CT} = \frac{\rho}{k_{CT}} \cdot h_{CT} = \frac{9 \cdot 10^{-4}}{1,616} \cdot 1170 = 0,652 \text{ см.}$$

Определяем единичные перемещения и грузовые члены днища:

Цилиндрическая жесткость днища:

$$D_{DH} = Et_{DH}^3/12(1 - \mu^2) = 2,1 \cdot 10^6 \cdot 0,8^3/12(1 - 0,3^2) = 9,846 \cdot 10^4 \text{ кгс} \cdot \text{см}$$

здесь t_{DH} – толщина окрайки на 3 мм больше толщины днища принятой 5 мм.

Коэффициент постели днища на песке $k_{DH}=5\text{кгс/см}^3$.

Коэффициент деформации днища:

$$m_{DH} = \sqrt[4]{k_{DH}/4D_{DH}} = \sqrt[4]{5/4 \cdot 9,864 \cdot 10^4} = 0,06 \frac{1}{\text{см}}$$

Находим значение функций θ , φ , ξ и ψ при аргументе $m_{DH} \cdot c = 0,06 \cdot 5 = 0,3$, где $c=5\text{см}$ – выступ днища за стенку резервуара.

$$\theta_{mc} = e^{-mc} \cos mc = e^{-0,3} \cdot \cos 0,3 = 0,7077;$$

Расчет вертикальных цилиндрических резервуаров

$$\begin{aligned}\xi_{mc} &= e^{-mc} \sin mc = e^{-0,3} \cdot \sin 0,3 = 0,2189; \\ \psi_{mc} &= \theta_{mc} - \xi_{mc} = 0,7077 - 0,2189 = 0,4888; \\ \varphi_{mc} &= \theta_{mc} + \xi_{mc} = 0,7077 + 0,2189 = 0,9266;\end{aligned}$$

Равномерно распределенная погонная нагрузка, приходящаяся на 1см периметра корпуса от собственного веса покрытия и корпуса:

$$q_1 = \frac{(G_{кр} + G_{сн})}{\pi D} = \frac{(14821 + 45130)}{3,14 \cdot 2280} = 8,37 \text{ кг/см},$$

здесь

$$\begin{aligned}G_{кр} &= \pi D^2 / 4 (G_{нас} + G_{бал}) = 3,14 \cdot 22,8^2 / 4 \cdot (20,6 + 15,7) = 1482 \text{ кг.} \\ G_{сн} &= \gamma_f \cdot \pi \cdot D \cdot H \cdot \rho \cdot t = 1,05 \cdot 3,14 \cdot 22,8 \cdot 12 \cdot 7850 \cdot 0,00637 = 45130 \text{ кг.}\end{aligned}$$

Равномерно распределенное гидростатическое давление:

$$q_0 = \rho H = 0,0009 \cdot 1170 = 1,053 \text{ кг/см}^2$$

Перемещения днища будут равны:

$$\begin{aligned}\delta_{11}^{дн} &= \frac{1}{m_{дн} \cdot D_{дн}} \cdot \frac{1 + \varphi_{mc}^2 + 2\theta_{mc}^2}{4} = \\ &= \frac{1}{0,06 \cdot 9,846 \cdot 10^4} \cdot \frac{1 + 0,9266^2 + 2 \cdot 0,7077^2}{4} = 1,21 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{кгс}} \\ \Delta_{1p}^{дн} &= \Delta_{1q_0}^{дн} + \Delta_{1q_1}^{дн} = \\ &= -\frac{q_0 m_{дн}}{2k_{дн}} \left(1 - \varphi_{m_{днc}} \cdot \psi_{m_{днc}} + 2\theta_{m_{днc}} \xi_{m_{днc}} \right) + \frac{q_1}{2m_{дн}^2 D_{дн}} \cdot \theta_{m_{днc}}^2 = \\ &= -\frac{1,053 \cdot 0,06}{2 \cdot 5} (1 - 0,9266 \cdot 0,4888 + 2 \cdot 0,7077 \cdot 0,2189) + \\ &\quad + \frac{8,37}{2 \cdot 0,06^2 \cdot 9,846 \cdot 10^4} \cdot 0,7077^2 = 4,994 \cdot 10^{-4} \\ \delta_{11} &= \delta_{11}^{ст} + \delta_{11}^{дн} = 1,368 \cdot 10^{-4} + 1,21 \cdot 10^{-4} = 2,578 \cdot 10^{-4} \\ \Delta_{1p} &= \Delta_{1p}^{ст} + \Delta_{1p}^{дн} = 5,57 \cdot 10^{-4} + 4,994 \cdot 10^{-4} = 1,056 \cdot 10^{-3}\end{aligned}$$

Подставляем значения перемещений и грузовые члены в каноническое уравнение:

$$\begin{cases} 2,578 \cdot 10^{-4} \cdot x_1 + 1,8 \cdot 10^{-3} \cdot x_2 = -1,056 \cdot 10^{-3} \\ 1,8 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 + 0,0474 \cdot x_2 = -0,652 \end{cases}$$

Откуда

Расчет вертикальных цилиндрических резервуаров

$$M_0 = x_1 = 125 \text{ кгс/см.}$$

$$Q_0 = x_2 = -18,5 \text{ кгс/см.}$$

Суммарное кольцевое растягивающее напряжения у низа стенки:

$$\sigma_{\text{кольц}}^{\text{ст}} = \frac{(\gamma_{f1}\rho H + \gamma_{f2}\rho_0)r}{t_{\text{ст}}} - \frac{2r \left(\frac{M_0}{S} + Q_0 \right)}{S \cdot t_{\text{ст}}} + \frac{6\mu M_0}{t_{\text{ст}}^2} =$$

$$= \frac{(1,1 \cdot 0,0009 \cdot 1150 + 1,2 \cdot 0,02) \cdot 1140}{1} - \frac{2 \cdot 1140 \left(\frac{125}{26,3} + 18,5 \right)}{26,3 \cdot 1} +$$

$$+ \frac{6 \cdot 0,3 \cdot 125}{1^2} = \frac{358 \text{ кгс}}{\text{см}^2} < R_y \gamma_c,$$

где $S = 0,78\sqrt{r \cdot \delta_{\text{ст}}} = 0,78\sqrt{1140 \cdot 1} = 26,3 \text{ см.}$

Первый член дает напряжение растяжения от давления нефти и её паров, второй член формулы дает напряжение от кольцевого нормального усилия краевого эффекта, а третий – напряжение от кольцевого изгибающего момента краевого эффекта.

Суммарное продольное сжимающее напряжение в стенке:

$$\sigma_{\text{ст}}^{\text{сж}} = \frac{N_{\text{сж}}}{t_{\text{ст}}} + \frac{6M_0}{t_{\text{ст}}^2} = \frac{16,8}{1} + \frac{6 \cdot 125}{1^2} = 767 \text{ кгс/см}^2 < R_y \gamma_c.$$

$$N_{\text{сж}} = \frac{(G_c + G_{\text{кр}})}{\pi D} = \frac{(43000 + 77400)}{3,14 \cdot 2280} = 16,8 \text{ кгс/см} - \text{сжимающее усилие на 1 см длины стенки.}$$

Здесь G_c – масса корпуса резервуара.

$G_{\text{кр}}$ – масса кровли резервуара со снегом, поясами жесткости и оборудованием.

$$G_{\text{кр}} = A_c(q + S_g) + G_{\text{а.п.}} = 306(66,3 + 180) + 200 = 77368 \text{ кг}$$

округленно $G_{\text{кр}} = 77400 \text{ кг.}$

$G_{\text{а.п.}} = 2000 \text{ кг}$ – оборудование и пояса жесткости.

По справочнику Кузнецова:

1. при ξ, φ , от $m_{\text{ст}} \cdot c$.

$$M_{\text{ст1}} = \frac{1}{m_{\text{ст}}} (-Q_0 \xi_{mx} + m_{\text{ст}} M_0 \varphi_{mx}) =$$

$$= \frac{1}{0,038} (18,5 \cdot 0,2189 + 0,038 \cdot 125 \cdot 0,9266) = 222,4 \text{ кгс} \cdot \text{см}$$

2. при ξ, φ , от $m_{\text{ст}} \cdot x$; $x=5 \text{ см.}$

$$m_{\text{ст}} \cdot x = 0,038 \cdot 5 = 0,19$$

$$\theta_{mx} = e^{-0,19} \cos 0,19 = 0,812$$

$$\xi_{mx} = e^{-0,19} \sin 0,19 = 0,156$$

$$\varphi_{mx} = 0,812 + 0,156 = 0,968$$

Расчет вертикальных цилиндрических резервуаров

$$M_{ст2} = \frac{1}{0,038} (18,5 \cdot 0,156 + 0,038 \cdot 125 \cdot 0,968) = 197 \text{ кгс} \cdot \text{см}$$

- 1) $\sigma_1 = \frac{T}{t_{ст}} + \frac{6M_{ст1}}{t_{ст}^2} = 1325 + \frac{6 \cdot 222,4}{1^2} = 2659 \text{ кгс/см}^2 > R_y \gamma_c m_{кр} =$
 $= 2450 \cdot 0,7 \cdot 1,2 = 2058 \text{ кгс/см}^2$
 $(\sigma_1 = 2031 \text{ кгс/см}^2 \text{ при } t_{ст} = 1,2 \text{ см}).$
- 2) $\sigma_0 = \frac{T}{t_{ст}} + \frac{6M_0}{t_{ст}^2} = 1325 + \frac{6 \cdot 125}{1^2} = 2075 \text{ кгс/см}^2 > R_y \gamma_c m_{кр} =$
 $= 2450 \cdot 0,7 \cdot 1,2 = 2058 \text{ кгс/см}^2$
- 3) $\sigma_2 = \frac{T}{t_{ст}} + \frac{6M_{ст2}}{t_{ст}^2} = 1325 + \frac{6 \cdot 197}{1^2} = 2507 \text{ кгс/см}^2 > R_y \gamma_c m_{кр} =$
 $= 2450 \cdot 0,7 \cdot 1,2 = 2058 \text{ кгс/см}^2$
 $(\sigma_2 = 1925 \text{ кгс/см}^2 \text{ при } t_{ст} = 1,2 \text{ см}).$

Следовательно, нижний пояс в этом сечении необходимо усилить, например, приваркой швеллера или уголка по всему контуру либо принять листы толщиной 12 мм, при которой условие прочности пояса удовлетворяется.

Таблица 1

№ пояса	Расстояние от верха резервуара, мм		Значение ($x_1 - 340$) до расчетного уровня, мм	Внутреннее усилие на пояс ($v_{вдр}x + v_{вдр}r$) $r, \text{ Н/см}$	Расчетная толщина пояса, мм при $R_{wy}, \text{ МПа}$		Принятая толщина листов $t, \text{ мм}$	Напряжение в поясе $\sigma, \text{ МПа}$
	до низа пояса	до расчетного уровня x_1			225	191		
8	1520	1320	980	1370	0,76	0,9	5	27,4
7	2980	2680	2340	2910	1,61	1,91	5	58,3
6	4400	4140	3800	4550	2,52	3	5	91
5	5890	5590	5250	6200	3,44	4,06	5	124
4	7340	7040	6700	7840	4,36	5,13	6	131
3	8840	8540	8200	9520	5,29	6,23	7	136
2	10 340	10 040	9700	11 240	6,3	7,42	8	141
1	11 840	11 540	11 200	12 900	7,2	8,5	10	129

Можно также толщину листов нижнего пояса оставить равной 10 мм без усиления прокатным профилем, но тогда необходимо назначать листы стали повышенной прочности, например, марки 09Г2С и др. Окончательно это решается на заводе-изготовителе с учетом наличия листовой стали соответствующих марок. Схемы сопряжений поясов по высоте резервуара и эпюры давления и напряжения показаны на рис. 4. После расчета стенки по прочности проверяют устойчивость формы корпуса резервуара при совместном действии равномерного осевого и радиального сжатия.

Расчет вертикальных цилиндрических резервуаров

Расчет конструктивных элементов щитов покрытия. Расчет конструкции покрытия производят на два вида нагрузок: нагрузки, направленные внутрь резервуара – собственный вес и вакуум, теплоизоляция, снег; нагрузка, направленная изнутри резервуара наружу; давление паров испаряющейся жидкости (избыточное давление 2 кПа).

Подсчёт расчётных нагрузок, действующих сверху вниз, Н/м²:
постоянная

листовой настил $t = 2,5$ мм	$0,0025 \cdot 7850 \cdot 1,05 (10) = 206$
балки (приблизленно)	$150 \cdot 1,05 = 157$
вакуум (разряжение)	$250 \cdot 1,2 = 300$
Итого $g = 663$	
временная (снеговая)	

$$p = 1200$$

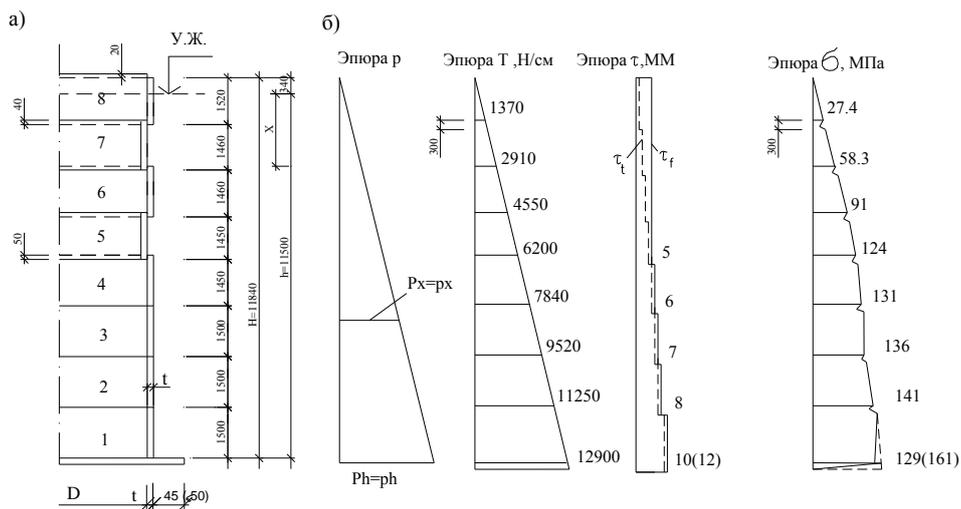


Рис. 4. Схемы сопряжений поясов по высоте резервуара и эпюры давления и напряжения:

а – расположение поясов по высоте стенке; б – эпюры давлений и напряжений

Расчет настила.

Принимаем настил приваренным к ребрам электродами марки Э42. Предельный относительный прогиб настила $[1/\pi_0] = 1/150$.

Из условия заданного предельного прогиба определяем отношение наибольшего пролёта настила к его толщине l/t по формуле, предложенной А. Л. Телояном,

$$l/t = (4n_0/15)(1 + 72E_1/n_0^4q_n) =$$

$$= (4 \cdot 150/15)(1 + 72 \cdot 22,6 \cdot 10^6 / 150^4 \cdot 0,1446) = 950,$$

Расчет вертикальных цилиндрических резервуаров

где $n_0 = [l/f] = 150$; $E_1 = E/(1-\nu^2) = 20,6 \cdot 10^6 / (1-0,3^2) = 22,6 \cdot 10^6 \text{ Н/см}^2$;
 $q_n = 206/1,05 + 250 + 1200 \cdot 0,7 = 1446 = 0,1286 \text{ Н/см}^2$.

При $t = 2,5 \text{ мм}$ пролёт настила допустим $l \leq 950 \cdot 2,5 = 2360 \text{ мм}$.

По конструктивным соображениям принимаем расстояние между рёбрами 1,2 м.

Расчет поперечных ребер щита. Расчетный пролет ребер принят $l \approx 3 \text{ м}$; равномерно распределенная нагрузка при шаге поперечных ребер $b = 1,2 \text{ м}$ составляет (по щиту № 2, сеч. 3-3 на рис. 5, в): $q = (q_{ow} + p)b = (206+300+1200+50 \cdot 1,05) 1,2 = 2190 \text{ Н/м}$, где $g_{ow} = 50 \cdot 1,05 = 53 \text{ Н/м}^2$ – собственный вес ребра.

Изгибающий момент, как в свободно опертой балке,

$$M = ql^2 / 8 = 2190 \cdot 3^2 / 8 = 2464 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Требуемый момент сопротивления сечения

$$W_d = M/R_y \gamma_c = 246400/23500 = 10,5 \text{ см}^3.$$

По сортаменту подбираем $\square 8$, $W_x = 22,4 \text{ см}^3$, $J_x = 89,4 \text{ см}^4$.

Относительный прогиб ребра (без учета настила ввиду его малой толщины)

$$f/l = (5/384)(q^n l^3 / EJ_x) = 5 \cdot 18,3 \cdot 300^3 / 384 \cdot 20,6 \cdot 10^6 \cdot 89,4 = 0,0035 < 1/200,$$

где $q^n = q/\gamma_f = 2190/1,2 = 1825 \approx 18,3 \text{ Н/см}$; $E = 20,6 \cdot 10^6 \text{ Н/см}^2$ ($2,06 \cdot 10^5 \text{ МПа}$).

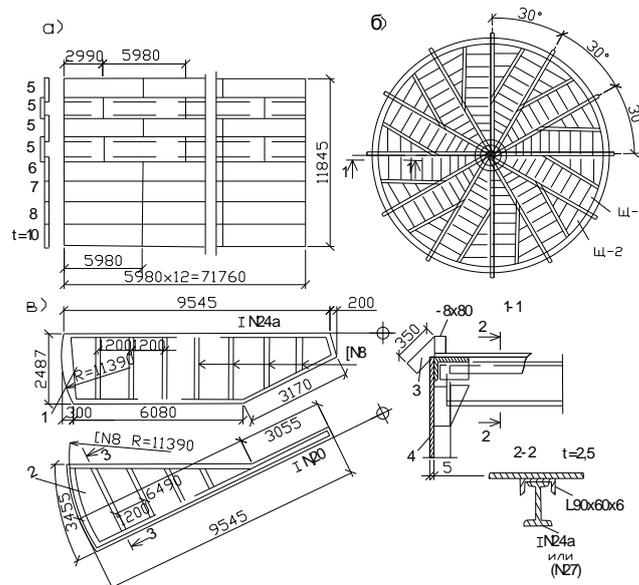


Рис. 5. Сборные элементы стенки и щитового покрытия резервуара вместимостью 5000 м³:

- а – корпус резервуара (полотнище); б – план щитов покрытия; в – типы щитов покрытия; 1 – щит Щ-1; 2 – то же, Щ-2; 3 – фиксатор (ловитель); 4 – стенка резервуара

Расчет вертикальных цилиндрических резервуаров

Расчет продольной балки щита. Пролет балки при свободном опирании на стенку резервуара и оголовка (зонт) трубчатой стойки равен около 10 м. Равномерно распределенная нагрузка на 1 м длины балки при ширине грузовой площадки $b \approx 1,25$ м

$$q = 1863 \cdot 1,25 = 2329 \text{ Н/см.}$$

Изгибающий момент от действия полной расчетной нагрузки

$$M = ql^2 / 8 = 2329 \cdot 10^2 / 8 = 29112 \text{ Н·м.}$$

Требуемый момент сопротивления сечения балки из условия обеспечения прочности в свою очередь

$$W_d = M / R_y \gamma_c = 2911200 / 23500 = 124 \text{ см}^3.$$

Требуемый момент инерции сечения балки из условия обеспечения жесткости (при $f/l = 1/250$)

$$J_{d,x} = (5n_0 / 384)(q^n l^3 / E) = (1250 / 384)(19,4 \cdot 1000^3 / 20,6 \cdot 10^6) = 3660 \text{ см}^4,$$

где $q^n = q / \gamma_f = 2329 / 1,2 = 1940 \approx 19,4 \text{ Н/см; } n_0 = [l / f] = 250 ; 5n_0 = 5 \cdot 250 = 1250$.

Принимаем по жесткости двутавр № 27, $J_x = 5010 \text{ см}^4$.

Покрытие резервуара спроектировано из щитов двух типов: прямоугольного со скошенным углом на опоре со стороны стойки и треугольного (см. рис. 5) применительно к типовому проекту № 704-1-56 института ЦНИИПроектстальконструкция (данный проект заменен типовым проектом № 704-1-67 института Южгипротрубопровод, г. Киев, покрытие – сферическое, варианты – с понтоном и без понтона).

Расчет элементов покрытия на вторую комбинацию нагрузок (избыточное давление внутри резервуара наружу) не производим, так как по заданию оно равно 2 кПа, что меньше расчетной нагрузки сверху вниз, равной 2,263 кПа.

Расчет центральной стойки проводим на центрально приложенную осевую силу. Грузовая площадь покрытия

$$A_c = \pi d_c^2 / 4 = 3,14 \cdot 11,4^2 / 4 = 102 \text{ м}^2,$$

где $d_c = D / 2 = 22,81 / 2 = 11,4 \text{ м.}$

Вычисляем осевую силу

$$N = A_c (g + p) + G_{ow} = 102(0,663 + 1,2) + 18 \cdot 1,05 = 209 \text{ кН.}$$

Расчет вертикальных цилиндрических резервуаров

Здесь G_{ow} – собственный вес стойки, принимаемый по опыту типового проектирования: для резервуаров вместимостью 3000-5000 м³ масса стойки на 1 м ее длины равна 150 кг; то же, вместимостью 1000-2000 м³ – 120-130 кг; общая масса стойки длиной 12 м $G_{ow} = 150 \cdot 12 = 1800$ кг (18 кН).

Требуемая площадь сечения стойки при $\varphi \approx 0,8$

$$A_d = N / \varphi R_y \gamma_c = 250000 / 0,8 \cdot 32000 = 9,8 \text{ см}^2.$$

По конструктивным соображениям, с учетом условий опирания щитов покрытия и использования стойки для рулонирования элементов резервуара принята стойка из трубы диаметром 1020 мм со стенкой толщиной 6 мм, ТУ 14-3-1138-82, $A = 191$ см², радиус инерции сечения $i = 35,9$ см, сталь марки 17ГИС-У (класса К-52), $R_y \approx 320$ МПа. Гибкость стойки $\lambda = l_0/i = 1200/35,9 = 33,4 < \lambda_{lim} = 120$; $\varphi = 0,93$. Для предотвращения отрыва покрытия трубчатую стойку заполняют песком. Детали стойки показаны на рис. 6. Оголовок (зонт) и базу стойки проектируют одинакового диаметра 2,6-3 м с расчетом возможности ее использования для рулонирования стенки или отправочной части днища резервуара на заводе-изготовителе.

Проверка устойчивости положения покрытия при действии избыточного давления $p_0 = 0,2$ Н/см². Общий вес покрытия N_r и стойки N_c без учета временной нагрузки и коэффициентов надёжности по нагрузке

$$N = N_r + N_c = 141,1 + 18 = 159,1 \approx 160 \text{ кН},$$

где $N_r = A_0 g^n = (\pi D^2 / 4) g^n = (3,14 \cdot 22,8^2 / 4)(206 + 157) / 1,05 = 141077 = 141,7 \text{ кН};$

$$N_c = G_{ow} = 0,150 \cdot 12(10) = 18 \text{ кН}.$$

Усилие изнутри резервуара вверх при $p_0 = 2$ кПа

$$N_e = A_0 p_0 \gamma_f = (3,14 \cdot 22,8^2 / 4) 2 \cdot 1,15 = 940 \text{ кН}.$$

Так как $N_e = 940 \text{ кН} > N_r = 141,1 \text{ кН}$, то требуется либо увеличить массу покрытия для предотвращения его отрыва, либо предусмотреть крепление щитов покрытия к корпусу и стойке резервуара. Для увеличения массы, как указано ранее, трубчатую стойку заполняют песком.

Последовательно определяем:

- массу песка при диаметре трубы 1020 мм и толщине стенки 6 мм

$$G_1 = (\pi D_0^2 / 4) H \rho = \left(\frac{3,14 \cdot 1,008^2}{4} \right) 12 \cdot 1500 = 14150 \text{ кг};$$

- массу корпуса резервуара

Расчет вертикальных цилиндрических резервуаров

$$G_c = \pi D H \rho_m = 3,14 \cdot 22,8 \cdot 12 \cdot 7850 \cdot 0,00637 = 43000 \text{ кг};$$

- массу днища при $t = 5 \text{ мм}$

$$G_b = (\pi D_b / 4) t \rho = (3,14 \cdot 22,9^2 / 4) 0,005 \cdot 7850 = 16200 \text{ кг};$$

- вес днища $\approx 16200(10) = 162000 \text{ Н} = 162 \text{ кН}$;

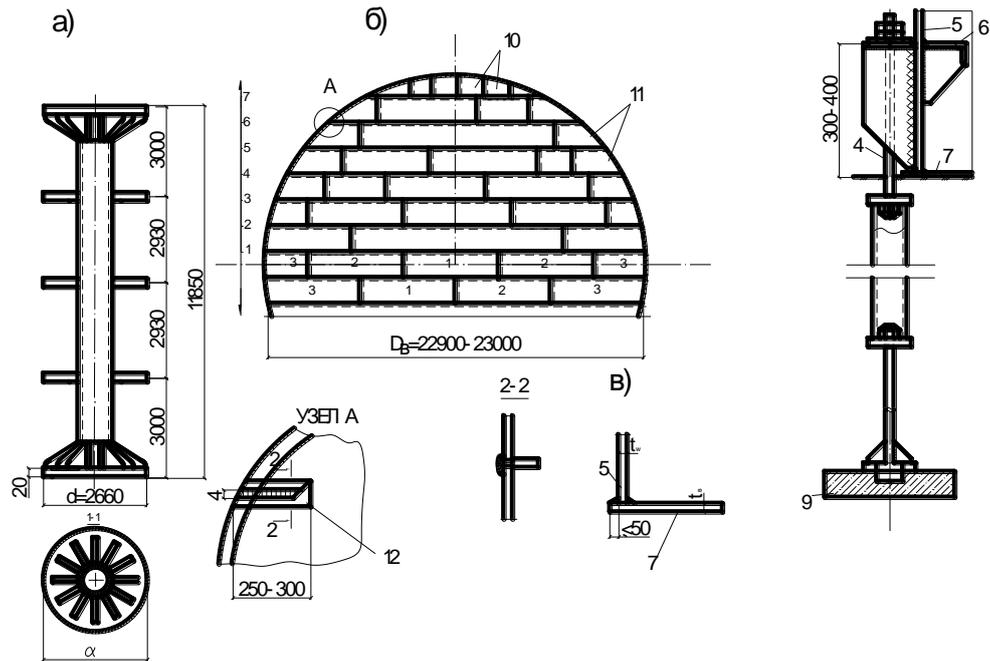


Рис. 6. Центральная стойка и днище резервуара:

а – стойка; б – план днища; в – соединение стенки с дном; г – крепление нижней части резервуара анкерами; 1-3 – полосы полотнища днища; 4 – анкерный болт; 5 – стенка резервуара; 6 – кольцо жесткости; 7 – днище; 8 – стальная труба, в которую опускается анкерный болт 4 до окончания мотажа днища; 9 – железобетонная плита или блок в грунте; 10 – окрайки поперечные; 11 – то же, продольные; 12 – подкладка

- массу поясов жесткости и аппаратуры (по проекту) $\approx 2 \text{ т}$;

- общую массу резервуара (ориентировочно):

$$G_r = N + G_1 + G_c + G_b + 2 = 16 + 14,15 + 43 + 16,2 + 2 = 91,35 \text{ т};$$

- усилие отрыва корпуса от днища

Расчет вертикальных цилиндрических резервуаров

$$N_d = N_e - (G_r - G_b) = 940 - (913,5 - 162) = 188,5 \text{ кН.}$$

Проверяем напряжение в швах, прикрепляющих нижний пояс стенки к днищу, при действии усилия отрыва

$$\sigma = N_d / A_w = 188500 / 5000 = 37,6 \text{ Н/см}^2 (0,376 \text{ МПа}) < \gamma_c R_{wf} \gamma_{wf} = 0,8 \cdot 180 \cdot 1 = 144 \text{ МПа,}$$

где $A_w = 2\pi D(\beta_f k_f) = 2 \cdot 3,14 \cdot 2280 \cdot 0,7 \cdot 0,5 = 5000 \text{ см}^2$; $k_f = 5 \text{ мм}$, с двух сторон пояса (толщину шва принимают равной не более меньшей толщины свариваемых листов).

Анкерные болты для крепления нижнего пояса резервуара к заглубленным железобетонным плитам по расчету не требуются. Стойку крепят к днищу анкерами или приваривают по контуру опорного кольца.

При внутреннем избыточном давлении в резервуаре более 2 кПа необходимо крепить нижний пояс стенки к заглубленным в грунт железобетонным плитам или блокам анкерными болтами (см. рис. 6, г). Число болтов определяют расчетом на растяжение по усилию отрыва стенки от днища (обычно 4-6 болтов, равномерно расположенных по контуру нижнего пояса стенки резервуара).

Проверку устойчивости формы оболочки (корпуса) резервуара при совместном действии вертикальных и горизонтальных (боковых) сжимающих усилий выполняют согласно рекомендации п. 8.5-8.9 СП 16.13330.2017 по формуле

$$\sigma_1 / \sigma_{cr1} + \sigma_2 / \sigma_{cr2} \leq \gamma_c,$$

где σ_1, σ_2 – соответственно абсолютные значения расчетных продольного и кольцевого сжимающих напряжений;

$\sigma_{cr1}, \sigma_{cr2}$ – соответственно нижние критические напряжения при раздельном равномерном действии осевого и радиального сжатия;

$\gamma_c = 1$ (если нет других указаний).

Проверяем устойчивость формы резервуара для пятого пояса, где толщина $t = 5 \text{ мм}$. Для этого вычисляем:

- продольное сжимающее напряжение от расчётных нагрузок

$$\sigma_1 = N / A = 869000 / 3580 = 243 \text{ Н/см}^2 = 2,43 \text{ МПа,}$$

где $N = A_c (g + p) + G_{0w} \gamma_f = 306 \cdot 2,263 + 169 \cdot 1,05 = 869 \text{ кН;}$

$$A_c = (\pi / 4)(D^2 - d_1^2) = (3,14 / 4)(22,8^2 - 11,4^2) = 306 \text{ м}^2;$$

$$d_1 = 0,5D = 0,5 \cdot 22,8 = 11,4 \text{ м;}$$

Расчет вертикальных цилиндрических резервуаров

$$A = \pi Dt = 3,14 \cdot 2280 \cdot 0,5 = 3580 \text{ см}^2 = 0,385 \text{ м}^2;$$

$$G_{0w} = A \rho = 0,358 \cdot 6 \cdot 7850 = 16900 \text{ кг} = 169 \text{ кН};$$

- кольцевое сжимающее напряжение при вакууме $p_v = 250 \text{ Па}$

$$\sigma_2 = pvr/t = 0,25 \cdot 1140/0,5 = 57 \text{ Н/см}^2 = 0,57 \text{ МПа}.$$

Определяем критические напряжения (по п. 8.5 и 8.7 СП16.13330.2017) при осевом сжатии:

σ_{cr1} принимаем равной меньшей из величин:

$$\sigma_{cr1} = \psi R ;$$

$$\sigma_{cr1} = cEt/r ,$$

где ψ, c – коэффициенты по табл. 2, при этом коэффициент $\psi = 0,97 - (0,00025 + 0,95R_y/E)r/t$, где $r/t \leq 300$.

При $r/t = 1140/0,5 = 2280 > 300$ коэффициент ψ не учитывается, а коэффициент $c = 0,0627$ (по интерполяции):

Тогда по формуле

$$\sigma_{cr1} = 0,0627 \cdot 2,06 \cdot 10^5 \cdot 0,5/1140 = 5,7 \text{ МПа};$$

- при радиальном сжатии от воздействия вакуума

$$(p_v = 250 \text{ Па}); H/r = L/r = 12/11,4 = 1,05 ;$$

- при $0,5 \leq L/r \leq 10$ σ_{cr2} определяют по формуле

$$\sigma_{cr2} = 0,55E(r/L)(t/r)^{3/2} = 0,5 \cdot 2,06 \cdot 10^5 (11,4/12)(0,5/1140)^{3/2} \approx 1 \text{ МПа}.$$

Устойчивость проверяем по формуле:

$$\sigma_1 / \sigma_{cr1} + \sigma_2 / \sigma_{cr2} = 2,43/5,7 + 0,57/1 = 0,996 < \gamma_c = 1 ,$$

т.е. оболочка устойчива.

Указания по изготовлению и монтажу резервуара

Расчет вертикальных цилиндрических резервуаров

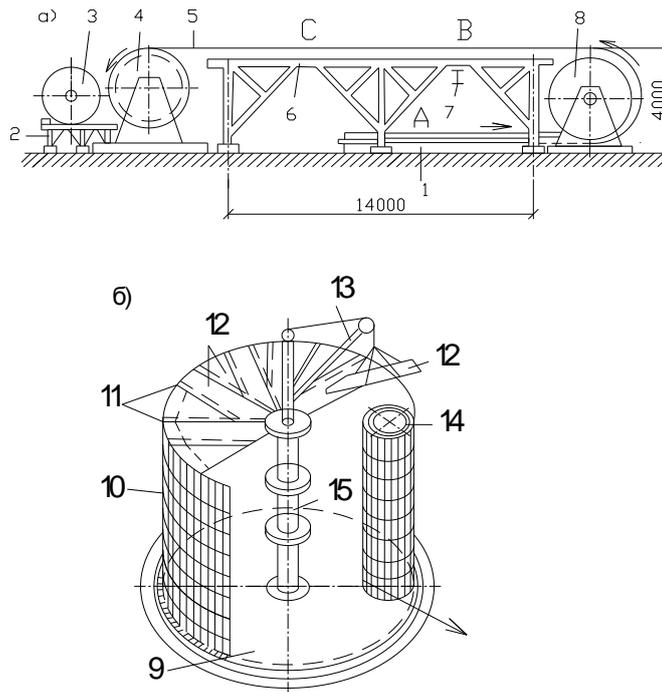


Рис. 7. Способы рулонирования и монтажа элементов резервуара:

- а – двухъярусный стенд для рулонирования стенки и дна;
- б – монтаж резервуара;
- 1 – стеллажи первого яруса; 2 – стеллаж для готового рулона; 3 – готовый рулон;
- 4 – силовое сворачивающее устройство; 5 – полотнище, готовое к рулонированию;
- 6 – стеллажи второго яруса для сварки полотнищ в отправочные марки и их испытания; 7 – монорельс; 8 – барабан для подачи полотнищ на второй ярус;
- 9 – днище; 10 – корпус; 11 – косынки-фиксаторы; 12 – щит покрытия; 13 – подъемная стрела;
- 14 – шахта лестницы в качестве катушки рулона; 15 – стойка; А, В, С – рабочие зоны по сварке и испытанию поясов и полотнищ элементов резервуара

Конструктивные элементы резервуара (днище, стенку, щиты покрытия, стойку и шахтную лестницу) изготавливают на заводе и доставляют на место строительства в виде укрупненных элементов. Днище сваривают из полос и разбивают на два элемента – половины днища. Стенку также сваривают из ранее подготовленных полос, а затем (при $t \leq 11$ мм) сворачивают на стенде в рулон вокруг стойки или шахтной лестницы и в таком виде доставляют на стройку (рис. 7). Аналогично доставляют и половины днища (схемы раскладки полос днища показаны на рис. 6, б). Половины днища соединяют внахлестку. После монтажа днища в центре устанавливают вертикально рулон корпуса и с помощью специального устройства разворачивают до заданного диаметра см. (рис. 7, б). Стык корпуса также выполняют внахлестку. Щиты покрытия укладывают на зонт стойки и стенку резервуара по мере разворачивания рулона корпуса. Для фиксации положения на внешней стороне щитов предусматривают ловители из полосо-вой стали (см. сечение 1-1 на рис. 5). После приварки стенки к днищу и устройства всех монтажных швов корпуса проверяют качество сварки физическими или химическими способами, обеспечивая непроницаемость соединений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лессиг Е.Н., Лилеев А.Ф., Соколов А.Г. Листовые металлические конструкции. – М.: Стройиздат, 1970.
2. Металлические конструкции. В 3т. Т.3. Специальные конструкции и сооружения / под ред. В.В. Горева. – М.: Высшая школа, 2005.
3. Металлические конструкции. В 3т. Т.2. Стальные конструкции зданий и сооружений: справочник проектировщика / под общ. ред. В.В. Кузнецова (ЦНИИпроектсталь-конструкция им. Н.П. Мельникова) – М.: Изд-во АСВ, 1998.
4. СП 16.13330.2017. Свод правил. Стальные конструкции. Актуализированная версия СНиП II-23-81*.
5. СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия. СНиП 2.01.07-85*.

Расчет вертикальных цилиндрических резервуаров

Таблица 2

Значение коэффициентов ψ и c для проверки цилиндрических оболочек

Расчётное сопротивление стали R_y , МПа	r/t											
	0	25	50	100	200	300	400	600	800	1000	1500	2500
Коэффициенты ψ												
200	0,97 ~ 1	0,941	0,911	0,853	0,735	0,618						
240	0,97 ~ 1	0,936	0,902	0,834	0,698	0,563						
280	0,97 ~ 1	0,931	0,893	0,816	0,66	0,508						
320	0,97 ~ 1	0,927	0,883	0,797	0,625	0,452						
400	0,97 ~ 1	0,918	0,865	0,760	0,551	0,342						
520	0,97 ~ 1	0,903	0,838	0,705	0,44	0,176						
600	0,97 ~ 1	0,895	0,819	0,668	0,367	0,065						
Коэффициенты c												
Независимо от марки стали				0,22	0,18	0,16	0,14	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06

Примечания: 1. Приведенные значения ψ и c действительны для конструкций, выполненных в соответствии с требованиями СП 70.13330.2012 по изготовлению и монтажу стальных конструкций. 2. Коэффициенты ψ вычислены по формуле (100) СП 16.13330.2017: $\psi = 0,97 - (0,00025 + 0,95R_y/E) r/t$, где $0 < r/t < 300$, $E = 2,06 \cdot 10^5$ МПа. Для других значений R_y коэффициент ψ вычислять по формуле (100) СП 16.13330.2017.