

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Воронежский государственный технический университет

Кафедра теплогазоснабжения и нефтегазового дела

370-2022

**РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ
ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению курсовой и практической работ
по дисциплине «Проектирование и строительство нефтехранилищ»
для студентов направления 21.03.01 «Нефтегазовое дело»
всех форм обучения

Воронеж 2022

УДК 621.642(07)
ББК 35.514я7

Составители:

А. В. Панин, С. В. Чуйкин, М. А. Долбилова

Расчет и конструирование вертикальных цилиндрических резервуаров: методические указания к выполнению курсовой и практической работ по дисциплине «Проектирование и строительство нефтехранилищ» для студентов направления 21.03.01 «Нефтегазовое дело» всех форм обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: А. В. Панин, С. В. Чуйкин, М. А. Долбилова. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2022. – 31 с.

В методических указаниях изложены основные положения расчета и проектирования вертикальных цилиндрических резервуаров.

Предназначены для студентов направления 21.03.01 «Нефтегазовое дело» всех форм обучения при изучении дисциплины «Проектирование и строительство нефтехранилищ».

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле МУ_РиКВЦР.pdf.

Ил. 8. Табл. 2. Библиогр.: 11 назв.

УДК 621.642(07)
ББК 35.514я7

Рецензент – *В. А. Козлов, д-р физ.-мат. наук, доц., заведующий кафедрой строительной механики ВГТУ*

*Издается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

ВВЕДЕНИЕ

Настоящие методические указания содержат положения по расчету и конструированию вертикальных металлических резервуаров и могут быть использованы при курсовом и дипломном проектировании студентами, обучающимися по направлению 21.03.01 «Нефтегазовое дело».

Цель методического указания состоит в том, чтобы рассчитать нагрузки, действующие на резервуар, выбрать оптимальные размеры, выполнить расчет на прочность, устойчивость резервуара, расчет и конструирование днища и покрытия резервуара. Материал учебного пособия отражает действующие строительные нормы и правила проектирования. В ходе работы над курсовой работой студент расширяет знания путем самостоятельной работы с нормативно-справочной литературой

Данный раздел может являться как самостоятельным расчетом, так и составным элементом расчетов для выпускной квалификационной работы бакалавров.

Курсовая работа представляет собой комплекс расчетно-пояснительной записки и графической части.

В пояснительной записке должна быть предусмотрена теоретическая часть с описанием основных формул, используемых при расчете. Графическая часть содержит развёртку стенки, планы днища, кровли резервуара, фасад резервуара и соответствующие разрезы и узлы.

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЁТА

Курсовая работа выполняется студентом в соответствии с полученным заданием, в котором указываются следующие исходные данные: номинальный объём; продукт хранения; район строительства; марка стали кровли, днища и корпуса; избыточное давление и значение вакуума.

Несущие конструкции вертикальных цилиндрических резервуаров рассчитывают по предельным состояниям в соответствии со строительными нормами и правилами [1, 2], с учётом дополнительных требований [3, 4, 5].

В зависимости от номинального объема, места расположения площадки строительства, прогнозируемой величины ущерба при возможной аварии, резервуары подразделяются на четыре уровня ответственности - класса опасности.

Минимальный класс опасности определяется номинальным объемом резервуара:

- класс 1 - резервуары объемом свыше 50000 м³;
- класс 2 - резервуары объемом от 10000 м³ до 50000 м³;
- класс 3 - резервуары объемом от 1000 м³ и менее 10000 м³;
- класс 4 - резервуары объемом менее 1000 м³.

Для резервуаров, предназначенных для хранения продуктов плотностью свыше 1,015 т/м³ класс опасности повышается на одну ступень.

Вертикальные цилиндрические резервуары воспринимают основные нагрузки:

- 1) нагрузка от собственного веса конструкции p_g , $\gamma_f = 1,05$;
- 2) полное расчётное значение снеговой нагрузки s ;
- 3) внутреннее (избыточное) давление паровоздушной смеси $p_{изб}$; $\gamma_f = 1,2$;
- 4) вакуум $p_{вак}$; $\gamma_f = 1,2$;
- 5) гидростатическое давление жидкости $p_{ж}$, $\gamma_f = 1,1$;
- 6) внешнее ветровое воздействие на стенку резервуара (в отличие от нагрузок от собственного веса, снега, внутреннего давления) не является осесимметричным и при расчете на устойчивость заменяется действием условного вакуума, равномерно распределенного по окружности резервуара.

$$w_{cm} = p_{вак.усл.} = 0,5w_m \gamma_f$$

где w_m – нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки на высоте z над поверхностью земли, $\gamma_f = 1,4$.

2. НАЗНАЧЕНИЕ ГЕНЕРАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ

Определение оптимальной высоты производится по следующей формуле:

$$H_{опт.} = \sqrt{\frac{\Delta \cdot R_{wy} \cdot \gamma_c}{\gamma_f \cdot \gamma_{ж}}}, \quad (2.1)$$

где Δ – суммарная приведённая толщина кровли и днища, зависит от объёма резервуара, принимаем по Таблице П1.1; R_{wy} – расчётное сопротивление сварного стыкового шва, оно равно расчётному сопротивлению стали R_y , определяется по Таблице П1. 2; γ_c – общий коэффициент условия работы, определяется по Приложению 1; γ_f – коэффициент надёжности по нагрузке, определяется по п.1; $\gamma_{ж}$ – удельный вес хранимого продукта, который рассчитаем по формуле:

$$\gamma_{ж} = \rho_{ж} \cdot g, \quad (2.2)$$

где $\rho_{ж}$ – плотность хранимого продукта, кг/м³; g – ускорение свободного падения в районе строительства.

При назначении высоты стенки и диаметра резервуара следует учитывать условие кратности высоты резервуара ширине листов, а длины окружности – длине листов. Наиболее часто в резервуарах применяются листы размерами 1500×6000, 1800×8000, 2000×8000 мм, следовательно, высота резервуаров должна приниматься кратной 1490, 1790 или 1990 мм в зависимости от принятого типоразмера листов, а длина окружности – кратной соответственно 5990 или 7990 мм (с учетом строжки листов на 5 мм по периметру). Разрешается принимать длину окружности, кратной половине длины листов.

Количество листов в высоту (рядов в вертикальном направлении) определяем по формуле, шт.:

$$n_{\text{листов}}^{\text{в}} = \frac{H_{\text{опт.}}}{b}, \quad (2.3)$$

где b – ширина листа, м.

Далее уточняем высоту резервуара, определяю фактическую высоту, м:

$$H_{\text{ф.}} = n_{\text{листов}} \cdot b, \quad (2.4)$$

Оптимальный радиус резервуара рассчитываем по формуле:

$$r_{\text{опт.}} = \sqrt{\frac{V}{H_{\text{ф.}} \cdot \pi}} \quad (2.5)$$

Длина развертки стенки, м:

$$l_{\text{опт.}} = 2 \cdot \pi \cdot r_{\text{опт.}} \quad (2.6)$$

Нужное количество листов в горизонтальном направлении (количество листов в одном поясе), шт.:

$$n_{\text{листов}}^{\text{г}} = \frac{l_{\text{опт.}}}{a}, \quad (2.7)$$

где a – длина листа, м.

Уточнённая длина (фактическая) резервуара:

$$l_{\text{ф}} = n_{\text{листов}}^{\text{г}} \cdot a - 0,2, \quad (2.8)$$

где 0,2 м – припуск на устройство стыка при монтаже из рулонных заготовок.

Фактические радиус и диаметр, м:

$$r_{\text{ф}} = \frac{l_{\text{ф}}}{2\pi}, \quad (2.9)$$

Считается, что для резервуаров объёмом свыше 1000 м³ оптимальное соотношение H/D должно находиться в пределах 1/3 – 1/2.

Фактический объём, м³:

$$V_{\text{ф}} = H \cdot \pi \cdot r^2, \quad (2.10)$$

Разница между заданным и фактическим объёмом резервуара не должна превышать 5%, т.е. должна выполняться проверка:

$$\frac{V_{\text{ф}} - V_{\text{п}}}{V_{\text{п}}} \cdot 100\% \leq 5\%, \quad (2.11)$$

При проектировании вертикальных цилиндрических резервуаров рекомендуется полученные в результате расчета основные параметры резервуара соотносить с рекомендациями [6], Приложение 1.

3. РАСЧЁТ СТЕНКИ РЕЗЕРВУАРА

Цилиндрические стенки резервуаров состоят из ряда поясов высотой, равной применяемой ширине листов (1500, 1800 или 2000 мм). В резервуарах малых объемов при толщине листов 4 мм сопряжение поясов может осуществляться внахлестку как при изготовлении на заводе, так и на монтаже. Начиная с

резервуаров объёмом 800 м³ толщина листов для нижних поясов постепенно увеличивается, что отражает увеличение воспринимаемых нагрузок от столба жидкости. В этом случае все соединения листов выполняются встык.

Стенки заводского изготовления поставляются для резервуаров объёмом до 5000 м³ в одном рулоне. Полотнища стенок резервуаров большей вместимости поставляют в виде нескольких рулонов, масса которых определяется грузоподъемностью обычных четырехосных железнодорожных платформ (60 т).

3.1 Определение толщины стенки резервуара

Минимальная расчётная толщина стенки, мм, в каждом поясе на уровне z (нижней кромки рассматриваемого пояса) для условий эксплуатации:

$$t_{cm} = \frac{p_z \cdot r}{\gamma_c R_{wy}} = \frac{\gamma_f \cdot \gamma_{ж} \cdot z + \gamma_f \cdot P_{изб}}{\gamma_c R_{wy}} r, \quad (3.1)$$

где γ_c – коэффициент условий работы, определяется по Прил. 1; r – фактический радиус резервуара; $p_{изб}$ – избыточное давление, определяется по исходным данным.

Расчёт по определению требуемой толщины поясов стенки удобно выполнять в табличной форме: Таблица 1.

Таблица 1

Расчёт определения толщины поясов стенки (начало)

Номер пояса	Расстояние от края стенки z, м	$\frac{\gamma_f \cdot \gamma_{ж}}{\gamma_c \cdot R_{wy}} \cdot r$	$\frac{\gamma_f \cdot \gamma_{ж}}{\gamma_c \cdot R_{wy}} \cdot r \cdot z$	$\frac{\gamma_f \cdot P_{изб.}}{\gamma_c \cdot R_{wy}} \cdot r$	$t_{ст.расч.},$ мм	$t_{ст.ф.},$ мм
1	2	3	4	5	6	7

Для верхних листов стенки, толщина которых по расчету весьма мала, следует учитывать также рекомендации, выработанные практикой проектирования, в противном случае стенка, вероятно, будет неустойчива (табл. 2).

Таблица 2

Минимальная конструктивно необходимая толщина

$V_p,$ тыс. м ³	до 5	5-10	10-20	20-30	30-40	40-50
$t_k, \text{ мм}$	4	6	7	8	8/10	10/12

В числителе - значения минимальной толщины для резервуаров с плавающей кровлей, в знаменателе – со стационарным покрытием.

3.2 Проверка прочности стенки

Стенка резервуара, являясь оболочкой вращения при действии осесимметричной нагрузки, в основном находится в безмоментном состоянии, и только в зонах краевого эффекта (в частности, в месте сопряжения стенки с дном) имеет место моментное напряженное состояние.

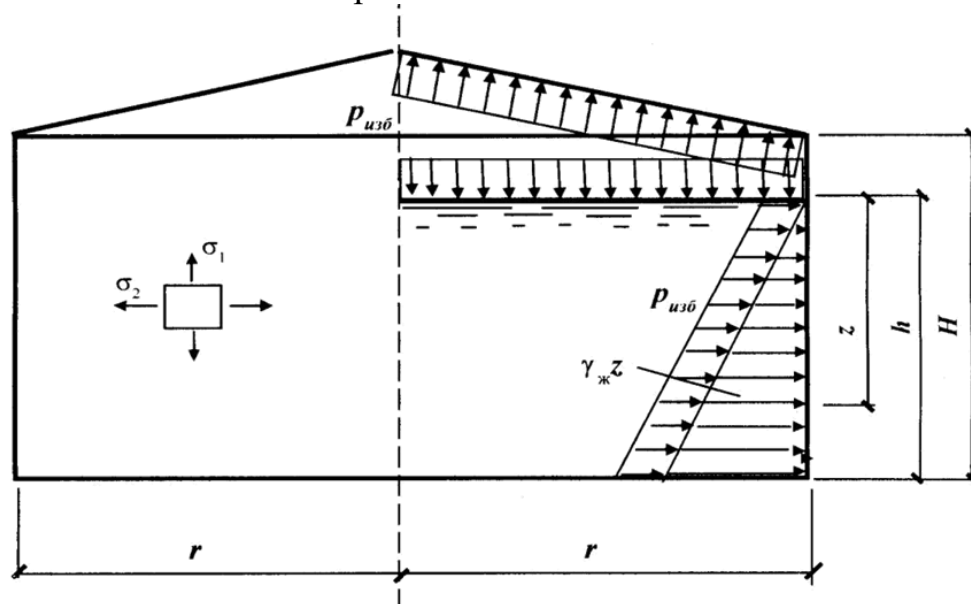


Рис. 1. Гидростатическое давление жидкости и избыточное давление паровоздушной смеси

Основной нагрузкой для стенки вертикального цилиндрического резервуара является внутреннее давление p как сумма гидростатического давления жидкости и давления паровоздушной смеси (рис.1). На расстоянии z от расчетного уровня жидкости h внутреннее давление

$$P_z = \gamma_{жс} \cdot \gamma_{f_2} \cdot z + P_{изб} \cdot \gamma_{f_1}, \quad (3.2)$$

здесь z – расстояние от расчётного уровня жидкости (в курсовом проектировании за расчётный уровень жидкости принимают полную высоту стенки H) до рассматриваемого сечения; где γ_{f_1} и γ_{f_2} – коэффициенты надёжности по нагрузке, определяются по п.1, при внутреннем (избыточном) давлении паровоздушной смеси $\gamma_{f_1} = 1,2$, а при гидростатическом давлении жидкости $\gamma_{f_2} = 1,1$.

Силы, действующие по касательной к окружности, называют кольцевыми, а по касательным к меридианам – меридиональными (осевыми). Кольцевые силы вызывают кольцевые напряжения, а меридиональные силы – меридиональные напряжения.

При воздействии внутреннего равномерного давления p в тонкостенной замкнутой оболочке возникают меридиональные и кольцевые усилия T_1 и T_2 , связанные между собой соотношением

$$\frac{T_1}{R_1} + \frac{T_2}{R_2} - p = 0 \quad (3.3)$$

В цилиндрической оболочке $R_1 = \infty$; $R_2 = r$, поэтому кольцевое усилие

$$T_2 = pr, \quad (3.4)$$

где r – радиус цилиндрической оболочки.

Кольцевые напряжения на уровне z

$$\sigma_2 = \frac{T_2}{t_{\text{CT}}} = \frac{p \cdot z \cdot r}{t_{\text{CT}}}, \quad (3.5)$$

они в два раза больше меридиональных напряжений и поэтому определяют прочность стенки;

$$\sigma_2 \leq \gamma_c R_{wy} \quad (3.6)$$

Напряжение сравнивается с расчётным сопротивлением сварного шва, поскольку вертикальные швы резервуаров обычно стыковые, в том числе и замыкающие.

Подставляя формулу 3.2 в выражение для кольцевых напряжений, получим, кН/м²:

$$\sigma_2 = \frac{p_{\text{изб.}} \cdot \gamma_{f_1} + \gamma_{\text{ж}} \cdot z \cdot \gamma_{f_2}}{t_{\text{CT}}} \cdot r \quad (3.7)$$

Для каждого пояса резервуара необходимо выполнить проверку ф. 3.6

Меридиональные напряжения, кН/м²:

$$\sigma_1 = \frac{G_{\text{CT}} + G_{\text{K}}}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot t_{\text{CT}}} + \frac{\psi \cdot (p_s + p_v)}{2 \cdot t_{\text{CT}}} \cdot r, \quad (3.8)$$

где G_{K} – вес крыши резервуара, кН:

$$G_{\text{K}} = g_{\text{K}} \cdot S_{\text{K}} \cdot \gamma_f, \quad (3.9)$$

здесь γ_f – коэффициент надёжности по нагрузке, для нагрузки от собственного веса конструкции, по п.1; g_{K} – удельный вес квадратного метра кровли, кН/м², прил. 1; S_{K} – площадь кровли; ψ – коэффициент сочетания нагрузок, определяется по [2], $\psi = 0,9$; p_s – значение веса снегового покрова на 1 м² поверхности кровли:

$$p_s = S \cdot \mu, \quad (3.10)$$

где S – расчётное значение веса снегового покрова на 1 м² горизонтальной поверхности земли, определяется по приложению К [2], с учетом коэффициента по нагрузке равного 1,4; μ – коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие, определяется по [2, приложение Б].

p_v – расчётное воздействие на кровлю вакуума:

$$p_v = P_v^H \cdot \gamma_f, \quad (3.11)$$

P_v^H – значение воздействия вакуума, по исходным данным $P_v^H=0,2$ кПа; γ_f – коэффициент надёжности по нагрузки для вакуума; $G_{ст}$ – расчётная нагрузка от стенки выше рассматриваемого сечения.

Для упрощения расчёта, рассчитаем расчётную нагрузку от стенки для каждого пояса:

$$G_{п} = h_{п} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \gamma_{ст} \cdot \gamma_f \cdot t_{ст}. \quad (3.12)$$

где $h_{п}$ – высота одного пояса, т.к. мы брали листы размером 1500x6000, то $h_{п}=1,49$ м; γ_f – коэффициент надёжности по нагрузки для нагрузки от собственного веса конструкции по [6, п.2.]; $\gamma_{ст}$ – удельный вес стали:

$$\gamma_{ст} = \rho_{ст} \cdot g, \quad (3.13)$$

где $\rho_{ст}$ – плотность стали, $\rho_{ст}=7850$ кг/м³, g – ускорение свободного падения, $g=9,81$ м/с².

Проверка на прочность для каждого пояса стенки резервуара как работающего при плоском напряжённом состоянии проводится следующим образом:

$$\sigma_{ред} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2^2} \leq \frac{R_y \cdot \gamma_c}{\gamma_n}, \quad (3.14)$$

где γ_n – коэффициент надёжности по назначению, определяется по п.1

Исходя из полученных данных, делается вывод о соблюдении условия прочности для всех поясов резервуара. В случае, если условие не выполняется, то расчёт повторяют с новой толщиной соответствующих поясов.

3.3 Определение усилий и проверка прочности в месте сопряжения стенки и днища резервуара

В вертикальном цилиндрическом резервуаре в сопряжении стенки с днищем за счет стесненности радиальных деформаций стенки возникает изгибающий момент и поперечная сила. Предполагается, что полосы единичной ширины, вырезанные из стенки и днища, работают как балки на упругом основании (рис. 2).

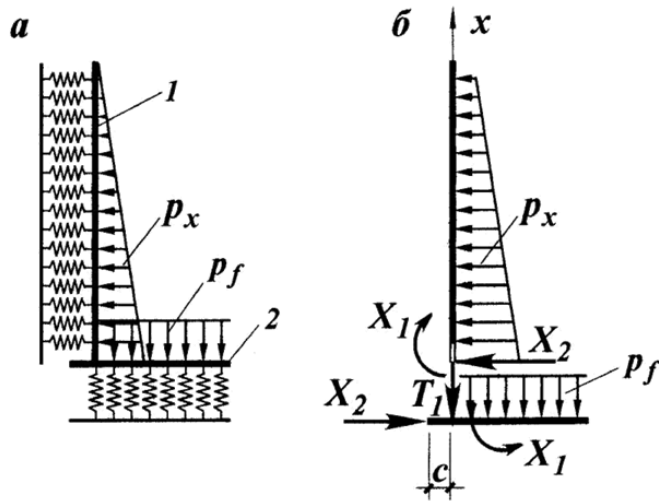


Рис. 2. Расчётная схема узла сопряжения стенки и днища

В вертикальном цилиндрическом резервуаре от действия гидростатической нагрузки хранимой жидкости наибольшие значения изгибающего момента и поперечной силы возникают в зоне краевого эффекта сопряжения стенки и днища. Неизвестные усилия X_1 и X_2 определяются из решения канонического уравнения метода сил:

$$\begin{cases} (\delta_{11}^{ст} + \delta_{11}^{дн}) \cdot X_1 + (\delta_{12}^{ст} + \delta_{12}^{дн}) \cdot X_2 + \Delta_{1p}^{ст} + \Delta_{1p}^{дн} = 0 \\ (\delta_{21}^{ст} + \delta_{21}^{дн}) \cdot X_1 + (\delta_{22}^{ст} + \delta_{22}^{дн}) \cdot X_2 + \Delta_{2p}^{ст} + \Delta_{2p}^{дн} = 0 \end{cases} \quad (3.15)$$

При этом считаем, что днище абсолютно жёсткое и неподвижное в горизонтальном направлении, учитываем, что от действия момента и горизонтальной нагрузки днище не деформируется в горизонтальном направлении, т.е.:

$$\delta_{12}^{дн} = \delta_{21}^{дн} = \delta_{22}^{дн} = \Delta_{2p}^{дн} = 0 \quad (3.16)$$

Тогда уравнения примут вид:

$$\begin{cases} (\delta_{11}^{ст} + \delta_{11}^{дн}) \cdot X_1 + \delta_{12}^{ст} \cdot X_2 + \Delta_{1p}^{ст} + \Delta_{1p}^{дн} = 0 \\ \delta_{21}^{ст} \cdot X_1 + \delta_{22}^{ст} \cdot X_2 + \Delta_{2p}^{ст} = 0 \end{cases} \quad (3.17)$$

Единичные перемещения стенки и днища зависят от их цилиндрической жёсткости и отпорности (условного коэффициента постели):

$$\delta_{11}^{ст} = \frac{1}{m_{ст} \cdot D_{ст}}, \quad (3.18)$$

$$\delta_{12}^{ст} = \delta_{21}^{ст} = -\frac{1}{2 \cdot m_{ст}^2 \cdot D_{ст}}, \quad (3.19)$$

$$\delta_{22}^{ст} = \frac{1}{2 \cdot m_{ст}^3 \cdot D_{ст}}, \quad (3.20)$$

$$\delta_{11}^{\text{дн}} = \frac{1 + \varphi^2 + 2 \cdot \Theta^2}{4 \cdot m_{\text{дн}} \cdot D_{\text{дн}}}, \quad (3.21)$$

где $m_{\text{ст}}$ и $m_{\text{дн}}$ – коэффициенты деформации стенки и днища соответственно:

$$m_{\text{ст}} = \sqrt[4]{\frac{K_{\text{ст}}}{4 \cdot D_{\text{ст}}}}, \quad (3.22)$$

$$m_{\text{дн}} = \sqrt[4]{\frac{K_{\text{дн}}}{4 \cdot D_{\text{дн}}}}, \quad (3.23)$$

где $K_{\text{ст}}$ и $K_{\text{дн}}$ – коэффициенты постели стенки и днища соответственно:

$$K_{\text{ст}} = \frac{E \cdot t_{\text{ст}}}{r^2}, \quad (3.24)$$

$t_{\text{ст}}$ – фактическая толщина стенки нижнего пояса, м; E – модуль упругости стали, $E=2,1 \cdot 10^5$ МПа= $2,1 \cdot 10^8$ кН/м².

Коэффициент постели днища принимается: для песчаного основания $K_{\text{дн}}=50-150$ Н/см³, для железобетонного фундамента (с учетом податливости), $K_{\text{дн}} = 300 - 500$ Н/см³, для фундамента под резервуары объемом более 50000 м³ $K_{\text{дн}}=2000-3000$ Н/см³.

$D_{\text{ст}}$ и $D_{\text{дн}}$ – цилиндрические жёсткости стенки и днища соответственно:

$$D_{\text{ст}} = \frac{E \cdot t_{\text{ст}}^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}, \quad (3.25)$$

$$D_{\text{дн}} = \frac{E \cdot t_{\text{дн}}^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}, \quad (3.26)$$

где ν – коэффициент Пуассона, для стали $\nu=0,3$; $t_{\text{дн}}$ – толщина окрайки днища, примем $t_{\text{дн}} = 0,01$ м.

Безразмерные коэффициенты определяются по следующим формулам:

$$\varphi = \Theta + \zeta, \quad (3.27)$$

$$\Theta = e^{-t} \cdot \cos(t), \quad (3.28)$$

$$\zeta = e^{-t} \cdot \sin(t), \quad (3.29)$$

$$t = m_{\text{дн}} \cdot c, \quad (3.30)$$

где s – величина свеса днища, назначается в пределах от 3 см для резервуара объемом 1000 м³ и до 8 см для резервуара объемом 75000 – 100000 м³.

Грузовые члены определяются величиной гидростатического давления жидкости и нагрузки от стенки, крыши и снега на ней:

$$\Delta_{1p}^{ст} = -\frac{\gamma_f \cdot \gamma_{ж}}{K_{ст}}, \quad (3.31)$$

$$\Delta_{2p}^{ст} = \frac{\gamma_f \cdot \gamma_{ж} \cdot H}{K_{ст}}, \quad (3.32)$$

Грузовой член $\Delta_{1p}^{дн}$ включает перемещения днища, возникающие от действия на него равномерно распределённого давления жидкости и сосредоточенного давления на днище массы покрытия и стенки T_1 :

$$\Delta_{1p}^{дн} = -\frac{\gamma_f \cdot \gamma_{ж} \cdot H + \gamma_f \cdot p_{изб}}{2 \cdot K_{дн}} \cdot m_{дн} \cdot (1 - \varphi \cdot \psi + 2 \cdot \Theta \cdot \zeta) + \frac{T_1}{2 \cdot m_{дн}^2 \cdot D_{дн}} \cdot \Theta^2, \quad (3.33)$$

где

$$T_1 = \zeta \cdot \frac{g_k + p_s}{2} \cdot r + \frac{G_{ст}}{2 \cdot \pi \cdot r}, \quad (3.34)$$

ζ - коэффициент, учитывающий, какая часть нагрузки от кровли передается на стенку;

$\zeta = 1$ - для сферической или щитовой кровли без центральной стойки;

$\zeta = 0,67$ - щитовое покрытие с центральной стойкой;

$\zeta = 0$ - висячая или плавающая кровля.

Неизвестные X_1 и X_2 определяются из решения канонического уравнения метода сил ф. 3.17.

Из канонических уравнений метода сил найдём:

$$M_1^{ст} = -X_1, \quad (3.35)$$

$$Q_1 = -X_2, \quad (3.36)$$

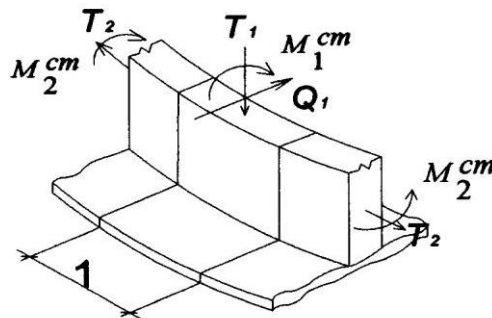


Рис. 3. Усилия в месте сопряжения стенки с днищем

Другие усилия находят из выражений:

$$M_2^{ct} = v \cdot M_1^{ct}, \quad (3.37)$$

$$T_2^0 = \frac{E \cdot t_{ct}}{2 \cdot r \cdot D_{ct} \cdot m_{ct}^3} \cdot (m_{ct} \cdot M_1^{ct} - Q_1), \quad (3.38)$$

$$T_2^1 = (\gamma_f \cdot \gamma_{ж} \cdot H + \gamma_f \cdot p_{изб}) \cdot r, \quad (3.39)$$

$$M_{дн} = \frac{M_1^{ct}}{2} \cdot (1 + \varphi^2) - \frac{T_1}{4 \cdot m_{дн}} \cdot (1 - 2 \cdot \Theta \cdot \zeta - \varphi \cdot \psi) - \frac{\gamma_f \cdot \gamma_{ж} \cdot H + \gamma_f \cdot p_{изб}}{2 \cdot m_{дн}^2} \cdot \zeta^2, \quad (3.40)$$

Кольцевые напряжения в стенке:

$$\sigma_2^{ct} = \frac{6 \cdot M_2^{ct}}{t_{ct}^2} + \frac{T_2^0}{t_{ct}} + \frac{T_2^1}{t_{ct}} \leq \gamma_c \cdot R_{wy}, \quad (3.41)$$

Вместе с тем, учитывая, что в резервуарах низкого давления и сравнительно небольшого объёма (до 20000 м³) T_1 мало, а в резервуарах повышенного давления подъёмная сила воспринимается анкерными креплениями, проверку прочности в данном случае можно вести только на воздействие момента:

$$\sigma_1 = \frac{6 \cdot M_1^{ct}}{t_{ct}^2} \leq \gamma_c \cdot R_{wy}, \quad (3.42)$$

Изгибное напряжение в днище:

$$\sigma_{дн} = \frac{6 \cdot M_{дн}}{t_{дн}^2} \leq \gamma_c \cdot R_{wy}, \quad (3.43)$$

где $\gamma_c = 1,6$.

Проверка прочности углового шва, прикрепляющего стенку к днищу, производится на одновременное воздействие поперечной силы и момента. Меридиональное усилие не учитывается ввиду сравнительной малости. Величиной катета шва предварительно задаются в пределах $0,3 \cdot t_{ct}$. Прочность проверяется по металлу шва и по границе сплавления. Представляя момент M_1^{ct} как произведение силы на плечо (рис. 4.) и распределяя поперечную силу на два шва, получаем условие прочности по металлу шва и границе сплавления соответственно:

$$\sqrt{\left(\frac{M_1^{ct}}{t_{ct}}\right)^2 + \left(\frac{Q_1}{2}\right)^2} \leq \beta_f \cdot k_f \cdot \gamma_{wf} \cdot R_{wf}, \quad (3.44)$$

$$\sqrt{\left(\frac{M_1^{ст}}{t_{ст}}\right)^2 + \left(\frac{Q_1}{2}\right)^2} \leq \beta_z \cdot k_f \cdot \gamma_{wz} \cdot R_{wz}, \quad (3.45)$$

где k_f – катет шва; β_f и β_z – коэффициенты для расчёта углового шва соответственно по металлу шва и по металлу границы сплавления, определяется по [1, п.11], для ручной сварки $\beta_f=0,7$, $\beta_z=1$; γ_{wf} и γ_{wz} – коэффициенты условий работы шва, определяется по [1, п.11], $\gamma_{wf}=1$, $\gamma_{wz}=1$; R_{wf} и R_{wz} – расчётные сопротивления угловых швов срезу (условному) по металлу шва и границы сплавления соответственно, определяется по [1].

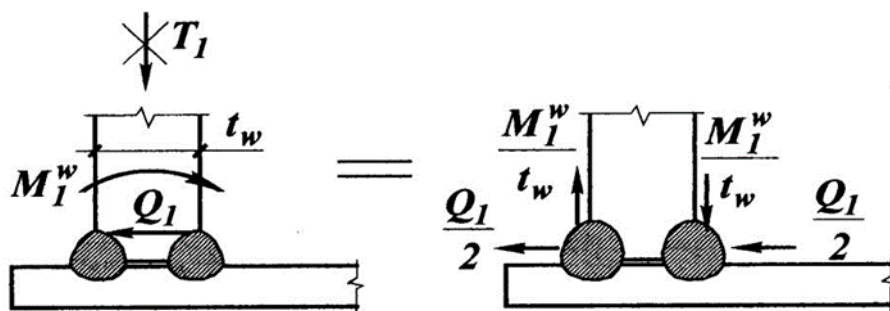


Рис. 4. Расчётная схема сварного шва, соединяющего стенку с дном

3.4 Расчёт стенки резервуара на устойчивость

Стенка незаполненного резервуара может потерять устойчивость под воздействием вертикальной нагрузки, параллельной её образующим (собственный вес, вес стенки, кровли и установленного на ней оборудования, теплоизоляция; снег и вакуум) и равномерного давления, нормального к боковой поверхности, вызывающего сжимающие усилия в кольцевом направлении (вакуум, ветер).

Суммарное продольное напряжение в стенке от расчетных нагрузок равно:

$$\sigma_1 = \frac{g_k + \psi \cdot (p_s + p_{\text{вак}})}{2 \cdot t_{ст, \min}} \cdot r + \frac{G_{ст}}{t_{ст, \min}} \quad (3.46)$$

где $t_{ст, \min}$ – минимальная толщина стенки.

В курсовом проекте ввиду отсутствия данных об устанавливаемом на кровле оборудовании и величине теплоизоляции, их не учитывают.

В общем случае определение напряжений и проверка устойчивости должна производиться для всех поясов стенки резервуара, однако практически проверку производят для нижней кромки верхнего участка стенки постоянной толщины.

Суммарные кольцевые напряжения в стенке резервуара со стационарной крышей от ветровой нагрузки и вакуума при её средней толщине:

$$\sigma_2 = \psi \frac{w_{\text{ст}} + p_{\text{вак}}}{t_{\text{сп}}} \cdot r \quad (3.47)$$

Действие ветровой нагрузки на стенку заменяется действием условного вакуума:

$$w_{\text{ст}} = 0,5 \cdot w_0 \cdot k \cdot \gamma_f \cdot c, \quad (3.48)$$

где w_0 – нормативное значение ветрового давления, определяется по [2], $w_0=0,6$ кПа; k – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте, определяется по прил. 1, γ_f – коэффициент надёжности по нагрузке, определяется по п.1; c – аэродинамический коэффициент, определяется по прил. 1.

Расчет на устойчивость стенки резервуара, подверженной одновременно воздействию меридиональной и кольцевой нагрузки, выполняется по формуле:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{\text{cr1}}} + \frac{\sigma_2}{\sigma_{\text{cr2}}} \leq \gamma_c, \quad (3.49)$$

где $\gamma_c = 1$; σ_{cr1} и σ_{cr2} – критические напряжения.

$$\sigma_{\text{cr1}} = \frac{c \cdot E \cdot t_{\text{crmin}}}{r}. \quad (3.50)$$

При $1220 \leq \frac{r}{t_{\text{crmin}}} < 2500$:

$$c = 0,085 - \frac{r}{t_{\text{crmin}} \cdot 10^5}. \quad (3.51)$$

При $0,5 \leq \frac{H}{r} \leq 10$:

$$\sigma_{\text{cr2}} = 0,55 \cdot E \cdot \frac{r}{H} \cdot \left(\frac{t_{\text{сп}}}{r} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (3.52)$$

Если условие устойчивости не выполняется из-за большой величины $\frac{\sigma_1}{\sigma_{\text{cr1}}}$, то стенку следует укреплять продольными ребрами жесткости, поставленными с шагом

$$b \leq \sqrt{20rt}, \quad (3.53)$$

что весьма трудоёмко, или увеличить толщину стенки.

Как правило, удобнее и экономичнее увеличивать толщину стенки на рассчитываемом уровне.

Если условие устойчивости не выполняется из-за большой величины σ_2 / σ_{cr2} , то стенку следует укрепить кольцевым ребром жесткости, расположив его на половине высоты стенки ($S_1 = S_2 = 0,5H$).

Пример развертки станки приведен в Приложении 2.

4 КОНСТРУИРОВАНИЕ ДНИЩА РЕЗЕРВУАРА

Вертикальные цилиндрические резервуары располагают на достаточно простых песчаных основаниях ввиду незначительности передаваемого на них давления. Уклон выполняется равным 1:100 для резервуаров объёмом 10 тыс. м³. Для резервуаров объёмом 10 000 м³ по периметру основания устраивают железобетонное монолитное кольцо.

Вертикальные цилиндрические резервуары имеют плоские днища, изготовленные из стальных листов толщиной 6 мм.

Днища резервуаров объёмом 10 000 м³ имеют центральную часть, которая состоит из двух районируемых полотнищ, изготовленных на заводе.

В резервуарах объёмом более 10 000 м³ окрайки получаются значительной толщины, что не позволяет равномерно сворачивать полотнища в рулон. Поэтому толстые окрайки днища поставляют из отдельных листов сегментной формы и приваривают к основным полотнам внахлест (30 мм). При рулонном исполнении днище резервуара состоит из двух полотен. Полотна свариваются из листов размерами 1500 x 6000 мм толщиной 6 мм.

Толщину листов окраек принимают 0,6...0,8 от толщины стенки, но не более 12...14 мм из-за возможных проблем сворачивания полотна днища при рулонном исполнении.

Расстояние от края днища (окраек) до стыков с более тонкими листами центральной части полотен должно быть не менее 1000 мм.

Сборку и сварку полотен на заводах выполняют на механизированных станах, где плоская большеразмерная заготовка сворачивается в многослойный габаритный рулон, удобный для перевозки к месту монтажа по железной дороге.

Пример днища резервуара приведен в Приложении 2.

5. РАСЧЁТ КРОВЛИ РЕЗЕРВУАРА

На практике распространены в основном щитовые конические крыши.

Щитовые крыши применяются в резервуарах с внутренним избыточным давлением в газовой подушке до 200 мм вод. ст. (2 кПа) и вакуумом до 25 мм вод. ст. (0,25 кПа). В резервуарах объёмом до 5000 м³ предпочтительнее устройство бесстоечной щитовой крыши, в резервуарах больших объёмов появляется необходимость в установке центральной стойки.

Крыша состоит из жестких щитов, покрытых стальной оболочкой и опирающихся на центральное кольцо, а по периметру - на стенку корпуса. Щиты изготавливают нескольких типов в зависимости от объема резервуара и распо-

ложения технологического оборудования. Каркас щитов выполняется из двутавров, швеллеров, уголков, в том числе гнутых. Листы кровли толщиной 2,5-3 мм крепят на каркас щита с напуском с одной стороны на ширину нахлестки.

Опорная стойка резервуара объёмом более 5000 м³ представляет собой колонну трубчатого сечения с диаметром равным 800 мм, устанавливаемую в центре днища. На оголовок колонны крепится центральное кольцо (центральный щит), опорную плиту колонны усиливают радиальными ребрами жесткости. При максимальном давлении паров нефтепродуктов (2 кПа) масса крыши и стойки могут оказаться недостаточными для уравновешения давления. Чтобы исключить, отрыв стойки от днища, трубу заполняют песком или тощим бетоном.

Все крыши по периметру опираются на стенку резервуара с использованием кольцевого элемента жёсткости. Минимальный размер кольцевого уголка 63 x 5 мм.

Расчёт стационарной крыши ведётся на несколько сочетаний нагрузок.

Первое сочетание (нагрузки, действующие сверху-вниз): собственный вес элементов кровли, вес стационарного оборудования, вес теплоизоляции, вес снегового покрова при симметричном и несимметричном распределении снега на крыше, внутренний вакуум в газовом пространстве резервуара.

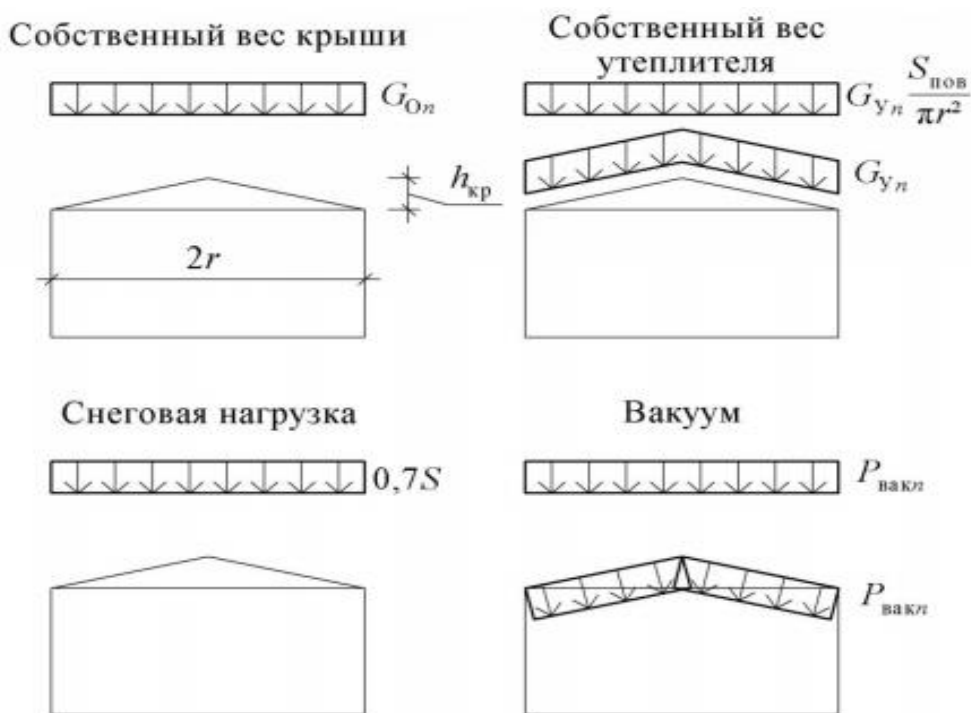


Рис. 5. Расчетные нагрузки, действующие на покрытие сверху вниз

Второе сочетание (нагрузки, действующие снизу-вверх): собственный вес элементов кровли, вес стационарного оборудования, вес теплоизоляции, избыточное давление и отрицательное давление ветра.

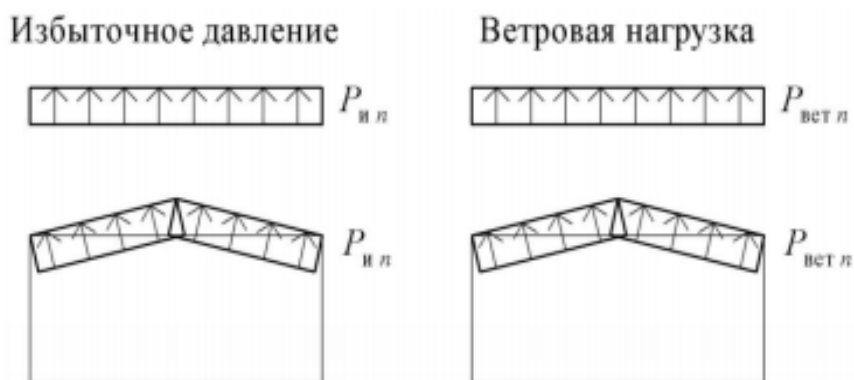


Рис. 6. Расчетные нагрузки, действующие на покрытие снизу вверх

Первое сочетание (нагрузки, действующие сверху-вниз), кН/м²:

$$q \downarrow = \gamma_f \cdot g_k + g_m + \psi (\gamma_f \cdot p_{\text{вак}} + s_g \cdot \mu) \quad (5.1)$$

Второе сочетание (нагрузки, действующие снизу-вверх), кН/м²:

$$q \uparrow = \psi (\gamma_f \cdot p_{\text{изб}} + \gamma_f \cdot w_{\text{ст}}) - g_k, \quad (5.2)$$

Из двух сочетаний выбирают большее и далее расчёт ведётся с этой нагрузкой.

5.1 Расчёт поперечных рёбер жёсткости

Поперечные рёбра работают как двух шарнирная балка с равномерно распределённой нагрузкой (на изгиб).

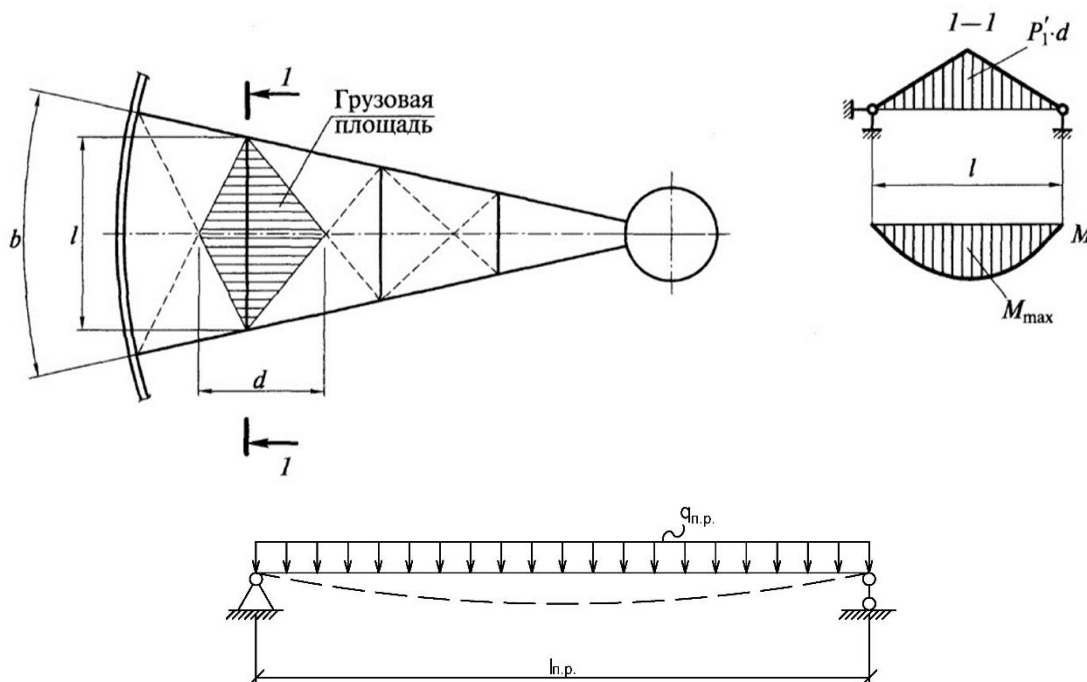


Рис. 7. Расчетная схема поперечного ребра

Нагрузка на поперечное ребро:

$$q_{п.р.} = q \cdot l_n, \quad (5.3)$$

где l_n – расчётная длина настила, которая принимается из условия жёсткости настила, толщина которого принимается 4 мм:

$$\left[\frac{f}{l_n} \right] = \frac{1}{n_0} = \frac{1}{150} \Rightarrow \Rightarrow n_0 = 150 \quad (5.4)$$

$$\frac{l_n}{t_n} = \frac{4 \cdot n_0}{15} \cdot \left(1 + \frac{72 \cdot E_1}{n_0^4 \cdot q_n^H} \right) \Rightarrow \quad (5.5)$$

$$l_n = \frac{4 \cdot n_0 \cdot t_n}{15} \cdot \left(1 + \frac{72 \cdot E_1}{n_0^4 \cdot q_n^H} \right), \quad (5.6)$$

где E_1 – приведённый модуль упругости:

$$E_1 = \frac{E}{1 - \nu^2}. \quad (5.7)$$

Нормативная нагрузка на настил:

$$q_n^H = \gamma_{ст} \cdot t_n + \psi \cdot (p_{вак} + s_g \cdot \mu), \quad (5.8)$$

Обычно расстояние между поперечными рёбрами щита принимают равным ширине листов (1,5 м).

Максимальный изгибающий момент в поперечном ребре, кН·м:

$$M_{п.р.} = \frac{q_{п.р.} \cdot l_{п.р.}^2}{8}, \quad (5.9)$$

где $l_{п.р.}$ – длина самого крайнего поперечного ребра, м.

Требуемый момент сопротивления:

$$W_{треб.} = \frac{M_{п.р.}}{R_y \cdot \gamma_c}, \quad (5.10)$$

По ГОСТ 8240-97. «Швеллеры стальные горячекатаные» примем ближайшее большее значение момента сопротивления W_x , см³. Для соответствующего номера швеллера выписываем момент инерции, см⁴.

Далее принятое сечение проверяется по условию жёсткости:

$$\frac{f}{l_{п.р.}} = \frac{8}{354} \cdot \frac{q_{п.р.}^H \cdot l_{п.р.}^3}{E \cdot I_x} \quad (5.11)$$

$$\frac{f}{l_{п.р.}} \leq \left[\frac{f}{l_{п.р.}} \right] = \frac{1}{200} \quad (5.12)$$

где $q_{п.р.}^H$ – нормативная нагрузка на поперечное ребро:

$$q_{п.р.}^H = q_{\downarrow}^H \cdot l_n \quad (5.13)$$

Если проверка сошлась, значит сечение подобрано верно. Если условие не выполнено, то выбирают швеллер следующего типоразмера и выполняют проверку повторно.

5.2 Расчёт радиальных рёбер жёсткости

Радиальное ребро рассматривается как балка на двух опорах.

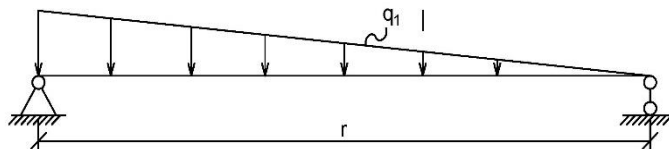


Рис. 8. Расчётная схема радиального ребра

Максимальный изгибающий момент, воспринимаемый одной радиальной балкой щита, кН·м:

$$M_{\max} = \frac{q_1 \cdot r^2}{9 \cdot \sqrt{3}} \quad (5.14)$$

где q_1 – нагрузка на 1 погонный метр длины щита у наружного контура покрытия, кН/м:

$$q_1 = q \downarrow \cdot b \quad (5.15)$$

Требуемый момент сопротивления для радиального ребра, см³ :

$$W_{\text{треб.}} = \frac{M_{\max}}{1,12 \cdot R_y \cdot \gamma_c} \quad (5.16)$$

По ГОСТ 57837–2017. «Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок» примем для балочного двутавра ближайшее большее значение момента сопротивления W_x , см³.

Принятое сечение проверяется по условию жёсткости:

$$\frac{f_{\max}}{r} = 0,0065 \cdot \frac{q_1^H \cdot r^3}{E \cdot I_x}, \quad (5.17)$$

$$\frac{f_{\max}}{r} \leq \left[\frac{f_{\max}}{r} \right] = \frac{1}{250}, \quad (5.18)$$

где q_1^H – нормативная нагрузка на 1 погонный метр длины щита у наружного контура покрытия:

$$q_1^H = q_{\downarrow}^H \cdot b \quad (5.19)$$

Если проверка сошлась, значит сечение подобрано верно. Если проверка не сошлась, значит выбираем сечение с большим моментом сопротивления и выполняют проверку повторно.

Пример днища резервуара приведен в Приложении 2.

6. ОФОРМЛЕНИЕ ТЕКСТОВОЙ И ГРАФИЧЕСКОЙ ЧАСТИ РАБОТЫ

Курсовая работа должна быть отпечатана на стандартных листах белой писчей бумаги формата А4 (210 х 297 мм). Текст размещается на одной стороне печатного листа.

Текст расчетно-пояснительной записки курсовой работы рекомендуется оформлять в соответствии с [10, 11].

При оформлении пояснительной записки используют гарнитуры шрифта Times New Roman размером 14 для основного текста и размером 12 для приложений, примечаний, сносок и примеров.

В нижней части рамки располагается основная надпись установленной формы. При этом на первой странице «Содержание» приводится основная надпись высотой 40 мм, а на всех остальных – высотой 15 мм.

Графическая часть выполняется на одной стороне белой чертёжной бумаги в соответствии с требованиями [11] формата А1 (594х841).

В графической части работы изображение и условные обозначения выполняют линиями по ГОСТ 2.303-68 ЕСКД «Линии».

Основная надпись на чертеже выполняется по форме 3 ГОСТ Р 21.101-2020 [10].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СП 16.13330.2017 «СНиП II-23-81. Стальные конструкции».
2. СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия».
3. ПБ 03-605-03. «Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. М.: Госгортехнадзор России, 2003.
4. ГОСТ 31385 – 2016. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов.
5. СТО-СА-03-002-2009 Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов
6. Панин, А.В. Вертикальные цилиндрические резервуары. Расчёт и проектирование: учеб. пособие / А.В. Панин; Воронежский ГАСУ. – Воронеж, 2015. – 96 с.
7. ГОСТ 8240-97. Швеллеры стальные горячекатаные.
8. ГОСТ 57837–2017. Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок.
9. Лапшин, А. А. Конструирование и расчёт вертикальных цилиндрических резервуаров низкого давления : учебное пособие / А. А. Лапшин, А. И. Колесов, М. А. Агеева; Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т. – Н. Новгород, ННГАСУ, 2009. – 122 с.
10. ГОСТ Р 2.105-2019 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Общие требования к текстовым документам: дата введения 2020-02-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 35 с.
11. ГОСТ Р 21.101-2020 Система проектной документации для строительства. Основные требования к проектной и рабочей документации : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2019-07-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 124 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Справочные данные

Таблица П.1.1

Сумма приведенных толщин кровли и днища

$V_p, \text{ м}^3$	2000	4000	8000	10000	12000	16000	20000	50000
$\Delta, \text{ см}$	0,9	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	2,0

Таблица П.1.2

Нормативные и расчетные сопротивления при растяжении, сжатии и изгибе листового, широкополосного универсального, сортового проката и труб

Сталь	Толщина проката, мм	Нормативное сопротивление проката и труб, Н/мм		Расчетное сопротивление* проката и труб, МПа	
		R_{yn}	R_{un}	R_y	R_u
C235	От 2,0 до 4,0 включ.	235	360	230 / 225	350 / 345
C245	От 2,0 до 20 включ.	245	370	240 / 235	360 / 350
C255	От 2,0 до 3,9 включ.	255	380	250 / 245	370 / 360
	" 4,0 " 10 "	245	380	240 / 235	370 / 360
	Св. 10 до 20 "	245	370	240 / 235	360 / 350
	" 20 до 40 "	235	370	230 / 225	360 / 350
C345	От 2,0 до 10 включ.	345	490	340 / 330	480 / 470
C345К	От 4,0 до 10 включ.	345	470	340 / 330	460 / 450
C355	От 8,0 до 16 включ.	355	490	350 / 340	460 / 450
	" 16 " 40 "	345	490	340 / 330	460 / 450
	" 40 " 60 "	335	490	330 / 320	460 / 450
	" 60 " 80 "	325	490	320 / 310	460 / 450
	" 80 " 100 "	315	470	310 / 300	460 / 450
	" 100 " 160 "	295	470	285 / 280	460 / 450
C355-1; C355-К	От 8,0 до 16 включ.	345	490	350 / 340	460 / 450
	" 16 " 40 "	345	490	340 / 330	460 / 450
	" 40 " 50 "	335	490	330 / 320	460 / 450
C355П	От 8,0 до 16 включ.	355	490	350 / 340	460 / 450
	" 16 " 40 "	345	490	340 / 330	460 / 450
C390; C390-1	От 8,0 до 50 включ.	390	520	380 / 370	505 / 495
C440	От 8,0 до 50 включ.	440	540	430 / 420	525 / 515
C550	От 8,0 до 50 включ.	540	640	525 / 515	625 / 610

* В числителе приведены значения расчетных сопротивлений проката по нормативной документации, в которой используется статистическая процедура контроля свойств проката ($\gamma_m=1,025$); в знаменателе - расчетное сопротивление остального проката при $\gamma_m=1,050$.

Таблица П.1.3

Значения коэффициент надежности по ответственности

Класс опасности	Коэффициент надежности по ответственности, γ_n
1	1,20
2	1,10
3	1,05
4	1,00

Таблица П.1.4

Значения коэффициента условий работы γ_c

Элементы конструкций резервуаров	Коэффициент условий работы γ_c
Стенка резервуаров при расчете на прочность	по таблице П2.3
Сопряжение стенки с крышей	1,0
То же, при расчете на устойчивость	1,0
Стационарные и плавающие крыши	0,9
Верхние кольца жесткости крыш резервуаров при расчете на прочность и устойчивость	0,9
Врезки в стенку резервуара	1,0
Остальные элементы конструкций	1,0

Таблица П.1.5

Значения коэффициента условий работы γ_c стенки

№ пояса	Коэффициент условий работы поясов стенки, γ_c	
	в условиях эксплуатации	в условиях гидравлических испытаний
1-ый	0,7	0,9
Все, кроме 1-го	0,8	0,9
Уторный узел	1,2	1,2

Таблица П.1.6

Геометрические объёмы (м³) резервуаров
рекомендуемого параметрического ряда (выборка)

Высота стенки, м	Внутренний диаметр стенки, м							
	20,92	22,80	28,50	34,20	39,90	45,60	50,70	55,80
12,0	4125	4899	7655	11024	15004			
13,5		5512	8612	12402	16880			
15,0		6124	9569	13779	18775	24497		
16,5			10526	15157	20631	26947		
18,0			11483	16535	22507	29396	36539	44018
19,5				17913	24382	31846	39368	47686
21,0					26258	34296	42396	51354
24,0					30009	39495	48453	

Таблица П.1.7

Значение коэффициента, учитывающего изменение ветрового давления по высоте

Высота z , м	Коэффициент k для типов местности		
	А	В	С
5	0,75	0,5	0,4
10	1,0	0,65	0,4
20	1,25	0,85	0,55
40	1,5	1,1	0,8
60	1,7	1,3	1,0
80	1,85	1,45	1,15
100	2,0	1,6	1,25
150	2,25	1,9	1,55
200	2,45	2,1	1,8
250	2,65	2,3	2,0
300	2,75	2,5	2,2

Таблица П.1.8

Вес покрытия, площадок ограждения и оборудования

Объем резервуара V , м ³	1000	5000	10000	20000	30000	50000
Вес крыши и оборудования, g_k , кН/м ²	0,3	0,35	0,45	0,55	0,60	0,65

Таблица П.1.9

Аэродинамический коэффициент

$\frac{H}{2R}$	0,17	0,25	0,5	1,0	2,0
C_1	0,5	0,55	0,7	0,8	0,9

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Графическая часть курсовой работы

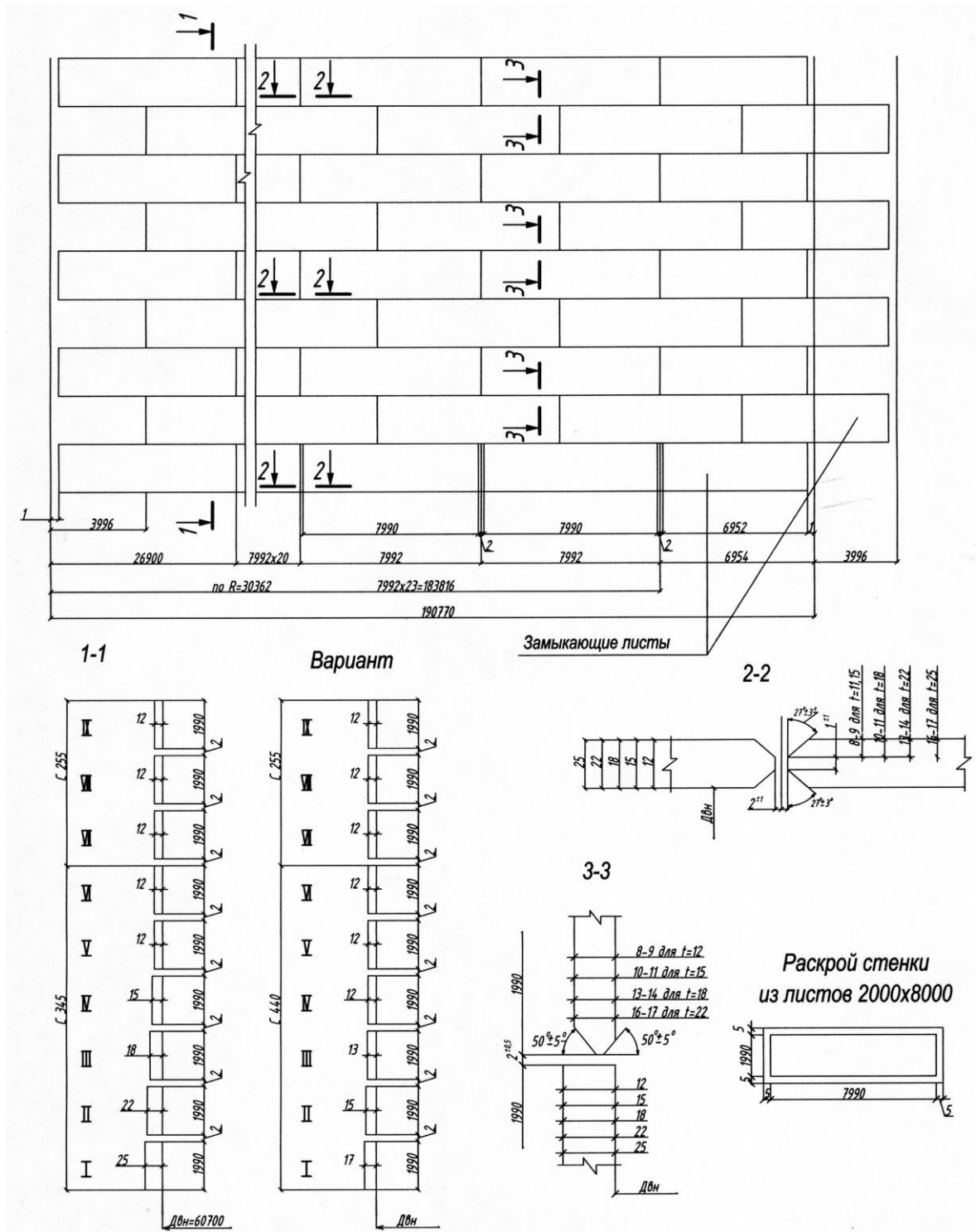


Рис. П.2.1. Развёртка стенки полистовой сборки резервуара объёмом 50000 м³

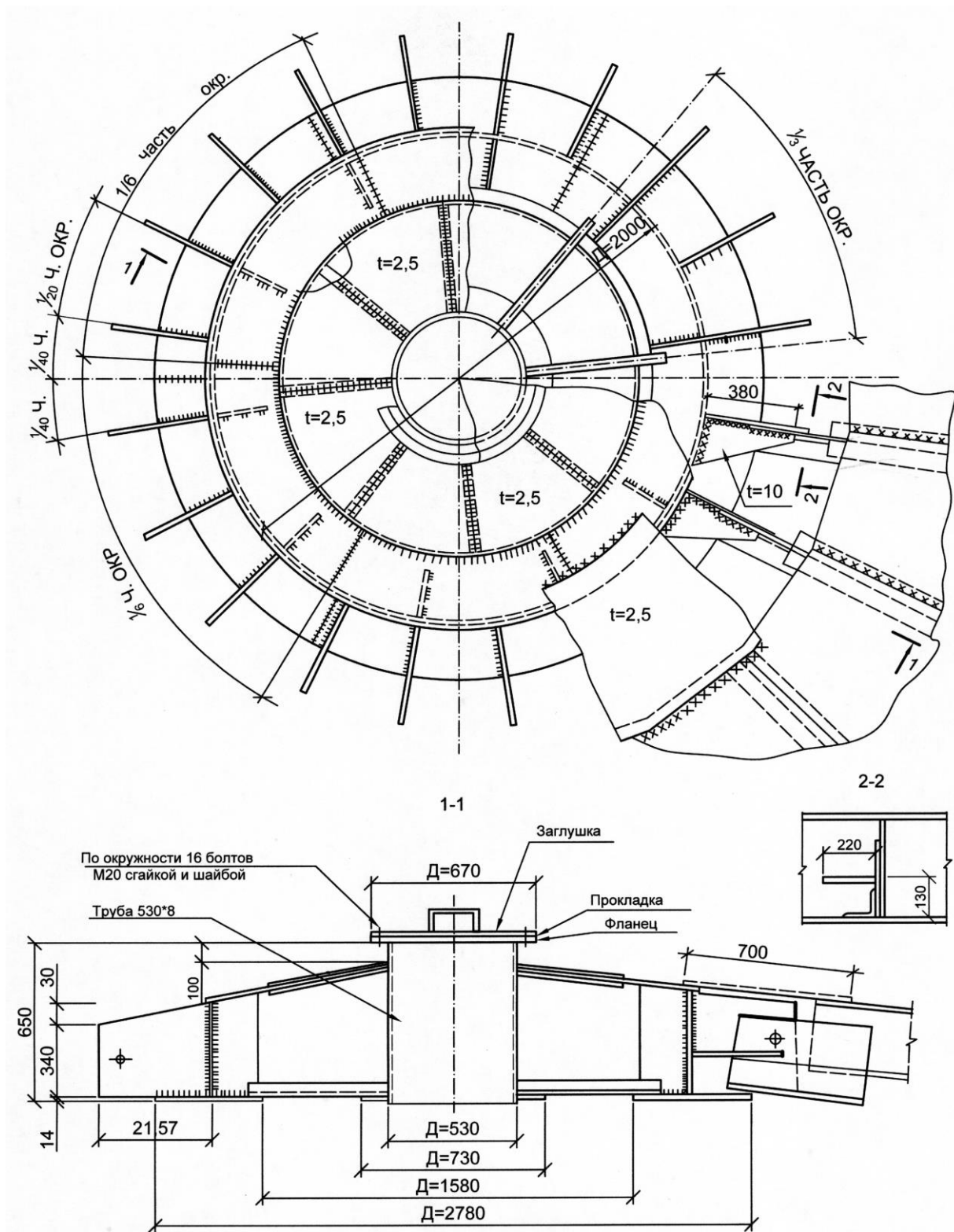


Рис. П.2.3. Центральное кольцо бесстоечного щитового покрытия резервуара объёмом 5000 м³

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. Исходные данные и общие положения расчёта	3
2. Назначение генеральных размеров	4
3. Расчет стенки резервуара	5
3.1 Определение толщины стенки резервуара	6
3.2 Проверка прочности стенки	7
3.3 Определение усилий и проверка прочности в месте сопряжения стенки и днища резервуара	8
3.4 Расчёт стенки резервуара на устойчивость	14
4. Конструирование днища резервуара	16
5. Расчёт кровли резервуара	16
5.1 Расчёт поперечных рёбер жёсткости	18
5.2 Расчёт радиальных рёбер жёсткости	20
6 Оформление текстовой и графической части работы	21
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	22
Приложение 1. Справочные данные	23
Приложение 2. Графическая часть курсовой работы	27

РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению курсовой и практической работ
по дисциплине «Проектирование и строительство нефтехранилищ»
для студентов направления 21.03.01 «Нефтегазовое дело»
всех форм обучения

Составители:

Панин Анатолий Васильевич
Чуйкин Сергей Владимирович
Долбилова Марина Александровна

В авторской редакции

Подписано к изданию 14.06.2022.

Уч.-изд. л. 1,6.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет»
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84