

## Практическая работа №24

**Тема:** Расчет сварных соединений резервуара

**Цель:** Научиться проводить расчет на прочность и стойкость цилиндрического резервуара

### **Порядок выполнения:**

1. Ознакомиться с теоретическими сведениями
2. Провести расчет на прочность и стойкость цилиндрического резервуара в соответствии с вариантом
3. Ответить на контрольные вопросы в **письменном** виде
4. Представить **отчет по практической работе и ответы** на контрольные вопросы в электронном виде на проверку в течение трех дней со дня выдачи задания.

С уважением, *Гнатюк Ирина Николаевна.*

При необходимости вопросы можно задать по телефону: 072-136-54-46

Работы отправлять на электронную почту [ira.gnatyuk.60@inbox.ru](mailto:ira.gnatyuk.60@inbox.ru)

### **Теоретические сведения**

#### **Общие указания к проведению расчета**

- Принимаем, что резервуар изготовлен из рулона путем контактного стыка отвесного шва с помощью стыкового шва, выполненного одним из способов сварки (согласно варианту задания) при условии  $R_{wy} < R_y$
- Расчетное сопротивление стыкового шва определяется из зависимости  $R_{wy} = 0,85 R_y$ , МПа
- Расчетное сопротивление углового шва стыка стенки с днищем на срез по металлу шва  $R_{wf}$  определяется по таблице (см. табл. 1),
- $R_y$  (расчетное сопротивление проката) определяется по границе текучести, (см. табл. 2)
- Модуль упругости для постоянные  $E = 2,06 \cdot 10^5$  МПа ( $= 2,06 \cdot 10^4$  кН/см<sup>2</sup>)
- Расчет проводится для более нагруженного нижнего пояса.

#### **Порядок расчета**

1. Проверка прочности резервуара за кольцевым направлением  
Кольцевое напряжение в стенке возле дна резервуара ( $b = h$ ):

$$\sigma_2 = \frac{(v_1 * \rho * y + v_2 P)r}{t} \leq v_c * R_{wy}, \quad \text{МПа}$$

где  $v_1 = 1,1$  – коэффициент надежности для нагрузки от гидростатического давления

$v_2 = 1,2$  - коэффициент надежности для нагрузки от давления газов

$v_c = 0,8$  – коэффициент условий работы

$b = h$  - расстояние от уровня жидкости к расчетному сечению, см

## 2. Проверка устойчивости стенки резервуара

Проводим расчет в меридиональном направлении от нагрузки вакуума  $P_H$  и расчетной нагрузки от покрытия  $P_{II}$

Продольная сила, которая приходится на 1 см длины кольцевого сечения резервуара с учетом грузовой площади:

$$N = 0,25 \cdot r \cdot (P_H + P_{II}), \quad \text{кН}$$

Определение меридионального напряжения в стенке:  $\sigma_1 = \frac{N}{t}$ , кН/см<sup>2</sup>

Критическое напряжение в меридиональном направлении

$\sigma_{cr1}$  равняется меньшему из значений

$$\Psi \cdot R_y \quad \text{или} \quad \frac{c \cdot E \cdot t}{r}$$

Прежде всего необходимо определить, какие коэффициенты ( $\Psi$  и  $c$ ) надо использовать при расчетах.

Если  $\frac{r}{t} \geq 300$ , то  $\Psi$  не учитывается в расчетах

Если  $\frac{r}{t} \leq 300$ , то  $\Psi$  учитывается и определяется по таблице (см. табл. 6).

Значение коэффициента  $C$  в зависимости от соотношения  $\frac{r}{t}$  определяется по таблице (см. табл. 3).

Критическое напряжение в кольцевом направлении

$$\sigma_{cr2} = 0,55 \cdot \left( \frac{r}{h} \right) \left( \frac{t}{r} \right)^{3/2}, \quad \text{если} \quad 0,5 \leq \frac{h}{r} < 10$$

$$\sigma_{cr2} = 0,17 \cdot \left( \frac{t}{r} \right)^2, \quad \text{если} \quad \frac{h}{r} \geq 20$$

Кольцевое напряжение в стенке от вакуума:  $\sigma_2 = \frac{P_H \cdot r}{t} \leq \sigma_{cr2}$ , кН/см<sup>2</sup>

## 3. Проверка прочности стыка:

Определение упругой характеристики стенки  $\alpha = \frac{1,29}{\sqrt{r \cdot t}}$

### 3.2. Изгибающий момент

$$M = \frac{v_2 \cdot P + v_1 \cdot \rho \cdot h}{2\alpha^2}, \quad \text{кНсм}$$

### 3.3. Поперечная сила

$$Q = \frac{v_2 \cdot P + v_1 \cdot \rho \cdot h}{\alpha}, \quad \text{кН}$$

3.4. Определение расчетного сжимающего усилия в стенке резервуара от покрытия, приходящегося на 1 см длины кольцевого сечения

$$N = 0,25 \cdot r \cdot P_{II}, \quad \text{кН.}$$

3.5. Определение максимального напряжения в стенке в меридиональном направлении в месте стыка с днищем:

$$\sigma = \frac{N}{t} + \frac{6M}{t^2} \leq v_c R_y ,$$

$v_c = 1,2$  – коэффициент условий работы

4. Расчет сварных швов:

Принимаем двусторонний угловой шов минимальной толщины  $k_f = t$

4.1. Определение расчетной ширины сечения швов:

$$b_{wf} = \beta_f k_f , \text{ см}$$

где  $\beta_f$  – коэффициент, зависящий от способа сварки (см. табл.4):

- для ручной сварки  $\beta_f = 0,7$
- для автоматической и полуавтоматической сварки проволокой сплошного сечения  $\beta_f = 0,9$
- для полуавтоматической сварки порошковой проволокой  $\beta_f = 0,8$

4.2. Определение площади сечения двух швов:

$$A_{wf} = 2 \cdot \beta_f k_f \cdot l_w , \text{ см}^2$$

где  $l_w = 1$  см – расчетная длина шва

4.3. Определение момента инерции швов относительно оси X:

$$J_x = 2 \left( \frac{l_w \cdot b_{wf}^2}{12} + l_w \cdot b_{wf} \cdot y^2 \right) , \text{ см}^4$$

$$b = (l_w - t) \cdot 2 \cdot b_{wf} , \text{ см}$$

4.4. Определение момента сопротивления швов:

$$W_f = \frac{J}{y_{\max}} , \text{ см}^3$$

где  $y_{\max} = y + \frac{b_{wf}}{2}$  – расстояние от оси , см

4.5. Определение несущей способности сварного шва:

$$\sqrt{\left(\frac{M}{W_f}\right)^2 + \left(\frac{Q}{\beta_f \cdot k_f \cdot l_w}\right)^2} \leq R_{wf} \cdot v_{wf} \cdot v_c$$

$$v_{wf} = 1,0, \quad v_c = 1,2$$

Таблица 1

Нормативные расчетные сопротивления металла швов сварных соединений с угловыми швами

Сварочные материалы		$R_{wun}$	$R_{wf}$
Тип электрода ( по ГОСТ 9467-75)	Марка проволоки	МПа	
Э42, Э42А, Э46, Э46А, Э50, Э50А	СВ.08, СВ.08А,	410	180
	СВ.08ГА,	450	200
	СВ.10ГА, СВ.08Г2С, СВ.08Г2СЦ, ПП-АН8, ПП-АН3	490	215
Э60	СВ.08Г2С*, СВ.08Г2СЦ*, Св.10НМА, Св.10Г2	590	240
Э710	Св.10ХГ2СМА, Св. 08ХН2ГМЮ	685	280
Э85	-	835	340

Примечание:

\* - только для однопроходных швов с катетом  $k_f \leq 8\text{мм}$  в конструкциях из стали с пределом текучести 440 МПа и более

Таблица 2

Расчетные сопротивления листового проката для стальных конструкций

Марка стали	Толщина проката, мм	Расчетное сопротивление, МПа	
		Предел текучести	Временное сопротивление
09Г2	4...10	310	440
	11...20	300	430
ВСтЗкп1	4...10	220	345
	11...20	210	340
10Г2С1	4...9	330	465
	10...20	320	455
18пс	4...20	230	360
14Г2	4...9	320	440
	10...32	310	430

Таблица 3

Значение коэффициента С

r/t	c	r/t	c	r/t	c
50	0,30	400	0,15	1000	0,08
100	0,22	600	0,11	1500	0,07
200	0,18	800	0,10	2500	0,06
300	0,16	900	0,09		

Таблица 4

Значения коэффициентов  $\beta_f$  и  $\beta_z$

Сварка	Диаметр сварочной проволоки d, мм	Положение шва	Коэффициент	Значения $\beta_f$ и $\beta_z$ при катетах швов, мм			
				3-8	9-12	14-16	18 и более
Автоматическая	3-5	В «лодочку»	$\beta_f$	1,1			1,07
			$\beta_z$	1,15			1,0
		Нижнее	$\beta_f$	1,1	0,9	0,7	
			$\beta_z$	1,15	1,05	1,0	
Автоматическая и полуавтоматическая	1,4-2	В «лодочку»	$\beta_f$	0,9	0,8	0,7	
			$\beta_z$	1,05		1,0	
		Нижнее	$\beta_f$	0,9	0,8	0,7	
			$\beta_z$	1,05	1,0		
Ручная полуавтоматическая поволокой: - сплошного сечения - порошковой	Более 1,4 -	В лодочку, нижнее, горизонтальное, вертикальное	$\beta_f$	0,7			
		потолочное	$\beta_z$	1,0			

## Задание для практической работы

Проверить прочность и стойкость стенки стального резервуара. Радиус оболочки резервуара  $r$ , высота резервуара  $H$ , уровень жидкости в резервуаре  $h$ , толщина поясов стенки  $t$ . Удельный вес жидкости  $\rho = 9 \text{ кН/м}^3$  ( $9 \cdot 10^{-6} \text{ кН/см}^3$ ). Избыточное внутреннее давление паров  $P = 0,02 \text{ МПа}$ , вакуум  $P_{\text{н}} = 0,002 \text{ МПа}$ . Расчетная нагрузка от покрытия резервуара  $P_{\text{п}} = 0,015 \text{ МПа}$ . Коэффициент надежности по назначению  $\gamma = 1$

### Исходные данные по вариантам

№ вар.	$r$ , мм	$H$ , мм	$h$ , мм	$t$ , мм	Материал	Способ сварки
1	1800	2900	3300	4	09Г2	автоматическая
2	1900	3000	3400	4	18пс	ручная(Э42А)
3	2000	3100	3500	5	ВСт3кп1	п/а (проволока)
4	2100	3200	3600	5	14Г2	автоматическая
5	2200	3300	3700	6	10Г2С1	ручная(Э42А)
6	2300	3400	3800	6	09Г2	п/а (проволока)
7	2400	3500	3900	4	18пс	автоматическая
8	2500	3600	4000	4	ВСт3кп1	ручная(Э42А)
9	2600	3700	4100	5	14Г2	п/а (проволока)
10	2700	3800	4200	5	10Г2С1	автоматическая
11	2800	3900	4300	6	09Г2	ручная(Э42А)
12	2900	4000	2900	6	18пс	п/а (проволока)
13	3000	4100	3000	4	ВСт3кп1	автоматическая
14	3100	4200	3100	4	14Г2	ручная(Э42А)
15	3200	4300	3200	5	10Г2С1	п/а (проволока)
16	1800	2900	3300	5	09Г2	автоматическая
17	1900	3000	3400	6	18пс	ручная(Э42А)
18	2000	3100	3500	6	ВСт3кп1	п/а (проволока)
19	2100	3200	3300	4	14Г2	автоматическая
20	2200	3300	3400	4	10Г2С1	ручная(Э42А)
21	2300	3400	3500	5	09Г2	п/а (проволока)
22	2400	3500	3600	5	18пс	автоматическая
23	2500	3600	3700	6	ВСт3кп1	ручная(Э42А)
24	2600	3700	3800	6	14Г2	п/а (проволока)
25	2700	3800	3900	4	10Г2С1	автоматическая
26	2800	3900	4000	4	09Г2	ручная(Э42А)
27	2900	4000	4100	5	18пс	п/а (проволока)
28	3000	4100	4200	5	ВСт3кп1	автоматическая
29	3100	4200	4300	6	14Г2	ручная(Э42А)
30	3200	4300	2900	6	10Г2С1	п/а (проволока)

### Пример выполнения практической работы

Проверить прочность и стойкость стенки стального резервуара. Радиус оболочки резервуара  $r = 4300 \text{ мм}$ , высота резервуара  $H = 7300 \text{ мм}$ , уровень жидкости в резервуаре  $h = 7000 \text{ мм}$ , толщина поясов стенки  $t = 4 \text{ мм}$ .

Удельный вес жидкости  $\rho = 9 \text{ кН/м}^3$  ( $9 \cdot 10^{-6} \text{ кН/см}^3$ ). Избыточное внутреннее давление паров  $P = 0,02 \text{ МПа}$ , вакуум  $P_{\text{н}} = 0,002 \text{ МПа}$ . Расчетная нагрузка от покрытия резервуара  $P_{\text{п}} = 0,015 \text{ МПа}$ . Коэффициент надежности по назначению  $\nu_{\text{т}} = 1$ . Конструкция изготовлена с постоянные ВстЗпсб-1.

### Решение

Расчетное сопротивление проката  $R_y = 230 \text{ МПа}$

Расчетное сопротивление стыкового шва

$$R_{\text{wy}} = 0,85 R_y = 0,85 \cdot 230 = 196 \text{ МПа}$$

Расчетное сопротивление углового шва на срез по металлу шва

$$R_{\text{wf}} = 180 \text{ МПа}$$

1. Определение кольцевого напряжения в стенке возле дна резервуара ( $b = h$ ):

$$\sigma_2 = \frac{(\nu_1 \cdot \rho \cdot y + \nu_2 P)r}{t} = \frac{(1,1 \cdot 9 \cdot 10^{-6} \cdot 700 + 1,2 \cdot 0,002) \cdot 430}{0,4} = 10 < \nu_c \cdot R_{\text{wy}} = 0,8 \cdot 196 = 157 \text{ МПа}$$

где  $\nu_1 = 1,1$  – коэффициент надежности для нагрузки от гидростатического давления

$\nu_2 = 1,2$  – коэффициент надежности для нагрузки от давления газов

$\nu_c = 0,8$  – коэффициент условий работы

$b = h$  – расстояние от уровня жидкости к расчетному сечению, см

Условие прочности резервуара за кольцевым направлением выполняется.

2. Определение продольной силы, которая приходится на 1 см длины кольцевого сечения резервуара с учетом грузовой площади:

$$N = 0,25r(P_{\text{н}} + P_{\text{п}}) = 0,25 \cdot 430(0,0002 + 0,0015) = 0,18 \text{ кН}$$

3. Определение меридионального напряжения в стенке:

$$\sigma_1 = \frac{N}{t} = \frac{0,18}{0,4} = 0,45 \text{ кН/см}^2$$

4. Определение критического напряжения в меридиональном направлении:

Критическое напряжение  $\sigma_{\text{сг}1}$  равняется меньшему из значений

$$\Psi \cdot R_y \quad \text{или} \quad \frac{c \cdot E \cdot t}{r}$$

$$\frac{r}{t} = \frac{430}{0,4} = 1075 > 300, \text{ поэтому коэффициент } \Psi \text{ не учитывается в расчетах}$$

Значение коэффициента  $C$  в зависимости от соотношения  $\frac{r}{t}$  определяется по таблице (см. табл. 3). Принимаем  $c = 0,08$

5. Определение критического напряжения в кольцевом направлении

$$\frac{h}{r} = \frac{700}{430} = 1,62$$

$$\sigma_{\text{ср}2} = 0,55 \Theta \left( \frac{r}{h} \right) \left( \frac{t}{r} \right)^{3/2}, \text{ так как } 0,5 \leq \frac{h}{r} < 10$$

$$\sigma_{\text{ср}2} = 0,55 \Theta \left( \frac{r}{h} \right) \left( \frac{t}{r} \right)^{3/2} = 0,55 \cdot 2,06 \cdot 10^4 \left( \frac{430}{730} \right) \left( \sqrt{\left( \frac{0,4}{430} \right)^3} \right) = 0,21 \text{ кН/см}^2 = 2,1 \text{ МПа}$$

6. Определение кольцевого напряжения в стенке от вакуума:

$$\sigma_2 = \frac{P_H \cdot r}{t} = \frac{0,0002 \cdot 430}{0,4} = 0,21 \text{ кН/см}^2 = 2,1 \text{ МПа} \leq \sigma_{cr2}, \text{ кН/см}^2$$

7. Определение упругой характеристики стенки

$$\alpha = \frac{1,29}{\sqrt{r \cdot t}} = \frac{1,29}{\sqrt{430 \cdot 0,4}} = 0,098$$

8. Изгибающий момент

$$M = \frac{\nu_2 \cdot P + \nu_1 \cdot \rho \cdot h}{2\alpha^2} = \frac{1,2 \cdot 0,002 + 1,1 \cdot 9 \cdot 10^{-6} \cdot 700}{2 \cdot 0,098^2} = 0,49 \text{ кН}\cdot\text{см}$$

9. Поперечная сила

$$Q = \frac{\nu_2 \cdot P + \nu_1 \cdot \rho \cdot h}{\alpha} = \frac{1,2 \cdot 0,002 + 1,1 \cdot 9 \cdot 10^{-6}}{0,098} = 0,1 \text{ кН}$$

10. Определение расчетного сжимающего усилия в стенке резервуара от покрытия, которое приходится на 1 см длины кольцевого сечения

$$N = 0,25 \cdot r \cdot P_H = 0,25 \cdot 430 \cdot 0,0015 = 0,16 \text{ кН.}$$

11. Определение максимального напряжения в стенке в меридиональном направлении в месте стыка с днищем:

$$\sigma = \frac{N}{t} + \frac{6M}{t^2} = \frac{0,16}{0,4} + \frac{6 \cdot 0,49}{0,4^2} = 18,8 \text{ кН/см}^2 = 188 \text{ МПа} \leq \nu_c \cdot R_y =$$

$$= 1,2 \cdot 230 = 276 \text{ МПа},$$

$\nu_c = 1,2$  – коэффициент условий работы

12. Расчет сварных швов:

Принимаем двусторонний угловой шов минимальной толщины  $k_f = t = 4 \text{ мм}$

13.. Определение расчетной ширины сечения швов:

$$b_{wf} = \beta_f \cdot k_f = 0,7 \cdot 0,4 = 0,28 \text{ см}$$

где  $\beta_f$  – коэффициент, который зависит от способа сваривания (см. табл..4):  
для ручной сварки  $\beta_f = 0,7$

14. Определение площади сечения двух швов:

$$A_{wf} = 2 \cdot \beta_f \cdot k_f \cdot l_w = 2 \cdot 0,7 \cdot 0,4 \cdot 1 = 0,56 \text{ см}^2$$

где  $l_w = 1 \text{ см}$  – расчетная длина шва

15. Определение момента инерции швов относительно оси X:

$$J_x = 2 \left( \frac{l_w \cdot b_{wf}^2}{12} + l_w \cdot b_{wf} \cdot y^2 \right) = 2 \left( \frac{1 \cdot 0,28^3}{12} + 1 \cdot 0,28 \cdot 0,34^2 \right) = 0,068 \text{ см}^4$$

$$b = (l_w - t) \cdot 2 \cdot b_{wf} = (1 - 0,4) \cdot 2 \cdot 0,28 = 0,34 \text{ см}$$

16. Определение момента сопротивления швов:

$$W_f = \frac{J}{y_{\max}} = \frac{0,068}{0,48} = 0,44 \text{ см}^3$$

$$\text{где } y_{\max} = y + \frac{b_{wf}}{2} = 0,34 + \frac{0,28}{2} = 0,48 \text{ см} - \text{расстояние от оси}$$

17. Определение несущей способности сварного шва:

$$\sqrt{\left( \frac{M}{W_f} \right)^2 + \left( \frac{Q}{\beta_f \cdot k_f \cdot l_w} \right)^2} = \sqrt{\left( \frac{0,49}{0,14} \right)^2 + \left( \frac{0,1}{0,28 \cdot 1} \right)^2} = 3,5 \text{ кН/см}^2 \leq R_{wf} \cdot \nu_{wf} \cdot \nu_c =$$

$$= 180 \cdot 1 \cdot 1,2 = 3,5$$

$$\nu_{wf} = 1,0$$

$$\nu_c = 1,2$$

Несущая способность сварного шва обеспечена

Выполняем эскиз резервуара.

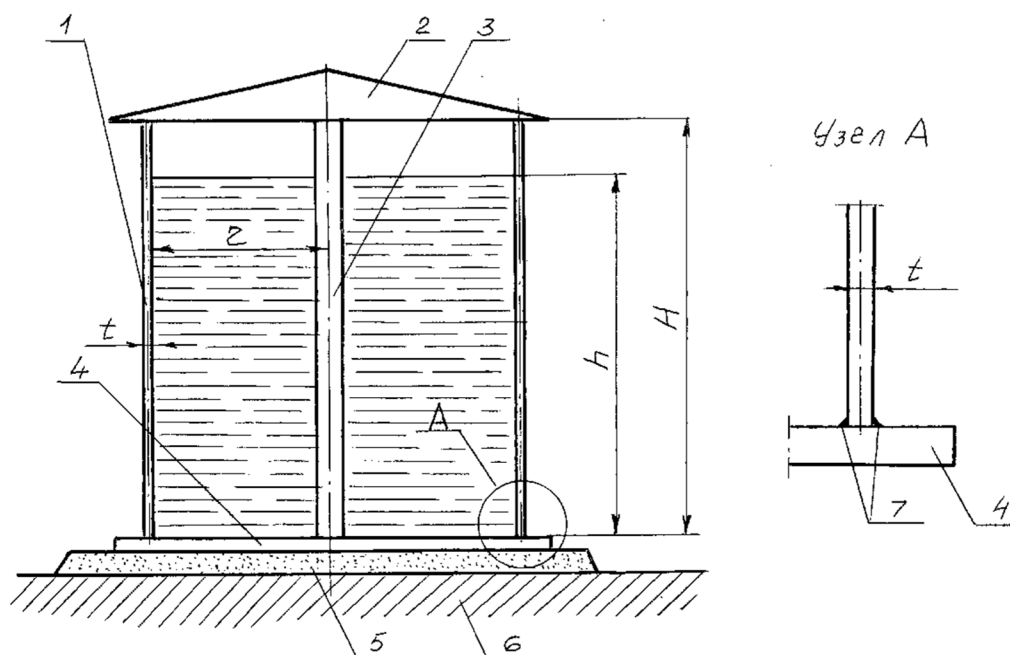


Рисунок 1 – Эскиз сварного резервуара

- 1 - корпус
- 2 - покрытие
- 3 - опора стойки
- 4 - плоское днище
- 5 - песчаная основа
- 6 - поверхность грунта
- 7 - сварные швы

**Контрольные вопросы:**

- 1 Какие виды конструкций относятся к оболочковым?
- 2 В чем особенности расчета тонкостенных оболочек?
- 3 Какие виды напряжений возникают в цилиндрической части резервуара хранилища?
- 4 Какие виды напряжений возникают в плоских днищах резервуаров хранилищ и в зонах их соединений в цилиндрической части?
- 5 В чем состоит метод расчета резервуаров по предельному состоянию?
- 6 Как определяются напряжения в кольцевых швах, в частности постоянного объема?
- 7 В чем состоит проверка тонкостенных конструкции на устойчивость?