

ФКП «Комбинат «Каменский»

Утверждаю:  
Главный инженер  
ФКП «Комбинат «Каменский»  
\_\_\_\_\_ Г.И. Мельник  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

**Бак воздушный вертикальный**

**Расчёты  
О-19412-0-0-0 РР**



1. Задача расчёта.

Задачей расчёта является определение прочности сосуда и его элементов.

2. Данные и условия для расчёта.

Объём, м <sup>3</sup>	6,3
Давление, Мпа	
рабочее	1,6
расчётное	1,6
Температура, °С	
рабочая	от минус 40 до плюс 45
расчётная	плюс 50
Среда	воздух
Внутренний диаметр	1800
Прибавка для компенсации	
коррозии мм/год	0,2
Срок службы, лет	10
Количество циклов нагружения	
сосуда давлением за весь срок	
службы, не более	10 <sup>3</sup>
Материал стенки обечайки и днищ	09Г2С
Допускаемые напряжения для стали	
09Г2С при температуре	
плюс 50°С, Мпа	188,5
плюс 20°С, Мпа	196

Недостающие исходные данные приведены в тексте.

Инд. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Инд. № дубл.
Подп. и дата	
Изм.	Лист

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

0-194 12-0-0-OPP



3.2 Определение толщины стенки обечайки, нагруженной внутренним избыточным давлением.

Толщина стенки цилиндрической обечайки, нагруженной внутренним избыточным давлением, определяется по формуле:

$$S_p = \frac{PD}{2[\sigma]\varphi_p - P} \quad (2, \text{стр. } 10)$$

где  $P$  — расчётное внутреннее избыточное давление, Мпа

$D$  — внутренний диаметр сосуда, мм

$[\sigma]$  — допускаемое напряжение при расчётной температуре, Мпа

$\varphi_p$  — коэффициент прочности продольного сварного шва

Для стыкового с подваркой корня шва  $\varphi_p = 1$  (2, стр. 71)

$$S_p = \frac{1,6 \cdot 1800}{2 \cdot 188,5 \cdot 1 - 1,6} = 7,67 \text{ мм}$$

$$S \geq S_p + C \quad (2, \text{стр. } 10)$$

где  $C = C_1 + C_2$  — сумма прибавок к расчётной толщине, мм

$C_1 = n\tau = 0,2 \cdot 10 = 2$  мм — прибавка для компенсации коррозии, мм

$C_2 = 0,8$  мм — минусовой допуск на листовой прокат, мм

$$C = 2 + 0,8 = 2,8 \text{ мм}$$

$$S > 7,67 + 2,8 = 10,47 \text{ мм}$$

Принимаем толщину стенки обечайки  $S = 12$  мм

Допускаемое избыточное давление для стенки обечайки

$$[P] = \frac{2[\sigma]\varphi_p(S - C)}{D + (S - C)} \quad (2, \text{стр. } 10)$$

$$[P] = \frac{2 \cdot 188,5 \cdot 1 \cdot (12 - 2,8)}{1800 + (12 - 2,8)} = 1,91 \text{ МПа}$$

Условие прочности обечайки  $[P] > P$  ( $1,91 \text{ МПа} > 1,6 \text{ Мпа}$ ) выполняется

Инд. № подл.	Подп. и дата									
Взам. инв. №	Инд. № дробл.									
Подп. и дата										
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	0-194 12-0-0-OPP					Лист
										5

3.3 Определение толщины стенки эллиптического днища, нагруженного внутренним избыточным давлением

$$S' \geq S'_p + C \quad (2, \text{стр. } 22)$$

$$S'_p = \frac{PR}{2\varphi[\sigma] - 0,5P} \quad (2, \text{стр. } 22)$$

где R — радиус кривизны и вершины днища, мм

$$R = \frac{D^2}{4H} \quad (2, \text{стр. } 22)$$

где H — высота выпуклой части днища, мм

при  $H=0,25 D$        $R=D=1800$  мм

$$S'_p = \frac{1,6 \cdot 1800}{2 \cdot 188,5 \cdot 1 - 0,5 \cdot 1,6} = 7,66 \text{ мм}$$

$$S' \geq 7,66 + 2,8 = 10,46 \text{ мм}$$

Принимаем толщину днища в соответствии с ГОСТ 6533-78 равной  $S'=12$  мм

Допускаемое внутреннее избыточное давление для стенок днищ

$$[P] = \frac{2(S' - C)\varphi[\sigma]}{R + 0,5(S' - C)} \quad (2, \text{стр. } 22)$$

$$[P] = \frac{2 \cdot (12 - 2,8) \cdot 1 \cdot 188,5}{1800 + 0,5(12 - 2,8)} = 1,92 \text{ МПа}$$

Условия прочности  $[P] > P$  ( $1,92 \text{ МПа} > 1,6 \text{ МПа}$ ) выполняется

3.4 Пробное давление для гидравлических испытаний сосуда определяется по формуле:

$$P_{\text{пр}} = \frac{1,25 P[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t}$$

где  $P=1,6$  МПа — расчётное давление в сосуде;  
 $[\sigma]_{20} = 230$  Мпа,       $[\sigma]_t = 230$  Мпа — для крепежа из стали 40Х

$$P_{\text{пр}} = \frac{1,25 \cdot 1,6 \cdot 230}{230} = 2 \text{ МПа}$$

Инд. № подл.	Подп. и дата	Инд. № дробл.	Взам. инв. №	Инд. № инв.	Подп. и дата	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	0-194 12-0-0-0-0PP	Лист
												6

### 3.5 Расчёт укрепления отверстий

#### 3.5.1 Расчётные диаметры укрепляемых элементов

для цилиндрической обечайки

$$D_p = D$$

для эллиптических днищ при  $H=0,25D$

$$D_p = 2D \sqrt{1 - 3 \left( \frac{X}{D} \right)^2} \quad (4, \text{стр. } 3)$$

где  $X$  — расстояние от центра укрепляемого отверстия до оси эллиптического днища;

$$\text{при } X=0 \quad D_p = 2D$$

#### 3.5.2 Расчётный диаметр отверстия

В стенке обечайки или днища при наличии наличия штуцера с круглым поперечным сечением, ось которого совпадает с нормалью к поверхности в центре отверстия:

$$d_p = d_1 + 2C_s \quad (4, \text{стр. } 3)$$

где  $d_1$  — внутренний диаметр штуцера

$C_s$  — сумма прибавок к расчётной толщине стенки штуцера

для смещённого штуцера в эллиптическом днище

$$d_p = \frac{d_1 + 2C_s}{\sqrt{1 - \left( \frac{2X}{D_p} \right)^2}}$$

3.5.3 Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда.

$$d_o = 2 \left( \frac{S-C}{S_p} - 0,8 \right) \sqrt{D_p (S-C)} \quad (4, \text{стр. } 6)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	0-194 12-0-0-OPP	Лист
						7
Инд. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инд. № дробл.	Подп. и дата		



3.5.8 Расчётная толщина стенки штуцера, нагруженного внутренним избыточным давлением

$$S_{IP} = \frac{P(d_1 + 2C_s)}{2[\sigma]_1 \varphi_1 - P} \quad (4, \text{стр. } 5)$$

где  $\varphi_1 = 1$  — коэффициент прочности продольного сварного шва соединения штуцера

$[\sigma]_1$  — допускаемое напряжение материала штуцера, МПа

$$S_{IP} = \frac{1,6(450 + 2 \cdot 2,8)}{2 \cdot 188,5 \cdot 1 - 1,6} = 1,94 \text{ мм}$$

3.5.9 Определение допускаемых напряжений для внешней и внутренней частей штуцера

$$\chi_{1,3} = \min \left\{ 1; \frac{[\sigma]_{1,3}}{[\sigma]} \right\} \quad (4, \text{стр. } 6)$$

для проходящего штуцера ( $S_1 = S_3$ )

$$\chi_1 = \chi_3 = \chi = \min \left\{ 1; \frac{188,5}{188,5} \right\} = 1$$

для накладного кольца

$$\chi_2 = \min \left\{ 1; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]} \right\} \quad (4, \text{стр. } 6)$$

$$\chi_2 = \min \left\{ 1; \frac{188,5}{188,5} \right\} = 1$$

3.5.10 Расчётные длины внутренней и внешней частей штуцера, участвующие в укреплении отверстий и учитываемые при расчёте

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \sqrt{(d_1 + 2C_s)(S_1 - C_s)} \right\} \quad (4, \text{стр. } 5)$$

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \sqrt{(d_1 + 2C_s)(S_3 - C_s - C_{S1})} \right\}$$

где  $l_1; l_3$  — исполнительные длины штуцера, мм;

Инд. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Инд. № дробл.
Инд. № подл.	Подп. и дата
Изм.	Лист
№ докум.	Подп.
Дата	Дата

0-194 12-0-0-OPP

Лист  
9

Формат А4

$S_1; S_3$  – исполнительные толщины стенки штуцера, мм;

для проходящего штуцера  $S_1=S_3$ ;

$C_S; C_{S1}$  – сумма прибавок к расчётной толщине стенки штуцера по внешней и внутренней части, мм

$$l_{1p} = \min \{ 127; 1,25 \sqrt{(450 + 2 \cdot 2,8)(12 - 2,8)} \} = \min \{ 127; 80,93 \} = 80,93 \text{ мм}$$

$$l_{3p} = \min \{ 5; 0,5 \sqrt{(450 + 2 \cdot 2,8)(12 - 2,8 - 2)} \} = \min \{ 5; 28,64 \} = 5 \text{ мм}$$

### 3.5.11 Расчётная ширина зоны укрепления

$$l_p = L_0 = \sqrt{D_p(S-C)}$$

$L_0$  – ширина зоны укрепления

для обечайки:

$$l_p = \sqrt{1800 \cdot (12 - 2,8)} = 128,69 \text{ мм}$$

### 3.5.12 Расчётная толщина накладного кольца

$$l_{2p} = \min \{ l_2; \sqrt{D_p(S_2 + S - C)} \} \quad (4, \text{стр. } 6)$$

$S_2$  – толщина накладного кольца

$$l_{2p} = \min \{ 100; \sqrt{1800(10 + 12 - 2,8)} \} = \min \{ 100; 185,9 \} = 100 \text{ мм}$$

$$A = 0,5(455,6 - 51,47)7,67 = 1549,83 \text{ мм}^2$$

$$A_1 + A_3 + A_2 = [80,93(12 - 1,94 - 2,8) + 5(12 - 2,8 - 2)]1 + 128,69(12 - 7,67 - 2,8) + 100 \cdot 10 \cdot 1 = 1820,45 \text{ мм}^2$$

Условие прочности  $A_1 + A_3 + A_2 > A$  ( $1820,45 \text{ мм}^2 > 1549,83 \text{ мм}^2$ ) выполняется

Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. № дробл.	Инв. №	Взам. инв. №	Подп. и дата	Изм.	Листы	№ докум.	Подп.	Дата	0-194 12-0-0-OPP	Листы
												10
Формат А4												

### 3.5.13 Допускаемое внутренне избыточное давление сосуда в зоне

укрепления отверстия

$$[P] = \frac{2K_1(S-C)\varphi[\sigma]}{D_p + (S-C)V} \quad (4, \text{стр. } 10)$$

$K_1=1$  — для обечаек

$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{[l_{1p}(S_1 - C_s) + l_{3p}(S_3 - C_s - C_{s1})]\chi + l_{2p}S_2\chi_2}{l_p(S-C)}}{1 + 0,5 \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1 \frac{d_1 + 2C_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}} \right\} \quad (4, \text{стр. } 10)$$

$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{[80,93(12 - 2,8) + 5(12 - 2,8 - 2)] \cdot 1 + 100 \cdot 10 \cdot 1}{128,69(12 - 2,8)}}{1 + 0,5 \frac{455,6 - 51,47}{128,69} + 1 \frac{450 + 2 \cdot 2,8}{1800} \cdot \frac{1}{1} \cdot \frac{80,93}{128,69}} \right\} = \min \{1; 0,917\} = 0,917$$

$$[P] = \frac{2 \cdot 1 \cdot (12 - 2,8) \cdot 1 \cdot 188,5}{1800 + (12 - 2,8) \cdot 0,917} \cdot 0,917 = 1,75 \text{ МПа} > 1,6 \text{ МПа}$$

Условие прочности  $[P] > P$  выполняется

### 3.5.14 Условие одиночного отверстия

$$b \geq \sqrt{D_p^I(S-C)} + \sqrt{D_p^{II}(S-C)}$$

где  $b$  — конструктивное расстояние между нагруженными поверхностями

штуцеров

Для обечайки

$$b \geq 2\sqrt{D_p(S-C)} = 2\sqrt{1800(12 - 2,8)} = 257,37 \text{ мм}$$

Все отверстия в обечайке одиночные

Инд. № подл.	Подп. и дата	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	0-194 12-0-0-OPP	Лист
								11
Взам. инв. №	Инд. № дробл.	Подп. и дата	Инд. № подл.	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

### 3.6 Расчёт фланцевого соединения люка

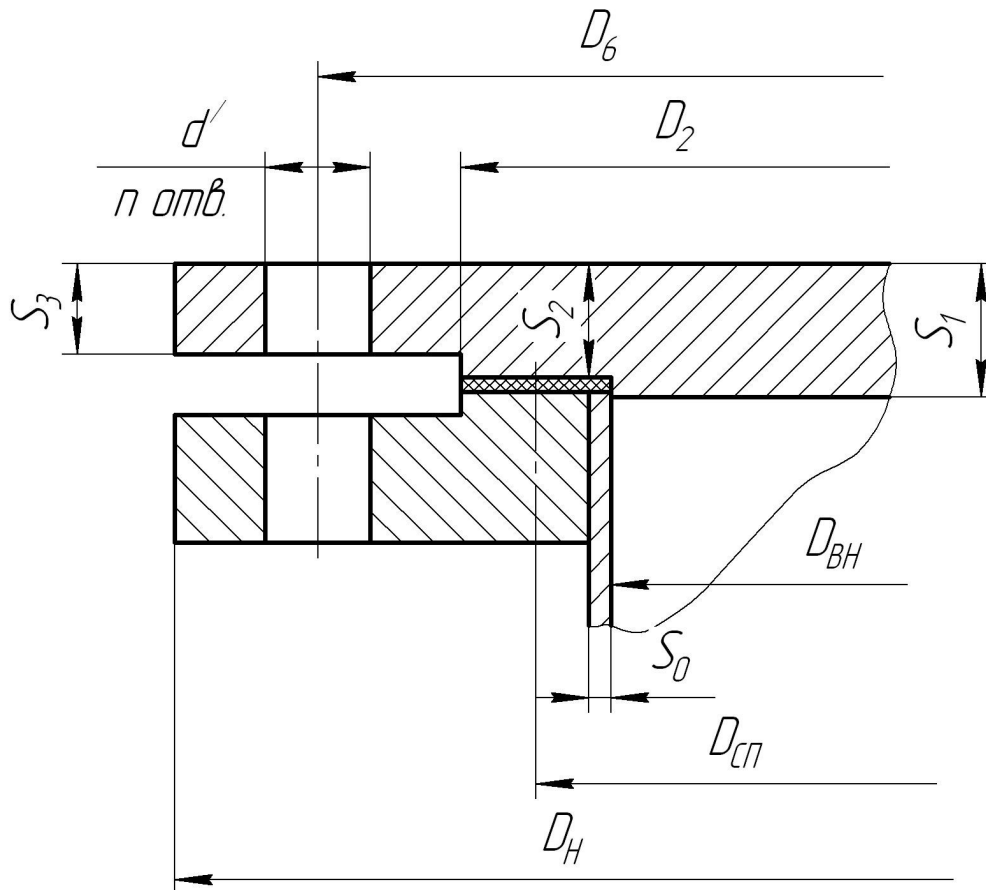


Рисунок 2

#### 3.6.1 Расчёт плоской крышки

3.6.1.1 Плоские круглые крышки с дополнительным краевым моментом рассчитывают по формуле:

$$S_1 \geq S_{1p} + C$$

$$S_{1p} = K_0 K_6 D_p \sqrt{\frac{P}{\varphi [\sigma]_{кр}}} \quad (2, \text{стр. } 27)$$

где  $C = C_1 + C_2$  — сумма прибавок к расчётной толщине стенки крышки, мм

$C_1 = 2,0$  мм — прибавка для компенсации коррозии

$C_2 = 0,9$  мм — минусовой допуск на лист

$$C = 2,0 + 2,9 \text{ мм}$$

$[\sigma]_{кр} = 188,5$  МПа — допускаемое напряжение материала крышки.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дробл.	Подп. и дата	Инв. № подл.	Лист	12
						0-194 12-0-0-0PP	
Формат А4							

$D_p = D_{СП} = 470$  мм – расчётный диаметр крышки

$K_0$  — коэффициент ослабления крышки отверстиями

для крышки без отверстий

$$K_0 = 1 \quad (2, \text{стр. } 31)$$

$$K_6 = 0,41 \sqrt{\frac{1 + 3\psi \left( \frac{D_3}{D_{СП}} - 1 \right)}{\frac{D_3}{D_{СП}}}} \quad (2, \text{стр. } 32)$$

где  $D_3 = 550$  мм — диаметр болтовой окружности

$$\psi = 1 + \frac{F_{ПР}}{F_Q} \quad (2, \text{стр. } 33)$$

$F_{ПР}$  — реакция прокладки в рабочих условиях, Н

$$F_{ПР} = D_{СП} \cdot \pi \cdot b_0 \cdot m \cdot P$$

$b_0$  – эффективная ширина прокладки

$$b_0 = 3,8 \sqrt{b_n} \quad \text{при } b_n = 20 \text{ мм} > 15 \text{ мм}$$

$$b_0 = 3,8 \sqrt{20} = 16,99 \text{ мм}$$

$m = 2,5$  — коэффициент для паронита толщиной 2 мм

$$F_{ПР} = 470 \cdot \pi \cdot 16,99 \cdot 2,5 \cdot 1,6 = 100346 \text{ Н}$$

$F_Q$  – равнодействующая внутреннего давления

$$F_Q = 0,785 D_{СП}^2 P \quad (5, \text{стр. } 12)$$

$$F_Q = 0,785 \cdot 470^2 \cdot P = 277450 \text{ Н}$$

$$\psi = 1 + \frac{100346}{277450} = 1,362$$

Инд. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Инд. № дубл.
Подп. и дата	
Изм.	Лист
№ докум.	Подп.
Дата	

0-194 12-0-0-0PP

Лист  
13

$$K_6 = 0,41 \sqrt{\frac{1 + 3 \cdot 1,362 \left( \frac{550}{470} - 1 \right)}{\frac{550}{470}}} = 0,494$$

$$S_{1p} = 1 \cdot 0,494 \cdot 470 \sqrt{\frac{1,6}{1 \cdot 188,5}} = 21,39 \text{ мм}$$

$$S_{1p} = 21,39 + 2,9 = 24,29 \text{ мм}$$

Конструктивно толщина крышки принята  $S_1 = 27 \text{ мм}$

3.6.1.2 Толщина крышки в месте уплотнения определяется по формуле

$$S_2 \geq \max \left\{ K_7 \sqrt{\Phi}; \frac{0,6}{D_{\text{СП}}} \Phi \right\} + C \quad (2, \text{ стр. } 33)$$

$K_7$  — коэффициент

$$K_7 = 0,8 \sqrt{\frac{D_3}{D_{\text{СП}}} - 1} = 0,8 \sqrt{\frac{550}{470} - 1} = 0,33 \text{ мм} \quad (2, \text{ стр. } 33)$$

$$\Phi = \max \left\{ \frac{F_{\text{бр}}}{[\sigma]_p}; \frac{F_{\text{б.м}}}{[\sigma]_m} \right\} \quad (2, \text{ стр. } 33)$$

где  $F_{\text{б.м}}$  — нагрузка на болты крепления крышки в условиях монтажа

$F_{\text{бр}}$  — нагрузка на болты крепления крышки в рабочем состоянии

$$F_{\text{б.м}} = \max \{ P_{61}; P_{62}; P'_{62} \} \quad (5, \text{ стр. } 13)$$

$$F_{61} = \alpha F_Q + F_{\text{пр}} - Q_t$$

( $Q_t$  не учитывается  $Q_t > 0$ )

$$F_{62} = 0,5 D_{\text{СП}} \pi b_0 q_{\text{обж}}$$

$$F'_{62} = 0,4 [\sigma]_6^{20} n f_6$$

$$F_{\text{бр}} = F_{\text{б.м}} + \Delta P_6$$

$\Delta P_6 = (1 - \alpha) F_Q + Q_t$  - приращение нагрузки в болтах в рабочих условиях

$q_{\text{обж}}$  - удельное давление обжатия прокладки

для прокладок из паронита  $q_{\text{обж}} = 20 \text{ МПа}$

(5, стр. 24)

$n=24$  — количество болтов

Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. № дробл.	Инв. № дробл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.	Лист	0-194 12-0-0-0PP	14

$f_6 = 225 \text{ мм}^2$  площадь поперечного сечения по внутреннему диаметру резьбы

$[\sigma]_6^{20}$  - допускаемое напряжение материала болтов при температуре  $20^\circ\text{C}$

для болтов из стали 40X  $[\sigma]_6^{20} = 230 \text{ МПа}$

$\alpha$  — коэффициент жёсткости соединения крышки с фланцем

$$\alpha = 1 - \frac{Y_n - (Y_\phi e + Y_{кр} b) b}{\eta} \quad (5, \text{стр. 11})$$

$b, e$  — плечи моментов

$$b = 0,5(D_6 - D_{сн}) = 0,5(500 - 470) = 40 \text{ мм} \quad (5, \text{стр. 10})$$

$$e = 0,5(D_{сн} - D - S_3) \quad (5, \text{стр. 11})$$

$D = 450 \text{ мм}$  — внутренний диаметр фланца

$S_3 = S_0 = 10 \text{ мм}$  - эквивалентная толщина втулки

$S_0$  - толщина втулки

$$e = 0,5(470 - 450 - 10) = 5 \text{ мм} \quad (5, \text{стр. 11})$$

$$\eta = Y_n + Y_6 + Y_\phi b^2 + Y_{кр} b^2$$

$Y_n$  - податливость прокладки, мм/Н

$$Y_n = \frac{h_n K}{E_n \pi D_{сн} b_n} \quad (5, \text{стр. 11})$$

$h_n = 2 \text{ мм}$  — толщина прокладки, мм

$K = 0,9$  — коэффициент обжатия прокладки (5, стр. 24)

$E_n = 0,02 \cdot 10^5 \text{ Мпа}$  — условный модуль обжатия прокладки (5, стр. 24)

$$Y_n = \frac{2 \cdot 0,9}{0,02 \cdot 10^5 \cdot \pi \cdot 470 \cdot 20} = 9,57 \cdot 10^{-8} \text{ мм/Н}$$

Инд. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Инд. № дробл.
Изм.	Лист
№ докум.	Подп.
Дата	

0-194 12-0-0-OPP

Лист  
15

$Y_6$  — податливость болтов, мм/Н

$$Y_6 = \frac{L_6}{E_6^{20} f_6 n} \quad (5, \text{стр. } 8)$$

$E_6^{20} = 1,99 \cdot 10^5$ , МПа — модуль упругости материала болта при температуре 20°C

$$L_6 = L_{60} + 0,28 d'$$

$L_{60} = 64$  мм — расстояние между опорами поверхности гаек

$d' = 20$  мм — наружный диаметр резьбы болта, мм

$$L_6 = 64 + 0,28 \cdot 20 = 69,6 \text{ мм}$$

$$Y_6 = \frac{69,6}{1,99 \cdot 10^5 \cdot 225 \cdot 24} = 6,48 \cdot 10^{-8} \text{ мм/Н}$$

$Y_\phi$  — угловая податливость фланца

$$Y_\phi = \frac{[1 - \omega(1 + 0,9 \lambda)] \psi_2}{E^{20} h^3} \quad (5, \text{стр. } 9)$$

где  $E^{20} = 1,99 \cdot 10^5$  МПа — модуль упругости материала фланца при температуре плюс 20°C

$h = 40$  мм — толщина фланца

$$\omega = \frac{1}{1 + 0,9 \lambda (1 + \psi_1 \cdot j^2)}$$

$\lambda$  — коэффициент

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{DS_0}} = \frac{40}{\sqrt{450 \cdot 10}} = 0,596$$

$j$  — коэффициент

$$j = \frac{h}{S_3} = \frac{40}{10} = 4$$

$$\psi_1 = 1,28 \lg \frac{D_H}{D}$$

$D_H = 590$  мм — наружный диаметр фланца

$$\psi_1 = 1,28 \lg \frac{590}{450} = 0,151$$

Инд. № подл.	Подп. и дата	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	0-194 12-0-0-OPP	Лист
Взам. инв. №	Инд. № дробл.							16

$$\psi_2 = \frac{D_H + D}{D_H - D} = \frac{590 + 450}{590 - 450} = 7,43$$

$$\omega = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot 0,596(1 + 0,151 \cdot 4^2)} = 0,353$$

$$y_\phi = \frac{[1 - 0,353(1 + 0,9 \cdot 0,596)] \cdot 7,43}{1,99 \cdot 10^5 \cdot 40^3} = 2,67 \cdot 10^{-10} \text{ 1/Н} \cdot \text{мм}$$

$Y_{кр}$  — угловая податливость крышки

$$Y_{кр} = \frac{X_{кр}}{E_{кр}^{20} h_{кр}^3} \quad (5, \text{ стр. } 10)$$

$E_{кр}^{20} = 1,99 \cdot 10^5$  МПа - модуль упругости материала крышки при температуре плюс 20°C

$h_{кр} = 22$  мм — толщина крышки в зоне укрепления

$$X = \frac{0,67 [K_{кр}^2 (1 + 8,55 \lg K_{кр}) - 1]}{(K_{кр} - 1) \left[ K_{кр}^2 - 1 + (1,857 K_{кр}^2 + 1) \frac{h_{кр}^3}{\delta_{кр}^3} \right]} \quad (5, \text{ стр. } 10)$$

$$K_{кр} = \frac{D_H}{D_{СП}} = \frac{590}{470} = 1,255$$

$\delta_{кр} = 17$  мм — толщина крышки на наружном конце

$$X = \frac{0,67 [1,255^2 (1 + 8,55 \lg 1,255) - 1]}{(1,255 - 1) \left[ 1,255^2 - 1 + (1,857 \cdot 1,255^2 + 1) \frac{22^3}{17^3} \right]} = 0,551$$

$$Y_{кр} = \frac{0,551}{1,99 \cdot 10^5 \cdot 22^3} = 2,6 \cdot 10^{-10} \text{ 1/Н} \cdot \text{мм}$$

$$\eta = 9,57 \cdot 10^{-8} + 6,48 \cdot 10^{-8} + 2,67 \cdot 10^{-10} \cdot 40^2 + 2,6 \cdot 10^{-10} \cdot 40^2 = 1,004 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

$$\alpha = 1 - \frac{9,57 \cdot 10^{-8} - (2,67 \cdot 10^{-10} \cdot 5 + 2,6 \cdot 10^{-20} \cdot 40) \cdot 40}{1,005 \cdot 10^{-6}} = 1,37$$

$Q_t$  — нагрузка, возникающая от температурных деформаций

Инв. № подл.	Взам. инв. №	Инв. № дробл.	Подп. и дата	0-194 12-0-0-OPP					Лист
				Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	17

$$Q_t = \frac{1}{\eta_1} (\alpha_\phi h t_\phi + \alpha_{кр} h_{кр} t_\phi - L_{б0} \alpha_\phi t_\phi)$$

$$\eta = Y_n + Y_\phi \frac{E_\phi}{E_\phi^{20}} + Y_\phi \frac{E}{E^{20}} b^2 + Y_{кр} \frac{E_{кр}}{E_{кр}^{20}} b^2$$

$E_\phi$ ;  $E$ ;  $E_{кр}$  — модуль упругости материала болта, фланца, крышки при расчётной температуре

$$E_\phi = 1,96 \cdot 10^5 \text{ МПа}; E = 1,96 \cdot 10^5 \text{ МПа}; E_{кр} = 1,96 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

$t_\phi$ ;  $t_\phi$  — расчётная температура фланца (крышки), болтов

$$t_\phi = 0,96 t = 0,96 \cdot 50 = 48^\circ\text{C}$$

$$t_\phi = 0,96 t = 0,85 \cdot 50 = 42,5^\circ\text{C}$$

$\alpha_\phi$ ;  $\alpha_{кр}$ ;  $\alpha_\phi$  - температурный коэффициент линейного расширения материала фланца, крышки, болтов

$$\alpha_\phi = 11,6 \cdot 10^{-6} \text{ 1/град C}$$

$$\alpha_{кр} = 13 \cdot 10^{-6} \text{ 1/град C}$$

$$\alpha_\phi = 13,4 \cdot 10^{-6} \text{ 1/град C}$$

$$\eta = 9,57 \cdot 10^{-8} + 6,48 \cdot 10^{-8} \frac{1,96 \cdot 10^5}{1,99 \cdot 10^5} + 2,67 \cdot 10^{-10} \frac{1,96 \cdot 10^5}{1,99 \cdot 10^5} \cdot 40^2 + 2,6 \cdot 10^{-10} \frac{1,96 \cdot 10^5}{1,99 \cdot 10^5} \cdot 40^2 = 9,9 \cdot 10^{-7} \text{ мм/Н}$$

$$Q_t = \frac{1}{9,9} \cdot 10^{-7} (11,6 \cdot 10^{-6} \cdot 40 \cdot 48 + 13 \cdot 10^{-6} \cdot 22 \cdot 48 - 64 \cdot 13,4 \cdot 10^{-6} \cdot 42,5) = -453 \text{ Н}$$

$$P_{\phi 1} = 1,37 \cdot 277450 + 100346 - (-453) = 480906 \text{ Н}$$

$$P_{\phi 2} = 0,5 \cdot \pi \cdot 470 \cdot 16,99 \cdot 20 = 250866 \text{ Н}$$

$$P'_{\phi 2} = 0,4 \cdot 230 \cdot 24 \cdot 225 = 496800 \text{ Н}$$

$$F_{\phi м} = \max \{ 480906; 250866; 496800 \} = 496800 \text{ Н}$$

$$\Delta P_\phi = (1 - 1,37) \cdot 277450 + (-453) = -103110 \text{ Н}$$

$$P_{\phi р} = 496800 - 103110 = 393690 \text{ Н}$$

$[\sigma]_р = [\sigma]_{кр} = 188,5$  — допускаемое напряжение материала крышки в рабочем состоянии

$[\sigma]_м = [\sigma]_{20} = 196$  — допускаемое напряжение материала крышки в состоянии монтажа

Инд. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Инд. № дробл.
Подп. и дата	
Изм.	Лист

0-194 12-0-0-0PP

Лист  
18

$$\Phi = \max \left\{ \frac{393690}{188,5}; \frac{496800}{196} \right\} = \max \{ 2088,54; 2534,69 \} = 2534,69 \text{ мм}^2$$

$$S_2 \geq \max \left\{ 0,33 \sqrt{2534,69}; \frac{0,6}{470} \cdot 2534,69 \right\} + 2,9 = \max \{ 16,61; 3,24 \} + 2,9 = 16,61 + 2,9 = 19,51 \text{ мм}$$

Конструктивно толщина крышки вместе уплотнения равна  $S_2 = 22 \text{ мм}$

3.6.1.3 Толщина крышки вне зоны уплотнения рассчитывается по формуле

$$S_3 \geq \max \left\{ K'_7 \sqrt{\Phi}; \frac{0,6}{D_2} \Phi \right\} + C \quad (2, \text{ стр. 33})$$

$$K'_7 = 0,8 \sqrt{\frac{D_3}{D_2} - 1}$$

$D_2 = 490 \text{ мм}$  — наименьший диаметр наружной утонённой части крышки

$$K'_7 = 0,8 \sqrt{\frac{550}{490} - 1} = 0,28$$

$$S_3 \geq \max \left\{ 0,28 \sqrt{2534,69}; \frac{0,6}{490} \cdot 2534,69 \right\} + 0,9 = \max \{ 14,1; 3,1 \} + 0,9 = 15 \text{ мм}$$

Конструктивно толщина крышки вне зоны уплотнения равна:  $S_3 = 17 \text{ мм}$

3.6.1.4 Допускаемое внутреннее избыточное давление для крышки

рассчитывается по формуле:

$$[P] = \left( \frac{S_1 - C}{K_0 K_6 D_p} \right)^2 [\sigma]_{кр} \varphi \cdot K_p \quad (2, \text{ стр. 33})$$

где  $K_p$  — поправочный коэффициент

$$\text{при } \frac{S_1 - C}{D_p} = \frac{22 - 2,9}{470} = 0,051 \leq 0,11 \quad K_p = 1 \quad (2, \text{ стр. 27})$$

$$[P] = \left( \frac{27 - 2,9}{1 \cdot 0,494 \cdot 470} \right)^2 188,5 \cdot 1 \cdot 1 = 2,03 \text{ МПа}$$

Условие прочности крышки  $[P] > P$  ( $2,03 \text{ МПа} > 1,6 \text{ МПа}$ ) выполняется

Инд. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Инд. № дубл.
Изм.	Лист
№ докум.	Подп.
Дата	

0-194 12-0-0-OPP

Лист  
19

Формат А4



### 3.6.2.2 Приращение угла поворота фланца в рабочих условиях

$$\Delta \theta = \Delta M_{01} \frac{[1 - \omega(1 + 0,9\lambda)] \psi_2}{E \cdot h^3} \quad (5, \text{стр. } 15)$$

$$\Delta M_{01} = \Delta P_6 \cdot b + F_Q \cdot e = (-103110) \cdot 40 + 277450 \cdot 5 = -2737150 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

$$\Delta \theta = -2737150 \frac{[1 - 0,353(1 + 0,9 \cdot 0,596)] \cdot 7,43}{1,96 \cdot 10^5 \cdot 40^3} = 0,00074$$

### 3.6.2.3 Требования к жёсткости

$$\theta + \Delta \theta \leq [\theta]$$

где  $[\theta] = 0,0013$  — допустимый угол поворота (5, стр. 21)

$$\theta + \Delta \theta = 0,00531 + (-0,00074) = 0,00457$$

$0,00457 < 0,0013$  — требование выполняется

### 3.6.2.4 Меридианные напряжения в обечайке на наружной и

внутренней поверхностях при затяжке

$$\sigma_{21} = \sigma_1 \quad \sigma_{22} = -\sigma_1 \quad (5, \text{стр. } 16)$$

$$\sigma_1 = \frac{T \cdot \omega \cdot M_{01}}{D(S_0 - C)^2} \quad (5, \text{стр. } 16)$$

$T$  — коэффициент

$$\text{при } \frac{D_H}{D} = \frac{590}{450} = 1,31 \quad T = 1,79 \quad (5, \text{стр. } 30)$$

$$\sigma_1 = \frac{1,79 \cdot 0,353 \cdot 19872000}{450(10 - 2,8)^2} = 538,3 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{21} = 538,3 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{22} = -538,3 \text{ МПа}$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	Инв. № подл.	Лист	21	
								Изм.
0-194 12-0-0-OPP							Лист	21
Формат А4								

3.6.2.5 Приращение меридианных напряжений в обечайке на наружной и внутренней поверхностях в рабочих условиях

$$\Delta\sigma_{21} = \Delta\sigma_M + \Delta\sigma_1 \quad (5. \text{ стр. } 16)$$

$$\Delta\sigma_{22} = \Delta\sigma_M - \Delta\sigma_1$$

$$\Delta\sigma_M = \frac{F_Q}{\pi \cdot D(S_0 - C)^2} \quad (5. \text{ стр. } 16)$$

$$\Delta\sigma_1 = \frac{T \cdot \omega \cdot \Delta M_{01}}{D(S_0 - C)^2} \quad (5. \text{ стр. } 16)$$

$$\Delta\sigma_M = \frac{277450}{\pi \cdot 450(10 - 2,8)^2} = 27,3 \text{ МПа}$$

$$\Delta\sigma_1 = \frac{1,79 \cdot 0,353 \cdot (-2737150)}{450(10 - 2,8)^2} = -74 \text{ МПа}$$

$$\Delta\sigma_{21} = 27,3 + (-74) = -46,7 \text{ МПа}$$

$$\Delta\sigma_{22} = 27,3 - (-74) = 101,3 \text{ МПа}$$

3.6.2.6 Окружные напряжения в обечайке на наружной и внутренней поверхностях при затяжке

$$\sigma_{23} = 0,3 \sigma_1 \quad \sigma_{24} = -0,3 \sigma_1 \quad (5, \text{ стр. } 17)$$

$$\sigma_{23} = 0,3 \cdot 538,3 = 161,5 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{24} = -0,3 \cdot 538,3 = -161,5 \text{ МПа}$$

3.6.2.7 Приращение окружных напряжений в обечайке на наружной и внутренней поверхностях в рабочих условиях

$$\Delta\sigma_{23} = \frac{P \cdot D}{2 \cdot (S_0 - C)} + 0,3 \sigma_1$$

$$\Delta\sigma_{24} = \frac{P \cdot D}{2 \cdot (S_0 - C)} - 0,3 \sigma_1$$

Инд. № подл.	Подп. и дата
Инд. № дробл.	
Взам. инв. №	
Подп. и дата	
Инд. № подл.	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

0-194 12-0-0-OPP

Лист  
22

$$\Delta \sigma_{23} = \frac{1,6 \cdot 450}{2 \cdot (10 - 2,8)} + 0,3 \cdot (-74) = 27,8 \text{ МПа}$$

$$\Delta \sigma_{24} = \frac{1,6 \cdot 450}{2 \cdot (10 - 2,8)} - 0,3 \cdot (-74) = 72,2 \text{ МПа}$$

3.6.2.8 Условие прочности фланца при расчёте статической прочности.

Для фланца св сечении  $S_0$  при затяжке

$$\sigma_{s0} = \max \left\{ \frac{\sqrt{\sigma_{21}^2 + \sigma_{23}^2 - \sigma_{21} \sigma_{23}}}{\sqrt{\sigma_{22}^2 + \sigma_{24}^2 - \sigma_{22} \sigma_{24}}} \right\} \leq [\sigma]_{s0} \quad (5, \text{ стр. } 18)$$

В рабочих условиях

$$\sigma'_{s0} = \max \left\{ \frac{\sqrt{(\sigma_{21} + \Delta \sigma_{21})^2 + (\sigma_{23} + \Delta \sigma_{23})^2 - (\sigma_{21} + \Delta \sigma_{21})(\sigma_{23} + \Delta \sigma_{23})}}{\sqrt{(\sigma_{22} + \Delta \sigma_{22})^2 + (\sigma_{24} + \Delta \sigma_{24})^2 - (\sigma_{22} + \Delta \sigma_{22})(\sigma_{24} + \Delta \sigma_{24})}} \right\} \leq [\sigma]_{s0}$$

где

$$[\sigma]_{s0} = \left( 4,5 - 2 \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_B} \right) [\sigma] \quad (5, \text{ стр. } 7)$$

$$\sigma_{0,2} = 217 \text{ МПа}$$

$$\sigma_B = 398,5 \text{ МПа}$$

$$[\sigma] = 145 \text{ МПа}$$

$$[\sigma]_{s0} = \left( 4,5 - 2 \frac{217}{398,5} \right) \cdot 145 = 494,5 \text{ МПа}$$

При затяжке

$$\sigma_{s0} = \max \left\{ \frac{\sqrt{538,3^2 + 161,5^2 - 538,3 \cdot 161,5}}{\sqrt{-538,3^2 + -161,5^2 - -538,3 \cdot 161,5}} \right\} = \max \left\{ \begin{matrix} 478,5 \\ 478,5 \end{matrix} \right\} = 478,5 \text{ МПа} \leq 494,5 \text{ МПа}$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дробл.	Подп. и дата	Изм.	Листы	№ докум.	Подп.	Дата	0-194 12-0-0-OPP	Листы
											23

В рабочих условиях

$$\sigma'_{s0} = \max \left\{ \frac{\sqrt{(538,3 - 46,7)^2 + (161,5 + 27,8)^2 - (538,3 + 46,7)(161,5 + 28,7)}}{\sqrt{(-538,3 + 101,3)^2 + (-161,5 + 72,2)^2 - (-538,3 + 101,3)(-161,5 + 72,2)}} \right\} =$$

$$= \max \left\{ \begin{matrix} 429,5 \\ 399,9 \end{matrix} \right\} = 429,5 \leq 494,5 \text{ МПа}$$

### 3.7 Расчёт на усталостную прочность.

Так как число циклов нагружения за весь срок службы составляет не более  $10^3$  проверка на усталостную прочность не производится.

### 4. Заключение

Корпус бака воздушного вертикального и его элементы соответствуют требованиям условий прочности.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Формат А4

5. Список литературы.

1. ГОСТ 6533-78 Днища эллиптические отбортованные стальные для сосудов, аппаратов и котлов. Основные размеры.
2. ГОСТ 14249-89 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчёта на прочность.
3. ГОСТ 19903-74 Прокат листовой горячекатаный. Сортамент.
4. ГОСТ 24755-89 Сосуды и аппараты. Нормы и метода расчёта на прочность укрепления отверстий.
5. РД 26-15-88 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчёта на прочность и герметичность фланцевых соединений.
6. ПБ 03-576-03 Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов работающих под давлением.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № д/фл.	Подп. и дата	0-194 12-0-0-OPP				Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата					25

