



**АО «ВНИИНЕФТЕМАШ»**

**ОАО «Славнефть-ЯНОС»  
Установка УПСК (Кодиак)**

**КОТЕЛ-УТИЛИЗАТОР  
ПОЗ. Е-101**

**Е-101-2344.00.00.000 РР**

**Расчеты**

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата
19765.4				

Москва  
2016 г.

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ВЫПОЛНЕН В СООТВЕТСТВИИ С:

ГОСТ Р 52857.1-2007 «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования».

ГОСТ Р 52857.2-2007 «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек».

ГОСТ Р 52857.3-2007 «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и внешнем давлениях.

Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер».

ГОСТ Р 52857.5-2007 «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.

Расчет обечаек и днищ от воздействия опорных нагрузок».

ГОСТ 52857.7-2007 «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Теплообменные аппараты».

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ВЫПОЛНЕН С ПОМОЩЬЮ:

Пакета прикладных программ расчета на прочность элементов сосудов, аппаратов и трубопроводов PVP DESIGN (разработчик – ООО «ПВП ДИЗАЙН»).

[illegible]

# СОДЕРЖАНИЕ

1. РАСЧЕТ НА ВНУТРЕННЕЕ ДАВЛЕНИЕ .....	4
1.1. Трубный пучок .....	4
1.2. Цилиндрическая обечайка корпуса Дв1050 .....	12
1.3. Штуцера А2 и В2 Ду80.....	14
1.4. Штуцер U Ду40 .....	17
1.5. Труба $\varnothing 48 \times 10$ .....	20
1.6. Неподвижная опора .....	21
1.7. Подвижная опора .....	25
1.8. Цилиндрическая обечайка камеры.....	29
1.9. Конический переход камеры Ду950 / Ду600.....	31
1.10. Проставок Ду600.....	36
2. РАСЧЕТ НА ВАКУУМ .....	37
2.1. Трубный пучок .....	37
2.2. Цилиндрическая обечайка корпуса Дв1050 .....	45
2.3. Штуцера А2 и В2 Ду80.....	47
2.4. Штуцер U Ду40 .....	50
2.5. Труба $\varnothing 48 \times 10$ .....	53
2.6. Неподвижная опора .....	54
2.7. Подвижная опора .....	58
2.8. Цилиндрическая обечайка камеры.....	62
2.9. Конический переход камеры Ду950 / Ду600.....	64
2.10. Проставок Ду600.....	69
Лист регистрации изменений .....	71

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата
19765.4				
2		Изм.	Е-101-2344.2	Редикунцев 09.16
1		Изм.	Е-101-2344.1	Редикунцев 04.16.
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись Дата
<b>Е-101-2344.00.00.000 РР</b>				
Лист 3				



Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Толщина стенки камеры в месте приварки решетки (для приваренных в стык фланцев – $S_2 = S_3$ по ГОСТ Р 52857.4–2007)	$S_2$	32	мм
Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Ширина тарелки фланца камеры (для решеток вваренных в кожух – $b_2 = 0$ )	$b_2$	0	мм
Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Количество труб в пучке	$i_r$	100	
Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Наружный диаметр трубы	$d_r$	51	мм
Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Расстояние от оси кожуха до оси наиболее удаленной трубы	$a_1$	438	мм
Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Толщина трубной решетки в зоне кольцевой канавки	$S_{p1}$	25	мм
Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Прибавка к толщине трубной решетки для компенсации минусового допуска	$C_{p2}$	0	мм
Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Расчётная прибавка к толщине трубной решетки	$C$	7	мм
Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Шаг расположения отверстий под трубы в решетке	$t_p$	72	мм

2		Изм.	E-101-2344.2	Редикунцев	09.16	E-101-2344.00.00.000 PP	Лист
1		Изм.	E-101-2344.1	Редикунцев	04.16.		5
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата		

Глубина развальцовки труб	$l_B$	19	мм
Высота сварного шва в месте приварки трубы к решетке	$\delta$	4.5	мм
Диаметр окружности, вписанной в максимальную бес- трубную площадь	$D_e$	114	мм
Эффективный коэффициент концентрации напряжений в месте приварки решетки	$K_\sigma$	1.7	
Максимальный пролет трубы между решеткой и перего- родкой	$l_{1r}$	935	мм
Максимальный пролет трубы между перегородками	$l_{2r}$	935	мм

### Результаты расчёта

Внутренний радиус кожуха:

$$a = \frac{D}{2} = 525 \text{ мм}$$

Относительная характеристика беструбного края:

$$m_n = a / a_1 = 1.199$$

Коэффициент влияния давления в межтрубном пространстве на  
трубную решетку:

$$\eta_M = 1 - \frac{id_r^2}{4a_1^2} = 0.661$$

Коэффициент влияния давления в трубном пространстве на труб-  
ную решетку:

$$\eta_T = 1 - \frac{i(d_T - 2S_T)^2}{4a_1^2} = 0.7701$$

Коэффициент ослабления трубной решетки:

$$\varphi_p = 1 - \frac{d_o}{t_o} = 0.2882$$

Коэффициент жесткости перфорированной плиты:

$$\psi_o = 0.5436$$

Модуль упругости основания (системы труб):

$$K_y = \frac{E_T(\eta_T - \eta_M)}{l} = 17.44 \text{ Н/мм}^3$$

Приведенное отношение жесткости труб к жесткости кожуха:

$$\rho = \frac{K_y a_1 l}{E_x S_x} = 1.338$$

Коэффициенты изменения жесткости системы трубы-кожух:

$$K_q = 1$$

$$K_p = 1$$

Приведенное давление:

$$P_o = [\alpha_k(t_k - t_o) - \alpha_T(t_T - t_o)]K_y l + \\ + [\eta_T - 1 + m_{cp} + m_n(m_n + 0.5\rho K_q)]P_T - \\ + [\eta_M - 1 + m_{cp} + m_n(m_n + 0.3\rho K_p)]P_M = -18.44$$

где:

$$m_{cp} = 0.15 \frac{i(d_T - S_T)^2}{a_1^2} = 0.1691$$

Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата		Инв. №		Взам. инв.		Подп. и дата		Лист
2		Изм.	Е-101-2344.2	Редикунцев	09.16	E-101-2344.00.00.000 PP				6
1		Изм.	Е-101-2344.1	Редикунцев	04.16.					
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата					

Коэффициент ослабления трубной решетки:	$\varphi_p = 1 - \frac{d_o}{t_o} =$	0.2882
Коэффициент жесткости перфорированной плиты:	$\psi_o =$	0.5436
Модуль упругости основания (системы труб):	$K_y = \frac{E_T(\eta_T - \eta_M)}{l} =$	17.44 Н/мм <sup>3</sup>
Приведенное отношение жесткости труб к жесткости кожуха:	$\rho = \frac{K_y \alpha_1 l}{E_k S_k} =$	1.338
Коэффициенты изменения жесткости системы трубы-кожух:	$K_q =$	1
	$K_p =$	1
Приведенное давление:	$P_o = [\alpha_k(t_k - t_o) - \alpha_T(t_T - t_o)]K_y l +$ $+ [\eta_T - 1 + m_{cp} + m_n(m_n + 0.5\rho K_q)]P_T -$ $+ [\eta_M - 1 + m_{cp} + m_n(m_n + 0.3\rho K_p)]P_M =$	-18.44
где:	$m_{cp} = 0.15 \frac{i(d_T - S_T)^2}{\alpha_1^2} =$	0.1691

Коэффициент системы решетка - трубы:

$$\beta = \frac{1.82}{S_y} \sqrt{\frac{K_y S_y}{\psi_o E_y}} = 0.01953 \text{ 1/MM}$$

Коэффициент системы кожух-решетка камеры:

$$\beta_1 = \frac{1.3}{\sqrt{a_{S_1}}} = 0.01003 \text{ 1/MM}$$

Коэффициент системы обечайка-фланец камеры:

$$\beta_2 = \frac{1.3}{\sqrt{a S_2}} = 0.01003 \text{ 1/MM}$$

Жесткость фланцевого соединения при изгибе:

$$K_{\theta_3} = K_{\theta_1} + K_{\theta_2} = 2.174\text{e}+07 \text{ H}\cdot\text{MM}/\text{MM}$$

где:

$$K_{\#1} = \frac{E_1 k_1^3 b_1}{12 R_1^2} + K_1 \left(1 + \frac{\beta_1 k_1}{2}\right) = 1.131\text{e}+07 \text{ H}\cdot\text{MM/MM}$$

$$K_{\#2} = \frac{E_2 h_2^3 b_2}{12 R_2^3} + K_2 \left(1 + \frac{\beta_2 h_2}{2}\right) = 1.043\text{e}+07 \text{ H} \cdot \text{mm/mm}$$

$$K_1 = \frac{\beta_1 \alpha E_k S_1^3}{5.5 R_1} = 1.003 \text{e}+07 \text{ H} \cdot \text{MM/MM}$$

$$K_2 = \frac{\beta_2 a E_D S_2^3}{5.5 R_2} = 8.988\text{e}+06 \text{ H}\cdot\text{MM/MM}$$

Коэффициент влияния давления на изгиб фланцев:

$$m_1 = \frac{1 + \beta_1 k_1}{2\beta_1^2} = 6217 \text{ mm}^2$$

Коэффициент влияния давления на изгиб фланцев:

$$m_2 = \frac{1 + \beta_2 h_2}{2\beta_2^2} = 6566 \text{ мм}^2$$

Приведенное отношение жесткости труб к жесткости фланцевого соединения:

$$\rho_1 = \frac{K_y a a_1}{\beta^2 K_{\sigma} R_1} = 0.8942$$

Приведенный безразмерный радиус трубного пучка:

$$\omega = \beta a_1 = 8.552$$

Коэффициенты, учитывающие влияние беструбного края решетки и поддерживающее влияние труб:

$$\bar{\Phi}_1 = \quad 12.72$$

$$\bar{\Phi}_3 = 8.747$$

$$\Phi_2 = 12.44$$

Коэффициент  $T_1$ :

$$T_1 = \Phi_1[m_{\infty} + 0.5(1 + m_{\infty}t)(t - 1)] = \quad 91.71$$

Коэффициент  $T_2$ :

$$T_2 = \Phi_2 t = 29.56$$

Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата				Инв. №	Взам. инв.	Подп. и дата	$m_1 = \frac{1 + \beta_1 h_1}{2 \beta_1^2} =$	6217 мм <sup>2</sup>
		Коэффициент влияния давления на изгиб фланцев:								
		$m_2 = \frac{1 + \beta_2 h_2}{2 \beta_2^2} =$						6566 мм <sup>2</sup>		
		Приведенное отношение жесткости труб к жесткости фланцевого соединения:						$\rho_1 = \frac{K_p a a_1}{\beta^2 K_\Phi R_1} =$	0.8942	
		Приведенный безразмерный радиус трубного пучка:						$\omega = \beta a_1 =$	8.552	
		Коэффициенты, учитывающие влияние беструбного края решетки и поддерживающее влияние труб:						$\Phi_1 =$	12.72	
								$\Phi_2 =$	8.747	
								$\Phi_3 =$	12.44	
		Коэффициент $T_1$ :						$T_1 = \Phi_1 [m_{\kappa} + 0.5(1 + m_{\kappa} t)(t - 1)] =$	91.71	
		Коэффициент $T_2$ :						$T_2 = \Phi_2 t =$	29.56	
Инв. № подл.	19765.4	2		Изм.	Е-101-2344.2	Редикulyцев	09.16	Е-101-2344.00.00.000 PP		Лист
		1		Изм.	Е-101-2344.1	Редикulyцев	04.16.			7
		Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата			

Коэффициент  $T_3$ :

$$T_2 = \Phi_2 m_u = 14.92$$

где:

$$t = 1 + 1.4\omega(m_{\text{u}} - 1) = \quad 3.379$$

Изгибающий момент, распределенный по краю трубной решетки:

$$M = \left(\frac{a_1}{\beta}\right) \frac{P_1(T_1 + \rho K_g) - P_o T_2}{(T_1 + \rho K_g)(T_2 + \rho_1) - T_2^2} = 2.633\text{e}+04 \text{ H}\cdot\text{MM/MM}$$

Перерезывающая сила, распределенная по краю трубной решетки:

$$Q = a_1 \frac{P_o(T_3 + \rho_1) - P_1 T_2}{(T_1 + \rho K_o)(T_3 + \rho_1) - T_2^2} = -250.1 \text{ H/MM}$$

где:

$$P_1 = \frac{K_y}{\beta K_x} (m_1 P_M - m_2 P_T) = 1.68 \text{ МПа}$$

Изгибающий момент, распределенный по периметру перфорированной зоны решетки:

$$M_n = M + (a - a_1)Q = 4562 \text{ H} \cdot \text{MM/MM}$$

Перерезывающая сила, распределенная по периметру перфорированной зоны решетки:

$$Q_n = m_n Q = -299.9 \text{ H/MM}$$

Осевая сила, действующая на трубу:

$$N_T = \frac{\pi_{11}}{i} [(\eta_M^{P_M} - \eta_T^{P_T})a_1 + \Phi_1 Q_a + \Phi_2 M_a] = -1.558\text{e}+04 \text{ H}$$

Изгибающий момент, действующий на трубу:

$$M_T = \frac{E_T J_T \beta}{K_{\nu} a_{1,xy}} (\Phi_2 Q_a + \Phi_3 M_a) = -3.453\text{e}+05 \text{ H}\cdot\text{mm}$$

где:

$$l_{yy} = 311.7 \text{ mm}$$

Осевая сила, распределенная по периметру кожуха:

$$Q_K = \frac{a}{2} P_T - Q = 255.4 \text{ H/MM}$$

Изгибающий момент, распределенный по периметру кожуха:

$$M_K = \frac{K_1}{\rho_1 K_2 \beta} (T_2 Q_n + T_3 \beta M) - \frac{P_M}{2 \beta^2} = -2.551 \text{e}+04 \text{ H} \cdot \text{mm/mm}$$

Осевая сила, действующая на кожух:

$$F = \pi D Q_y = 8.424\text{e}+05 \text{ H}$$

Расчётное изгибное напряжение в трубной решетке в месте соединения с кожухом:

$$\sigma_{\text{н}} = \frac{6|M|}{(S_{\text{н}} - C)^2} = 487.7 \text{ МПа}$$

Расчётное касательное напряжение в трубной решетке в месте соединения с кожухом:

$$\tau_{P1} = \frac{|Q|}{(S_{1,2} - C)} = 13.9 \text{ MPa}$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Изгибающий момент, действующий на трубу:	$M_T = \frac{E_T J_T \beta}{K_y a_1 l_{np}} (\Phi_2 Q_a + \Phi_3 M_a) =$	-3.453e+05 Н·мм
					где:	$l_{np} =$	311.7 мм
					Осевая сила, распределенная по периметру кожуха:	$Q_K = \frac{a}{2} P_T - Q =$	255.4 Н/мм
					Изгибающий момент, распределенный по периметру кожуха:	$M_K = \frac{K_1}{\rho_1 K_\Phi \beta} (T_2 Q_a + T_3 M) - \frac{P_M}{2 \beta_1^2} =$	-2.551e+04 Н·мм/мм
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Осевая сила, действующая на кожух:	$F = \pi D Q_K =$	8.424e+05 Н
					Расчётное изгибное напряжение в трубной решетке в месте соединения с кожухом:	$\sigma_{P1} = \frac{6 M }{(S_{1P} - C)^2} =$	487.7 МПа
					Расчётное касательное напряжение в трубной решетке в месте соединения с кожухом:	$\tau_{P1} = \frac{ Q }{(S_{1P} - C)} =$	13.9 МПа

2		Изм.	Е-101-2344.2	Редикольцев	09.16	E-101-2344.00.00.000 PP	Лист
1		Изм.	Е-101-2344.1	Редикольцев	04.16.		8
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата		



Максимальный расчётный изгибающий момент в перфорированной части трубной решетки:

$$M_{\max} = \left\{ \begin{array}{l} A \frac{|Q_a|}{\beta} \text{ npu} \quad -1.0 \leq \frac{\beta M_a}{Q_a} \leq 1.0 \\ B |M_a| \text{ npu} \quad \frac{\beta M_a}{Q_a} < -1.0 \text{ u } \frac{\beta M_a}{Q_a} > 1.0 \end{array} \right\} = \quad 4513$$

где:

$$A\left(\omega, \frac{\beta M_a}{Q_a}\right) = 0.2939$$

Расчётное изгибное напряжение в перфорированной части трубной решетки:

$$\sigma_{P2} = \frac{6M_{\max}}{\varphi_s(S_s - C)^2} = 290 \text{ МПа}$$

Расчётное касательное напряжение в перфорированной части  
трубной решетки:

$$\tau_{p2} = \frac{|Q_a|}{\varphi_p(S_p - C)} = 57.8 \text{ МПа}$$

Мембранные напряжения в меридиональном направлении в коже в месте присоединения к решетке:

$$\sigma_{MX} = \frac{|Q_K|}{(S_1 - C_v)} = 9.459 \text{ МПа}$$

Изгибные напряжения в меридиональном направлении в кожухе в месте присоединения к решетке:

$$\sigma_{vx} = \frac{6|M_x|}{(S_x - C_x)^2} = 210 \text{ МПа}$$

Мембранные напряжения в окружном направлении в кожухе в месте присоединения к решетке:

$$\sigma_{M_{\phi}} = \frac{|P_M|a}{(S_1 - C_v)} = 128.3 \text{ МПа}$$

Изгибные напряжения в окружном направлении в кожухе в месте присоединения к решетке:

$$\sigma_{U_{\infty}} = 0.3\sigma_{U_X} = 62.99 \text{ МПа}$$

Расчётные мембранные напряжения в трубах в осевом направлении:

$$\sigma_{\text{fr}} = \frac{|N_r|}{\pi(d_r - S_r)S_r} = 23.7 \text{ МПа}$$

Расчётные суммарные напряжения в трубах в осевом направлении:

$$\sigma_1 = \sigma_{1r} + \frac{d_r |M_r|}{2J_r} = 72.8 \text{ МПа}$$

Расчётные напряжения в трубах в окружном направлении:

$$\sigma_{2r} = \frac{(d_r - S_r) \max(|P_r|, |P_M|, |P_r - P_M|)}{2S_r} = 34.1 \text{ МПа}$$

Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата					Инв. №	Взам. инв.	Подп. и дата	месте присоединения к решетке:	$\sigma_{ux} = \frac{6 M_K }{(S_1 - C_K)^2} =$	210 МПа																				
		Мембранные напряжения в окружном направлении в кожухе в месте присоединения к решетке:	$\sigma_{M\phi} = \frac{ P_M a}{(S_1 - C_K)} =$	128.3 МПа																												
		Изгибные напряжения в окружном направлении в кожухе в месте присоединения к решетке:	$\sigma_{U\phi} = 0.3\sigma_{ux} =$	62.99 МПа																												
		Расчётные мембранные напряжения в трубах в осевом направлении:	$\sigma_{lr} = \frac{ N_r }{\pi(d_r - S_r)S_r} =$	23.7 МПа																												
		Расчётные суммарные напряжения в трубах в осевом направлении:	$\sigma_1 = \sigma_{lr} + \frac{d_r M_r }{2J_r} =$	72.8 МПа																												
		Расчётные напряжения в трубах в окружном направлении:	$\sigma_{2r} = \frac{(d_r - S_r) \max\{ P_r ;  P_M ;  P_r - P_M \}}{2S_r} =$	34.1 МПа																												
<table><tr><td>2</td><td></td><td>Изм.</td><td>E-101-2344.2</td><td>Редикольцев</td><td>09.16</td><td rowspan="3">E-101-2344.00.00.000 PP</td><td>Лист</td></tr><tr><td>1</td><td></td><td>Изм.</td><td>E-101-2344.1</td><td>Редикольцев</td><td>04.16.</td><td>9</td></tr><tr><td>Изм</td><td>Кол.уч</td><td>Лист</td><td>№ док.</td><td>Подпись</td><td>Дата</td></tr></table>												2		Изм.	E-101-2344.2	Редикольцев	09.16	E-101-2344.00.00.000 PP	Лист	1		Изм.	E-101-2344.1	Редикольцев	04.16.	9	Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата
2		Изм.	E-101-2344.2	Редикольцев	09.16	E-101-2344.00.00.000 PP	Лист																									
1		Изм.	E-101-2344.1	Редикольцев	04.16.		9																									
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата																											

Условия статической прочности решетки:

Максимальное касательное напряжение в решетке:

$$\max\{\tau_{p1}; \tau_{p2}\} = 57.8 \text{ МПа}$$

Допускаемое касательное напряжение в решетке:

$$0.8[\sigma]_p = 84 \text{ МПа}$$

Необходимая толщина решетки из условия прочности беструбной зоны:

$$S_p \geq 0.5 D_z \sqrt{\frac{P_R}{[\sigma]_p}} + C = 21.29 \text{ мм}$$

Условия малоциклового прочности решетки:

Расчётная амплитуда напряжений в решетке в месте соединения с кожухом:

$$\sigma_a = K_\sigma \frac{\sigma_{p1}}{2} = 414.5 \text{ МПа}$$

Расчётная амплитуда напряжений в перфорированной зоне решетки:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{p2}}{2} = 145 \text{ МПа}$$

Допускаемая амплитуда напряжений для материала решетки:

$$[\sigma_a]_p = 580.6 \text{ МПа}$$

Проверка жесткости трубных решеток:

Условие статической прочности кожуха:

Мембранное напряжение в кожухе в месте приварки к решетке:

$$\sigma_{MX} = 9.459 \text{ МПа}$$

Допускаемое местное мембранное напряжение в кожухе:

$$1.3[\sigma]_K = 198.2 \text{ МПа}$$

Условие малоциклового прочности кожуха:

Расчётная амплитуда напряжений в кожухе в месте приварки к решетке:

$$\sigma_a = K_\sigma \max \left\{ \left| \sigma_{MX} + \sigma_{UX} \right|, \left| \sigma_{M\varphi} + \sigma_{U\varphi} \right|, \left| (\sigma_{MX} + \sigma_{UX}) - (\sigma_{M\varphi} + \sigma_{U\varphi}) \right| \right\} = 186.5 \text{ МПа}$$

Допускаемая амплитуда напряжений для материала кожуха:

$$[\sigma_a]_K = 481.5 \text{ МПа}$$

Условие устойчивости кожуха (по ГОСТ Р 52857.2):

Условие статической прочности труб:

Максимальное мембранное напряжение в трубах:

$$\max\{\sigma_{1T}; \sigma_{2T}\} = 34.1 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для материала труб:

$$[\sigma]_T = 76 \text{ МПа}$$

Расчётная амплитуда напряжений в трубах:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_1}{2} = 36.4 \text{ МПа}$$

Допускаемая амплитуда напряжений для материала труб:

$$[\sigma_a]_T = 49 \text{ МПа}$$

Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата		Инв. №		Взам. инв.		Подп. и дата		Инв. № подл.	19765.4																						
<p>Допускаемое местное мембранное напряжение в кожеху:</p> $1.3[\sigma]_K = 198.2 \text{ МПа}$ <p>Условие малоциклового прочнoсти кожуха:</p> <p>Расчётная амплитуда напряжений в кожухе в месте приварки к решетке:</p> $\sigma_a = K_\sigma \max \left\{ \left  \sigma_{MX} + \sigma_{UX} \right ; \left  \sigma_{M\varphi} + \sigma_{U\varphi} \right ; \left  (\sigma_{MX} + \sigma_{UX}) - (\sigma_{M\varphi} + \sigma_{U\varphi}) \right  \right\} = 186.5 \text{ МПа}$ <p>Допускаемая амплитуда напряжений для материала кожуха:</p> $[\sigma_a]_K = 481.5 \text{ МПа}$ <p>Условие устойчивости кожуха (по ГОСТ Р 52857.2):</p> <p>Условие статической прочнoсти труб:</p> <p>Максимальное мембранное напряжение в трубах:</p> $\max \{ \sigma_{1T}; \sigma_{2T} \} = 34.1 \text{ МПа}$ <p>Допускаемое напряжение для материала труб:</p> $[\sigma]_T = 76 \text{ МПа}$ <p>Расчётная амплитуда напряжений в трубах:</p> $\sigma_a = \frac{\sigma_1}{2} = 36.4 \text{ МПа}$ <p>Допускаемая амплитуда напряжений для материала труб:</p> $[\sigma_a]_T = 49 \text{ МПа}$																																	
<table><tr><td>2</td><td></td><td>Изм.</td><td>Е-101-2344.2</td><td>Редикульцев</td><td>09.16</td><td rowspan="3"><b>Е-101-2344.00.00.000 РР</b></td><td>Лист</td></tr><tr><td>1</td><td></td><td>Изм.</td><td>Е-101-2344.1</td><td>Редикульцев</td><td>04.16.</td><td>10</td></tr><tr><td>Изм</td><td>Кол.уч</td><td>Лист</td><td>№ док.</td><td>Подпись</td><td>Дата</td><td></td></tr></table>												2		Изм.	Е-101-2344.2	Редикульцев	09.16	<b>Е-101-2344.00.00.000 РР</b>	Лист	1		Изм.	Е-101-2344.1	Редикульцев	04.16.	10	Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата	
2		Изм.	Е-101-2344.2	Редикульцев	09.16	<b>Е-101-2344.00.00.000 РР</b>	Лист																										
1		Изм.	Е-101-2344.1	Редикульцев	04.16.		10																										
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата																												

Инв. № подл. 19765.4	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Допускаемая нагрузка на соединение трубы с решеткой с помощью развальцовки:						$[N]_{FP} =$	2.998e+04 Н																									
					Напряжение сдвига в сварном шве приварки трубы к решетке:						$\tau = \frac{ N_T  d_T + 4  M_T }{\pi d_T^2 \delta} =$	59.19 МПа																									
					Допускаемое напряжение сдвига в сварном шве приварки трубы к решетке в случае крепления труб к решетке способом приварки или приварки с подвальцовкой:						$[\tau] = \varphi_C \min\{[\sigma]_T; [\sigma]_P\} =$	26.6 МПа																									
					где:						$\varphi_C = \min\{0.5; (0.95 - 0.21 \lg N)\} =$	0.35																									
Условие прочности крепления труб к решетке способом развальцовки с обваркой:					$\max \left\{ \frac{\varphi_C \min\{[\sigma]_T; [\sigma]_P\}}{\tau} + 0,6 \frac{[N]_{TP}}{ N_T }; \frac{[N]_{TP}}{ N_T } \right\} =$						1.925 > 1																										
Условия прочности и устойчивости элементов теплообменного аппарата выполняются.																																					
<table><tr><td>2</td><td></td><td>Изм.</td><td>E-101-2344.2</td><td>Редикунцев</td><td>09.16</td><td colspan="5" rowspan="3">E-101-2344.00.00.000 PP</td><td>Лист</td></tr><tr><td>1</td><td></td><td>Изм.</td><td>E-101-2344.1</td><td>Редикунцев</td><td>04.16.</td><td></td></tr><tr><td>Изм</td><td>Кол.уч</td><td>Лист</td><td>№ док.</td><td>Подпись</td><td>Дата</td><td>11</td></tr></table>												2		Изм.	E-101-2344.2	Редикунцев	09.16	E-101-2344.00.00.000 PP					Лист	1		Изм.	E-101-2344.1	Редикунцев	04.16.		Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата	11
2		Изм.	E-101-2344.2	Редикунцев	09.16	E-101-2344.00.00.000 PP					Лист																										
1		Изм.	E-101-2344.1	Редикунцев	04.16.																																
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата						11																										

## 1.2. Цилиндрическая обечайка корпуса Дв1050

Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.2-2007

*Расчёт выполнен с помощью пакета прикладных программ расчёта на прочность элементов сосудов, аппаратов и трубопроводов PVP Design (Свидетельство о государственной регистрации 2008614973)*

Элемент: Гладкая цилиндрическая обечайка, работающая под действием внутреннего давления - изгибающего момента.

### *Исходные данные*

Материал обечайки

Сталь 09Г2С-12 ГОСТ 5520-79, Лист

Расчётная температура	T	293	°C
Расчётное давление в сосуде	P	6.6	МПа
Расчётный изгибающий момент	M	6.028e+06	Н·мм
Расчётное поперечное усилие	Q	1.724e+04	Н
Внутренний диаметр обечайки	D	1050	мм
Фактическая длина обечайки	Lact	1880	мм
Расчётная длина обечайки	L	1880	мм
Толщина стенки обечайки	S	32	мм
Прибавка на коррозию	c <sub>1</sub>	3	мм
Прибавка – минусовый допуск	c <sub>2</sub>	1	мм
Прибавка технологическая	c <sub>3</sub>	1	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки	c	5	мм
Коэффициент прочности продольного сварного шва	φ <sub>p</sub>	1	
Допускаемое напряжение	[σ]	152.5	МПа
Модуль продольной упругости	E	1.715e+05	МПа

### *Результаты расчёта*

Расчётная толщина стенки обечайки от действия давления

$$S_p = \frac{pD}{2[\sigma]\phi_p - p} = 23.22 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки обечайки от действия давления с учетом прибавки

$$S \geq S_p + C = 28.22 \text{ мм}$$

Допускаемое внутреннее давление

$$[p] = \frac{2[\sigma]\phi_p(S - C)}{D + (S - C)} = 7.646 \text{ МПа}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости в пределах упругости

$$[F]_{E1} = \frac{31 \cdot 10^{-5} E}{n_y} D^2 \left[ \frac{100(S - C)}{D} \right]^{2.5} = 2.59e+08 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое усилие из условия устойчивости в пределах упругости

$$[F]_E = \text{Min} \{ [F]_{E1}; [F]_{E2} \} = 2.59e+08 \text{ Н}$$

Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Инв. №	Взам. инв.	Подп. и дата	Коэффициент прочности продольного сварного шва					φ <sub>р</sub>	1			
						Допускаемое напряжение					[σ ]	152.5	МПа		
						Модуль продольной упругости					E	1.715e+05	МПа		
Результаты расчёта															
Расчётная толщина стенки обечайки от действия давления															
$S_p = \frac{pD}{2[\sigma]\phi_p - p} = 23.22 \text{ мм}$															
Расчётная толщина стенки обечайки от действия давления с учетом прибавки															
$S \geq S_p + C = 28.22 \text{ мм}$															
Допускаемое внутреннее давление															
$[p] = \frac{2[\sigma]\phi_p(S - C)}{D + (S - C)} = 7.646 \text{ МПа}$															
Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости в пределах упругости															
$[F]_{E1} = \frac{31 \cdot 10^{-5} E}{n_y} D^2 \left[ \frac{100(S - C)}{D} \right]^{2.5} = 2.59e+08 \text{ Н}$															
Допускаемое осевое усилие из условия устойчивости в пределах упругости															
$[F]_E = \text{Min} \{ [F]_{E1}; [F]_{E2} \} = 2.59e+08 \text{ Н}$															
						E-101-2344.00.00.000 PP									Лист
2		Изм.	E-101-2344.2	Редикунцев	09.16										12
1		Изм.	E-101-2344.1	Редикунцев	04.16.										
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата										







Расчётный диаметр неукрепляемого отверстия

$$d_{\text{оп}} = 0,4 \sqrt{D_{\text{п}}(s - c)} = 67.35 \text{ мм}$$

Коэффициент понижения прочности узла врезки штуцера

$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p}(s_1 - c_s) \lambda_1 + l_{2p}s_2 \lambda_2 + l_{3p}(s_3 - c_s - c_{s1}) \lambda_3}{l_p(s - c)}}{1 + 0,5 \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1 \frac{d + 2c_s}{D_p} \frac{\varphi l_{1p}}{q l_p}} \right\} = 1$$

### Допускаемое давление для узла врезки штуцера

$$[p] = \frac{2K_1(s-c)\phi[\sigma]}{D_n + (s-c)V} V = 7.646 \text{ МПа}$$

где

$$K_1 = 1$$

### Приведенное суммарное напряжение в зоне обечайки

$$\sigma_{y\phi} = 179.6 \text{ МПа}$$

### Приведенное мембранное напряжение в зоне обечайки

$$\sigma_{pm_o} = 164 \text{ МПа}$$

Приведенное суммарное напряжение в зоне штуцера

$$\sigma_{\text{max}} = 197.7 \text{ МПа}$$

### Приведенное мембранное напряжение в зоне штуцера

$$\sigma_{\text{max}} = 171.5 \text{ МПа}$$

Приведенное суммарное напряжение на внутренней поверхности

$$\sigma_{y \text{ exo}} = 233.3 \text{ МПа}$$

Приведенное суммарное напряжение на внутренней поверхности

$$\sigma_{y_{\text{в шм}}} = 363.5 \text{ МПа}$$

Таким образом, рассмотренный узел врезки отвечает условиям прочности в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52857.3-2007.

Инв. № подл. 19765.4	Подп. и дата						Инв. №	Взам. инв.	Подп. и дата
	$\sigma_{\text{вн}_o} = 233.3 \text{ МПа}$								
	Приведенное суммарное напряжение на внутренней поверхности								
	$\sigma_{\text{вн}_\text{шт}} = 363.5 \text{ МПа}$								
Таким образом, рассмотренный узел врезки отвечает условиям прочности в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52857.3-2007.									
2		Изм.	E-101-2344.2	Редикulyцев	09.16	<b>E-101-2344.00.00.000 PP</b>			
1		Изм.	E-101-2344.1	Редикulyцев	04.16.				
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата				
						Лист 16			





Изгибающий момент вокруг оси X действующий на штуцер	$M_x$	3.75e+05	Н*мм
Изгибающий момент вокруг оси Y действующий на штуцер	$M_y$	5e+05	Н*мм
Изгибающий момент вокруг оси Z действующий на штуцер	$M_z$	6.25e+05	Н*мм
Перерезывающая сила вдоль оси X действующая на штуцер	$F_x$	3125	Н
Перерезывающая сила вдоль оси Y действующая на штуцер	$F_y$	3125	Н
Модуль продольной упругости материала обечайки	$E$	1.715e+05	МПа
Коэффициент Пуассона обечайки	$\mu$	0.3	
Модуль продольной упругости материала штуцера	$E_1$	1.715e+05	МПа
Коэффициент Пуассона штуцера	$\mu_1$	0.3	
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии стенки корпуса	$c_1$	3	мм
Прибавка для компенсации минусового допуска стенки корпуса	$c_2$	1	мм
Прибавка технологическая стенки корпуса	$c_3$	1	мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии стенки штуцера	$c_{s1}$	3	мм
Прибавка для компенсации минусового допуска стенки штуцера	$c_{s2}$	0	мм
Прибавка технологическая стенки штуцера	$c_{s3}$	1	мм

### Результаты расчёта

2		Изм.	E-101-2344.2	Редикольцев	09.16	<div style="text-align: center;"> <b>E-101-2344.00.00.000 PP</b> </div>	Лист
1		Изм.	E-101-2344.1	Редикольцев	04.16.		18
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата		

Расчётный диаметр неукрепляемого отверстия

$$d_{\text{оп}} = 0,4 \sqrt{D_{\text{п}}(s - c)} = 67.35 \text{ мм}$$

Коэффициент понижения прочности узла врезки штуцера

$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p}(s_1 - c_s) \chi_1 + l_{2p}s_2 \chi_2 + l_{3p}(s_3 - c_s - c_{s1}) \chi_3}{l_p(s - c)}}{1 + 0,5 \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1 \frac{d + 2c_s}{D_p} \frac{\varphi l_{1p}}{q l_p}} \right\} = 1$$

### Допускаемое давление для узла врезки штуцера

$$[p] = \frac{2K_1(s-c)\phi[\sigma]}{D_n + (s-c)V} V = 7.646 \text{ МПа}$$

где

$$K_1 = 1$$

### Приведенное суммарное напряжение в зоне обечайки

$$\sigma_{y\theta} = 176.1 \text{ МПа}$$

### Приведенное мембранное напряжение в зоне обечайки

$$\sigma_{pm_o} = 153.6 \text{ МПа}$$

Приведенное суммарное напряжение в зоне штуцера

$$\sigma_{y \text{ max}} = 209.2 \text{ МПа}$$

### Приведенное мембранное напряжение в зоне штуцера

$$\sigma_{\text{max}} = 171.7 \text{ МПа}$$

Приведенное суммарное напряжение на внутренней поверхности

$$\sigma_{y_{ex}} = 261.7 \text{ МПа}$$

Приведенное суммарное напряжение на внутренней поверхности

$$\sigma_{y \text{ на шти}} = 365.5 \text{ МПа}$$

Таким образом, рассмотренный узел врезки отвечает условиям прочности в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52857.3-2007.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	
19765.4					<p style="text-align: center;"> <math>\sigma_{\text{вн}_o} = 261.7 \text{ МПа}</math> </p> <p>Приведенное суммарное напряжение на внутренней поверхности</p> <p style="text-align: center;"> <math>\sigma_{\text{вн}_\text{шт}} = 365.5 \text{ МПа}</math> </p> <p>Таким образом, рассмотренный узел врезки отвечает условиям прочности в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52857.3-2007.</p>

  

2		Изм.	Е-101-2344.2	Редикulyцев	09.16	<b>Е-101-2344.00.00.000 РР</b>	Лист
1		Изм.	Е-101-2344.1	Редикulyцев	04.16.		
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата		19

## 1.5. Труба ø48x10

Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.2-2007

*Расчёт выполнен с помощью пакета прикладных программ расчёта на прочность элементов сосудов, аппаратов и трубопроводов PVP Design (Свидетельство о государственной регистрации 2008614973)*

Элемент: Гладкая цилиндрическая обечайка, работающая под действием  
внутреннего давления.  
Режим: Рабочий.

### *Исходные данные*

Материал обечайки	Сталь 09Г2С-12 ГОСТ 53383-2009, Труба		
Расчётная температура	T	293	°C
Расчётное давление в сосуде	P	6.6	МПа
Внутренний диаметр обечайки	D	28	мм
Фактическая длина обечайки	Lact	146	мм
Толщина стенки обечайки	S	10	мм
Прибавка на коррозию	c <sub>1</sub>	3	мм
Прибавка – минусовый допуск	c <sub>2</sub>	1.5	мм
Прибавка технологическая	c <sub>3</sub>	1	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки	c	5.5	мм
Коэффициент прочности продольного сварного шва	φ <sub>p</sub>	1	
Допускаемое напряжение	[σ]	135.5	МПа

### *Результаты расчёта*

Расчётная толщина стенки обечайки от действия давления

$$S_p = \frac{pD}{2[\sigma]\phi_p - p} = 0.6989 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки обечайки от действия давления с учетом прибавки

$$S \geq S_p + C = 6.199 \text{ мм}$$

Допускаемое внутреннее давление

$$[p] = \frac{2[\sigma]\phi_p(S - C)}{D + (S - C)} = 37.52 \text{ МПа}$$

Обечайка отвечает условиям прочности в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52857.2-2007.

Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Инв. №	Взам. инв.	Подп. и дата						Лист
2		Изм.	E-101-2344.2	Редикulyцев	09.16	<b>E-101-2344.00.00.000 PP</b>					20
1		Изм.	E-101-2344.1	Редикulyцев	04.16.						
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата						

## 1.6. Неподвижная опора

Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.5-2007

*Расчёт выполнен с помощью пакета прикладных программ расчёта на прочность элементов сосудов, аппаратов и трубопроводов PVP Design (Свидетельство о государственной регистрации 2008614973)*

Элемент: Цилиндрическая обечайка на седловых опорах,  
работающая под действием внутреннего давления.  
Без колец жесткости и без подкладного листа.  
Седловая опора со сплошным сечением.  
Режим: Рабочий.

### *Исходные данные*

Материал обечайки

Сталь 09Г2С-12 ГОСТ 5520-79, Лист

Расчётная температура	T	293	°C
Расчётное давление	P	6.6	МПа
Опорное усилие, действующее на опору	F	2.188e+04	H
Максимальный момент над опорой	M	1.241e+06	H*мм
Расчётное поперечное усилие	Q	1.724e+04	H
Внутренний диаметр обечайки	D	1050	мм
Исполнительная толщина стенки обечайки	s	32	мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии	c1	3	мм
Прибавка для компенсации минусового допуска	c2	1	мм
Прибавка технологическая	c3	1	мм
Сумма прибавок к толщине стенки обечайки	c	5	мм
Расстояние от края родительского элемента до седловой опоры	L_p	535	мм
Длина цилиндрической выступающей части, включая отбортовку	a	535	мм
Коэффициент прочности сварных швов, расположенных в области опорного узла	φ	1	
Угол охвата седловой опоры, градусов	δ <sub>1</sub>	120	
Ширина седловой опоры	b	153	мм
Допускаемое напряжение для материала обечайки	[σ]	152.5	МПа
Допускаемое осевое усилие из условий устойчивости по ГОСТ Р 52857.2-2007	[F]	1.391e+07	H
Допускаемый изгибающий момент из условий устойчивости по ГОСТ Р 52857.2-2007	[M]	3.653e+09	H·мм
Допускаемая перерезывающая сила по ГОСТ Р 52857.2-2007	[Q]	3.358e+06	H

### *Результаты расчёта*

Проверка несущей способности обечайки без подкладного листа в области опорного узла  
Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta_1 = 0,91 \frac{b}{\sqrt{D(s-c)}} = 0.8269$$

Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Инв. №	Взам. инв.	<div>Результаты расчёта</div> <div>Проверка несущей способности обечайки без подкладного листа в области опорного узла</div> <div>Параметр, определяемый шириной пояса опоры:</div> <div><math display="block">\beta_1 = 0,91 \frac{b}{\sqrt{D(s - c)}} = 0.8269</math></div>					
		Прибавка технологическая	c3	1						мм
		Сумма прибавок к толщине стенки обечайки	c	5						мм
		Расстояние от края родительского элемента до седловой опоры	L_p	535						мм
		Длина цилиндрической выступающей части, включая отбортовку	a	535						мм
		Коэффициент прочности сварных швов, расположенных в области опорного узла	φ	1						
		Угол охвата седловой опоры, градусов	δ <sub>1</sub>	120						
		Ширина седловой опоры	b	153						мм
		Допускаемое напряжение для материала обечайки	[σ]	152.5						МПа
		Допускаемое осевое усилие из условий устойчивости по ГОСТ Р 52857.2-2007	[F]	1.391e+07						Н
Взам. инв.		Допускаемый изгибающий момент из условий устойчивости по ГОСТ Р 52857.2-2007	[M]	3.653e+09	Н·мм					
		Допускаемая перерезывающая сила по ГОСТ Р 52857.2-2007	[Q]	3.358e+06	Н					

2		Изм.	Е-101-2344.2	Редикulyцев	09.16	Е-101-2344.00.00.000 PP	Лист
1		Изм.	Е-101-2344.1	Редикulyцев	04.16.		
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата		21

$$\bar{\sigma}_{\max} = \frac{4M_i}{\pi D^2 (s-c)} = \begin{matrix} 0.05307 \\ \text{МПа} \end{matrix}$$
$$K_{10} = 0.3892$$
$$K_{12} = 0.9816$$
$$K_{15} = 0.8461$$
$$K_2 = 1.25$$
$$g_1 = -\frac{0.23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0.1764$$
$$g_{2,1} = \frac{-\bar{\sigma}_{mx}}{K_\gamma[\sigma]} = -0.0002784$$

$$g_{2,2} = \left( \frac{pD}{4(s-c)} - \bar{\sigma}_{mx} \right) \frac{1}{K_2[\sigma]} = 0.3363$$

$$K_1(\mathfrak{g}_1; \mathfrak{g}_{2,1}) = 1.407$$

$$K_1(\mathfrak{g}_1; \mathfrak{g}_{2,2}) = 1.492$$

$$[\sigma]_i = K_1 K_2 [\sigma] = 268.3 \text{ МПа}$$
$$[F]_2 = \frac{0.7[\sigma_i]_2 \sqrt{D(s-c)(s-c)}}{K_{10}K_{12}} = 2.234e+06 \text{ H}$$
$$\mathcal{G}_1 = -\frac{0.53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0.5\delta_1)} = -1.578$$
$$g_{2,1} = 0$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	$\vartheta_{2,2} = \left[ \frac{F D}{4(s-c)} - \sigma_{\max} \right] \frac{1}{K_2[\sigma]} =$	0.3363				
					Коэффициент $K_1$ (принимается меньшее значение из двух): $K_1(\vartheta_1; \vartheta_{2,1}) =$ $K_1(\vartheta_1; \vartheta_{2,2}) =$	1.407 1.492				
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Предельное напряжение изгиба: $[\sigma]_i = K_1 K_2 [\sigma] =$	268.3 МПа				
					Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении: $[F]_2 = \frac{0.7[\sigma_i]_2 \sqrt{D(s-c)(s-c)}}{K_{10} K_{12}} =$	2.234e+06 Н				
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в окружном направлении: Коэффициент, представляющий отношение местных мембранных напряжений к местным напряжениям изгиба: $\vartheta_1 = - \frac{0.53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0.5\vartheta_1)} =$	-1.578				
					Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями $\vartheta_{2,1} =$	0				
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	19765.4					
					2		Изм.	E-101-2344.2	Редикольцев	09.16
					1		Изм.	E-101-2344.1	Редикольцев	04.16.
		Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата	E-101-2344.00.00.000 PP		Лист
										22

$$\mathcal{G}_{2,2} = \frac{pD}{2(s-c)} \frac{1}{K_1[\sigma]} = 0.6732$$

Коэффициент  $K_1$  (принимается меньшее значение из двух):

$$K_1(\mathfrak{g}_1; \mathfrak{g}_{2,1}) = 0.5137$$

$$K_1(\mathfrak{g}_1; \mathfrak{g}_{2,2}) = 0.8451$$

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_i = K_1 K_2 [\sigma] = 97.93 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0.9[\sigma_i]_3 \sqrt{D(s-c)}(s-c)}{K_{14}K_{16}K_{17}} = 1.214e+06 \text{ H}$$

Проверка прочности обечайки в области опорного узла:

Допускаемое усилие на опору:

$$[F_i] = \min \{ [F]_2; [F]_3 \} = 1.214\text{e}+06 \text{ H}$$

Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в осевом направлении:

Коэффициент, представляющий отношение местных мембранных напряжений к местным напряжениям изгиба:

$$\mathcal{J}_1 = -\frac{0.23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0.1764$$

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями

$$g_{2,1} = \frac{-\bar{\sigma}_{mx}}{K_2[\sigma]} = -0.0002784$$

$$g_{2,2} = \left( \frac{pD}{4(s_{\vartheta} - c)} - \bar{\sigma}_{mx} \right) \frac{1}{K_2[\sigma]} = 0.3363$$

Коэффициент  $K_1$  (принимается меньшее значение из двух):

$$K_1(\mathfrak{g}_1; \mathfrak{g}_{2,1}) = 1.407$$

$$K_1(\mathfrak{g}_1; \mathfrak{g}_{2,2}) = 1.492$$

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_i = K_1 K_2 [\sigma] = 268.3 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0.7[\sigma_i]_2 \sqrt{D(s_{\text{eff}} - c)(s_{\text{eff}} - c)}}{K_{10}K_{12}} = 2.234\text{e}+06 \text{ H}$$

Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в окружном направлении:

Коэффициент, представляющий отношение местных мембранных напряжений к местным напряжениям изгиба:

$$\mathcal{G}_1 = -\frac{0.53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0.5\delta_1)} = -1.578$$

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями

$$g_{21} = 0$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	$g_{2,1} = \frac{-\bar{\sigma}_{mx}}{K_2[\sigma]} =$	-0.0002784				
					$g_{2,2} = \left( \frac{pD}{4(s_{\varphi} - c)} - \bar{\sigma}_{mx} \right) \frac{1}{K_2[\sigma]} =$	0.3363				
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Коэффициент $K_1$ (принимается меньшее значение из двух):					
					$K_1(g_1; g_{2,1}) =$	1.407				
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	$K_1(g_1; g_{2,2}) =$	1.492				
					Предельное напряжение изгиба:					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	$[\sigma]_i = K_1 K_2 [\sigma] =$	268.3 МПа				
					Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	$[F]_2 = \frac{0.7[\sigma_i]_2 \sqrt{D(s_{\varphi} - c)(s_{\varphi} - c)}}{K_{10} K_{12}} =$	2.234e+06 Н				
					Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в окружном направлении:					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Коэффициент, представляющий отношение местных мембранных напряжений к местным напряжениям изгиба:					
					$g_1 = -\frac{0.53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0.5\delta_1)} =$	-1.578				
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями					
					$g_{2,1} =$	0				
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	2					
					1					
					Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	E-101-2344.00.00.000 PP					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Лист					
					23					

$$\mathcal{G}_{2,2} = \frac{pD}{2(s_{\sigma} - c)} \frac{1}{K_2[\sigma]} = 0.6732$$

Коэффициент  $K_1$  (принимается меньшее значение из двух):

$$K_1(\mathfrak{g}_1; \mathfrak{g}_{2,1}) = 0.5137$$

$$K_1(\mathfrak{g}_1; \mathfrak{g}_{2,2}) = 0.8451$$

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_i = K_1 K_2 [\sigma] = 97.93 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0.9[\sigma_i]_3 \sqrt{D(s_{\text{eff}} - c)(s_{\text{eff}} - c)}}{K_{14}K_{16}K_{17}} = 1.214\text{e}+06 \text{ H}$$

Проверка прочности обечайки в области опорного узла:

Допускаемое усилие на опору:

$$[F_i] = \min \{ [F]_2; [F]_3 \} = 1.214\text{e}+06 \text{ H}$$

Проверка устойчивости обечайки в области опорного узла:

Эффективное осевое усилие от местных мембранных напряжений, действующих в области опоры:

$$F_e = F_i \cdot \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{D}{(s-c)}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} = 3.139\text{e}+04 \text{ H}$$

Условие устойчивости обечайки, работающей под внутренним давлением:

$$\frac{|M_i|}{[M]} + \frac{|F_e|}{[F]} + \left( \frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0.002622 < 1$$

Цилиндрическая обечайка на седловых опорах отвечает условиям прочности и устойчивости в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52857.5-2007 .

Инв. № подл.

19765.4

Подп. и дата

Взам. инв.

Инв. №

Подп. и дата

2

Изм.

Е-101-2344.2

Редикунцев

09.16

1

Изм.

Е-101-2344.1

Редикунцев

04.16.

Изм

Кол.уч

Лист

№ док.

Подпись

Дата

E-101-2344.00.00.000 РР

Лист

24

$$\frac{|M_i|}{[M]} + \frac{|F_e|}{[F]} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 =$$

Цилиндрическая обечайка на седловых опорах отвечает условиям прочности и устойчивости в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52857.5-2007 .

0.002622< 1



## 1.7. Подвижная опора

Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.5-2007.

Расчёт выполнен с помощью пакета прикладных программ расчёта на прочность элементов сосудов, аппаратов и трубопроводов PVP Design (Свидетельство о государственной регистрации 2008614973)

Элемент: Цилиндрическая обечайка на седловых опорах,  
работающая под действием внутреннего давления.  
Без колец жесткости и без подкладного листа.  
Седловая опора со сплошным сечением.  
Режим: Рабочий.

### Исходные данные

Материал обечайки

Сталь 09Г2С-12 ГОСТ 5520-79, Лист

Расчётная температура	T	293	°C
Расчётное давление	P	6.6	МПа
Опорное усилие, действующее на опору	F	1.654e+04	H
Максимальный момент над опорой	M	8.92e+05	H*мм
Расчётное поперечное усилие	Q	1.331e+04	H
Внутренний диаметр обечайки	D	1050	мм
Исполнительная толщина стенки обечайки	s	32	мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии	c1	3	мм
Прибавка для компенсации минусового допуска	c2	1	мм
Прибавка технологическая	c3	1	мм
Сумма прибавок к толщине стенки обечайки	c	5	мм
Расстояние от края родительского элемента до седловой опоры	L_p	1672	мм
Длина цилиндрической выступающей части, включая отбортовку	a	756	мм
Коэффициент прочности сварных швов, расположенных в области опорного узла	φ	1	
Угол охвата седловой опоры, градусов	δ <sub>1</sub>	120	
Ширина седловой опоры	b	153	мм
Допускаемое напряжение для материала обечайки	[σ]	152.5	МПа
Допускаемое осевое усилие из условий устойчивости по ГОСТ Р 52857.2-2007	[F]	1.391e+07	H
Допускаемый изгибающий момент из условий устойчивости по ГОСТ Р 52857.2-2007	[M]	3.653e+09	H·мм
Допускаемая перерезывающая сила по ГОСТ Р 52857.2-2007	[Q]	3.358e+06	H

### Результаты расчёта

Проверка несущей способности обечайки без подкладного листа в области опорного узла  
Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta_1 = 0,91 \frac{b}{\sqrt{D(s-c)}} = 0.8269$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №	Взам. инв.	Подп. и дата	Инв. № подл.	19765.4
2		Изм.	E-101-2344.2	Редикulyцев	09.16	E-101-2344.00.00.000 PP
1		Изм.	E-101-2344.1	Редикulyцев	04.16.	
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата	
						Лист
						25

$$\bar{\sigma}_{\max} = \frac{4M_i}{\pi D^2 (s-c)} = \begin{matrix} 0.03815 \\ \text{МПа} \end{matrix}$$
$$K_{10} = 0.3892$$
$$K_{12} = 0.9816$$
$$K_{15} = 1$$
$$K_2 = 1.25$$
$$g_1 = -\frac{0.23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0.2085$$
$$g_{2,1} = \frac{-\bar{\sigma}_{mx}}{K_1[\sigma]} = -0.0002002$$

$$g_{2,2} = \left( \frac{pD}{4(s-c)} - \bar{\sigma}_{mx} \right) \frac{1}{K_2[\sigma]} = 0.3364$$

$$K_1(\mathfrak{g}; \mathfrak{g}_{3,1}) = 1.376$$

$$K_1(\mathfrak{g}_1; \mathfrak{g}_{2,2}) = 1.499$$

$$[\sigma]_i = K_1 K_2 [\sigma] = 262.4 \text{ МПа}$$
$$[F]_2 = \frac{0.7[\sigma_i]_2 \sqrt{D(s-c)(s-c)}}{K_{10}K_{12}} = 2.185e+06 \text{ H}$$
$$\mathcal{G}_1 = -\frac{0.53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0.5\delta_1)} = -1.47$$
$$g_{2,1} = 0$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	$\vartheta_{2,2} = \left[ \frac{FD}{4(s-c) - \sigma_{\max}} - \sigma_{\max} \right] \frac{1}{K_2[\sigma]} =$	0.3364						
					Коэффициент $K_1$ (принимается меньшее значение из двух): $K_1(\vartheta_1; \vartheta_{2,1}) =$ $K_1(\vartheta_1; \vartheta_{2,2}) =$	1.376 1.499						
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Предельное напряжение изгиба: $[\sigma]_i = K_1 K_2 [\sigma] =$	262.4 МПа						
					Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении: $[F]_2 = \frac{0.7[\sigma_i]_2 \sqrt{D(s-c)(s-c)}}{K_{10} K_{12}} =$	2.185e+06 Н						
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в окружном направлении: Коэффициент, представляющий отношение местных мембранных напряжений к местным напряжениям изгиба: $\vartheta_1 = - \frac{0.53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0.5\vartheta_1)} =$	-1.47						
					Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями $\vartheta_{2,1} = <$	0						
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата			E-101-2344.00.00.000 PP	Лист				
					2		Изм.	E-101-2344.2	Редикольцев	09.16		
					1		Изм.	E-101-2344.1	Редикольцев	04.16.		
					Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата		

$$\mathcal{G}_{2,2} = \frac{pD}{2(s-c)} \frac{1}{K_1[\sigma]} = 0.6732$$

Коэффициент  $K_1$  (принимается меньшее значение из двух):

$$K_1(\mathfrak{g}_1; \mathfrak{g}_{2,1}) = 0.5433$$

$$K_1(\mathfrak{g}_1; \mathfrak{g}_{2,2}) = 0.8914$$

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_i = K_1 K_2 [\sigma] = 103.6 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0.9[\sigma_i]_3 \sqrt{D(s-c)}(s-c)}{K_{14} K_{16} K_{17}} = 1.196 \times 10^6 \text{ H}$$

Проверка прочности обечайки в области опорного узла:

Допускаемое усилие на опору:

$$[F_i] = \min \{ [F]_2; [F]_3 \} = 1.196\text{e}+06 \text{ H}$$

Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в осевом направлении:

Коэффициент, представляющий отношение местных мембранных напряжений к местным напряжениям изгиба:

$$g_1 = -\frac{0.23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0.2085$$

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями

$$g_{2,1} = \frac{-\bar{\sigma}_{mx}}{K_2[\sigma]} = -0.0002002$$

$$g_{2,2} = \left( \frac{pD}{4(s_{\vartheta} - c)} - \bar{\sigma}_{mx} \right) \frac{1}{K_2[\sigma]} = 0.3364$$

Коэффициент  $K_1$  (принимается меньшее значение из двух):

$$K_1(\mathfrak{g}; \mathfrak{g}_{2,1}) = 1.376$$

$$K_1(\mathfrak{g}_1; \mathfrak{g}_{2,2}) = 1.499$$

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_i = K_1 K_2 [\sigma] = 262.4 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0.7[\sigma_i]_2 \sqrt{D(s_{\text{eff}} - c)(s_{\text{eff}} - c)}}{K_{10}K_{12}} = 2.185\text{e}+06 \text{ H}$$

Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в окружном направлении:

Коэффициент, представляющий отношение местных мембранных напряжений к местным напряжениям изгиба:

$$g_1 = -\frac{0.53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0.5\delta_1)} = -1.47$$

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями

$$g_{21} = 0$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	$g_{2,1} = \frac{-\bar{\sigma}_{mx}}{K_2[\sigma]} =$	-0.0002002				
					$g_{2,2} = \left( \frac{pD}{4(s_{\varphi} - c)} - \bar{\sigma}_{mx} \right) \frac{1}{K_2[\sigma]} =$	0.3364				
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Коэффициент $K_1$ (принимается меньшее значение из двух):					
					$K_1(g_1; g_{2,1}) =$	1.376				
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	$K_1(g_1; g_{2,2}) =$	1.499				
					Предельное напряжение изгиба:					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	$[\sigma]_i = K_1 K_2 [\sigma] =$	262.4 МПа				
					Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	$[F]_2 = \frac{0.7[\sigma]_i \sqrt{D(s_{\varphi} - c)(s_{\varphi} - c)}}{K_{10} K_{12}} =$	2.185e+06 Н				
					Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в окружном направлении:					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Коэффициент, представляющий отношение местных мембранных напряжений к местным напряжениям изгиба:					
					$g_1 = -\frac{0.53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0.5\delta_1)} =$	-1.47				
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями					
					$g_{2,1} =$	0				
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	2					
					1					
					Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Изм.	Е-101-2344.2	Редикольцев	09.16	E-101-2344.00.00.000 PP	Лист
					Изм.	Е-101-2344.1	Редикольцев	04.16.		
					Изм	Кол.уч	Лист	№ док.		
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Изм.	Е-101-2344.2	Редикольцев	09.16	E-101-2344.00.00.000 PP	Лист
					Изм.	Е-101-2344.1	Редикольцев	04.16.		
					Изм	Кол.уч	Лист	№ док.		

$$\mathcal{G}_{2,2} = \frac{pD}{2(s_{\sigma} - c)} \frac{1}{K_2[\sigma]} = 0.6732$$

Коэффициент  $K_1$  (принимается меньшее значение из двух):

$$K_1(\mathfrak{g}_1; \mathfrak{g}_{2,1}) = 0.5433$$

$$K_1(\mathfrak{g}_1, \mathfrak{g}_{2,2}) = 0.8914$$

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_i = K_1 K_2 [\sigma] = 103.6 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0.9[\sigma_i]_3 \sqrt{D(s_{\text{eff}} - c)(s_{\text{eff}} - c)}}{K_{14}K_{16}K_{17}} = 1.196\text{e}+06 \text{ H}$$

Проверка прочности обечайки в области опорного узла:

Допускаемое усилие на опору:

$$[F_i] = \min \{ [F]_2; [F]_3 \} = 1.196\text{e}+06 \text{ H}$$

Проверка устойчивости обечайки в области опорного узла:

Эффективное осевое усилие от местных мембранных напряжений, действующих в области опоры:

$$F_e = F_i \cdot \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{D}{(s-c)}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} = 2.805\text{e}+04 \text{ H}$$

Условие устойчивости обечайки, работающей под внутренним давлением:

$$\frac{|M_i|}{[M]} + \frac{|F_e|}{[F]} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 = 0.002276 < 1$$

Цилиндрическая обечайка на седловых опорах отвечает условиям прочности и устойчивости в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52857.5-2007.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	$\frac{ M_i }{[M]} + \frac{ F_e }{[F]} + \left( \frac{Q}{[Q]} \right)^2 =$ <p>0.002276 &lt; 1</p> <p>Цилиндрическая обечайка на седловых опорах отвечает условиям прочности и устойчивости в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52857.5-2007.</p>
19765.4					

2		Изм.	Е-101-2344.2	Редикунцев	09.16	<b>Е-101-2344.00.00.000 РР</b>	Лист
1		Изм.	Е-101-2344.1	Редикунцев	04.16.		
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата		

## 1.8. Цилиндрическая обечайка камеры

Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.2-2007

*Расчёт выполнен с помощью пакета прикладных программ расчёта на прочность элементов сосудов, аппаратов и трубопроводов PVP Design (Свидетельство о государственной регистрации 2008614973)*

Элемент: Гладкая цилиндрическая обечайка, работающая под действием внутреннего давления - изгибающего момента.

Режим: Рабочий.

### *Исходные данные*

Материал обечайки

Сталь 12ХМ ГОСТ 5520-79, Лист

Расчётная температура	T	400	°C
Расчётное давление в сосуде	P	0.02	МПа
Расчётный изгибающий момент	M	4.018e+05	Н·мм
Расчётное поперечное усилие	Q	1486	Н
Внутренний диаметр обечайки	D	948	мм
Фактическая длина обечайки	Lact	249	мм
Расчётная длина обечайки	L	249	мм
Толщина стенки обечайки	S	12	мм
Прибавка на коррозию	c <sub>1</sub>	3	мм
Прибавка – минусовый допуск	c <sub>2</sub>	0.8	мм
Прибавка технологическая	c <sub>3</sub>	1	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки	c	4.8	мм
Коэффициент прочности продольного сварного шва	φ <sub>p</sub>	1	
Допускаемое напряжение	[σ]	132	МПа
Модуль продольной упругости	E	1.78e+05	МПа

### *Результаты расчёта*

Расчётная толщина стенки обечайки от действия давления

$$S_p = \frac{pD}{2[\sigma]\phi_p - p} = 0.07182 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки обечайки от действия давления с учетом прибавки

$$S \geq S_p + C = 4.872 \text{ мм}$$

Допускаемое внутреннее давление

$$[p] = \frac{2[\sigma]\phi_p(S - C)}{D + (S - C)} = 1.99 \text{ МПа}$$

Допускаемый изгибающий момент из условий устойчивости в пределах упругости

$$[M]_E = \frac{89 \cdot 10^{-6} E}{n_y} D^3 \left[ \frac{100(S - C)}{D} \right]^{2.5} = 2.813e+09 \text{ Н·мм}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности

Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Инв. №	Взам. инв.	Подп. и дата	<div style="text-align: center;"> <b>E-101-2344.00.00.000 PP</b> </div>	Лист
2		Изм.	E-101-2344.2	Редикунцев	09.16		
1		Изм.	E-101-2344.1	Редикунцев	04.16.		
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата		29



## 1.9. Конический переход камеры Ду950 / Ду600

Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.2-2007

*Расчёт выполнен с помощью пакета прикладных программ расчёта на прочность элементов сосудов, аппаратов и трубопроводов PVP Design (Свидетельство о государственной регистрации 2008614973)*

Элемент: Неотбортованный конический переход,  
работающий под действием внутреннего давления.  
Режим: Рабочий.

### *Исходные данные*

Материал конической обечайки или днища	Сталь 12ХМ ГОСТ 5520-79, Лист
Материал большего цилиндрического перехода	Сталь 12ХМ ГОСТ 5520-79, Лист
Материал меньшего цилиндрического перехода	Сталь 12ХМ ГОСТ 5520-79, Лист

Расчётная температура	T	400	°C
Расчётное давление	P	0.02	МПа
Расчётная осевая сила	F	5000	Н
Расчётный изгибающий момент	M	1.183e+05	Н·мм
Внутренний диаметр большей обечайки, перехода или днища	D	948	мм
Внутренний диаметр меньшей цилиндрической обечайки	D <sub>1</sub>	597	мм
Половина угла раствора при вершине конической обечайки (днища)	α <sub>1</sub>	30.41	град
Исполнительная толщина стенки конической обечайки (днища)	S <sub>к</sub>	12	мм
Исполнительная толщина стенки большей цилиндрической обечайки	S <sub>б</sub>	12	мм
Исполнительная толщина стенки меньшей цилиндрической обечайки	S <sub>м</sub>	12	мм
Прибавка к расчётной толщине конической обечайки (днища) для компенсации коррозии и эрозии	C <sub>к_1</sub>	3	мм
Прибавка к расчётной толщине конической обечайки (днища) для компенсации минусового допуска	C <sub>к_2</sub>	0.8	мм
Прибавка технологическая к расчётной толщине конической обечайки (днища)	C <sub>к_3</sub>	1	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине конической обечайки (днища)	C <sub>к</sub>	4.8	мм
Прибавка к расчётной толщине большей цилиндрической обечайки(перехода) для компенсации коррозии и эрозии	C <sub>2б_1</sub>	3	мм
Прибавка к расчётной толщине большей цилиндрической обечайки(перехода) для компенсации минусового допуска	C <sub>2б_2</sub>	0.8	мм
Прибавка технологическая к расчётной толщине большей цилиндрической обечайки (перехода)	C <sub>2б_3</sub>	1	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине большей цилиндрической обечайки (перехода)	C <sub>2б</sub>	4.8	мм
Прибавка к расчётной толщине меньшей цилиндрической обечайки(перехода) для компенсации коррозии и эрозии	C <sub>2м_1</sub>	3	мм
Прибавка к расчётной толщине меньшей цилиндрической	C <sub>2м_2</sub>	0.8	мм

Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата		Инв. №		Взам. инв.		Подп. и дата		Лист
				</						

Модуль продольной упругости материала конической обечайки (днища)

$C_{2M\_3}$	1	MM
$C_{2M}$	4.8	MM
$\varphi_p$	1	
$\varphi_T$	1	
$[\sigma]$	132	МПа
$[\sigma]_2$	132	МПа
$[\sigma]_2$	132	МПа
E	1.78e+05	МПа

Расчётная длина переходной части конической обечайки:

$$a_1 = 0,7 \sqrt{\frac{D}{\cos \alpha_1}} (s_1 - c) = 62,27 \text{ mm}$$

Расчётная длина переходной части конической обечайки у меньшего конца:

$$a_1 = \sqrt{\frac{D}{\cos \alpha_1}} (s_1 - c) = 49.42 \text{ mm}$$

Расчётная длина переходной части цилиндрической обечайки:

$$a_2 = 0,7\sqrt{D(s_2 - c)} = 57.83 \text{ mm}$$

Расчётная длина цилиндрической обечайки или штуцера у меньшего конца:

$$a_2 = 1,25 \sqrt{D(s_2 - c)} = 81.95 \text{ mm}$$

Расчётный диаметр гладкой конической обечайки без тороидального перехода:

$$D_v = D - 1.4a_1 \sin \alpha_1 = 903.9 \text{ mm}$$

Эффективные толщины переходных участков:

- конической части соединения без тороида: без тороида:

$$s_{1E} = \max \left\{ \frac{a_{1D}}{a_1} s_1, s_x \right\} = 12 \text{ mm}$$

- цилиндрической части соединения без тороидального перехода:

$$s_{2F} = \max \left\{ \frac{a_{2D}}{a_2} s_2, s \right\} = 12 \text{ mm}$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление для конической обечайки или днища:

$$[\rho]_{sx} = \frac{2[\sigma]\varphi_p(s_x - c)}{\frac{D_x}{\cos \alpha_i} + (s_x - c)} = 1.801 \text{ МПа}$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	<p>Расчётная длина переходной части цилиндрической обечайки:</p> $a_2 = 0,7\sqrt{D(s_2 - c)} = 57.83 \text{ мм}$ <p>Расчётная длина цилиндрической обечайки или штуцера у меньшего конца:</p> $a_2 = 1,25\sqrt{D(s_2 - c)} = 81.95 \text{ мм}$ <p>Расчётный диаметр гладкой конической обечайки без тороидального перехода:</p> $D_x = D - 1.4a_1 \sin \alpha_1 = 903.9 \text{ мм}$ <p>Эффективные толщины переходных участков:</p> <p>- конической части соединения без тороидального перехода:</p> $s_{1Э} = \max \left\{ \frac{a_{1D}}{a_1} s_1; s_x \right\} = 12 \text{ мм}$ <p>- цилиндрической части соединения без тороидального перехода:</p> $s_{2Э} = \max \left\{ \frac{a_{2D}}{a_2} s_2; s \right\} = 12 \text{ мм}$ <p>Допускаемое внутреннее избыточное давление для конической обечайки или днища:</p> $[p]_{сх} = \frac{2[\sigma]\varphi_p(s_x - c)}{\frac{D_x}{\cos \alpha_i} + (s_x - c)} = 1.801 \text{ МПа}$													
					<table border="1"> <tr> <td>2</td> <td></td> <td>Изм.</td> <td>Е-101-2344.2</td> <td>Редикulyцев</td> <td>09.16</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td></td> <td>Изм.</td> <td>Е-101-2344.1</td> <td>Редикulyцев</td> <td>04.16.</td> </tr> <tr> <td>Изм</td> <td>Кол.уч</td> <td>Лист</td> <td>№ док.</td> <td>Подпись</td> <td>Дата</td> </tr> </table>	2		Изм.	Е-101-2344.2	Редикulyцев	09.16	1		Изм.	Е-101-2344.1	Редикulyцев	04.16.	Изм
2		Изм.	Е-101-2344.2	Редикulyцев	09.16													
1		Изм.	Е-101-2344.1	Редикulyцев	04.16.													
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата													

**Е-101-2344.00.00.000 PP**

Лист  
32



$$[F] = \pi D_1 (s_v - c) \phi_r [\sigma] \cos \alpha_1 = 2.733 \text{e}+06 \text{ H}$$

где:

$$[F] = \min \left\{ \frac{[F]_{\text{H}}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[F]_{\text{H}}}{[F]_{\text{S}}} \right)^2}}; \frac{D_1}{D_F} [F]_{\text{H}} \right\} = 1.599\text{e}+06 \text{ H}$$

- допускаемая осевая сила из условия прочности:

$$[F]_v = \pi D_F (s_v - c) [\sigma] \cos \alpha_1 = 1.599\text{e}+06 \text{ H}$$

- допускаемая осевая сила из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[F]_F = \frac{310 \cdot 10^{-6} E}{n_v} (D_F \cos \alpha_1)^2 \cdot \left[ \frac{100(s_k - c)}{D_F} \right]^{2.5} = 7.302\text{e}+06 \text{ H}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности:

$$[M] = \frac{D_1}{A} \pi D_1 (s_x - c) \phi_T [\sigma] \cos \alpha_1 = 2.483 \text{e}+08 \text{ H} \cdot \text{mm}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости:

где:

$$[M] = \frac{[M]_{\text{H}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\text{H}}}{[M]_{\text{E}}}\right)^2}} = 6.891\text{e}+08 \text{ H}\cdot\text{MM}$$

- допускаемый изгибающий момент из условия прочности:

$$[M]_{\text{H}} = \frac{D_F}{A} \pi D_F (s_n - c) [\sigma] \cos \alpha_1 = 7.251\text{e}+08 \text{ H}\cdot\text{MM}$$

- допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_E = \frac{D_F}{3.5} \cdot \frac{310 \cdot 10^{-6} E}{n_y} (D_F \cos \alpha_1)^2 \cdot \left[ \frac{100(s_k - c)}{D_F} \right]^{2.5} = 2.214 \text{e}+09 \text{ H} \cdot \text{mm}$$

- эффективный диаметр конической обечайки при осевом сжатии и изгибе:

$$D_F = \frac{0,9D + 0,1D_1}{\cos \alpha_1} = 1061 \text{ mm}$$

- коэффициент запаса устойчивости:

$$\mathcal{N}_v = \quad \quad \quad 2.4$$

Допускаемое давление из условия прочности большей переходной части без тороидального перехода:

где:

$$[p] = \frac{2[\sigma]_2 \varphi_p(s_2 - c)}{D\beta + (s_2 - c)} = 1.901 \text{ МПа}$$

- коэффициент формы:

$$\beta_1 = \max\{0.5, \beta\} = 1.047$$

Инв. № подл. 19765.4	Подп. и дата					Инв. №	Подп. и дата																											
	- допускаемый изгибающий момент из условия прочности:						$[M]_{\text{ж}} = \frac{D_F}{4} \pi D_F (s_{\text{ж}} - c) [\sigma] \cos \alpha_1 = 7.251\text{e}+08 \text{ Н} \cdot \text{мм}$																											
	- допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:						$[M]_{\text{ж}} = \frac{D_F}{3.5} \cdot \frac{310 \cdot 10^{-6} E}{n_y} (D_F \cos \alpha_1)^2 \cdot \left[ \frac{100(s_{\text{ж}} - c)}{D_F} \right]^{2.5} = 2.214\text{e}+09 \text{ Н} \cdot \text{мм}$																											
	- эффективный диаметр конической обечайки при осевом сжатии и изгибе:						$D_F = \frac{0,9D + 0,1D_1}{\cos \alpha_1} = 1061 \text{ мм}$																											
Взам. инв.					- коэффициент запаса устойчивости:					$n_y = 2.4$																								
Подп. и дата					Допускаемое давление из условия прочности большей переходной части без тороидального перехода: где:					$[p] = \frac{2[\sigma]_2 \varphi_p (s_2 - c)}{D \beta_1 + (s_2 - c)} = 1.901 \text{ МПа}$																								
Инв. № подл.					- коэффициент формы:					$\beta_1 = \max \{0.5; \beta\} = 1.047$																								
2					Изм.					Е-101-2344.2					Редикulyцев					09.16					Е-101-2344.00.00.000 РР					Лист				
1					Изм.					Е-101-2344.1					Редикulyцев					04.16.										33				
Изм					Кол.уч					Лист					№ док.					Подпись										Дата				

- коэффициент  $\beta$ :

$$\beta = 0,4 \sqrt{\frac{D}{s_2 - c}} \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{1 + \sqrt{\frac{1 + \chi \left( \frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)^2}{2 \cos \alpha_1} \chi \left( \frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)}} - 0,25 = 1.047$$

Допускаемая осевая растягивающая или сжимающая сила из условия прочности переходной части:

где:

$$[F] = \pi D \frac{(s_2 - c)[\sigma]_2 \varphi_r}{\beta_s} = 8.592 \text{e}+05 \text{ H}$$

- коэффициент  $\beta_5$ :

$$\beta_s = \max\{1.0; (2\beta + 1.2)\} = 3.294$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности переходной части:

$$[M] = \frac{D}{4}[F] = 2.483\text{e}+08 \text{ H}\cdot\text{MM}$$

Допускаемое давление из условия прочности соединения штуцера или внутреннего цилиндрического корпуса с конической обечайкой:

где:

$$[\rho]_{MN} = \frac{2[\sigma]_h \varphi_p (s_2 - c)}{D\beta_1 + (s_2 - c)} = 2.066 \text{ МПа}$$

- общий коэффициент формы для переходной части:

$$\beta_4 = \max \{1.0, \beta_v\} = 1.529$$

- коэффициент  $\beta_N$ :

$$\beta_u = \begin{cases} \beta + 0.75 & -npu & x \left( \frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)^2 \geq 1 \\ 0,4 \sqrt{\frac{D}{s_2 - c}} \times & & \\ \times \frac{tg \alpha_1}{x \left( \frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right) \sqrt{\frac{s_1 - c}{(s_2 - c) \cos \alpha_1}} + \sqrt{\frac{1 + x \left( \frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)^2}{2}}} + & & \\ + 0,5 & -npu & x \left( \frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)^2 < 1 \end{cases} = 1.529$$

- коэффициент  $\beta$ :

$$\beta = 0,4 \sqrt{\frac{D}{s_2 - c}} \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{1 + \sqrt{\frac{1 + x \left( \frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)^2}{2 \cos \alpha_1} x \left( \frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)}} - 0,25 = 0,7794$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	
19765.4					<p><math>\beta_4 = \max \{1.0; \beta_x\} =</math> <span style="float: right;">1.529</span></p> <p>- коэффициент <math>\beta_x</math>:</p> $\beta_x = \left\{ \begin{array}{ll} \beta + 0.75 & \text{— при } x \left( \frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)^2 \geq 1 \\ 0,4 \sqrt{\frac{D}{s_2 - c}} \times \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{x \left( \frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right) \sqrt{\frac{s_1 - c}{(s_2 - c) \cos \alpha_1}} + \sqrt{\frac{1 + x \left( \frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)^2}{2}}} & \\ + 0,5 & \text{— при } x \left( \frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)^2 < 1 \end{array} \right\} =$ <p><span style="float: right;">1.529</span></p> <p>- коэффициент <math>\beta</math>:</p> $\beta = 0,4 \sqrt{\frac{D}{s_2 - c}} \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{1 + \sqrt{\frac{1 + x \left( \frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)^2}{2 \cos \alpha_1}} x \left( \frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)} - 0,25 =$ <p><span style="float: right;">0.7794</span></p>

Допускаемая осевая растягивающая или сжимающая сила из условия прочности переходной части:  
где:

$$[F] = \pi D \frac{(s_2 - c)[\sigma]_2 \cdot \varphi_p}{\beta_8} = 8.658e+05 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности переходной части:

$$[M] = \frac{D}{4} [F] = 1.292e+08 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

Условие устойчивости

$$-\frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} = 0.003299 < 1$$

Условие прочности большей переходной части

$$\left| \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} \right| + \frac{M}{[M]} = 0.005283 < 1$$

Условие прочности меньшей переходной части

$$\left| \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} \right| + \frac{M}{[M]} = 0.004824 < 1$$

Конический переход (пологое коническое днище) отвечает условиям прочности и устойчивости в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52857.2-2007.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	
19765.4					
2		Изм.	Е-101-2344.2	Редикюльцев	09.16
1		Изм.	Е-101-2344.1	Редикюльцев	04.16.
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата

<b>Е-101-2344.00.00.000 РР</b>	Лист
	35

## 1.10. Проставок Ду600

Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.2-2007

*Расчёт выполнен с помощью пакета прикладных программ расчёта на прочность элементов сосудов, аппаратов и трубопроводов PVP Design (Свидетельство о государственной регистрации 2008614973)*

Элемент: Гладкая цилиндрическая обечайка, работающая под действием  
внутреннего давления.  
Режим: Рабочий.

### *Исходные данные*

Материал обечайки

Сталь 12ХМ ГОСТ 5520-79, Лист

Расчётная температура	T	400	°C
Расчётное давление в сосуде	P	0.02	МПа
Внутренний диаметр обечайки	D	597	мм
Фактическая длина обечайки	Lact	200	мм
Толщина стенки обечайки	S	12	мм
Прибавка на коррозию	c <sub>1</sub>	3	мм
Прибавка – минусовый допуск	c <sub>2</sub>	0.8	мм
Прибавка технологическая	c <sub>3</sub>	1	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки	c	4.8	мм
Коэффициент прочности продольного сварного шва	φ <sub>p</sub>	1	
Допускаемое напряжение	[σ]	132	МПа

### *Результаты расчёта*

Расчётная толщина стенки обечайки от действия давления

$$S_p = \frac{pD}{2[\sigma]\phi_p - p} = 0.04523 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки обечайки от действия давления с учетом прибавки

$$S \geq S_p + C = 4.845 \text{ мм}$$

Допускаемое внутреннее давление

$$[p] = \frac{2[\sigma]\phi_p(S - C)}{D + (S - C)} = 3.146 \text{ МПа}$$

Обечайка отвечает условиям прочности в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52857.2-2007.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №	Взам. инв.	Подп. и дата							Лист	
19765.4												
2		Изм.	E-101-2344.2	Редикulyцев	09.16	<b>E-101-2344.00.00.000 PP</b>						
1		Изм.	E-101-2344.1	Редикulyцев	04.16.							
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата							36

<b>Результаты расчёта</b>									
Расчётная толщина стенки обечайки от действия давления									
$S_p = \frac{pD}{2[\sigma] \varphi_p - p} =$					0.04523 мм				
Расчётная толщина стенки обечайки от действия давления с учетом прибавки									
$S \geq S_p + C =$					4.845 мм				
Допускаемое внутреннее давление									
$[p] = \frac{2[\sigma] \varphi_p (S - C)}{D + (S - C)} =$					3.146 МПа				
Обечайка отвечает условиям прочности в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52857.2-2007.									

## 2. РАСЧЕТ НА ВАКУУМ

### 2.1. Трубный пучок

Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.7–2007

*Расчёт выполнен с помощью пакета прикладных программ расчёта на прочность элементов сосудов, аппаратов и трубопроводов PVP Design (Свидетельство о государственной регистрации 2008614973)*

Элементы кожухотрубчатого теплообменного аппарата  
с неподвижными трубными решетками.

Режим: Рабочий.

Аппарат с перегородками по межтрубному пространству.

Аппарат без перегородок по трубному пространству.

Решетка, вваренная в кожух.

Крепление труб к решетке развальцовкой с обваркой.

Трубы развальцованные в пазы при наличии одного паза.

Специальная проверка жесткости решеток не нужна.

#### *Исходные данные*

Материал кожуха	Сталь 09Г2С-12 ГОСТ 5520-79, Лист
Материал труб	Сталь 20 ГОСТ 550-75, Труба
Материал решеток	Сталь 09Г2С ГОСТ 8479-70 гр.IV-КП 245, Поковка

Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Средняя температура стенки кожуха	$t_k$	275	°C			
						Средняя температура труб	$t_T$	293	°C			
						Расчётная температура кожуха	$T_k$	293	°C			
						Расчётная температура труб	$T_T$	400	°C			
						Расчётная температура решетки	$T_p$	400	°C			
						Расчётное давление в межтрубном пространстве	$P_m$	0.1	МПа			
						Расчётное давление в трубном пространстве	$P_T$	0.1	МПа			
						Максимально возможный перепад давлений, действующих на решетку	$P_r$	0.1	МПа			
						Количество циклов нагружения за расчётный срок службы	$N$	1000				
						Модуль продольной упругости материала кожуха	$E_k$	1.73e+05	МПа			
						Модуль продольной упругости материала фланцев кожуха	$E_l$	1.55e+05	МПа			
						Модуль продольной упругости материала камеры	$E_d$	1.55e+05	МПа			
						Модуль продольной упругости материала труб	$E_T$	1.55e+05	МПа			
						Модуль продольной упругости материала решетки	$E_p$	1.55e+05	МПа			
						Коэффициент линейного расширения материала кожуха при температуре $t_k$	$\alpha_k$	1.295e-05	1/°C			
						Коэффициент линейного расширения материала труб при температуре $t_T$	$\alpha_T$	1.36e-05	1/°C			
						Допускаемое напряжение для материала кожуха при температуре $T_k$	$[\sigma]_k$	152.5	МПа			
						Допускаемое напряжение для материала труб при темпе-	$[\sigma]_T$	76	МПа			
Инв. № подл.	19765.4					2	Изм.	Е-101-2344.2	Редикунцев	09.16	Е-101-2344.00.00.000 PP	Лист
						1	Изм.	Е-101-2344.1	Редикунцев	04.16.		
						Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись		

Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Толщина стенки камеры в месте приварки решетки (для приваренных в стык фланцев – $S_2 = S_3$ по ГОСТ Р 52857.4–2007)	$S_2$	32	мм	
Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Толщина тарелки фланца камеры (для решеток вваренных в кожух – $h_2 = S_{1p}$ )	$h_2$	32	мм	
Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Ширина тарелки фланца камеры (для решеток вваренных в кожух – $b_2 = 0$ )	$b_2$	0	мм	
Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Радиус центра тяжести тарелки фланца камеры ( $(D_n+D)/4$ )	$R_2$	541	мм	
Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Количество труб в пучке	$i_r$	100		
Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Половина длины трубы	$l$	969.5	мм	
Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Наружный диаметр трубы	$d_r$	51	мм	
Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Толщина стенки трубы	$S_r$	4.5	мм	
Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Расстояние от оси кожуха до оси наиболее удаленной трубы	$a_1$	438	мм	
Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Толщина трубной решетки	$S_p$	25	мм	
Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Толщина трубной решетки в зоне кольцевой канавки	$S_{p1}$	25	мм	
Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Прибавка к толщине трубной решетки для компенсации коррозии и эрозии	$Cp1$	6	мм	
Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Прибавка к толщине трубной решетки для компенсации минусового допуска	$Cp2$	0	мм	
Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Прибавка технологическая к толщине трубной решетки	$Cp3$	1	мм	
Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Расчётная прибавка к толщине трубной решетки	$C$	7	мм	
Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Диаметр отверстий под трубы в решетке	$d_o$	51.25	мм	
Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Шаг расположения отверстий под трубы в решетке	$t_p$	72	мм	
2		Изм.	Е-101-2344.2	Редикунцев	09.16	Е-101-2344.00.00.000 PP				Лист
1		Изм.	Е-101-2344.1	Редикунцев	04.16.					38
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата					



$$m_{\varphi} = 0.15 \frac{i(d_r - S_r)^2}{\alpha_1^2} = 0.1691$$

Коэффициент системы решетка - трубы:

$$\beta = \frac{1.82}{S_z} \sqrt[4]{\frac{K_y S_p}{\psi_o E_z}} = 0.01953 \text{ 1/MM}$$

Коэффициент системы кожух-решетка камеры:

$$\beta_1 = \frac{1.3}{\sqrt{aS_1}} = 0.01003 \text{ 1/MM}$$

Коэффициент системы обечайка-фланец камеры:

$$\beta_2 = \frac{1.3}{\sqrt{aS_2}} = 0.01003 \text{ 1/MM}$$

Жесткость фланцевого соединения при изгибе:

$$K_{\theta} = K_{\theta 1} + K_{\theta 2} = 2.174 \text{e}+07 \text{ H} \cdot \text{MM/MM}$$

где:

$$K_{\#1} = \frac{E_1 h_1^3 b_1}{12 R_1^2} + K_1 \left(1 + \frac{\beta_1 h_1}{2}\right) = 1.131 \text{e}+07 \text{ H} \cdot \text{mm/mm}$$

$$K_{\#2} = \frac{E_2 h_2^3 b_2}{12 R_2^3} + K_2 \left(1 + \frac{\beta_2 h_2}{2}\right) = 1.043 \text{e}+07 \text{ H} \cdot \text{MM/MM}$$

$$K_1 = \frac{\beta_1 a E_k S_1^3}{5.5 R_1} = 1.003 \text{e}+07 \text{ H} \cdot \text{MM/MM}$$

$$K_2 = \frac{\beta_2 a E_D S_2^3}{5.5 R_0} = 8.988 \text{e}+06 \text{ H} \cdot \text{MM/MM}$$

Коэффициент влияния давления на изгиб фланцев:

$$m_1 = \frac{1 + \beta_1 k_1}{2 \beta_1^2} = 6217 \text{ mm}^2$$

Коэффициент влияния давления на изгиб фланцев:

$$m_2 = \frac{1 + \beta_2 h_2}{2 \beta_1^2} = 6566 \text{ mm}^2$$

Приведенное отношение жесткости труб к жесткости фланцевого соединения:

$$\rho_1 = \frac{K_y a a_1}{\beta^2 K_{\star} R_1} = 0.8942$$

Приведенный безразмерный радиус трубного пучка:

$$\omega = \beta a_1 = 8.552$$

Коэффициенты, учитывающие влияние беструбного края решетки и поддерживающее влияние труб:

$$\Phi_1 = 12.72$$

$$\Phi_2 = 8.747$$

$$\Phi_2 = \quad 12.44$$

Коэффициент  $T_1$ :

$$T_1 = \Phi_1[m_n + 0.5(1 + m_n t)(t - 1)] = \quad 91.71$$

Коэффициент  $T_2$ :

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	8.988e+06 Н·мм/мм					
19765.4	Коэффициент влияния давления на изгиб фланцев:				$m_1 = \frac{1 + \beta_1 h_1}{2 \beta_1^2} =$					6217 мм²
	Коэффициент влияния давления на изгиб фланцев:				$m_2 = \frac{1 + \beta_2 h_2}{2 \beta_2^2} =$					6566 мм²
	Приведенное отношение жесткости труб к жесткости фланцевого соединения:				$\rho_1 = \frac{K_y a a_1}{\beta^2 K_{\Phi} R_1} =$					0.8942
	Приведенный безразмерный радиус трубного пучка:				$\omega = \beta a_1 =$					8.552
	Коэффициенты, учитывающие влияние беструбного края решетки и поддерживающее влияние труб:				$\Phi_1 =$					12.72
					$\Phi_2 =$					8.747
					$\Phi_3 =$					12.44
	Коэффициент $T_1$ :				$T_1 = \Phi_1 [m_{\kappa} + 0.5(1 + m_{\kappa} t)(t - 1)] =$					91.71
	Коэффициент $T_2$ :									
	2		Изм.	Е-101-2344.2	Редикольцев	09.16	E-101-2344.00.00.000 PP			
1		Изм.	Е-101-2344.1	Редикольцев	04.16.	40				
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата					



$$T_2 = \Phi_2 t = 29.56$$

Коэффициент  $T_3$ :

$$T_3 = \Phi_3 m_n = 14.92$$

где:

$$t = 1 + 1.4\omega(m_n - 1) = \quad 3.379$$

Изгибающий момент, распределенный по краю трубной решетки:

$$M = \left(\frac{a_1}{\beta}\right) \frac{P_1(T_1 + \rho K_q) - P_o T_2}{(T_1 + \rho K_q)(T_3 + \rho_1) - T_2^2} = 7653 \text{ H}\cdot\text{MM/MM}$$

Перерезывающая сила, распределенная по краю трубной решетки:

$$Q = a_1 \frac{P_o(T_3 + \rho_1) - P_1 T_2}{(T_1 + \rho K_g)(T_3 + \rho_1) - T_2^2} = -79.95 \text{ H/MM}$$

где:

$$P_1 = \frac{K_y}{\beta K_\phi} (m_1 P_M - m_2 P_T) = -0.001434 \text{ МПа}$$

Изгибающий момент, распределенный по периметру перфорированной зоны решетки:

$$M_s = M + (a - a_1)Q = \quad 694.3 \text{ H}\cdot\text{MM/MM}$$

Перерезывающая сила, распределенная по периметру перфорированной зоны решетки:

$$Q_p = m_s Q = -95.84 \text{ H/MM}$$

Осевая сила, действующая на трубу:

$$N_r = \frac{\mathcal{R}_1}{i} [(\eta_M^{P_M} - \eta_r^{P_r})a_1 + \Phi_1 Q_a + \Phi_2 M_a] = -1.521\text{e}+04 \text{ H}$$

Изгибающий момент, действующий на трубу:

$$M_T = \frac{E_T J_T \beta}{K_y a_{1xy}} (\Phi_2 Q_2 + \Phi_3 \beta M_2) = -1.527 \text{e}+05 \text{ H} \cdot \text{mm}$$

где:

$$l_{xx} = 311.7 \text{ mm}$$

Осевая сила, распределенная по периметру кожуха:

$$Q_K = \frac{a}{2} P_T - Q = 106.2 \text{ H/MM}$$

Изгибающий момент, распределенный по периметру кожуха:

$$M_K = \frac{K_1}{\rho_s K_\phi \beta} (T_2 Q_n + T_3 \beta M) - \frac{P_M}{2 \beta^2} = -4045 \text{ H} \cdot \text{mm/mm}$$

Осевая сила, действующая на кожух:

$$F = \pi D Q_x = 3.503\text{e}+05 \text{ H}$$

Расчётное изгибное напряжение в трубной решетке в месте соединения с кожухом:

$$\sigma_{F1} = \frac{6|M|}{(S_{1p} - C)^2} = 141.7 \text{ МПа}$$

Расчётное касательное напряжение в трубной решетке в месте соединения с кожухом:

Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №					Подп. и дата
		Взам. инв.					





Допускаемая амплитуда напряжений для материала труб:

$$[\sigma_a]_T = 49 \text{ МПа}$$

Проверка устойчивости и жесткости труб:

Расчётное сжимающее напряжение в трубах:

$$\sigma_{1T} = 23.15 \text{ МПа}$$

Допускаемое сжимающее напряжение в трубах:

$$\varphi_T [\sigma]_T = 72.06 \text{ МПа}$$

где:

Коэффициент уменьшения допускаемого напряжения при продольном изгибе:

$$\begin{aligned} \varphi_T(\lambda) &= 0.9482 \\ \lambda &= 1.3 \sqrt{\frac{[\sigma]_T}{E_T}} \frac{l_R}{(d_T - S_T)} = 0.5788 \\ l_R &= 935 \text{ мм} \end{aligned}$$

Прогиб трубы:

$$Y = A_y \frac{|M_T|}{|N_T|} = 0.2728 \text{ мм}$$

где:

$$\begin{aligned} A_y(\lambda_y) &= 0.02718 \\ \lambda_y &= \frac{|N_T| l_{np}^2}{E_T J_T} = 0.05315 \end{aligned}$$

Проверка прочности крепления труб в решетке:

Расчётная нагрузка на соединение трубы с решеткой:

$$|N_T| = -1.521 \text{e}+04 \text{ Н}$$

Допускаемая нагрузка на соединение трубы с решеткой с помощью развальцовки:

$$[N]_{TP} = 2.998 \text{e}+04 \text{ Н}$$

Напряжение сдвига в сварном шве приварки трубы к решетке:

$$\tau = \frac{|N_T| d_T + 4 |M_T|}{\pi d_r^2 \delta} = 37.72 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение сдвига в сварном шве приварки трубы к решетке в случае крепления труб к решетке способом приварки или приварки с подвальцовкой:

$$[\tau] = \varphi_c \min\{[\sigma]_T; [\sigma]_P\} = 26.6 \text{ МПа}$$

где:

$$\varphi_c = \min\{0.5; (0.95 - 0.21 \lg N)\} = 0.35$$

Условие прочности крепления труб к решетке способом развальцовки с обваркой:

$$\max \left\{ \frac{\varphi_c \min\{[\sigma]_T; [\sigma]_P\}}{\tau} + 0.6 \frac{[N]_{TP}}{|N_T|}; \frac{[N]_{TP}}{|N_T|} \right\} = 1.971 > 1$$

Условия прочности и устойчивости элементов теплообменного аппарата выполняются.

Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Инв. №	Взам. инв.	Подп. и дата						Лист
											44
2		Изм.	Е-101-2344.2	Редикунцев	09.16	Е-101-2344.00.00.000 РР					
1		Изм.	Е-101-2344.1	Редикунцев	04.16.						
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата						

## **2.2. Цилиндрическая обечайка корпуса Дв1050**

## Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.2-2007

*Расчёт выполнен с помощью пакета прикладных программ расчёта на прочность элементов сосудов, аппаратов и трубопроводов PVP Design (Свидетельство о государственной регистрации 2008614973)*

Элемент: Гладкая цилиндрическая обечайка, работающая под действием  
наружного давления - изгибающего момента.

Режим: Расчет на вакуум.

### *Исходные данные*

## Материал обечайки

Сталь 09Г2С-12 ГОСТ 5520-79, Лист

Расчётная температура	T	293	°C
Расчётное давление	P	0.1	МПа
Расчётный изгибающий момент	M	5.858e+06	Н·мм
Расчётное поперечное усилие	Q	1.688e+04	Н
Внутренний диаметр обечайки	D	1050	мм
Фактическая длина обечайки	Lact	1880	мм
Расчётная длина обечайки	L	2439	мм
Толщина стенки обечайки	S	32	мм
Прибавка на коррозию	c <sub>1</sub>	3	мм
Прибавка – минусовый допуск	c <sub>2</sub>	1	мм
Прибавка технологическая	c <sub>3</sub>	1	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки	c	5	мм
Допускаемое напряжение	[σ ]	152.5	МПа
Модуль продольной упругости	E	1.715e+05	МПа

### Результаты расчёта

Допускаемое наружное давление

$$[\sigma] = \frac{[\sigma]_{\text{н}}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[\sigma]_{\text{н}}}{[\sigma]_{\text{в}}} \right)^2}} = 5.075 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условий прочности

$$[p]_{\kappa} = \frac{2[\sigma](s-c)}{D+(s-c)} = 7.646 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условий устойчивости в пределах упругости

$$[\mathcal{P}]_E = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E}{n_v \cdot B_1} \frac{D}{L} \left[ \frac{100(s-c)}{D} \right]^{2,5} = \quad 6.784$$

Коэффициент

$$B_1 = \min \left\{ 1, 0, \quad 9,45 \frac{D}{L} \sqrt{\frac{D}{100(s-c)}} \right\} = \quad 1$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Сумма прибавок к расчётной толщине стенки				c	5	мм	
		Допускаемое напряжение				[σ ]	152.5	МПа	
		Модуль продольной упругости				E	1.715e+05	МПа	
Инв. №	Подп. и дата	<b>Результаты расчёта</b>							
		Допускаемое наружное давление							
		$[p] = \frac{[p]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\pi}}{[p]_{\text{F}}}\right)^2}} =$				5.075 МПа			
Взам. инв.	Подп. и дата	Допускаемое наружное давление из условий прочности							
		$[p]_{\pi} = \frac{2[\sigma](s - c)}{D + (s - c)} =$				7.646 МПа			
		Допускаемое наружное давление из условий устойчивости в пределах упругости							
Инв. № подл.	Подп. и дата	$[p]_{\text{F}} = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E D}{n_y \cdot B_1 L} \left[ \frac{100(s - c)}{D} \right]^{2,5} =$				6.784			
		Коэффициент							
		$B_1 = \min \left\{ 1,0; \quad 9,45 \frac{D}{L} \sqrt{\frac{D}{100(s - c)}} \right\} =$				1			
19765.4	2		Изм.	E-101-2344.2	Редикulyцев	09.16	<b>E-101-2344.00.00.000 PP</b>		Лист
	1		Изм.	E-101-2344.1	Редикulyцев	04.16.			
	Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата			
45									

$$[F]_{E1} = \frac{31 \cdot 10^{-5} E}{n_y} D^2 \left[ \frac{100(S-C)}{D} \right]^{2.5} = 2.59e+08 \text{ H}$$
$$[F]_F = \text{Min} \{ [F]_{F1}, [F]_{F2} \} = 2.59\text{e}+08 \text{ H}$$
$$[\mathrm{F}]_{\pi} = \pi(D + S - C)(S - C)[\sigma] = 1.393\mathrm{e}+07 \text{ H}$$
$$[M]_E = \frac{89 \cdot 10^{-6} E}{n_v} D^3 \left[ \frac{100(S-C)}{D} \right]^{2,5} = \frac{7.769e+10}{H \cdot MM}$$
$$[M]_{\text{tr}} = \frac{\pi D(D+S-C)(S-C)[\sigma]}{4} = \frac{3.657 \times 10^9}{\text{H} \cdot \text{mm}}$$
$$[M] = \frac{[M]_{\text{fr}}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[M]_{\text{fr}}}{[M]_{\text{E}}} \right)^2}} =$$
$$[Q]_E = \frac{2.4E(S-C)^2}{n_y} \left[ 0.18 + 3.3 \frac{D(S-C)}{L^2} \right] = 2.25e+07 \text{ H}$$
$$[Q]_r = \frac{\pi D(S-C)[\sigma]}{4} = 3.396 \times 10^6 \text{ H}$$
$$[Q] = \frac{[Q]_r}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_r}{[Q]_E}\right)^2}} = 3.358 \times 10^6 \text{ H}$$
$$\frac{P}{[P]} + \frac{M}{[M]} + \left( \frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0.02133 < 1$$

Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата		Взам. инв.		Инв. №		Подп. и дата		$[Q]_{\text{E}} = \frac{2.4E(S-C)^2}{n_y} \left[ 0.18 + 3.3 \frac{D(S-C)}{L^2} \right] =$	2.25e+07 Н	
										Допускаемое поперечное усилие из условия прочности	$[Q]_{\text{K}} = \frac{\pi D(S-C)[\sigma]}{4} =$	3.396e+06 Н
										Допускаемое перерезывающее усилие	$[Q] = \frac{[Q]_{\text{K}}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[Q]_{\text{K}}}{[Q]_{\text{E}}} \right)^2}} =$	3.358e+06 Н
										Условие устойчивости (п.5.3.7 ГОСТ Р 52857.2-2007)	$\frac{P}{[P]} + \frac{M}{[M]} + \left( \frac{Q}{[Q]} \right)^2 =$	0.02133 < 1
Обечайка отвечает условиям прочности и устойчивости в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52857.2-2007.												
Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата		Взам. инв.		Инв. №		Подп. и дата				
2		Изм.	Е-101-2344.2	Редикulyцев	09.16	<div style="text-align: center;"> <b>Е-101-2344.00.00.000 PP</b> </div>						Лист
1		Изм.	Е-101-2344.1	Редикulyцев	04.16.							46
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата							

## 2.3. Штуцера А2 и В2 Ду80

Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.3-2007

*Расчёт выполнен с помощью пакета прикладных программ расчёта на прочность элементов сосудов, аппаратов и трубопроводов PVP Design (Свидетельство о государственной регистрации 2008614973)*

Элемент: Укрепление отверстий в обечайках и днищах.

Наружное давление.

Отверстие в цилиндрической обечайке.

Расчёт укрепления одиночного отверстия.

Укрепление непропущенным (непроходящим) штуцером.

Штуцер с осью нормальной к корпусу сосуда.

Расчёт с учетом внешних нагрузок методом конечных элементов.

Внешние нагрузки определялись без учета стесненности температурных деформаций.

Внешние нагрузки приложены в месте пересечения оси штуцера.

с образующей обечайки или днища.

Режим: Расчет на вакуум.

### *Исходные данные*

Материал корпуса

Сталь 09Г2С-12 ГОСТ 5520-79, Лист

Материал штуцера

Сталь 09Г2С ГОСТ 8479-70 гр.IV-КП 245,  
Поковка

Расчётная температура днища

$T$  293 °C

Расчётное давление

$P$  0.1 МПа

Внутренний диаметр обечайки, днища или конического перехода, в месте расположения отверстия

$D$  1050 мм

Исполнительная толщина стенки обечайки, конического перехода или днища

$s$  32 мм

Коэффициент прочности сварных соединений обечаек и днищ

$\phi$  1

Допускаемое напряжение для материала обечайки, перехода или днища при расчётной температуре

$[\sigma]$  152.5 МПа

Допускаемое наружное давление в пределах упругости

$[p]_E$  6.784 МПа

Внутренний диаметр штуцера

$d$  73 мм

Исполнительная толщина усиленной части штуцера

$s_1$  32 мм

Исполнительная длина усиленной части штуцера

$l_1$  103 мм

Исполнительная толщина стенки штуцера

$s_{шт}$  22 мм

Исполнительная длина штуцера

$l_{шт}$  256 мм

Допускаемое напряжение для материала штуцера

$[\sigma]_1$  118 МПа

Коэффициент прочности продольного сварного шва штуцера

$\phi_1$  1

Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (или  $L_k=0$ )

$L_k$  220.5 мм

Размер сварного шва приварки штуцера (по образующей обечайки)

$\alpha$  0 мм

Размер сварного шва приварки штуцера (по образующей штуцера)

$b$  0 мм

Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата		Инв. №		Взам. инв.		Подп. и дата		Расчётное давление Внутренний диаметр обечайки, днища или конического перехода, в месте расположения отверстия Исполнительная толщина стенки обечайки, конического перехода или днища Коэффициент прочности сварных соединений обечаек и днищ Допускаемое напряжение для материала обечайки, перехода или днища при расчётной температуре Допускаемое наружное давление в пределах упругости Внутренний диаметр штуцера Исполнительная толщина усиленной части штуцера Исполнительная длина усиленной части штуцера Исполнительная толщина стенки штуцера Исполнительная длина штуцера Допускаемое напряжение для материала штуцера Коэффициент прочности продольного сварного шва штуцера Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (или $L_k=0$ ) Размер сварного шва приварки штуцера (по образующей обечайки) Размер сварного шва приварки штуцера (по образующей штуцера)





Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата		Инв. №		Взам. инв.		Подп. и дата		Лист
2		Изм.	Е-101-2344.2	Редикulyцев	09.16	<b>Е-101-2344.00.00.000 РР</b>				49
1		Изм.	Е-101-2344.1	Редикulyцев	04.16.					
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата					

Подп. и дата	Инв. №	Взам. инв.	Подп. и дата	Инв. № подл.
				19765.4

$$l_p = 168.4 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр неукрепленного отверстия

$$d_{op} = 0,4 \sqrt{D_p (s - c)} = 67.35 \text{ мм}$$

Коэффициент понижения прочности узла врезки штуцера

$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p}(s_1 - c_s) \chi_1 + l_{2p}s_2 \chi_2 + l_{3p}(s_3 - c_s - c_{s1}) \chi_3}{l_p(s - c)}}{1 + 0,5 \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1 \frac{d + 2c_s}{D_p} \frac{\varphi l_{1p}}{\varphi l_p}} \right\} = 1$$

Допускаемое давление в пределах пластичности

$$[p]_н = \frac{2K_1(s - c)[\sigma]}{D_p + (s - c)V} V = 7.646 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление для узла врезки штуцера

$$[p] = \frac{[p]_н}{\sqrt{1 + \left( \frac{[p]_н}{[p]_в} \right)^2}} = 5.075 \text{ МПа}$$

где

$$K_1 = 1$$

Приведенное суммарное напряжение в зоне обечайки

$$\sigma_{p_o} = 22.76 \text{ МПа}$$

Приведенное мембранное напряжение в зоне обечайки

$$\sigma_{pm_o} = 19.75 \text{ МПа}$$

Приведенное суммарное напряжение в зоне штуцера

$$\sigma_{p_{шт}} = 30.56 \text{ МПа}$$

Приведенное мембранное напряжение в зоне штуцера

$$\sigma_{pm_{шт}} = 26.54 \text{ МПа}$$

Приведенное суммарное напряжение на внутренней поверхности

$$\sigma_{p_{en_o}} = 41.47 \text{ МПа}$$

Приведенное суммарное напряжение на внутренней поверхности

$$\sigma_{p_{en_{шт}}} = 39.31 \text{ МПа}$$

Таким образом, рассмотренный узел врезки отвечает условиям прочности в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52857.3-2007.

## 2.4. Штуцер U Ду40

Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.3-2007

*Расчёт выполнен с помощью пакета прикладных программ расчёта на прочность элементов сосудов, аппаратов и трубопроводов PVP Design (Свидетельство о государственной регистрации 2008614973)*

Элемент: Укрепление отверстий в обечайках и днищах.

Наружное давление.

Отверстие в цилиндрической обечайке.

Расчёт укрепления одиночного отверстия.

Укрепление непропущенным (непроходящим) штуцером.

Штуцер с осью нормальной к корпусу сосуда.

Расчёт с учетом внешних нагрузок методом конечных элементов.

Внешние нагрузки определялись без учета стесненности температурных деформаций.

Внешние нагрузки приложены в месте пересечения оси штуцера  
с образующей обечайки или днища.

Режим: Расчет на вакуум.

### *Исходные данные*

Материал корпуса	Сталь 09Г2С-12 ГОСТ 5520-79, Лист
Материал штуцера	Сталь 09Г2С ГОСТ 8479-70 гр.IV-КП 245, Поковка

Расчётная температура днища	$T$	293	°C
Расчётное давление	$P$	0.1	МПа
Внутренний диаметр обечайки, днища или конического перехода, в месте расположения отверстия	$D$	1050	мм
Исполнительная толщина стенки обечайки, конического перехода или днища	$s$	32	мм
Коэффициент прочности сварных соединений обечаек и днищ	$\varphi$	1	
Допускаемое напряжение для материала обечайки, перехода или днища при расчётной температуре	$[\sigma]$	152.5	МПа
Допускаемое наружное давление в пределах упругости	$[p]_E$	6.784	МПа
Внутренний диаметр штуцера	$d$	49	мм
Исполнительная толщина усиленной части штуцера	$s_1$	32	мм
Исполнительная длина усиленной части штуцера	$l_1$	60	мм
Исполнительная толщина стенки штуцера	$s_{шт}$	10	мм
Исполнительная длина штуцера	$l_{шт}$	0	мм
Допускаемое напряжение для материала штуцера	$[\sigma]_1$	135.5	МПа
Коэффициент прочности продольного сварного шва штуцера	$\varphi_1$	1	
Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (или $L_k=0$ )	$L_k$	751	мм
Размер сварного шва приварки штуцера (по образующей обечайки)	$\alpha$	0	мм
Размер сварного шва приварки штуцера (по образующей штуцера)	$b$	0	мм

Инв. № подл.  19765.4	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Внутренний диаметр обечайки, днища или конического перехода, в месте расположения отверстия	$D$	1050	мм																				
					Исполнительная толщина стенки обечайки, конического перехода или днища	$s$	32	мм																				
					Коэффициент прочности сварных соединений обечаек и днищ	$\varphi$	1																					
					Допускаемое напряжение для материала обечайки, перехода или днища при расчётной температуре	$[\sigma]$	152.5	МПа																				
					Допускаемое наружное давление в пределах упругости	$[p]_E$	6.784	МПа																				
					Внутренний диаметр штуцера	$d$	49	мм																				
					Исполнительная толщина усиленной части штуцера	$s_1$	32	мм																				
					Исполнительная длина усиленной части штуцера	$l_1$	60	мм																				
					Исполнительная толщина стенки штуцера	$s_{шт}$	10	мм																				
					Исполнительная длина штуцера	$l_{шт}$	0	мм																				
					Допускаемое напряжение для материала штуцера	$[\sigma]_1$	135.5	МПа																				
					Коэффициент прочности продольного сварного шва штуцера	$\varphi_1$	1																					
					Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (или $L_k=0$ )	$L_k$	751	мм																				
					Размер сварного шва приварки штуцера (по образующей обечайки)	$\alpha$	0	мм																				
					Размер сварного шва приварки штуцера (по образующей штуцера)	$b$	0	мм																				
<table><tr><td>2</td><td></td><td>Изм.</td><td>Е-101-2344.2</td><td>Редикунцев</td><td>09.16</td><td rowspan="3"><b>Е-101-2344.00.00.000 РР</b></td><td rowspan="3">Лист</td></tr><tr><td>1</td><td></td><td>Изм.</td><td>Е-101-2344.1</td><td>Редикунцев</td><td>04.16.</td></tr><tr><td>Изм</td><td>Кол.уч</td><td>Лист</td><td>№ док.</td><td>Подпись</td><td>Дата</td></tr></table>									2		Изм.	Е-101-2344.2	Редикунцев	09.16	<b>Е-101-2344.00.00.000 РР</b>	Лист	1		Изм.	Е-101-2344.1	Редикунцев	04.16.	Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата
2		Изм.	Е-101-2344.2	Редикунцев	09.16	<b>Е-101-2344.00.00.000 РР</b>	Лист																					
1		Изм.	Е-101-2344.1	Редикунцев	04.16.																							
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата																							
								50																				



Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №	Взам. инв.	Подп. и дата
19765.4				
2		Изм.	Е-101-2344.2	Редикulyцев 09.16
1		Изм.	Е-101-2344.1	Редикulyцев 04.16.
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись Дата

$$l_p = 168.4 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр неукрепляемого отверстия

$$d_{op} = 0,4 \sqrt{D_p (s - c)} = 67.35 \text{ мм}$$

Коэффициент понижения прочности узла врезки штуцера

$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p}(s_1 - c_s) \chi_1 + l_{2p}s_2 \chi_2 + l_{3p}(s_3 - c_s - c_{s1}) \chi_3}{l_p(s - c)}}{1 + 0,5 \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1 \frac{d + 2c_s}{D_p} \frac{\varphi l_{1p}}{\varphi l_p}} \right\} = 1$$

Допускаемое давление в пределах пластичности

$$[p]_n = \frac{2K_1(s - c)[\sigma]}{D_p + (s - c)V} V = 7.646 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление для узла врезки штуцера

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left( \frac{[p]_n}{[p]_g} \right)^2}} = 5.075 \text{ МПа}$$

где

$$K_1 = 1$$

Приведенное суммарное напряжение в зоне обечайки

$$\sigma_{p-o} = 12.58 \text{ МПа}$$

Приведенное мембранное напряжение в зоне обечайки

$$\sigma_{pm-o} = 10.37 \text{ МПа}$$

Приведенное суммарное напряжение в зоне штуцера

$$\sigma_{p-шт} = 97.26 \text{ МПа}$$

Приведенное мембранное напряжение в зоне штуцера

$$\sigma_{pm-шт} = 78.23 \text{ МПа}$$

Приведенное суммарное напряжение на внутренней поверхности

$$\sigma_{p-en-o} = 18.18 \text{ МПа}$$

Приведенное суммарное напряжение на внутренней поверхности

$$\sigma_{p-en-шт} = 82.71 \text{ МПа}$$

Таким образом, рассмотренный узел врезки отвечает условиям прочности в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52857.3-2007.

**Е-101-2344.00.00.000 РР**

Лист

52

## 2.5. Труба ø48x10

Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.2-2007

*Расчёт выполнен с помощью пакета прикладных программ расчёта на прочность элементов сосудов, аппаратов и трубопроводов PVP Design (Свидетельство о государственной регистрации 2008614973)*

Элемент: Гладкая цилиндрическая обечайка, работающая под действием  
наружного давления  
Режим: Расчет на вакуум

### **Исходные данные**

Материал обечайки	Сталь 09Г2С-12 ГОСТ 53383-2009, Труба		
Расчётная температура	T	293	°C
Расчётное давление	P	0.1	МПа
Внутренний диаметр обечайки	D	28	мм
Фактическая длина обечайки	Lact	146	мм
Расчётная длина обечайки	L	146	мм
Толщина стенки обечайки	S	10	мм
Прибавка на коррозию	c <sub>1</sub>	3	мм
Прибавка – минусовый допуск	c <sub>2</sub>	1.5	мм
Прибавка технологическая	c <sub>3</sub>	1	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки	c	5.5	мм
Допускаемое напряжение	[σ]	135.5	МПа
Модуль продольной упругости	E	1.715e+05	МПа

### **Результаты расчёта**

Допускаемое наружное давление

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left( \frac{[p]_n}{[p]_E} \right)^2}} = 37.46 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условий прочности

$$[p]_n = \frac{2[\sigma](s - c)}{D + (s - c)} = 37.52 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условий устойчивости в пределах упругости

$$[p]_E = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E D}{n_y \cdot B_1 L} \left[ \frac{100(s - c)}{D} \right]^{2,5} = 652.9$$

Коэффициент

$$B_1 = \min \left\{ 1,0; \quad 9,45 \frac{D}{L} \sqrt{\frac{D}{100(s - c)}} \right\} = 0.4521$$

Обечайка отвечает условиям прочности и устойчивости в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52857.2-2007.

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

## 2.6. Неподвижная опора

Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.5-2007

*Расчёт выполнен с помощью пакета прикладных программ расчёта на прочность элементов сосудов, аппаратов и трубопроводов PVP Design (Свидетельство о государственной регистрации 2008614973)*

Элемент: Цилиндрическая обечайка на седловых опорах,  
работающая под действием наружного давления.  
Без колец жесткости и без подкладного листа.  
Седловая опора со сплошным сечением.  
Режим: Расчет на вакуум.

### *Исходные данные*

Материал обечайки

Сталь 09Г2С-12 ГОСТ 5520-79, Лист

Расчётная температура	T	293	°C
Расчётное давление	P	0.1	МПа
Опорное усилие, действующее на опору	F	2.152e+04	H
Максимальный момент над опорой	M	1.241e+06	H*мм
Расчётное поперечное усилие	Q	1.688e+04	H
Внутренний диаметр обечайки	D	1050	мм
Исполнительная толщина стенки обечайки	s	32	мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии	c1	3	мм
Прибавка для компенсации минусового допуска	c2	1	мм
Прибавка технологическая	c3	1	мм
Сумма прибавок к толщине стенки обечайки	c	5	мм
Расстояние от края родительского элемента до седловой опоры	L_p	535	мм
Длина цилиндрической выступающей части, включая отбортовку	a	535	мм
Коэффициент прочности сварных швов, расположенных в области опорного узла	φ	1	
Угол охвата седловой опоры, градусов	δ <sub>1</sub>	120	
Ширина седловой опоры	b	153	мм
Допускаемое напряжение для материала обечайки	[σ]	152.5	МПа
Допускаемое наружное давление для обечайки без колец жесткости или между кольцами по ГОСТ Р 52857.2-2007	[p]	1	МПа
Допускаемое осевое усилие из условий устойчивости по ГОСТ Р 52857.2-2007	[F]	1.391e+07	H
Допускаемый изгибающий момент из условий устойчивости по ГОСТ Р 52857.2-2007	[M]	3.653e+09	H·мм
Допускаемая перерезывающая сила по ГОСТ Р 52857.2-2007	[Q]	3.358e+06	H

### *Результаты расчёта*

Проверка несущей способности обечайки без подкладного листа в области опорного узла

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Инв. №	Взам. инв.							Лист
2		Изм.	E-101-2344.2	Редикунцев	09.16	<b>E-101-2344.00.00.000 PP</b>					54
1		Изм.	E-101-2344.1	Редикунцев	04.16.						
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата						



$$\begin{aligned} g_{2,1} &= & 0 \\ g_{2,2} &= \frac{pD}{2(s-c)} \frac{1}{K_5[\sigma]} = & -0.0102 \end{aligned}$$

$K_1(\mathcal{G}_1; \mathcal{G}_{2,1}) =$	0.5137
$K_1(\mathcal{G}_1; \mathcal{G}_{2,2}) =$	0.5086

$$[\sigma]_i = K_1 K_2 [\sigma] = 96.95 \text{ МПа}$$
$$[F]_3 = \frac{0.9[\sigma_i]_3 \sqrt{D(s-c)}(s-c)}{K_{14}K_{16}K_{17}} = 1.202e+06 \text{ H}$$
$$[F_i] = \min \{ [F]_2, [F]_3 \} = 1.202\text{e}+06 \text{ H}$$
$$g_1 = -\frac{0.23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0.1764$$
$$g_{2,1} = \frac{-\bar{\sigma}_{mx}}{K_2[\sigma]} = -0.0002784$$

$$g_{2,2} = \left( \frac{pD}{4(s_{\varphi} - c)} - \bar{\sigma}_{mx} \right) \frac{1}{K_2[\sigma]} = -0.005379$$

$$\begin{aligned} K_1(\mathfrak{g}_1; \mathfrak{g}_{2,1}) &= 1.407 \\ K_1(\mathfrak{g}_1; \mathfrak{g}_{3,2}) &= 1.404 \end{aligned}$$
$$[\sigma]_i = K_1 K_2 [\sigma] = 267.6 \text{ МПа}$$
$$[F]_2 = \frac{0.7[\sigma_i]_2 \sqrt{D(s_{\text{eff}} - c)(s_{\text{eff}} - c)}}{K_{10}K_{12}} = 2.229\text{e}+06 \text{ H}$$

Коэффициент, представляющий отношение местных мембранных напряжений к местным напряжениям изгиба:

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	$\mathfrak{A}_1 = -\frac{\bar{\sigma}_{\text{мк}}}{K_{12} \cdot K_{10}} =$		
					Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями		
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	$\mathfrak{A}_{2,1} = \frac{-\bar{\sigma}_{\text{мк}}}{K_2[\sigma]} =$	-0.0002784	
					$\mathfrak{A}_{2,2} = \left( \frac{pD}{4(s_{\text{с}} - c)} - \bar{\sigma}_{\text{мк}} \right) \frac{1}{K_2[\sigma]} =$	-0.005379	
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Коэффициент $K_1$ (принимается меньшее значение из двух):		
					$K_1(\mathfrak{A}_1; \mathfrak{A}_{2,1}) =$	1.407	
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	$K_1(\mathfrak{A}_1; \mathfrak{A}_{2,2}) =$	1.404	
					Предельное напряжение изгиба:		
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	$[\sigma]_i = K_1 K_2 [\sigma] =$	267.6 МПа	
					Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:		
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	$[F]_2 = \frac{0.7[\sigma]_2 \sqrt{D(s_{\text{с}} - c)(s_{\text{с}} - c)}}{K_{10} K_{12}} =$	2.229e+06 Н	
					Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в окружном направлении:		
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Коэффициент, представляющий отношение местных мембранных напряжений к местным напряжениям изгиба:		
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата			
2		Изм.	E-101-2344.2	Редикунцев	09.16	E-101-2344.00.00.000 PP	Лист
1		Изм.	E-101-2344.1	Редикунцев	04.16.		
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата		
							56



$$\mathcal{A}_1 = -\frac{0.53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0.5\delta_1)} = -1.578$$

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями

$$\begin{aligned} g_{2,1} &= 0 \\ g_{2,2} &= \frac{pD}{2(s_{\sigma} - c)} \frac{1}{K_2[\sigma]} = -0.0102 \end{aligned}$$

Коэффициент  $K_1$  (принимается меньшее значение из двух):

$K_1(\mathfrak{g}_1; \mathfrak{g}_{2,1}) =$	0.5137
$K_1(\mathfrak{g}_1; \mathfrak{g}_{2,2}) =$	0.5086

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_i = K_1 K_2 [\sigma] = 96.95 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0.9[\sigma_i]_3 \sqrt{D(s_{\text{eff}} - c)(s_{\text{eff}} - c)}}{K_{14}K_{16}K_{17}} = 1.202\text{e}+06 \text{ H}$$

Проверка прочности обечайки в области опорного узла:

Допускаемое усилие на опору:

$$[F_i] = \min \{ [F]_2, [F]_3 \} = 1.202\text{e}+06 \text{ H}$$

Проверка устойчивости обечайки в области опорного узла:

Эффективное осевое усилие от местных мембранных напряжений, действующих в области опоры:

$$F_e = F_i \cdot \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{D}{(s-c)}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} = 3.088\text{e}+04 \text{ H}$$

Условие устойчивости обечайки, работающей под наружным давлением:

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{|M_i|}{[M]} + \frac{|F_e|}{[F]} + \left( \frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0.1026 < 1$$

Цилиндрическая обечайка на седловых опорах отвечает условиям прочности и устойчивости в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52857.5-2007.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата
19765.4				

  

ний, действующих в области опоры:

$$F_e = F_i \cdot \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{D}{(s-c)}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} = 3.088e+04 \text{ Н}$$

Условие устойчивости обечайки, работающей под наружным давлением:

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{|M_i|}{[M]} + \frac{|F_e|}{[F]} + \left( \frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0.1026 < 1$$

Цилиндрическая обечайка на седловых опорах отвечает условиям прочности и устойчивости в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52857.5-2007.

  
  

Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата
2		Изм.	E-101-2344.2	Редикulyцев	09.16
1		Изм.	E-101-2344.1	Редикulyцев	04.16.

**E-101-2344.00.00.000 PP**

	Лист
	57

## 2.7. Подвижная опора

Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.5-2007

*Расчёт выполнен с помощью пакета прикладных программ расчёта на прочность элементов сосудов, аппаратов и трубопроводов PVP Design (Свидетельство о государственной регистрации 2008614973)*

Элемент: Цилиндрическая обечайка на седловых опорах,  
работающая под действием наружного давления.  
Без колец жесткости и без подкладного листа.  
Седловая опора со сплошным сечением.  
Режим: Расчет на вакуум.

### *Исходные данные*

Материал обечайки

Сталь 09Г2С-12 ГОСТ 5520-79, Лист

Расчётная температура	T	293	°C
Расчётное давление	P	0.1	МПа
Опорное усилие, действующее на опору	F	1.736e+04	H
Максимальный момент над опорой	M	1.296e+06	H*мм
Расчётное поперечное усилие	Q	1.367e+04	H
Внутренний диаметр обечайки	D	1050	мм
Исполнительная толщина стенки обечайки	s	32	мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии	c1	3	мм
Прибавка для компенсации минусового допуска	c2	1	мм
Прибавка технологическая	c3	1	мм
Сумма прибавок к толщине стенки обечайки	c	5	мм
Расстояние от края родительского элемента до седловой опоры	L_p	1672	мм
Длина цилиндрической выступающей части, включая отбортовку	a	997	мм
Коэффициент прочности сварных швов, расположенных в области опорного узла	φ	1	
Угол охвата седловой опоры, градусов	δ <sub>1</sub>	120	
Ширина седловой опоры	b	153	мм
Допускаемое напряжение для материала обечайки	[σ]	152.5	МПа
Допускаемое наружное давление для обечайки без колец жесткости или между кольцами по ГОСТ Р 52857.2-2007	[p]	1	МПа
Допускаемое осевое усилие из условий устойчивости по ГОСТ Р 52857.2-2007	[F]	1.391e+07	H
Допускаемый изгибающий момент из условий устойчивости по ГОСТ Р 52857.2-2007	[M]	3.653e+09	H·мм
Допускаемая перерезывающая сила по ГОСТ Р 52857.2-2007	[Q]	3.358e+06	H

### *Результаты расчёта*

Проверка несущей способности обечайки без подкладного листа в области опорного узла

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Инв. №	Взам. инв.	Подп. и дата						Лист
											58
2		Изм.	Е-101-2344.2	Редикунцев	09.16	<b>Е-101-2344.00.00.000 РР</b>					
1		Изм.	Е-101-2344.1	Редикунцев	04.16.						
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата						

$$\beta_1 = 0,91 \frac{b}{\sqrt{D(s-c)}} = 0.8269$$

Общее осевое мембранное напряжение, действующее в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{\text{мх}} = \frac{4M_i}{\pi D^2 (s-c)} = 0.05544 \text{ МПа}$$

Коэффициенты, учитывающие влияние ширины пояса опоры:

$$K_{10} = 0.3892$$

Коэффициенты, учитывающие влияние угла охвата:

$$K_{12} = 0.9816$$

Коэффициенты, учитывающие влияние расстояния до днища:

$$K_{15} = 1$$

Коэффициент  $K_2$

$$K_2 = 1.25$$

Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в осевом направлении:  
Коэффициент, представляющий отношение местных мембранных напряжений к местным напряжениям изгиба:

$$\beta_1 = -\frac{0.23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0.2085$$

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями

$$\beta_{2,1} = \frac{-\bar{\sigma}_{\text{мх}}}{K_2[\sigma]} = -0.0002908$$

$$\beta_{2,2} = \left( \frac{pD}{4(s-c)} - \bar{\sigma}_{\text{мх}} \right) \frac{1}{K_2[\sigma]} = -0.005391$$

Коэффициент  $K_1$  (принимается меньшее значение из двух):

$$K_1(\beta_1; \beta_{2,1}) = 1.376$$

$$K_1(\beta_1; \beta_{2,2}) = 1.372$$

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_i = K_1 K_2 [\sigma] = 261.6 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0.7[\sigma]_2 \sqrt{D(s-c)(s-c)}}{K_{10} K_{12}} = 2.179 \times 10^6 \text{ Н}$$

Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в окружном направлении:  
Коэффициент, представляющий отношение местных мембранных напряжений к местным напряжениям изгиба:

$$\beta_1 = -\frac{0.53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0.5\delta_1)} = -1.415$$

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями

Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Инв. №	Взам. инв.	Подп. и дата
2		Изм.	Е-101-2344.2	Редикунцев	09.16
1		Изм.	Е-101-2344.1	Редикунцев	04.16.
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата
Е-101-2344.00.00.000 РР					
Лист					
59					

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата
19765.4				

$$\vartheta_{2,1} = <$$

$$\vartheta_{2,2} = \frac{pD}{2(s-c)} \frac{1}{K_2[\sigma]} =$$

0

-0.0102

Коэффициент  $K_1$  (принимается меньшее значение из двух):

$$K_1(\vartheta_1; \vartheta_{2,1}) =$$

$$K_1(\vartheta_1; \vartheta_{2,2}) =$$

0.5596

0.554

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_i = K_1 K_2 [\sigma] =$$

105.6 МПа

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0.9[\sigma]_3 \sqrt{D(s-c)(s-c)}}{K_{14} K_{16} K_{17}} =$$

1.174e+06 Н

Проверка прочности обечайки в области опорного узла:

Допускаемое усилие на опору:

$$[F_i] = \min \{ [F]_2; [F]_B \} =$$

1.174e+06 Н

Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в осевом направлении:  
Коэффициент, представляющий отношение местных мембранных напряжений к местным напряжениям изгиба:

$$\vartheta_1 = - \frac{0.23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} =$$

-0.2085

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями

$$\vartheta_{2,1} = \frac{-\bar{\sigma}_{mx}}{K_2[\sigma]} =$$

$$\vartheta_{2,2} = \left( \frac{pD}{4(s_{\vartheta} - c)} - \bar{\sigma}_{mx} \right) \frac{1}{K_2[\sigma]} =$$

-0.0002908

-0.005391

Коэффициент  $K_1$  (принимается меньшее значение из двух):

$$K_1(\vartheta_1; \vartheta_{2,1}) =$$

$$K_1(\vartheta_1; \vartheta_{2,2}) =$$

1.376

1.372

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_i = K_1 K_2 [\sigma] =$$

261.6 МПа

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0.7[\sigma]_2 \sqrt{D(s_{\vartheta} - c)(s_{\vartheta} - c)}}{K_{10} K_{12}} =$$

2.179e+06 Н

Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в окружном направлении:  
Коэффициент, представляющий отношение местных мембранных напряжений к местным напряжениям изгиба:

$$\vartheta_1 = - \frac{0.53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0.5\delta_1)} =$$

-1.415

Лист

60



## 2.8. Цилиндрическая обечайка камеры

Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.2-2007

*Расчёт выполнен с помощью пакета прикладных программ расчёта на прочность элементов сосудов, аппаратов и трубопроводов PVP Design (Свидетельство о государственной регистрации 2008614973)*

Элемент: Гладкая цилиндрическая обечайка, работающая под действием  
наружного давления - изгибающего момента.

Режим: Расчет на вакуум.

### *Исходные данные*

Материал обечайки

Сталь 12ХМ ГОСТ 5520-79, Лист

Расчётная температура	T	400	°C
Расчётное давление	P	0.1	МПа
Расчётный изгибающий момент	M	7.087e+05	Н·мм
Расчётное поперечное усилие	Q	1953	Н
Внутренний диаметр обечайки	D	948	мм
Фактическая длина обечайки	Lact	290	мм
Расчётная длина обечайки	L	2439	мм
Толщина стенки обечайки	S	12	мм
Прибавка на коррозию	c <sub>1</sub>	3	мм
Прибавка – минусовый допуск	c <sub>2</sub>	0.8	мм
Прибавка технологическая	c <sub>3</sub>	1	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки	c	4.8	мм
Допускаемое напряжение	[σ]	132	МПа
Модуль продольной упругости	E	1.78e+05	МПа

### *Результаты расчёта*

Допускаемое наружное давление

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left( \frac{[p]_n}{[p]_f} \right)^2}} = 0.298 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условий прочности

$$[p]_n = \frac{2[\sigma](s - c)}{D + (s - c)} = 1.99 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условий устойчивости в пределах упругости

$$[p]_f = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E D}{n_y \cdot B_1 L} \left[ \frac{100(s - c)}{D} \right]^{2.5} = 0.3014$$

Коэффициент

$$B_1 = \min \left\{ 1,0; \quad 9,45 \frac{D}{L} \sqrt{\frac{D}{100(s - c)}} \right\} = 1$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Сумма прибавок к расчётной толщине стенки	c	4.8	мм	
					Допускаемое напряжение	[σ]	132	МПа	
					Модуль продольной упругости	E	1.78e+05	МПа	
<b>Результаты расчёта</b>									
Допускаемое наружное давление					$[p] = \frac{[p]_н}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_н}{[p]_в}\right)^2}} =$				
					0.298 МПа				
Допускаемое наружное давление из условий прочности					$[p]_н = \frac{2[\sigma](s - c)}{D + (s - c)} =$				
					1.99 МПа				
Допускаемое наружное давление из условий устойчивости в пределах упругости					$[p]_в = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E D}{n_y \cdot B_1 L} \left[ \frac{100(s - c)}{D} \right]^{2,5} =$				
					0.3014				
Коэффициент					$B_1 = \min \left\{ 1,0; \quad 9,45 \frac{D}{L} \sqrt{\frac{D}{100(s - c)}} \right\} =$				
					1				
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата					Лист
19765.4	2		Изм.	E-101-2344.2	Редикulyцев	09.16	E-101-2344.00.00.000 PP		62
	1		Изм.	E-101-2344.1	Редикulyцев	04.16.			
	Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата			

$$[M]_E = \frac{89 \cdot 10^{-6} E}{n_y} D^3 \left[ \frac{100(S - C)}{D} \right]^{2.5} = \frac{2.813e09}{H \cdot MM}$$
$$[M]_{\text{H}} = \frac{\pi D(D+S-C)(S-C)[\sigma]}{4} = \frac{6.759 \times 10^8}{\text{H} \cdot \text{mm}}$$
$$[M] = \frac{[M]_{IR}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[M]_{IR}}{[M]_{IE}} \right)^2}} = \frac{6.572e+08}{H \cdot MM}$$
$$[Q]_E = \frac{2.4E(S-C)^2}{n_v} \left[ 0.18 + 3.3 \frac{D(S-C)}{L^2} \right] = 1.661e+06 \text{ H}$$
$$[Q]_R = \frac{\pi D(S-C)[\sigma]}{4} = 7.076 \times 10^5 \text{ H}$$
$$[Q] = \frac{[Q]_R}{\sqrt{1 + \left( \frac{[Q]_R}{[Q]_E} \right)^2}} = 6.51 \text{e}+05 \text{ H}$$
$$\frac{p}{[p]} + \frac{M}{[M]} + \left( \frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0.3367 < 1$$

Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата	Инв. №	Взам. инв.	Подп. и дата	<p>Условие устойчивости (п.5.3.7 ГОСТ Р 52857.2-2007)</p> $\frac{P}{[P]} + \frac{M}{[M]} + \left( \frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0.3367 < 1$ <p>Обечайка отвечает условиям прочности и устойчивости в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52857.2-2007.</p>
--------------	---------	--------------	--------	------------	--------------	---

2		Изм.	Е-101-2344.2	Редикulyцев	09.16	<b>Е-101-2344.00.00.000 РР</b>	Лист
1		Изм.	Е-101-2344.1	Редикulyцев	04.16.		
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата		63

## 2.9. Конический переход камеры Ду950 / Ду600

Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.2-2007

*Расчёт выполнен с помощью пакета прикладных программ расчёта на прочность элементов сосудов, аппаратов и трубопроводов PVP Design (Свидетельство о государственной регистрации 2008614973)*

Элемент: Неотбортованный конический переход,  
работающий под действием наружного давления.  
Режим: Расчет на вакуум.

### *Исходные данные*

Материал конической обечайки или днища	Сталь 12ХМ ГОСТ 5520-79, Лист
Материал большего цилиндрического перехода	Сталь 12ХМ ГОСТ 5520-79, Лист
Материал меньшего цилиндрического перехода	Сталь 12ХМ ГОСТ 5520-79, Лист

Расчётная температура	T	400	°C
Расчётное давление	P	0.1	МПа
Расчётная осевая сила	F	5000	Н
Расчётный изгибающий момент	M	2.594e+05	Н·мм
Внутренний диаметр большей обечайки, перехода или днища	D	948	мм
Внутренний диаметр меньшей цилиндрической обечайки	D <sub>1</sub>	597	мм
Половина угла раствора при вершине конической обечайки (днища)	α <sub>1</sub>	30.41	град
Исполнительная толщина стенки конической обечайки (днища)	S <sub>к</sub>	12	мм
Исполнительная толщина стенки большей цилиндрической обечайки	S <sub>б</sub>	12	мм
Исполнительная толщина стенки меньшей цилиндрической обечайки	S <sub>м</sub>	12	мм
Прибавка к расчётной толщине конической обечайки (днища) для компенсации коррозии и эрозии	C <sub>к_1</sub>	3	мм
Прибавка к расчётной толщине конической обечайки (днища) для компенсации минусового допуска	C <sub>к_2</sub>	0.8	мм
Прибавка технологическая к расчётной толщине конической обечайки (днища)	C <sub>к_3</sub>	1	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине конической обечайки (днища)	C <sub>к</sub>	4.8	мм
Прибавка к расчётной толщине большей цилиндрической обечайки(перехода) для компенсации коррозии и эрозии	C <sub>2б_1</sub>	3	мм
Прибавка к расчётной толщине большей цилиндрической обечайки(перехода) для компенсации минусового допуска	C <sub>2б_2</sub>	0.8	мм
Прибавка технологическая к расчётной толщине большей цилиндрической обечайки (перехода)	C <sub>2б_3</sub>	1	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине большей цилиндрической обечайки (перехода)	C <sub>2б</sub>	4.8	мм
Прибавка к расчётной толщине меньшей цилиндрической обечайки(перехода) для компенсации коррозии и эрозии	C <sub>2м_1</sub>	3	мм
Прибавка к расчётной толщине меньшей цилиндрической обечайки(перехода) для компенсации минусового допуска	C <sub>2м_2</sub>	0.8	мм

Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата		Инв. №		Взам. инв.		Подп. и дата		E-101-2344.00.00.000 PP					Лист



обечайки(перехода) для компенсации минусового допуска

Прибавка технологическая к расчётной толщине меньшей цилиндрической обечайки (перехода)

$C_{2M_3}$  1 мм

Сумма прибавок к расчётной толщине меньшей цилиндрической обечайки (перехода)

$C_{2M}$  4.8 мм

Коэффициент прочности продольного сварного шва

$\phi_p$  1

Коэффициент прочности кольцевого сварного шва

$\phi_T$  1

Допускаемое напряжение для материала конической обечайки (днища)

$[\sigma]$  132 МПа

Допускаемое напряжение для материала большей цилиндрической обечайки (перехода)

$[\sigma]_2$  132 МПа

Допускаемое напряжение для материала меньшей цилиндрической обечайки (перехода)

$[\sigma]_2$  132 МПа

Модуль продольной упругости материала конической обечайки (днища)

$E$  1.78e+05 МПа

### Результаты расчёта

Расчётная длина переходной части конической обечайки:

$$a_1 = 0,7 \sqrt{\frac{D}{\cos \alpha_1} (s_1 - c)} = 62.27 \text{ мм}$$

Расчётная длина переходной части конической обечайки у меньшего конца:

$$a_1 = \sqrt{\frac{D}{\cos \alpha_1} (s_1 - c)} = 49.42 \text{ мм}$$

Расчётная длина переходной части цилиндрической обечайки:

$$a_2 = 0,7 \sqrt{D(s_2 - c)} = 57.83 \text{ мм}$$

Расчётная длина цилиндрической обечайки или штуцера у меньшего конца:

$$a_2 = 1,25 \sqrt{D(s_2 - c)} = 81.95 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр гладкой конической обечайки без тороидального перехода:

$$D_x = D - 1.4 a_1 \sin \alpha_1 = 903.9 \text{ мм}$$

Эффективные толщины переходных участков:

- конической части соединения без тороидального перехода:

$$s_{1E} = \max \left\{ \frac{a_{1D}}{a_1} s_1; s_x \right\} = 12 \text{ мм}$$

- цилиндрической части соединения без тороидального перехода:

$$s_{2E} = \max \left\{ \frac{a_{2D}}{a_2} s_2; s \right\} = 12 \text{ мм}$$

Допускаемая растягивающая сила:

$$[F] = \pi D_1 (s_x - c) \phi_T [\sigma] \cos \alpha_1 = 2.733e+06 \text{ Н}$$

Допускаемое наружное давление для гладкой конической обечайки или пологого конического днища:

где:

Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. №	Взам. инв.	Подп. и дата	Инв. № подл.
19765.4					
2		Изм.	Е-101-2344.2	Редикунцев	09.16
1		Изм.	Е-101-2344.1	Редикунцев	04.16.
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата
Е-101-2344.00.00.000 РР					Лист
					65

$$[p] = \frac{[p]_k}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_k}{[p]_E}\right)^2}} = 1.445 \text{ МПа}$$

- допускаемое давление из условия прочности:

$$[p]_k = \frac{2[\sigma](s_k - c)}{\frac{D_k}{\cos \alpha_1} + (s_k - c)} = 1.801 \text{ МПа}$$

- допускаемое давление для гладкой конической обечайки из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[p]_E = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E D_E}{n_y \cdot B_1 l_E} \left[ \frac{100(s_k - c)}{D_E} \right]^{2,5} = 2.422 \text{ МПа}$$

- эффективный диаметр конической обечайки при действии наружного давления:

$$D_E = \max \left\{ \frac{D + D_1}{2 \cos \alpha_1}; \frac{D}{\cos \alpha_1} - 0,31(D + D_1) \sqrt{\frac{D + D_1}{s_k - c}} \cdot \operatorname{tg} \alpha_1 \right\} = 909.7$$

- эффективная длина конической обечайки при действии наружного давления:

$$l_E = \frac{D - D_1}{2 \sin \alpha_1} = 323 \text{ мм}$$

- коэффициент  $B_1$ :

$$B_1 = \min \left\{ 1,0; 9,45 \frac{D_E}{l_E} \sqrt{\frac{D_E}{100(s_k - c)}} \right\} = 1$$

Допускаемая осевая сжимающая сила:

где:

$$[F] = \min \left\{ \frac{[F]_k}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_k}{[F]_E}\right)^2}}; \frac{D_1}{D_F} [F]_k \right\} = 1.599\text{e}+06 \text{ Н}$$

- допускаемая осевая сила из условия прочности:

$$[F]_k = \pi D_F (s_k - c) [\sigma] \cos \alpha_1 = 1.599\text{e}+06 \text{ Н}$$

- допускаемая осевая сила из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[F]_E = \frac{310 \cdot 10^{-6} E (D_F \cos \alpha_1)^2}{n_y} \cdot \left[ \frac{100(s_k - c)}{D_F} \right]^{2,5} = 7.302\text{e}+06 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности:

$$[M] = \frac{D_1}{4} \pi D_1 (s_k - c) \varphi_T [\sigma] \cos \alpha_1 = 2.483\text{e}+08 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости:

Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата		Инв. №		Взам. инв.		Подп. и дата			
2			Изм.	Е-101-2344.2	Редикунцев	09.16	E-101-2344.00.00.000 PP				Лист
1			Изм.	Е-101-2344.1	Редикунцев	04.16.					
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата						

- коэффициент $B_1$ :	$B_1 = \min \left\{ 1, 0,945 \frac{D_F}{l_F} \sqrt{\frac{D_F}{100(s_x - c)}} \right\} =$	1
Допускаемая осевая сжимающая сила:		
где:		
	$[F] = \min \left\{ \frac{[F]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[F]_{\pi}}{[F]_F} \right)^2}}; \frac{D_1}{D_F} [F]_{\pi} \right\} =$	1.599e+06 Н
- допускаемая осевая сила из условия прочности:	$[F]_{\pi} = \pi D_F (s_x - c) [\sigma] \cos \alpha_1 =$	1.599e+06 Н
- допускаемая осевая сила из условия устойчивости в пределах упругости:	$[F]_F = \frac{310 \cdot 10^{-6} E}{n_y} (D_F \cos \alpha_1)^2 \cdot \left[ \frac{100(s_x - c)}{D_F} \right]^{2,5} =$	7.302e+06 Н
Допускаемый изгибающий момент из условия прочности:		
	$[M] = \frac{D_1}{4} \pi D_1 (s_x - c) \varphi_T [\sigma] \cos \alpha_1 =$	2.483e+08 Н·мм
Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости:		

где:

$$[M] = \frac{[M]_{\text{н}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\text{н}}}{[M]_{\text{в}}}\right)^2}} = 6.891\text{e}+08 \text{ Н}\cdot\text{мм}$$

- допускаемый изгибающий момент из условия прочности:

$$[M]_{\text{н}} = \frac{D_F}{4} \pi D_F (s_k - c) [\sigma] \cos \alpha_1 = 7.251\text{e}+08 \text{ Н}\cdot\text{мм}$$

- допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_{\text{в}} = \frac{D_F}{3.5} \cdot \frac{310 \cdot 10^{-6} E}{n_y} (D_F \cos \alpha_1)^2 \cdot \left[ \frac{100(s_k - c)}{D_F} \right]^{2.5} = 2.214\text{e}+09 \text{ Н}\cdot\text{мм}$$

- эффективный диаметр конической обечайки при осевом сжатии и изгибе:

$$D_F = \frac{0,9D + 0,1D_1}{\cos \alpha_1} = 1061 \text{ мм}$$

- коэффициент запаса устойчивости:

$$n_y = 2.4$$

Допускаемое давление из условия прочности большей переходной части без тороидального перехода:

где:

$$[p] = \frac{2[\sigma]_2 \varphi_p (s_2 - c)}{D \beta_1 + (s_2 - c)} = 1.901 \text{ МПа}$$

- коэффициент формы:

$$\beta_1 = \max\{0.5; \beta\} = 1.047$$

- коэффициент  $\beta$ :

$$\beta = 0,4 \sqrt{\frac{D}{s_2 - c}} \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{1 + \sqrt{\frac{1 + \chi \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)^2}{2 \cos \alpha_1} \chi \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)}} - 0,25 = 1.047$$

Допускаемая осевая растягивающая или сжимающая сила из условия прочности переходной части:

где:

$$[F] = \pi D \frac{(s_2 - c) [\sigma]_2 \varphi_r}{\beta_3} = 8.592\text{e}+05 \text{ Н}$$

- коэффициент  $\beta_3$ :

$$\beta_3 = \max\{1.0; (2\beta + 1.2)\} = 3.294$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности переходной части:

$$[M] = \frac{D}{4} [F] = 2.483\text{e}+08 \text{ Н}\cdot\text{мм}$$

Допускаемое давление из условия прочности соединения штуцера или внутреннего цилиндрического корпуса с конической обечайкой:

где:

Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата		Инв. №		Взам. инв.		Подп. и дата		
2		Изм.	Е-101-2344.2	Редикунцев	09.16	Е-101-2344.00.00.000 РР				Лист
1		Изм.	Е-101-2344.1	Редикунцев	04.16.					67
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата					

- коэффициент формы:	$\beta_1 = \max\{0.5; \beta\} =$	1.047
- коэффициент $\beta$ :	$\beta = 0,4 \sqrt{\frac{D}{s_2 - c}} \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{1 + \sqrt{\frac{1 + \chi \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)^2}{2 \cos \alpha_1} \chi \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)}} - 0,25 =$	1.047
Допускаемая осевая растягивающая или сжимающая сила из условия прочности переходной части:		
где:	$[F] = \pi D \frac{(s_2 - c)[\sigma]_2 \varphi_r}{\beta_s} =$	8.592e+05 Н
- коэффициент $\beta_s$ :	$\beta_s = \max\{1.0; (2\beta + 1.2)\} =$	3.294
Допускаемый изгибающий момент из условия прочности переходной части:		
	$[M] = \frac{D}{4} [F] =$	2.483e+08 Н·мм
Допускаемое давление из условия прочности соединения штуцера или внутреннего цилиндрического корпуса с конической обечайкой:		
где:		

Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата					
		Инв. №					
		Взам. инв.					
		Подп. и дата					
2		Изм.	Е-101-2344.2	Редикунцев	09.16	Е-101-2344.00.00.000 РР	Лист
1		Изм.	Е-101-2344.1	Редикунцев	04.16.		68
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата		

## 2.10. Проставок Ду600

Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.2-2007

*Расчёт выполнен с помощью пакета прикладных программ расчёта на прочность элементов сосудов, аппаратов и трубопроводов PVP Design (Свидетельство о государственной регистрации 2008614973)*

Элемент: Гладкая цилиндрическая обечайка, работающая под действием  
наружного давления - изгибающего момента.

Режим: Расчет на вакуум.

### *Исходные данные*

Материал обечайки

Сталь 12ХМ ГОСТ 5520-79, Лист

Расчётная температура	T	400	°C
Расчётное давление	P	0.1	МПа
Расчётный изгибающий момент	M	3.536e+04	Н·мм
Расчётное поперечное усилие	Q	353.6	Н
Внутренний диаметр обечайки	D	597	мм
Фактическая длина обечайки	Lact	200	мм
Расчётная длина обечайки	L	369.5	мм
Толщина стенки обечайки	S	12	мм
Прибавка на коррозию	c <sub>1</sub>	3	мм
Прибавка – минусовый допуск	c <sub>2</sub>	0.8	мм
Прибавка технологическая	c <sub>3</sub>	1	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки	c	4.8	мм
Допускаемое напряжение	[σ]	132	МПа
Модуль продольной упругости	E	1.78e+05	МПа

### *Результаты расчёта*

Допускаемое наружное давление

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left( \frac{[p]_n}{[p]_f} \right)^2}} = 2.468 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условий прочности

$$[p]_n = \frac{2[\sigma](s - c)}{D + (s - c)} = 3.146 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условий устойчивости в пределах упругости

$$[p]_f = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E D}{n_y \cdot B_1 L} \left[ \frac{100(s - c)}{D} \right]^{2,5} = 3.981$$

Коэффициент

$$B_1 = \min \left\{ 1,0; \quad 9,45 \frac{D}{L} \sqrt{\frac{D}{100(s - c)}} \right\} = 1$$

Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата						Сумма прибавок к расчётной толщине стенки	c	4.8	мм	
		Инв. №						Допускаемое напряжение	[σ]	132	МПа	
		Взам. инв.						Модуль продольной упругости	E	1.78e+05	МПа	
<b>Результаты расчёта</b>												
Допускаемое наружное давление												
$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_n}{[p]_B}\right)^2}} = 2.468 \text{ МПа}$												
Допускаемое наружное давление из условий прочности												
$[p]_n = \frac{2[\sigma](s - c)}{D + (s - c)} = 3.146 \text{ МПа}$												
Допускаемое наружное давление из условий устойчивости в пределах упругости												
$[p]_B = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E D}{n_y \cdot B_1 L} \left[ \frac{100(s - c)}{D} \right]^{2,5} = 3.981$												
Коэффициент												
$B_1 = \min \left\{ 1,0; \quad 9,45 \frac{D}{L} \sqrt{\frac{D}{100(s - c)}} \right\} = 1$												
Инв. № подл.	19765.4	Подп. и дата						<b>E-101-2344.00.00.000 PP</b>				
		Инв. №										Лист
		Взам. инв.										69
2		Изм.	E-101-2344.2	Редикунцев	09.16							
1		Изм.	E-101-2344.1	Редикунцев	04.16.							
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата							

$$[M]_E = \frac{89 \cdot 10^{-6} E}{n_y} D^3 \left[ \frac{100(S - C)}{D} \right]^{2.5} = \frac{2.233e09}{H \cdot MM}$$
$$[M]_{\text{H}} = \frac{\pi D(D+S-C)(S-C)[\sigma]}{4} = \frac{2.692 \times 10^8}{\text{H} \cdot \text{mm}}$$
$$[M] = \frac{[M]_{IR}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[M]_{IR}}{[M]_{IE}} \right)^2}} = \frac{2.673e+08}{H \cdot MM}$$
$$[Q]_E = \frac{2.4E(S-C)^2}{n_v} \left[ 0.18 + 3.3 \frac{D(S-C)}{L^2} \right] = 1.661e+06 \text{ H}$$
$$[Q]_r = \frac{\pi D(S-C)[\sigma]}{4} = 4.456e+05 \text{ H}$$
$$[Q] = \frac{[Q]_T}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_T}{[Q]_E}\right)^2}} = 4.304 \times 10^5 \text{ H}$$
$$\frac{p}{[p]} + \frac{M}{[M]} + \left( \frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0.04065 < 1$$

Инв. № подл. 19765.4	Подп. и дата					<p>Условие устойчивости (п.5.3.7 ГОСТ Р 52857.2-2007)</p> $\frac{P}{[P]} + \frac{M}{[M]} + \left( \frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0.04065 < 1$ <p>Обечайка отвечает условиям прочности и устойчивости в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52857.2-2007.</p>	
	Взам. инв.						
	Инв. №						
	Подп. и дата						
2		Изм.	Е-101-2344.2	Редикulyцев	09.16	<p><b>Е-101-2344.00.00.000 РР</b></p>	Лист
1		Изм.	Е-101-2344.1	Редикulyцев	04.16.		70
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись	Дата		

## Лист регистрации изменений

[illegible]

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата
19765.4				
2		Изм.	Е-101-2344.2	Редикольцев 09.16
1		Изм.	Е-101-2344.1	Редикольцев 04.16.
Изм	Кол.уч	Лист	№ док.	Подпись Дата
<div> <div>Е-101-2344.00.00.000 РР</div> <div>71</div> </div>				