



АО «ВНИИНЕФТЕМАШ»

**ОАО «Славнефть-ЯНОС»
Установка утилизации сероводорода (МК-2)**

**Холодильник технологического газа
поз. Е-107**

Расчеты





Е-107-2376.00.00.000 РР

Инов. № подл. 19805	Подп. и дата	Взам. инв.	Инов. №	Подп. и дата
------------------------	--------------	------------	---------	--------------

Москва
2016 г.

СОДЕРЖАНИЕ

1.	Расчет на внутреннее давление	4
1.1.	Цилиндрический переход входной камеры Ду 1000	4
1.2.	Цилиндрический переход входной камеры Двн=2188	6
1.3.	Коническая обечайка входной камеры	8
1.4.	Элементы теплообменных аппаратов	13
1.5.	Корпус	21
1.6.	Укрепление отверстий В2 Ду 100	23
1.7.	Укрепление отверстий А2 Ду 80	27
1.8.	Укрепление отверстий U1, U2	31
1.9.	Труба 57×6	35
1.10.	Укрепление отверстий D1 Ду 50	36
1.11.	Неподвижная опора	38
1.12.	Подвижная опора	42
1.13.	Цилиндрический переход выпускной камеры Двн=2188	46
1.14.	Коническая обечайка выпускной камеры	48
1.15.	Укрепление отверстий под люк Ду 600	53
1.16.	Цилиндрический переход выпускной камеры Ду 1100	55
2.	Расчет на наружное давление	57
2.1.	Цилиндрический переход входной камеры Ду 1000	57
2.2.	Коническая обечайка входной камеры	59
2.3.	Цилиндрический переход входной камеры Двн 2188	64
2.4.	Кожух	65
2.5.	Укрепление отверстий В2 Ду 100	67
2.6.	Укрепление отверстий А2 Ду 80	71
2.7.	Укрепление отверстий U1, U2	75
2.8.	Труба 57×6	79
2.9.	Укрепление отверстий D1 Ду 50	80
2.10.	Неподвижная опора	84
2.11.	Подвижная опора	88
2.12.	Цилиндрический переход выпускной камеры Двн 2188	92
2.13.	Коническая обечайка выпускной камеры	94
2.14.	Укрепление отверстий под люк Ду 600	99
2.15.	Цилиндрический переход выпускной камеры Ду 1100	102
2.16.	Расчет линейного расширения от неподвижной опоры	104
2.16.1.	Удлинение аппарата ΔL1 от неподвижной опоры при максимальной температуре	104
2.16.2.	Удлинение аппарата ΔL2 от неподвижной опоры при максимальной температуре	104
2.16.3.	Удлинение аппарата ΔL1 от неподвижной опоры при минимальной температуре	105
2.16.4.	Удлинение аппарата ΔL2 от неподвижной опоры при минимальной температуре	105
2.17.	Лист регистрации изменений	106

Инов. № подл.	19805	Разраб.	Матюшина		10.16	Холодильник технологического газа поз. Е-107 Расчеты	Лит.	Лист	Листов
		Пров.	Дундуков		10.16		Т	2	106
Н. контр.	Капацинская		10.16	АО «ВНИИНЕФТЕМАШ»					
Утв.	Дундуков		10.16						
Инов. №		Изм	Лист	№ док.	Подпись		Дата	Е-107-2376.00.00.000 РР	
Взам. инв.		3	Зам		Матюшина	03.17			
Подп. и дата		1	-		Матюшина	12.16			
ОАО «Славнефть-ЯНОС»							Установка утилизации сероводорода (МК-2)		
Подп. и дата									
Инов. №		2.17. Лист регистрации изменений					106		
		2.16.4. Удлинение аппарата ΔL2 от неподвижной опоры при минимальной температуре					105		
Подп. и дата		2.16.3. Удлинение аппарата ΔL1 от неподвижной опоры при минимальной температуре					105		
		2.16.2. Удлинение аппарата ΔL2 от неподвижной опоры при максимальной температуре					104		
Инов. №		2.16.1. Удлинение аппарата ΔL1 от неподвижной опоры при максимальной температуре					104		
		2.16. Расчет линейного расширения от неподвижной опоры					104		
Подп. и дата		2.15. Цилиндрический переход выпускной камеры Ду 1100					102		
		2.14. Укрепление отверстий под люк Ду 600					99		
Инов. №		2.13. Коническая обечайка выпускной камеры					94		
		2.12. Цилиндрический переход выпускной камеры Двн 2188					92		
Подп. и дата		2.11. Подвижная опора					88		
		2.10. Неподвижная опора					84		
Инов. №		2.9. Укрепление отверстий D1 Ду 50					80		

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 52857.4-2007 «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений».

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».

ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Расчет на прочность и плотность арматурных фланцев.

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ВЫПОЛНЕН С ПОМОЩЬЮ:

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

[illegible]

1. Расчет на внутреннее давление

1.1. Цилиндрический переход входной камеры Ду 1000

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	09Г2С, Лист		
Расчётная температура	T	450	°C
Расчётное давление в сосуде	P	0.0204	МПа
Расчётный изгибающий момент	M	4.013e+04	Н·мм
Расчётное поперечное усилие	Q	729.6	Н
Внутренний диаметр обечайки	D	1000	мм
Фактическая длина обечайки	Lact	110	мм
Расчётная длина обечайки	L	650.6	мм
Толщина стенки обечайки	S	10	мм
Прибавка на коррозию	c ₁	2	мм
Прибавка – минусовый допуск	c ₂	0.8	мм
Прибавка технологическая	c ₃	1	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки	c	3.8	мм
Коэффициент прочности продольного сварного шва	φ _p	1	
Допускаемое напряжение	[σ]	71	МПа
Модуль продольной упругости	E	1.4e+05	МПа

Результаты расчёта

Расчётная толщина стенки обечайки от действия давления

$$S_p = \frac{pD}{2[\sigma]\phi_p - p} = 0.1437 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки обечайки от действия давления с учетом прибавки

$$S \geq S_p + C = 3.944 \text{ мм}$$

Допускаемое внутреннее давление

$$[p] = \frac{2[\sigma]\phi_p(S - C)}{D + (S - C)} = 0.875 \text{ МПа}$$

Допускаемый изгибающий момент из условий устойчивости в пределах упругости

$$[M]_E = \frac{89 \cdot 10^{-6} E}{n_y} D^3 \left[\frac{100(S - C)}{D} \right]^{2.5} = 1.564e+09 \text{ Н·мм}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности

Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	E-107-2376.00.00.000 PP	Лист
						4

$$[M]_{\text{н}} = \frac{\pi D(D + S - C)(S - C)[\sigma]}{4} =$$

3.479e+08
Н·мм

Допускаемый изгибающий момент

$$[M] = \frac{[M]_{\text{н}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\text{н}}}{[M]_{\text{Е}}}\right)^2}} =$$

3.396e+08
Н·мм

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости в пределах упругости

$$[Q]_{\text{Е}} = \frac{2.4E(S - C)^2}{n_y} \left[0.18 + 3.3 \frac{D(S - C)}{L^2} \right] =$$

9.687e+05 Н

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности

$$[Q]_{\text{н}} = \frac{\pi D(S - C)[\sigma]}{4} =$$

3.457e+05 Н

Допускаемое перерезывающее усилие

$$[Q] = \frac{[Q]_{\text{н}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\text{н}}}{[Q]_{\text{Е}}}\right)^2}} =$$

3.256e+05 Н

Условие устойчивости (п.5.3.7 ГОСТ Р 52857.2-2007)

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

0.0001232 < 1

Обечайка 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				
19805																								

1.2. Цилиндрический переход входной камеры Двн=2188

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	09Г2С, Лист		
Расчётная температура	T	450	°C
Расчётное давление в сосуде	P	0.0204	МПа
Расчётный изгибающий момент	M	2.375e+07	Н·мм
Расчётное поперечное усилие	Q	2.477e+04	Н
Внутренний диаметр обечайки	D	2188	мм
Фактическая длина обечайки	Lact	112	мм
Расчётная длина обечайки	L	5212	мм
Толщина стенки обечайки	S	16	мм
Прибавка на коррозию	c ₁	2	мм
Прибавка – минусовый допуск	c ₂	0.8	мм
Прибавка технологическая	c ₃	1	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки	c	3.8	мм
Коэффициент прочности продольного сварного шва	φ _p	1	
Допускаемое напряжение	[σ]	71	МПа
Модуль продольной упругости	E	1.4e+05	МПа

Результаты расчёта

Расчётная толщина стенки обечайки от действия давления

$$S_p = \frac{pD}{2[\sigma]\phi_p - p} = 0.3144 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки обечайки от действия давления с учетом прибавки

$$S \geq S_p + C = 4.114 \text{ мм}$$

Допускаемое внутреннее давление

$$[p] = \frac{2[\sigma]\phi_p(S - C)}{D + (S - C)} = 0.7874 \text{ МПа}$$

Допускаемый изгибающий момент из условий устойчивости в пределах упругости

$$[M]_E = \frac{89 \cdot 10^{-6} E}{n_y} D^3 \left[\frac{100(S - C)}{D} \right]^{2.5} = 1.256e+10 \text{ Н·мм}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности

$$3.275e+09$$

Инв. № подл.	19805	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	
E-107-2376.00.00.000 PP					Лист
					6

1.3. Коническая обечайка входной 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: Неотбортованный конический переход, работающий под действием внутреннего давления Кососимметричный конический переход
Режим: Рабочий

Исходные данные

Материал конической обечайки или днища 09Г2С, Лист
Материал большего цилиндрического перехода 09Г2С, Лист
Материал меньшего цилиндрического перехода 09Г2С, Лист

Расчётная температура	T	450	°C
Расчётное давление	P	0.0204	МПа
Расчётная осевая сила	F	0	Н
Расчётный изгибающий момент	M	2.107e+07	Н·мм
Внутренний диаметр большей обечайки, перехода или днища	D	2188	мм
Внутренний диаметр меньшей цилиндрической обечайки	D ₁	1000	мм
Угол наклона кососимметричной обечайки	α_1	34	град
Исполнительная толщина стенки конической обечайки (днища)	S _к	10	мм
Исполнительная толщина стенки большей цилиндрической обечайки	S _б	16	мм
Исполнительная толщина стенки меньшей цилиндрической обечайки	S _м	10	мм
Прибавка к расчётной толщине конической обечайки (днища) для компенсации коррозии и эрозии	C _{к_1}	2	мм
Прибавка к расчётной толщине конической обечайки (днища) для компенсации минусового допуска	C _{к_2}	0.8	мм
Прибавка технологическая к расчётной толщине конической обечайки (днища)	C _{к_3}	1	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине конической обечайки (днища)	C _к	3.8	мм
Прибавка к расчётной толщине большей цилиндрической обечайки(перехода) для компенсации коррозии и эрозии	C _{2б_1}	2	мм
Прибавка к расчётной толщине большей цилиндрической обечайки(перехода) для компенсации минусового допуска	C _{2б_2}	0.8	мм
Прибавка технологическая к расчётной толщине большей цилиндрической обечайки (перехода)	C _{2б_3}	1	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине большей цилиндрической обечайки (перехода)	C _{2б}	3.8	мм
Прибавка к расчётной толщине меньшей цилиндрической обечайки(перехода) для компенсации коррозии и эрозии	C _{2м_1}	2	мм
Прибавка к расчётной толщине меньшей цилиндрической обечайки(перехода) для компенсации минусового допуска	C _{2м_2}	0.8	мм

Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	E-107-2376.00.00.000 PP	Лист
						8

ка

Прибавка технологическая к расчётной толщине меньшей цилиндрической обечайки (перехода)

$C_{2м_3}$ 2 мм

Сумма прибавок к расчётной толщине меньшей цилиндрической обечайки (перехода)

$C_{2м}$ 4.8 мм

Коэффициент прочности продольного сварного шва

φ_p 1

Коэффициент прочности кольцевого сварного шва

φ_t 1

Допускаемое напряжение для материала конической обечайки (днища)

$[\sigma]$ 71 МПа

Допускаемое напряжение для материала большей цилиндрической обечайки (перехода)

$[\sigma]_2$ 71 МПа

Допускаемое напряжение для материала меньшей цилиндрической обечайки (перехода)

$[\sigma]_2$ 71 МПа

Модуль продольной упругости материала конической обечайки (днища)

E 1.4e+05 МПа

Результаты расчёта

Расчётная длина переходной части конической обечайки:

$$a_1 = 0,7 \sqrt{\frac{D}{\cos \alpha_1}} (s_1 - c) = 89.54 \text{ мм}$$

Расчётная длина переходной части конической обечайки у меньшего конца:

$$a_1 = \sqrt{\frac{D}{\cos \alpha_1}} (s_1 - c) = 60.54 \text{ мм}$$

Расчётная длина переходной части цилиндрической обечайки:

$$a_2 = 0,7 \sqrt{D(s_2 - c)} = 114.4 \text{ мм}$$

Расчётная длина цилиндрической обечайки или штуцера у меньшего конца:

$$a_2 = 1,25 \sqrt{D(s_2 - c)} = 90.14 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр гладкой конической обечайки без тороидального перехода:

$$D_x = D - 1.4 a_1 \sin \alpha_1 = 2118 \text{ мм}$$

Эффективные толщины переходных участков:

- конической части соединения без тороидального перехода:

$$s_{1Э} = \max \left\{ \frac{a_{1D}}{a_1} s_1; s_x \right\} = 10 \text{ мм}$$

- цилиндрической части соединения без тороидального перехода:

$$s_{2Э} = \max \left\{ \frac{a_{2D}}{a_2} s_2; s \right\} = 16 \text{ мм}$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление для конической обечайки или днища:

$$[p]_{Эх} = \frac{2[\sigma]\varphi_p(s_x - c)}{\frac{D_x}{\cos \alpha_1} + (s_x - c)} = 0.3438 \text{ МПа}$$

Допускаемая растягивающая сила:

Инв. № подл. 19805	Подп. и дата					Инв. №	Подп. и дата									
Изм. Лист № док. Подпись Дата						$a_2 = 0,7\sqrt{D(s_2 - c)} =$ $a_2 = 1,25\sqrt{D(s_2 - c)} =$ $D_x = D - 1.4a_1 \sin \alpha_1 =$ $s_{1E} = \max \left\{ \frac{a_{1D}}{a_1} s_1; s_x \right\} =$ $s_{2E} = \max \left\{ \frac{a_{2D}}{a_2} s_2; s \right\} =$ $[p]_{ex} = \frac{2[\sigma] \varphi_p (s_x - c)}{\frac{D_x}{\cos \alpha_i} + (s_x - c)}$	Расчётная длина цилиндрической обечайки или штуцера у меньшего конца:					114.4 мм 90.14 мм 2118 мм				
							Расчётный диаметр гладкой конической обечайки без тороидального перехода:									
							Эффективные толщины переходных участков:									
							- конической части соединения без тороидального перехода:									
					- цилиндрической части соединения без тороидального перехода:					10 мм 16 мм						
					Допускаемое внутреннее избыточное давление для конической обечайки или днища:					0.3438 МПа						
					Допускаемая растягивающая сила:											
<div>Е-107-2376.00.00.000 PP</div>											Лист					
											9					

E-107-2376.00.00.000 PP

$$[F] = \pi D_1 (s_k - c) \varphi_T [\sigma] \cos \alpha_1 = 2.864 \text{e}+06 \text{ Н}$$

Допускаемая осевая сжимающая сила:

где:

$$[F] = \min \left\{ \frac{[F]_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\text{п}}}{[F]_{\text{э}}} \right)^2}}; \frac{D_1}{D_F} [F]_{\text{п}} \right\} = 1.169 \text{e}+06 \text{ Н}$$

- допускаемая осевая сила из условия прочности:

$$[F]_{\text{п}} = \pi D_F (s_k - c) [\sigma] \cos \alpha_1 = 1.169 \text{e}+06 \text{ Н}$$

- допускаемая осевая сила из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[F]_{\text{э}} = \frac{310 \cdot 10^{-6} E}{n_y} (D_F \cos \alpha_1)^2 \cdot \left[\frac{100(s_k - c)}{D_F} \right]^{2.5} = 2.38 \text{e}+06 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности:

$$[M] = \frac{D_1}{4} \pi D_1 (s_k - c) \varphi_T [\sigma] \cos \alpha_1 = 2.982 \text{e}+08 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости:

где:

$$[M] = \frac{[M]_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\text{п}}}{[M]_{\text{э}}} \right)^2}} = 1.232 \text{e}+09 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

- допускаемый изгибающий момент из условия прочности:

$$[M]_{\text{п}} = \frac{D_F}{4} \pi D_F (s_k - c) [\sigma] \cos \alpha_1 = 1.789 \text{e}+09 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

- допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_{\text{э}} = \frac{D_F}{3.5} \cdot \frac{310 \cdot 10^{-6} E}{n_y} (D_F \cos \alpha_1)^2 \cdot \left[\frac{100(s_k - c)}{D_F} \right]^{2.5} = 1.699 \text{e}+09 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

- эффективный диаметр конической обечайки при осевом сжатии и изгибе:

$$D_F = \frac{0,9D + 0,1D_1}{\cos \alpha_1} = 2498 \text{ мм}$$

- коэффициент запаса устойчивости:

$$n_y = 2.4$$

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

где:

$$[p] = \frac{2[\sigma]_2 \varphi_p (s_2 - c)}{D \beta_1 + (s_2 - c)} = 0.5359 \text{ МПа}$$

- коэффициент формы:

$$\beta_1 = \max \{0.5; \beta\} = 1.472$$

Инв. № подл.	19805	Подп. и дата	Подп. и дата	Инв. №	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Подп. и дата	Инв. №
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	Е-107-2376.00.00.000 РР				Лист
									10

- коэффициент β :

$$\beta = 0,4 \sqrt{\frac{D}{s_2 - c}} \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{1 + \sqrt{\frac{1 + \chi \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)^2}{2 \cos \alpha_1} \chi \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)}} - 0,25 = 1.472$$

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

где:

$$[F] = \pi D \frac{(s_2 - c)[\sigma]_2 \varphi_r}{\beta_5} - 1.437\text{e}+06 \text{ H}$$

- коэффициент β_5 :

$$\beta_s = \max\{1.0; (2\beta + 1.2)\} = \quad 4.144$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности переходной части:

$$[M] = \frac{D}{4}[F] = 2.982 \times 10^8 \text{ H} \cdot \text{mm}$$

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

где:

$$[\mathcal{P}]_{\text{max}} = \frac{2[\sigma]_2 \varphi_p(s_2 - c)}{D\beta_1 + (s_2 - c)} = 0.3486 \text{ МПа}$$

- общий коэффициент формы для переходной части:

$$\beta_4 = \max \{1.0, \beta_v\} = \quad 2.113$$

- коэффициент β_n :

$$\beta_{\alpha} = \begin{cases} \beta + 0,75 & -npu & x \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)^2 \geq 1 \\ 0,4 \sqrt{\frac{D}{s_2 - c}} \times & & \\ \times \frac{tg \alpha_1}{x \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right) \sqrt{\frac{s_1 - c}{(s_2 - c) \cos \alpha_1}} + \sqrt{\frac{1 + x \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)^2}{2}}} + & & \\ + 0,5 & -npu & x \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)^2 < 1 \end{cases} = \quad 2.113$$

- коэффициент β :

$$\beta = 0,4 \sqrt{\frac{D}{s_2 - c}} \cdot \frac{tg \alpha_1}{1 + \sqrt{\frac{1 + x \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)^2}{2 \cos \alpha_1} x \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)}} - 0,25 = \quad 1.363$$

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

$$[F] = \pi D \frac{(s_2 - c)[\sigma]_2 \cdot \varphi_p}{\beta_8} = 3.595e+05 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности переходной части:

$$[M] = \frac{D}{4} [F] = 8.989e+07 \text{ Н}\cdot\text{мм}$$

Условие устойчивости

$$-\frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} = 0.0171 < 1$$

Условие прочности большей переходной части

$$\left| \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} \right| + \frac{M}{[M]} = 0.06488 < 1$$

Условие прочности меньшей переходной части

$$\left| \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} \right| + \frac{M}{[M]} = 0.2929 < 1$$

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		
19805						
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	Е-107-2376.00.00.000 РР	Лист
						12

1.4. Элементы теплообменных аппаратов

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 нескольких пазов

Специальная проверка жесткости решеток не нужна

Исходные данные

Материал кожуха	09Г2С, Лист
Материал труб	SA-106 B Smls. pipe
Материал решеток	09Г2С КП 245, Поковка

Средняя температура стенки кожуха	t_k	275.4	°C
Средняя температура труб	t_t	277.7	°C
Расчётная температура кожуха	T_k	289	°C
Расчётная температура труб	T_t	300	°C
Расчётная температура решетки	T_p	450	°C
Расчётное давление в межтрубном пространстве	P_m	7.34	МПа
Расчётное давление в трубном пространстве	P_t	0.0204	МПа
Максимально возможный перепад давлений, действующих на решетку	P_r	7.34	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	1.4e+05	МПа
Модуль продольной упругости материала камеры	E_d	1.71e+05	МПа
Модуль продольной упругости материала труб	E_t	1.85e+05	МПа
Модуль продольной упругости материала решетки	E_p	1.4e+05	МПа
Коэффициент линейного расширения материала кожуха при температуре t_k	α_k	1.295e-05	1/°C
Коэффициент линейного расширения материала труб при температуре t_t	α_t	1.32e-05	1/°C
Допускаемое напряжение для материала кожуха при температуре T_k	$[\sigma]_k$	136	МПа
Допускаемое напряжение для материала труб при температуре T_t	$[\sigma]_t$	126	МПа
Допускаемое напряжение для материала решетки при	$[\sigma]_p$	62	МПа

Инв. № подл. 19805	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Расчётная температура кожуха	T_k	230	°C
					Расчётная температура труб	T_T	300	°C
					Расчётная температура решетки	T_p	450	°C
					Расчётное давление в межтрубном пространстве	P_m	7.34	МПа
					Расчётное давление в трубном пространстве	P_T	0.0204	МПа
					Максимально возможный перепад давлений, действующих на решетку	P_r	7.34	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	1.4e+05	МПа
					Модуль продольной упругости материала камеры	E_d	1.71e+05	МПа
					Модуль продольной упругости материала труб	E_T	1.85e+05	МПа
					Модуль продольной упругости материала решетки	E_p	1.4e+05	МПа
					Коэффициент линейного расширения материала кожуха при температуре t_k	α_k	1.295e-05	1/°C
					Коэффициент линейного расширения материала труб при температуре t_T	α_T	1.32e-05	1/°C
					Инв. № подл. 19805	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №
Допускаемое напряжение для материала труб при температуре T_T	$[\sigma]_T$	126	МПа					
Допускаемое напряжение для материала решетки при	$[\sigma]_p$	62	МПа					
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	Е-107-2376.00.00.000 РР			Лист
								13

температуре T_p			
Допускаемая амплитуда напряжений для материала кожуха при температуре T_k	$[\sigma_a]_k$	482	МПа
Допускаемая амплитуда напряжений для материала труб при температуре T_t	$[\sigma_a]_t$	538.8	МПа
Допускаемая амплитуда напряжений для материала решетки при температуре T_p	$[\sigma_a]_p$	434	МПа
Внутренний диаметр кожуха	D	2200	мм
Толщина стенки кожуха	S_k	66	мм
Толщина стенки кожуха в месте приварки решетки (для приваренных в стык фланцев – $S_1 = S_3$ по ГОСТ Р 52857.4–2007)	S_1	66	мм
Прибавка к толщине стенки кожуха для компенсации коррозии и эрозии	C_{k1}	1.6	мм
Прибавка к толщине стенки кожуха для компенсации минусового допуска	C_{k2}	1.3	мм
Прибавка технологическая к толщине стенки кожуха	C_{k3}	1	мм
Расчётная прибавка к толщине стенки кожуха	C_k	3.9	мм
Толщина тарелки фланца кожуха (для решеток вваренных в кожух – $h_1 = S_{1p}$)	h_1	78	мм
Ширина тарелки фланца кожуха (для решеток вваренных в кожух – $b_1 = (D_n - D)/2$)	b_1	66	мм
Радиус центра тяжести тарелки фланца кожуха ($(D_n + D)/4$)	R_1	1132	мм
Толщина стенки камеры в месте приварки решетки (для приваренных в стык фланцев – $S_2 = S_3$ по ГОСТ Р 52857.4–2007)	S_2	66	мм
Толщина тарелки фланца камеры (для решеток вваренных в кожух – $h_2 = S_{1p}$)	h_2	66	мм
Ширина тарелки фланца камеры (для решеток вваренных в кожух – $b_2 = 0$)	b_2	0	мм
Радиус центра тяжести тарелки фланца камеры ($(D_n + D)/4$)	R_2	1132	мм
Количество труб в пучке	i_t	1821	
Половина длины трубы	l	2100	мм
Наружный диаметр трубы	d_t	26.9	мм
Толщина стенки трубы	S_t	2.9	мм
Расстояние от оси кожуха до оси наиболее удаленной трубы	a_1	890	мм
Толщина трубной решетки	S_p	78	мм
Толщина трубной решетки в зоне кольцевой канавки	S_{p1}	78	мм
Прибавка к толщине трубной решетки для компенсации коррозии и эрозии	C_{p1}	3.2	мм
Прибавка к толщине трубной решетки для компенсации минусового допуска	C_{p2}	0	мм
Прибавка технологическая к толщине трубной решетки	C_{p3}	0	мм
Расчётная прибавка к толщине трубной решетки	C	3.2	мм
Диаметр отверстий под трубы в решетке	d_o	27.05	мм
Шаг расположения отверстий под трубы в решетке	t_p	40	мм
Глубина развальцовки труб	l_b	69	мм
Высота сварного шва в месте приварки трубы к решетке	δ	3	мм

Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата

E-107-2376.00.00.000 PP

Диаметр окружности, вписанной в максимальную беструбную площадь	D_e	20	мм
Эффективный коэффициент концентрации напряжений в месте приварки решетки	K_σ	1.7	
Максимальный пролет трубы между решеткой и перегородкой	l_{lr}	1400	мм
Максимальный пролет трубы между перегородками	l_{2r}	1400	мм

Результаты расчёта

Внутренний радиус кожуха:

$$a = \frac{D}{2} = 1100 \text{ мм}$$

Относительная характеристика беструбного края:

$$m_n = a / a_1 = 1.236$$

Коэффициент влияния давления в межтрубном пространстве на трубную решетку:

$$\eta_M = 1 - \frac{i d_T^2}{4 a_1^2} = 0.5841$$

Коэффициент влияния давления в трубном пространстве на трубную решетку:

$$\eta_T = 1 - \frac{i (d_T - 2 S_T)^2}{4 a_1^2} = 0.7441$$

Коэффициент ослабления трубной решетки:

$$\varphi_p = 1 - \frac{d_o}{t_o} = 0.3237$$

Коэффициент жесткости перфорированной плиты:

$$\psi_o = 0.5018$$

Модуль упругости основания (системы труб):

$$K_y = \frac{E_T (\eta_T - \eta_M)}{l} = 14.1 \text{ Н/мм}^3$$

Приведенное отношение жесткости труб к жесткости кожуха:

$$\rho = \frac{K_y a_1 l}{E_x S_x} = 2.307$$

Коэффициенты изменения жесткости системы трубы-кожух:

$$K_q = 1$$

$$K_p = 1$$

Приведенное давление:

$$P_o = [\alpha_k (t_k - t_o) - \alpha_T (t_T - t_o)] K_y l + \\ + [\eta_T - 1 + m_{cp} + m_n (m_n + 0.5 \rho K_q)] P_T - \\ + [\eta_M - 1 + m_{cp} + m_n (m_n + 0.3 \rho K_p)] P_M = -18.63$$

где:

$$m_{cp} = 0.15 \frac{i (d_T - S_T)^2}{a_1^2} = 0.1986$$

Инв. № подл.	Подл. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата
19805				
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата
Е-107-2376.00.00.000 РР				Лист
				15

Коэффициент системы решетка - трубы:

$$\beta = \frac{1.82}{S_p} \sqrt[4]{\frac{K_y S_p}{\psi_o E_p}} = 0.008253 \text{ 1/мм}$$

Коэффициент системы кожух-решетка камеры:

$$\beta_1 = \frac{1.3}{\sqrt{a S_1}} = 0.004825 \text{ 1/мм}$$

Коэффициент системы обечайка-фланец камеры:

$$\beta_2 = \frac{1.3}{\sqrt{a S_2}} = 0.004825 \text{ 1/мм}$$

Жесткость фланцевого соединения при изгибе:

$$K_{\#} = K_{\#1} + K_{\#2} = 9.924\text{e}+07 \text{ Н}\cdot\text{мм/мм}$$

где:

$$K_{\#1} = \frac{E_1 h_1^3 b_1}{12 R_1^2} + K_1 \left(1 + \frac{\beta_1 h_1}{2}\right) = 5.066\text{e}+07 \text{ Н}\cdot\text{мм/мм}$$

$$K_{\#2} = \frac{E_2 h_2^3 b_2}{12 R_2^2} + K_2 \left(1 + \frac{\beta_2 h_2}{2}\right) = 4.858\text{e}+07 \text{ Н}\cdot\text{мм/мм}$$

$$K_1 = \frac{\beta_1 a E_K S_1^3}{5.5 R_1} = 4.24\text{e}+07 \text{ Н}\cdot\text{мм/мм}$$

$$K_2 = \frac{\beta_2 a E_D S_2^3}{5.5 R_2} = 4.191\text{e}+07 \text{ Н}\cdot\text{мм/мм}$$

Коэффициент влияния давления на изгиб фланцев:

$$m_1 = \frac{1 + \beta_1 h_1}{2 \beta_1^2} = 2.956\text{e}+04 \text{ мм}^2$$

Коэффициент влияния давления на изгиб фланцев:

$$m_2 = \frac{1 + \beta_2 h_2}{2 \beta_2^2} = 2.832\text{e}+04 \text{ мм}^2$$

Приведенное отношение жесткости труб к жесткости фланцевого соединения:

$$\rho_1 = \frac{K_y a a_1}{\beta^2 K_{\#} R_1} = 1.803$$

Приведенный безразмерный радиус трубного пучка:

$$\omega = \beta a_1 = 7.345$$

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

$$\Phi_1 = 11$$

$$\Phi_2 = 7.522$$

$$\Phi_3 = 10.73$$

Коэффициент T_1 :

$$T_1 = \Phi_1 [m_{\#} + 0.5(1 + m_{\#} t)(t - 1)] = 83.48$$

Коэффициент T_2 :

$$T_2 = \Phi_2 t = 25.77$$

Инв. № подл. 19805	Подп. и дата		Инв. №	Подп. и дата																				
<p>Коэффициент влияния давления на изгиб фланцев:</p> $m_2 = \frac{1 + \beta_2 h_2}{2 \beta_2^2} = 2.832e+04 \text{ мм}^2$																								
<p>Приведенное отношение жесткости труб к жесткости фланцевого соединения:</p> $\rho_1 = \frac{K_y a a_1}{\beta^2 K_{\Phi} R_1} = 1.803$																								
<p>Приведенный безразмерный радиус трубного пучка:</p> $\omega = \beta a_1 = 7.345$																								
<p>Коэффициенты, учитывающие влияние беструбного края решетки и поддерживающее влияние труб:</p> $\Phi_1 = 11$ $\Phi_2 = 7.522$ $\Phi_3 = 10.73$																								
<p>Коэффициент T_1:</p> $T_1 = \Phi_1 [m_x + 0.5(1 + m_x t)(t - 1)] = 83.48$																								
<p>Коэффициент T_2:</p> $T_2 = \Phi_2 t = 25.77$																								
<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td rowspan="3">E-107-2376.00.00.000 PP</td><td>Лист</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>16</td></tr><tr><td>Изм.</td><td>Лист</td><td>№ док.</td><td>Подпись</td><td>Дата</td><td></td></tr></table>											E-107-2376.00.00.000 PP	Лист						16	Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	
					E-107-2376.00.00.000 PP	Лист																		
						16																		
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата																				

Коэффициент T_3 :

$$T_3 = \Phi_3 m_n = 13.26$$

где:

$$t = 1 + 1.4 \varphi (m_n - 1) = 3.426$$

Изгибающий момент, распределенный по краю трубной решетки:

$$M = \left(\frac{a_1}{\beta}\right) \frac{P_1(T_1 + \rho K_q) - P_o T_2}{(T_1 + \rho K_q)(T_3 + \rho_1) - T_2^2} = 1.373e+05 \text{ Н} \cdot \text{мм/мм}$$

Перерезывающая сила, распределенная по краю трубной решетки:

$$Q = a_1 \frac{P_o(T_3 + \rho_1) - P_1 T_2}{(T_1 + \rho K_q)(T_3 + \rho_1) - T_2^2} = -533.6 \text{ Н/мм}$$

где:

$$P_1 = \frac{K_y}{\beta K_\Phi} (m_1 P_M - m_2 P_T) = 3.725 \text{ МПа}$$

Изгибающий момент, распределенный по периметру перфорированной зоны решетки:

$$M_a = M + (a - a_1)Q = 2.521e+04 \text{ Н} \cdot \text{мм/мм}$$

Перерезывающая сила, распределенная по периметру перфорированной зоны решетки:

$$Q_a = m_n Q = -659.5 \text{ Н/мм}$$

Осевая сила, действующая на трубу:

$$N_T = \frac{\pi a_1}{i} [(\eta_M P_M - \eta_T P_T) a_1 + \Phi_1 Q_a + \Phi_2 M_a] = -2901 \text{ Н}$$

Изгибающий момент, действующий на трубу:

$$M_T = \frac{E_T J_T \beta}{K_y a_1 l_{np}} (\Phi_2 Q_a + \Phi_3 M_a) = -1.136e+04 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

где:

$$l_{np} = 466.7 \text{ мм}$$

Осевая сила, распределенная по периметру кожуха:

$$Q_K = \frac{a}{2} P_T - Q = 544.8 \text{ Н/мм}$$

Изгибающий момент, распределенный по периметру кожуха:

$$M_K = \frac{K_1}{\rho_1 K_\Phi \beta} (T_2 Q_n + T_3 M) - \frac{P_M}{2 \beta_1^2} = -1.212e+05 \text{ Н} \cdot \text{мм/мм}$$

Осевая сила, действующая на кожух:

$$F = \pi D Q_K = 3.765e+06 \text{ Н}$$

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

$$\sigma_{P1} = \frac{6|M|}{(S_{1P} - C)^2} = 147.2 \text{ МПа}$$

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

$$\tau_{P1} = \frac{|Q|}{(S_{1P} - C)} = 7.133 \text{ МПа}$$

Инв. № подл. 19805	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	$M_T = \frac{E_T J_T \beta}{K_p a_1 l_{np}} (\Phi_2 Q_a + \Phi_3 \beta M_a) =$ где: $l_{np} =$ Осевая сила, распределенная по периметру кожуха: $Q_K = \frac{a}{2} P_T - Q =$ Изгибающий момент, распределенный по периметру кожуха: $M_K = \frac{K_1}{\rho_1 K_\Phi \beta} (T_2 Q_n + T_3 \beta M) - \frac{P_M}{2 \beta_1^2} =$ Осевая сила, действующая на кожух: $F = \pi D Q_K =$ Расчётное изгибное напряжение в трубной решетке в месте соединения с кожухом: $\sigma_{P1} = \frac{6 M }{(S_{1P} - C)^2} =$ Расчётное касательное напряжение в трубной решетке в месте соединения с кожухом: $\tau_{P1} = \frac{ Q }{(S_{1P} - C)} =$	-1.136e+04 Н·мм 466.7 мм 544.8 Н/мм -1.212e+05 Н·мм/мм 3.765e+06 Н 147.2 МПа 7.133 МПа																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															

Максимальный расчётный изгибающий момент в перфорированной части трубной решетки:

$$M_{\max} = \left\{ \begin{array}{l} A \frac{|Q_a|}{\beta} \text{ при } -1.0 \leq \frac{\beta M_a}{Q_a} \leq 1.0 \\ B |M_a| \text{ при } \frac{\beta M_a}{Q_a} < -1.0 \text{ и } \frac{\beta M_a}{Q_a} > 1.0 \end{array} \right\} = 2.483 \times 10^4$$

где:

$$A \left(\omega, \frac{\beta M_a}{Q_a} \right) = 0.3107$$

Расчётное изгибное напряжение в перфорированной части трубной решетки:

$$\sigma_{P2} = \frac{6 M_{\max}}{\varphi_P (S_P - C)^2} = 82.23 \text{ МПа}$$

Расчётное касательное напряжение в перфорированной части трубной решетки:

$$\tau_{P2} = \frac{|Q_a|}{\varphi_P (S_P - C)} = 27.23 \text{ МПа}$$

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

$$\sigma_{MX} = \frac{|Q_K|}{(S_1 - C_K)} = 8.773 \text{ МПа}$$

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

$$\sigma_{UX} = \frac{6 |M_K|}{(S_1 - C_K)^2} = 188.5 \text{ МПа}$$

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

$$\sigma_{M\phi} = \frac{|P_M| a}{(S_1 - C_K)} = 130 \text{ МПа}$$

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

$$\sigma_{U\phi} = 0.3 \sigma_{UX} = 56.55 \text{ МПа}$$

Расчётные мембранные напряжения в трубах в осевом направлении:

$$\sigma_{1T} = \frac{|N_T|}{\pi (d_T - S_T) S_T} = 13.27 \text{ МПа}$$

Расчётные суммарные напряжения в трубах в осевом направлении:

$$\sigma_1 = \sigma_{1T} + \frac{d_T |M_T|}{2 J_T} = 22.84 \text{ МПа}$$

Расчётные напряжения в трубах в окружном направлении:

$$\sigma_{2T} = \frac{(d_T - S_T) \max\{|P_T|, |P_M|, |P_T - P_M|\}}{2 S_T} = 30.37 \text{ МПа}$$

Условия статической прочности решетки:

Инв. № подл. 19805	Подп. и дата					188.5 МПа
	Инв. №					
Инв. № подл.	Взам. инв.					130 МПа
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					56.55 МПа
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					13.27 МПа
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					22.84 МПа
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					30.37 МПа
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.	Взам. инв.					18
	Подп. и дата					
Инв. № подл.						

Максимальное касательное напряжение в решетке:

$$\max\{\tau_{p1}; \tau_{p2}\} = 27.23 \text{ МПа}$$

Допускаемое касательное напряжение в решетке:

$$0.8[\sigma]_p = 49.6 \text{ МПа}$$

Необходимая толщина решетки из условия прочности беструбной зоны:

$$S_p \geq 0.5 D_p \sqrt{\frac{P_p}{[\sigma]_p}} + C = 6.641 \text{ мм}$$

Условия малоциклового прочностии решетки:

Расчётная амплитуда напряжений в решетке в месте соединения с кожухом:

$$\sigma_a = K_\sigma \frac{\sigma_{p1}}{2} = 125.1 \text{ МПа}$$

Расчётная амплитуда напряжений в перфорированной зоне решетки:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{p2}}{2} = 41.12 \text{ МПа}$$

Допускаемая амплитуда напряжений для материала решетки:

$$[\sigma_a]_p = 434 \text{ МПа}$$

Проверка жесткости трубных решеток:

Условие статической прочностии кожуха:

Мембранное напряжение в кожухе в месте приварки к решетке:

$$\sigma_{MX} = 8.773 \text{ МПа}$$

Допускаемое местное мембранное напряжение в кожухе:

$$1.3[\sigma]_K = 176.8 \text{ МПа}$$

Условие малоциклового прочностии кожуха:

Расчётная амплитуда напряжений в кожухе в месте приварки к решетке:

$$\sigma_a = K_\sigma \max \left\{ \left| \sigma_{MX} + \sigma_{UX} \right|, \left| \sigma_{M\varphi} + \sigma_{U\varphi} \right|, \left| (\sigma_{MX} + \sigma_{UX}) - (\sigma_{M\varphi} + \sigma_{U\varphi}) \right| \right\} = 167.7 \text{ МПа}$$

Допускаемая амплитуда напряжений для материала кожуха:

$$[\sigma_a]_K = 482 \text{ МПа}$$

Условие устойчивостии кожуха (по ГОСТ Р 52857.2):

Условие статической прочностии труб:

Максимальное мембранное напряжение в трубах:

$$\max\{\sigma_{1T}; \sigma_{2T}\} = 30.37 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для материала труб:

$$[\sigma]_T = 126 \text{ МПа}$$

Расчётная амплитуда напряжений в трубах:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_1}{2} = 11.42 \text{ МПа}$$

Допускаемая амплитуда напряжений для материала труб:

$$[\sigma_a]_T = 538.8 \text{ МПа}$$

Проверка устойчивостии и жесткости труб:

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Е-107-2376.00.00.000 РР	Лист
19805						19
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		

Расчётное сжимающее напряжение в трубах:

$$\sigma_{\Gamma} = 13.27 \text{ МПа}$$

Допускаемое сжимающее напряжение в трубах:

$$\varphi_T [\sigma]_T = 31.17 \text{ МПа}$$

где:

Коэффициент уменьшения допускаемого напряжения при продольном изгибе:

$$0.2474$$

$$\lambda = 1.3 \sqrt{\frac{[\sigma]_T}{E_T} \frac{l_R}{(d_T - S_T)}} = 1.979$$

$$l_R = 1400 \text{ мм}$$

Прогиб трубы:

$$Y = A_Y \frac{|M_T|}{|N_T|} = 0.4596 \text{ мм}$$

где:

$$A_Y (\lambda_Y) = 0.1173$$

$$\lambda_Y = \frac{|N_T| \lambda_{\text{пр}}^2}{E_T J_T} = 0.2138$$

Проверка прочности крепления труб в решетке:

Расчётная нагрузка на соединение трубы с решеткой:

$$|N_T| = -2901 \text{ Н}$$

Допускаемая нагрузка на соединение трубы с решеткой с помощью развальцовки:

$$[N]_{\Gamma P} = 1.085 \text{e}+04 \text{ Н}$$

Напряжение сдвига в сварном шве приварки трубы к решетке:

$$\tau = \frac{|N_T| d_T + 4 |M_T|}{\pi d_T^2 \delta} = 18.11 \text{ МПа}$$

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

$$21.7 \text{ МПа}$$

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

где:

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

Условие прочности крепления труб к решетке способом развальцовки с обваркой:

$$\max \left\{ \frac{\varphi_c \min \{ [\sigma]_T; [\sigma]_P \}}{\tau} + 0.6 \frac{[N]_{\text{пр}}}{|N_T|}; \frac{[N]_{\text{пр}}}{|N_T|} \right\} = 3.739 > 1$$

Условия прочности и устойчивости элементов теплообменного аппарата выполняются

Инв. № подл. 19805	Подп. и дата		Инв. №	Взам. инв.	Подп. и дата	щью развальцовки:	$[N]_{FP} =$	1.085e+04 Н	
						Напряжение сдвига в сварном шве приварки трубы к решетке:	$\tau = \frac{ N_T d_T + 4 M_T }{\pi d_T^2 \delta} =$	18.11 МПа	
Допускаемое напряжение сдвига в сварном шве приварки трубы к решетке в случае крепления труб к решетке способом приварки или приварки с подвальцовкой:							$[\tau] = \varphi_C \min \{ [\sigma]_F; [\sigma]_P \} =$	21.7 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:							$\max \left\{ \frac{\varphi_C \min \{ [\sigma]_T; [\sigma]_P \}}{\tau} + 0,6 \frac{[N]_{TP}}{ N_T }; \frac{[N]_{TP}}{ N_T } \right\} =$	3.739 > 1	
Условия прочности и устойчивости элементов теплообменного аппарата выполняются									
Инв. № подл. 19805						Е-107-2376.00.00.000 РР			Лист
									20
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата					

1.5. Корпус

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	09Г2С, Лист		
Расчётная температура	T	289	°C
Расчётное давление в сосуде	P	7.34	МПа
Расчётный изгибающий момент	M	7.889e+07	Н·мм
Расчётное поперечное усилие	Q	1.781e+05	Н
Внутренний диаметр обечайки	D	2200	мм
Фактическая длина обечайки	Lact	4200	мм
Расчётная длина обечайки	L	5212	мм
Толщина стенки обечайки	S	66	мм
Прибавка на коррозию	c ₁	1.6	мм
Прибавка – минусовый допуск	c ₂	1.3	мм
Прибавка технологическая	c ₃	1	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки	c	3.9	мм
Коэффициент прочности продольного сварного шва	φ _p	1	
Допускаемое напряжение	[σ]	136	МПа
Модуль продольной упругости	E	1.72e+05	МПа

Результаты расчёта

Расчётная толщина стенки обечайки от действия давления

$$S_p = \frac{pD}{2[\sigma]\phi_p - p} = 61.01 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки обечайки от действия давления с учетом прибавки

$$S \geq S_p + C = 64.91 \text{ мм}$$

Допускаемое внутреннее давление

$$[p] = \frac{2[\sigma]\phi_p(S - C)}{D + (S - C)} = 7.467 \text{ МПа}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости в пределах упругости

$$[F]_{E1} = \frac{31 \cdot 10^{-5} E}{n_y} D^2 \left[\frac{100(S - C)}{D} \right]^{2.5} = 1.439e+09 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое усилие из условия устойчивости в пределах упругости

$$1.439e+09 \text{ Н}$$

Инв. № подл.	19805	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	
E-107-2376.00.00.000 PP					Лист
					21

1.6. Укрепление отверстий В2 Ду 100

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

Внутреннее 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 по ГОСТ Р -52857.3-2007

Внешние нагрузки определялись без учета стесненности температурных деформаций

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

Режим:Рабочий

Исходные данные

Материал корпуса

09Г2С, Лист

Материал штуцера

09Г2С КП 245, Поковка

Расчётная температура днища

T 289 °С

Расчётное давление

P 7.34 МПа

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

D 2200 мм

Исполнительная толщина стенки обечайки, конического перехода или днища

s 66 мм

Коэффициент прочности сварных соединений обечаек и днищ

φ 1

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

$[\sigma]$ 136 МПа

Внутренний диаметр штуцера

d 92 мм

Исполнительная толщина стенки штуцера

s_1 34 мм

Исполнительная длина штуцера (для заведомо длинных штуцеров $l_1=0$)

l_1 235 мм

Допускаемое напряжение для материала штуцера

$[\sigma]_1$ 119 МПа

Коэффициент прочности продольного сварного шва штуцера

φ_1 1

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

L_k 348 мм

Вылет штуцера

L_f 235 мм

Осевая нагрузка на штуцер

F_z 4500 Н

Изгибающий момент вокруг оси X действующий на штуцер

M_x 1.73e+06 Н*мм

Изгибающий момент вокруг оси Y действующий на штуцер

M_y 2.3e+06 Н*мм

Перерезывающая сила вдоль оси X действующая на штуцер

F_x 6770 Н

Инв. № подл. 19805	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	<div>Е-107-2376.00.00.000 РР</div>					Лист
										23
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата						

Перерезывающая сила вдоль оси Y действующая на штуцер	F_y	6770	Н
Модуль продольной упругости материала штуцера	E_1	1.72e+05	МПа
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии стенки корпуса	c_1	1.6	мм
Прибавка для компенсации минусового допуска стенки корпуса	c_2	1.3	мм
Прибавка технологическая стенки корпуса	c_3	1	мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии стенки штуцера	c_{s1}	1.6	мм
Прибавка для компенсации минусового допуска стенки штуцера	c_{s2}	0	мм
Прибавка технологическая стенки штуцера	c_{s3}	1	мм

Результаты расчёта

Расчётный внутренний диаметр цилиндрической обечайки

$$D_p = D = 2200 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки корпуса

$$s_p = \frac{pD}{2[\sigma]\varphi - p} = 61.01 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия

$$d_p = d + 2c_s = 97.2 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки штуцера

$$s_{1p} = \frac{p(d + 2c_s)}{2[\sigma]_1\varphi_1 - p} = 3.093 \text{ мм}$$

Расчётная длина штуцера

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25\sqrt{(d + 2c_s)(s_1 - c_s)} \right\} = 69.06 \text{ мм}$$

Отношение допускаемых напряжений штуцера и корпуса

$$\chi_1 = \min \left\{ 1, 0, \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = 0.875$$

Ширина зоны укрепления, прилегающей к штуцеру

$$L_o = \sqrt{D_p(s - c)} = 369.6 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления, прилегающей к штуцеру

$$l_p = 348 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр неукрепляемого отверстия

$$d_{op} = 0,4\sqrt{D_p(s - c)} = 147.8 \text{ мм}$$

Коэффициент понижения прочности узла врезки штуцера

$$V = \min \left\{ 1, \frac{1 + \frac{l_{1p}(s_1 - c_s)\chi_1 + l_{2p}s_2\chi_2 + l_{3p}(s_3 - c_s - c_{s1})\chi_3}{l_p(s - c)}}{1 + 0,5\frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1\frac{d + 2c_s}{D_p}\frac{\varphi l_{1p}}{\varphi_1 l_p}} \right\} = 1$$

Инв. № подл.	Подл. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подл. и дата
19805				
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата
Е-107-2376.00.00.000 РР				Лист
				24

ГОСТ Р 52857.2-2007

3.332e+07 Н*мм

$$[M]_{\text{уч}} =$$

Расчётный изгибающий момент вокруг оси Х в точке пересечения образующей корпуса с осью штуцера

$$M_{X_{\text{расч}}} =$$

1.73e+06 Н*мм

Расчётный изгибающий момент вокруг оси Y в точке пересечения образующей корпуса с осью штуцера

$$M_{Y_{\text{расч}}} =$$

2.3e+06 Н*мм

Эквивалентная толщина обечайки

$$s_3 = (s - c) =$$

66 мм

Коэффициент С1 по п. 6.1.2.2.

$$C_1 =$$

1.81

Коэффициент С2 по п. 6.1.2.3.

$$C_2 =$$

4.9

Коэффициент С3 по п. 6.1.2.5.

$$C_3 =$$

5.576

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
19805				
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата
Е-107-2376.00.00.000 РР				Лист
				26

1.7. Укрепление отверстий А2 Ду 80

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

Внутреннее 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 по ГОСТ Р -52857.3-2007

Внешние нагрузки определялись без учета стесненности температурных деформаций

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

Режим:Рабочий

Исходные данные

Материал корпуса 09Г2С, Лист
Материал штуцера 09Г2С КП 245, Поковка

Расчётная температура днища	T	289	°С
Расчётное давление	P	7.34	МПа
Внутренний диаметр обечайки, днища или конического перехода, в месте расположения отверстия	D	2200	мм
Исполнительная толщина стенки обечайки, конического перехода или днища	δ	66	мм
Коэффициент прочности сварных соединений обечаек и днищ	φ	1	
Допускаемое напряжение для материала обечайки, перехода или днища при расчётной температуре	$[\sigma]$	136	МПа
Внутренний диаметр штуцера	d	75	мм
Исполнительная толщина стенки штуцера	δ_1	32	мм
Исполнительная длина штуцера (для заведомо длинных штуцеров $l_1=0$)	l_1	240	мм
Допускаемое напряжение для материала штуцера	$[\sigma]_1$	119	МПа
Коэффициент прочности продольного сварного шва штуцера	φ_1	1	
Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (или $L_k=0$)	L_k	290	мм
Вылет штуцера	L_f	240	мм
Осевая нагрузка на штуцер	F_z	2760	Н
Изгибающий момент вокруг оси X действующий на штуцер	M_x	1.01e+06	Н*мм
Изгибающий момент вокруг оси Y действующий на штуцер	M_y	1.35e+06	Н*мм
Перерезывающая сила вдоль оси X действующая на штуцер	F_x	4220	Н
Перерезывающая сила вдоль оси Y действующая на штуцер	F_y	4220	Н
Модуль продольной упругости материала штуцера	E_1	1.72e+05	МПа

Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	Е-107-2376.00.00.000 РР	Лист
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		27
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата
19805				

Расчётный внутренний диаметр цилиндрической обечайки

$$D_p = D = 2200 \text{ mm}$$

61.01 MM

$$S_F = \frac{pD}{2[\sigma]\varphi_D - p} =$$

80.2 MM

$$d_D = d + 2c_s =$$

2.552 MM

$$s_{lp} = \frac{p(d + 2c_s)}{2[\sigma_1 \varphi - p]} =$$

60.7 MM

$$l_{lp} = \min \left\{ l_1; 1, 25 \sqrt{(d + 2c_s)(s_1 - c_s)} \right\} =$$

0.875

$$\chi_1 = \min \left\{ 1, 0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} =$$

369.6 MM

$$L_0 = \sqrt{D_p (s - c)} =$$

290 MM

$$J_D =$$

147.8 MM

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

1

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

7.467 МПа

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

где

$$K_1 =$$

1

Допускаемое осевое усилие

$$[F_z] = [\sigma](s-c)^2 \max[C_1; 1,81] =$$

9.493e+05 Н

Допускаемый изгибающий момент вдоль оси X

$$[M_x] = [\sigma](s-c)^2 \frac{d_c}{4} \max[C_2; 4,9] =$$

6.875e+07 Н*мм

Допускаемый изгибающий момент вдоль оси Y

$$[M_y] = [\sigma](s-c)^2 \frac{d_c}{4} \max[C_3; 4,9] =$$

7.853e+07 Н*мм

Условие прочности по давлению

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| \leq 1 =$$

0.983

Условие прочности по осевой нагрузке

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{[F_z]} \right| \leq 1 =$$

0.002907

Условие прочности по изгибающему моменту

$$\Phi_\delta = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]} \right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]} \right)^2} \leq 1$$

0.02261

Условие прочности при совместном действии нагрузок

$$\sqrt{\left[\max \left(\left| \frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z \right|, \left| \Phi_z \right|, \left| \frac{\Phi_p}{C_4} - 0,2\Phi_z \right| \right) \right]^2 + \Phi_\delta^2} \leq 1$$

0.9862

Максимальное продольное растягивающее напряжение в штуцере

$$\frac{p(d+s_1)}{4(s_1-c_s)} + \frac{4\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi(d+s_1)^2(s_1-c_s)} + \frac{F_z}{\pi(d+s_1)(s_1-c_s)} \leq [\sigma] =$$

13.34 МПа

Условие устойчивости штуцера

$$\frac{p}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} \leq 1 =$$

0.07836

Коэффициент по п. 6.1.1.а

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_s}} =$$

0.2767

Допускаемая сжимающая продольная сила из условия устойчивости по ГОСТ Р 52857.2-2007

$$[F]_{уст} =$$

1.147e+06 Н

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости по ГОСТ Р 52857.2-2007

2.152e+07 Н*мм

Инв. № подл.	19805	Подп. и дата	Подп. и дата	Инв. №	Взам. инв.
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	
Е-107-2376.00.00.000 РР					Лист
					29

$$[M]_{уст} =$$

Расчётный изгибающий момент вокруг оси X в точке пересечения образующей корпуса с осью штуцера

$$M_{x_{расч}} = 1.01e+06 \text{ Н*мм}$$

Расчётный изгибающий момент вокруг оси Y в точке пересечения образующей корпуса с осью штуцера

$$M_{y_{расч}} = 1.35e+06 \text{ Н*мм}$$

Эквивалентная толщина обечайки

$$s_s = (s - c) = 66 \text{ мм}$$

Коэффициент C1 по п. 6.1.2.2.

$$C_1 = 1.81$$

Коэффициент C2 по п. 6.1.2.3.

$$C_2 = 4.9$$

Коэффициент C3 по п. 6.1.2.5.

$$C_3 = 5.597$$

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					
19805									
									Лист
									30
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата					

E-107-2376.00.00.000 PP

1.8. Укрепление отверстий U1, U2

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

Внутреннее 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 по ГОСТ Р -52857.3-2007

Внешние нагрузки определялись без учета стесненности температурных деформаций

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

Режим:Рабочий

Исходные данные

Материал корпуса 09Г2С, Лист
Материал штуцера 09Г2С КП 245, Поковка

Расчётная температура днища	T	289	°С
Расчётное давление	P	7.34	МПа
Внутренний диаметр обечайки, днища или конического перехода, в месте расположения отверстия	D	2200	мм
Исполнительная толщина стенки обечайки, конического перехода или днища	δ	66	мм
Коэффициент прочности сварных соединений обечаек и днищ	φ	1	
Допускаемое напряжение для материала обечайки, перехода или днища при расчётной температуре	$[\sigma]$	136	МПа
Внутренний диаметр штуцера	d	47	мм
Исполнительная толщина усиленной части штуцера	δ_1	35	мм
Исполнительная длина усиленной части штуцера	l_1	100	мм
Исполнительная толщина стенки штуцера	$\delta_{шт}$	10	мм
Исполнительная длина штуцера	$l_{шт}$	150	мм
Допускаемое напряжение для материала штуцера	$[\sigma]_1$	119	МПа
Коэффициент прочности продольного сварного шва штуцера	φ_1	1	
Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (или $L_k=0$)	L_k	0	мм
Вылет штуцера	L_f	450	мм
Осевая нагрузка на штуцер	F_x	1380	Н
Изгибающий момент вокруг оси X действующий на штуцер	M_x	3.15e+05	Н*мм
Изгибающий момент вокруг оси Y действующий на штуцер	M_y	4.2e+05	Н*мм
Перерезывающая сила вдоль оси X действующая на штуцер	F_x	2080	Н

Инв. № подл. 19805	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Внутренний диаметр обечайки, днища или конического пе- рехода, в месте расположения отверстия	D	2200	мм	
					Исполнительная толщина стенки обечайки, конического пе- рехода или днища	s	66	мм	
					Коэффициент прочности сварных соединений обечаек и днищ	φ	1		
					Допускаемое напряжение для материала обечайки, перехода или днища при расчётной температуре	$[\sigma]$	136	МПа	
					Внутренний диаметр штуцера	d	47	мм	
					Исполнительная толщина усиленной части штуцера	s_1	35	мм	
					Исполнительная длина усиленной части штуцера	l_1	100	мм	
					Исполнительная толщина стенки штуцера	$s_{шт}$	10	мм	
					Исполнительная длина штуцера	$l_{шт}$	150	мм	
					Допускаемое напряжение для материала штуцера	$[\sigma]_1$	119	МПа	
					Коэффициент прочности продольного сварного шва штуцера	φ_1	1		
					Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайше- го несущего конструктивного элемента (или $L_k=0$)	L_k	0	мм	
					Вылет штуцера	L_f	450	мм	
					Осевая нагрузка на штуцер	F_z	1380	Н	
Инв. № подл. 19805	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Изгибающий момент вокруг оси Х действующий на штуцер	M_x	3.15e+05	Н*мм	
					Изгибающий момент вокруг оси Y действующий на штуцер	M_y	4.2e+05	Н*мм	
					Перерезывающая сила вдоль оси Х действующая на штуцер	F_x	2080	Н	
					Е-107-2376.00.00.000 PP				Лист
									31
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата					

Перерезывающая сила вдоль оси Y действующая на штуцер	F_y	2080	Н
Модуль продольной упругости материала штуцера	E_1	1.72e+05	МПа
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии стенки корпуса	c_1	1.6	мм
Прибавка для компенсации минусового допуска стенки корпуса	c_2	1.3	мм
Прибавка технологическая стенки корпуса	c_3	1	мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии стенки штуцера	c_{s1}	1.6	мм
Прибавка для компенсации минусового допуска стенки штуцера	c_{s2}	0	мм
Прибавка технологическая стенки штуцера	c_{s3}	1	мм

Результаты расчёта

Расчётный внутренний диаметр цилиндрической обечайки

$$D_p = D = 2200 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки корпуса

$$s_p = \frac{pD}{2[\sigma]\varphi - p} = 61.01 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия

$$d_p = d + 2c_s = 52.2 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки штуцера

$$s_{1p} = \frac{p(d + 2c_s)}{2[\sigma]_1\varphi_1 - p} = 1.661 \text{ мм}$$

Расчётная длина штуцера

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25\sqrt{(d + 2c_s)(s_1 - c_s)} \right\} = 51.41 \text{ мм}$$

Отношение допускаемых напряжений штуцера и корпуса

$$\chi_1 = \min \left\{ 1, 0, \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = 0.875$$

Ширина зоны укрепления, прилегающей к штуцеру

$$L_o = \sqrt{D_p(s - c)} = 369.6 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления, прилегающей к штуцеру

$$l_p = 369.6 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр неукрепленного отверстия

$$d_{op} = 0,4\sqrt{D_p(s - c)} = 147.8 \text{ мм}$$

Коэффициент понижения прочности узла врезки штуцера

$$V = \min \left\{ 1, \frac{1 + \frac{l_{1p}(s_1 - c_s)}{l_p(s - c)}\chi_1 + l_{2p}s_2\chi_2 + l_{3p}(s_3 - c_s - c_{s1})\chi_3}{1 + 0,5\frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1\frac{d + 2c_s}{D_p}\frac{\varphi l_{1p}}{\varphi_1 l_p}} \right\} = 1$$

Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	Е-107-2376.00.00.000 PP	Лист
Инд. № подл.	19805					32
Подп. и дата						
Взам. инв.						
Инд. №						
Подп. и дата						

Допускаемое давление для узла врезки штуцера

$$[p] = \frac{2K_1(s-c)\varphi[\sigma]}{D_p + (s-c)V} = 7.467 \text{ МПа}$$

где

$$K_1 = 1$$

Допускаемое осевое усилие

$$[F_z] = [\sigma](s-c)^2 \max[C_1; 1,81] = 9.493\text{e}+05 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент вдоль оси X

$$[M_x] = [\sigma](s-c)^2 \frac{d_c}{4} \max[C_2; 4,9] = 5.268\text{e}+07 \text{ Н*мм}$$

Допускаемый изгибающий момент вдоль оси Y

$$[M_y] = [\sigma](s-c)^2 \frac{d_c}{4} \max[C_3; 4,9] = 6.168\text{e}+07 \text{ Н*мм}$$

Условие прочности по давлению

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| \leq 1 = 0.983$$

Условие прочности по осевой нагрузке

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{[F_z]} \right| \leq 1 = 0.001454$$

Условие прочности по изгибающему моменту

$$\Phi_\delta = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]} \right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]} \right)^2} \leq 1 = 0.009062$$

Условие прочности при совместном действии нагрузок

$$\sqrt{\left[\max \left(\left| \frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z \right|, \left| \Phi_z \right|, \left| \frac{\Phi_p}{C_4} - 0,2\Phi_z \right| \right) \right]^2 + \Phi_\delta^2} \leq 1 = 0.9845$$

Максимальное продольное растягивающее напряжение в штуцере

$$\frac{p(d+s_1)}{4(s_1-c_s)} + \frac{4\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi(d+s_1)^2(s_1-c_s)} + \frac{F_z}{\pi(d+s_1)(s_1-c_s)} \leq [\sigma] = 7.878 \text{ МПа}$$

Условие устойчивости штуцера

$$\frac{p}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} \leq 1 = 0.04646$$

Коэффициент по п. 6.1.1.а

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} = 0.212$$

Допускаемая сжимающая продольная сила из условия устойчивости по ГОСТ Р 52857.2-2007

$$[F]_{уст} = 9.618\text{e}+05 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости по

Инв. № подл.	19805	Подп. и дата	Подп. и дата	Инв. №	Подп. и дата
Взам. инв.		Инв. №	Подп. и дата	Инв. №	Подп. и дата
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	
Е-107-2376.00.00.000 РР					Лист
					33

ГОСТ Р 52857.2-2007

1.13e+07 Н*мм

$$[M]_{\text{уч}} =$$

Расчётный изгибающий момент вокруг оси X в точке пересечения образующей корпуса с осью штуцера

$$M_{X_{\text{расч}}} =$$

3.15e+05 Н*мм

Расчётный изгибающий момент вокруг оси Y в точке пересечения образующей корпуса с осью штуцера

$$M_{Y_{\text{расч}}} =$$

4.2e+05 Н*мм

Эквивалентная толщина обечайки

$$s_3 = (s - c) =$$

66 мм

Коэффициент C1 по п. 6.1.2.2.

$$C_1 =$$

1.81

Коэффициент C2 по п. 6.1.2.3.

$$C_2 =$$

4.9

Коэффициент C3 по п. 6.1.2.5.

$$C_3 =$$

5.737

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
19805				
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата
E-107-2376.00.00.000 PP				Лист
				34

1.9. Труба 57×6

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

Сталь20, Тру-
ба

Расчётная температура	T	289	°C
Расчётное давление в сосуде	P	7.34	МПа
Внутренний диаметр обечайки	D	45	мм
Фактическая длина обечайки	Lact	500	мм
Толщина стенки обечайки	S	6	мм
Прибавка на коррозию	c ₁	1.6	мм
Прибавка – минусовый допуск	c ₂	0.9	мм
Прибавка технологическая	c ₃	0	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки	c	2.5	мм
Коэффициент прочности продольного сварного шва	φ _p	1	
Допускаемое напряжение	[σ]	121.5	МПа

Результаты расчёта

Расчётная толщина стенки обечайки от действия давления

$$S_p = \frac{pD}{2[\sigma]\phi_p - p} = 1.402 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки обечайки от действия давления с учетом прибав-
ки

$$S \geq S_p + C = 3.902 \text{ мм}$$

Допускаемое внутреннее давление

$$[p] = \frac{2[\sigma]\phi_p(S - C)}{D + (S - C)} = 17.54 \text{ МПа}$$

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

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	<div>Е-107-2376.00.00.000 РР</div>					Лист
19805										35
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата						

Исполнительная толщина стенки обечайки, конического перехода или днища	s	66	мм
Коэффициент прочности сварных соединений обечаек и днищ	φ	1	
Допускаемое напряжение для материала обечайки, перехода или днища при расчётной температуре	$[\sigma]$	136	МПа
Внутренний диаметр штуцера	d	46	мм
Исполнительная толщина стенки штуцера	s_1	34	мм
Исполнительная длина штуцера (для заведомо длинных штуцеров $l_1=0$)	l_1	0	мм
Допускаемое напряжение для материала штуцера	$[\sigma]_1$	119	МПа
Коэффициент прочности продольного сварного шва штуцера	φ_1	1	
Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (или $L_k=0$)	L_k	0	мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии стенки корпуса	c_1	1.6	мм
Прибавка для компенсации минусового допуска стенки корпуса	c_2	1.3	мм
Прибавка технологическая стенки корпуса	c_3	1	мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии стенки штуцера	c_{s1}	1.6	мм
Прибавка для компенсации минусового допуска стенки шту-	c_{s2}	0	мм

Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата
------	------	--------	---------	------

E-107-2376.00.00.000 PP

Лист
36

цера

Прибавка технологическая стенки штуцера

c_{s3} 1

мм

Результаты расчёта

Расчётный внутренний диаметр цилиндрической обечайки

$$D_p = D = 2200 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки корпуса

$$s_p = \frac{pD}{2[\sigma]\varphi_p - p} = 61.01 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия

$$d_p = d + 2c_s = 51.2 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки штуцера

$$s_{1p} = \frac{p(d + 2c_s)}{2[\sigma]_1\varphi_1 - p} = 1.629 \text{ мм}$$

Расчётная длина штуцера

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25\sqrt{(d + 2c_s)(s_1 - c_s)} \right\} = 50.12 \text{ мм}$$

Отношение допускаемых напряжений штуцера и корпуса

$$\chi_1 = \min \left\{ 1, 0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = 0.875$$

Ширина зоны укрепления, прилегающей к штуцеру

$$L_0 = \sqrt{D_p(s - c)} = 369.6 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления, прилегающей к штуцеру

$$l_p = 369.6 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр неукрепленного отверстия

$$d_{op} = 0,4\sqrt{D_p(s - c)} = 147.8 \text{ мм}$$

Коэффициент понижения прочности узла врезки штуцера

$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p}(s_1 - c_s)}{l_p} \chi_1 + l_{2p}s_2 \chi_2 + l_{3p}(s_3 - c_s - c_{s1}) \chi_3}{l_p(s - c)} \right\} = 1$$

$$1 + 0,5 \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1 \frac{d + 2c_s}{D_p} \frac{\varphi l_{1p}}{\varphi_1 l_p}$$

Допускаемое давление для узла врезки штуцера

$$[p] = \frac{2K_1(s - c)\varphi[\sigma]}{D_p + (s - c)V} V = 7.467 \text{ МПа}$$

где

$$K_1 = 1$$

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

Инв. № подл. 19805	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	<div>Е-107-2376.00.00.000 РР</div>					Лист
										37
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата						

1.11. 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

09Г2С, Лист

Расчётная температура	T	289	°C
Расчётное давление	P	7.34	МПа
Опорное усилие, действующее на опору	F	2.711e+05	H
Максимальный момент над опорой	M	6.445e+07	H*мм
Расчётное поперечное усилие	Q	1.674e+05	H
Внутренний диаметр обечайки	D	2200	мм
Исполнительная толщина стенки обечайки	s	66	мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии	c1	1.6	мм
Прибавка для компенсации минусового допуска	c2	1.3	мм
Прибавка технологическая	c3	1	мм
Сумма прибавок к толщине стенки обечайки	c	3.9	мм
Расстояние от края родительского элемента до седловой опоры	L_p	635	мм
Длина цилиндрической выступающей части, включая отбортовку	a	2618	мм
Коэффициент прочности сварных швов, расположенных в области опорного узла	φ	1	
Угол охвата седловой опоры, градусов	δ ₁	120	
Ширина седловой опоры	b	300	мм
Допускаемое напряжение для материала обечайки	[σ]	136	МПа
Допускаемое осевое усилие из условий устойчивости по ГОСТ Р 52857.2-2007	[F]	5.997e+07	H
Допускаемый изгибающий момент из условий устойчивости по ГОСТ Р 52857.2-2007	[M]	3.299e+10	H·мм
Допускаемая перерезывающая сила по ГОСТ Р 52857.2-2007	[Q]	1.449e+07	H

Результаты расчёта

Проверка несущей способности обечайки без подкладного листа в области опорного узла

Параметр, определяемый шириной пояса опоры: 0.7386

Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	E-107-2376.00.00.000 PP	Лист
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		38
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		

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

Общее осевое мембранное напряжение, действующее в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{mx} = \frac{4M_i}{\pi D^2 (s-c)} = 0.273 \text{ МПа}$$

Коэффициенты, учитывающие влияние ширины пояса опоры:

$$K_{10} = 0.4355$$

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:

$$\beta_1 = -\frac{0.23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0.1864$$

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями

$$\beta_{2,1} = \frac{-\bar{\sigma}_{mx}}{K_2[\sigma]} = -0.001606$$

$$\beta_{2,2} = \left(\frac{pD}{4(s-c)} - \bar{\sigma}_{mx} \right) \frac{1}{K_2[\sigma]} = 0.3808$$

Коэффициент K_1 (принимается меньшее значение из двух):

$$K_1(\beta_1; \beta_{2,1}) = 1.397$$

$$K_1(\beta_1; \beta_{2,2}) = 1.484$$

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_i = K_1 K_2 [\sigma] = 237.5 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0.7[\sigma]_i \sqrt{D(s-c)}(s-c)}{K_{10} K_{12}} = 8.926e+06 \text{ Н}$$

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

$$\beta_1 = -\frac{0.53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0.5\delta_1)} = -1.37$$

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мем-

Инв. № подл.	19805	Подп. и дата	Подп. и дата
Взам. инв.		Инв. №	
Изм.	Лист	№ док.	Подпись
Дата			
Е-107-2376.00.00.000 РР			
Лист			
39			

бранными напряжениями

0

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

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

0.7648

Коэффициент K_1 (принимается меньшее значение из двух):

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

0.5735

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

0.9855

Предельное напряжение изгиба:

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

97.5 МПа

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

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

5.151e+06 Н

Проверка прочности обечайки в области опорного узла:

Допускаемое усилие на опору:

$$[F]_i = \min \{ [F]_2; [F]_3 \} =$$

5.151e+06 Н

Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в осевом направлении:

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

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

-0.1864

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями

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

-0.001606

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

0.3808

Коэффициент K_1 (принимается меньшее значение из двух):

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

1.397

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

1.484

Предельное напряжение изгиба:

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

237.5 МПа

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

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

8.926e+06 Н

Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в окружном направлении:

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

-1.37

Инв. № подл. 19805	Подп. и дата		Инв. №	Подп. и дата		
Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями						
$\mathfrak{A}_{2,1} = \frac{-\overline{\sigma_{mx}}}{K_2[\sigma]} =$			-0.001606			
$\mathfrak{A}_{2,2} = \left(\frac{pD}{4(s_{\varphi} - c)} - \overline{\sigma_{mx}} \right) \frac{1}{K_2[\sigma]} =$			0.3808			
Коэффициент K_1 (принимается меньшее значение из двух):						
$K_1(\mathfrak{A}_1; \mathfrak{A}_{2,1}) =$			1.397			
$K_1(\mathfrak{A}_1; \mathfrak{A}_{2,2}) =$			1.484			
Предельное напряжение изгиба:						
$[\sigma]_i = K_1 K_2 [\sigma] =$			237.5 МПа			
Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:						
$[F]_2 = \frac{0.7[\sigma]_2 \sqrt{D(s_{\varphi} - c)(s_{\varphi} - c)}}{K_{10} K_{12}} =$			8.926e+06 Н			
Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в окружном направлении:						
Коэффициент, представляющий отношение местных мембранных напряжений к местным напряжениям изгиба:						
			-1.37			
Инв. № подл. 19805						Лист 40
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	Е-107-2376.00.00.000 РР	

Лист

40

1.12. 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

09Г2С, Лист

Расчётная температура	T	289	°C
Расчётное давление	P	7.34	МПа
Опорное усилие, действующее на опору	F	2.97e+05	H
Максимальный момент над опорой	M	7.889e+07	H*мм
Расчётное поперечное усилие	Q	1.781e+05	H
Внутренний диаметр обечайки	D	2200	мм
Исполнительная толщина стенки обечайки	s	66	мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии	c1	1.6	мм
Прибавка для компенсации минусового допуска	c2	1.3	мм
Прибавка технологическая	c3	1	мм
Сумма прибавок к толщине стенки обечайки	c	3.9	мм
Расстояние от края родительского элемента до седловой опоры	L_p	3435	мм
Длина цилиндрической выступающей части, включая отбортовку	a	2748	мм
Коэффициент прочности сварных швов, расположенных в области опорного узла	φ	1	
Угол охвата седловой опоры, градусов	δ ₁	120	
Ширина седловой опоры	b	300	мм
Допускаемое напряжение для материала обечайки	[σ]	136	МПа
Допускаемое осевое усилие из условий устойчивости по ГОСТ Р 52857.2-2007	[F]	5.997e+07	H
Допускаемый изгибающий момент из условий устойчивости по ГОСТ Р 52857.2-2007	[M]	3.299e+10	H·мм
Допускаемая перерезывающая сила по ГОСТ Р 52857.2-2007	[Q]	1.449e+07	H

Результаты расчёта

Проверка несущей способности обечайки без подкладного листа в области опорного узла

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

0.7386

Подп. и дата	Инов. №	Взам. инв.	Подп. и дата	Инов. № подл.						Лист
				19805						42
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	E-107-2376.00.00.000 PP					

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

Общее осевое мембранное напряжение, действующее в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{mx} = \frac{4M_i}{\pi D^2 (s-c)} = 0.3342 \text{ МПа}$$

Коэффициенты, учитывающие влияние ширины пояса опоры:

$$K_{10} = 0.4355$$

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:

$$\beta_1 = - \frac{0.23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0.1864$$

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями

$$\beta_{2,1} = \frac{-\bar{\sigma}_{mx}}{K_2[\sigma]} = -0.001966$$

$$\beta_{2,2} = \left(\frac{pD}{4(s-c)} - \bar{\sigma}_{mx} \right) \frac{1}{K_2[\sigma]} = 0.3804$$

Коэффициент K_1 (принимается меньшее значение из двух):

$$K_1(\beta_1; \beta_{2,1}) = 1.397$$

$$K_1(\beta_1; \beta_{2,2}) = 1.484$$

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_i = K_1 K_2 [\sigma] = 237.5 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0.7[\sigma]_i \sqrt{D(s-c)}(s-c)}{K_{10} K_{12}} = 8.925e+06 \text{ Н}$$

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

$$\beta_1 = - \frac{0.53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0.5\delta_1)} = -1.366$$

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мем-

Инв. № подл.	19805	Подп. и дата	Подп. и дата
Взам. инв.		Инв. №	
Изм.	Лист	№ док.	Подпись
Дата			
Е-107-2376.00.00.000 PP			
Лист			
43			

бранными напряжениями

0

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

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

0.7648

Коэффициент K_1 (принимается меньшее значение из двух):

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

0.5749

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

0.9878

Предельное напряжение изгиба:

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

97.74 МПа

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

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

5.147e+06 Н

Проверка прочности обечайки в области опорного узла:

Допускаемое усилие на опору:

$$[F]_i = \min \{ [F]_2; [F]_3 \} =$$

5.147e+06 Н

Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в осевом направлении:

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

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

-0.1864

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями

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

-0.001966

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

0.3804

Коэффициент K_1 (принимается меньшее значение из двух):

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

1.397

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

1.484

Предельное напряжение изгиба:

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

237.5 МПа

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

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

8.925e+06 Н

Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в окружном направлении:

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

-1.366

Инв. № подл. 19805	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	<p>Е-107-2376.00.00.000 PP</p>					Лист
										44
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата						

1.13. Цилиндрический переход выпускной камеры Двн=2188

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	08X18H10T, Лист		
Расчётная температура	T	450	°C
Расчётное давление в сосуде	P	0.0204	МПа
Расчётный изгибающий момент	M	2.389e+07	Н·мм
Расчётное поперечное усилие	Q	2.484e+04	Н
Внутренний диаметр обечайки	D	2188	мм
Фактическая длина обечайки	Lact	112	мм
Расчётная длина обечайки	L	5212	мм
Толщина стенки обечайки	S	12	мм
Прибавка на коррозию	c ₁	0	мм
Прибавка – минусовый допуск	c ₂	0.8	мм
Прибавка технологическая	c ₃	0	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки	c	0.8	мм
Коэффициент прочности продольного сварного шва	φ _p	1	
Допускаемое напряжение	[σ]	99	МПа
Модуль продольной упругости	E	1.74e+05	МПа

Результаты расчёта

Расчётная толщина стенки обечайки от действия давления	$S_p = \frac{pD}{2[\sigma]\phi_p - p} =$	0.2255 мм
Расчётная толщина стенки обечайки от действия давления с учетом прибавки	$S \geq S_p + C =$	1.025 мм
Допускаемое внутреннее давление	$[p] = \frac{2[\sigma]\phi_p(S - C)}{D + (S - C)} =$	1.008 МПа
Допускаемый изгибающий момент из условий устойчивости в пределах упругости	$[M]_E = \frac{89 \cdot 10^{-6} E}{n_y} D^3 \left[\frac{100(S - C)}{D} \right]^{2.5} =$	1.261e+10 Н·мм
Допускаемый изгибающий момент из условия прочности		4.19e+09

Подп. и дата	Инв. №	Взам. инв.	Подп. и дата	Инв. № подл.						Лист
				19805						
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	E-107-2376.00.00.000 PP					46

$$[M]_{\text{н}} = \frac{\pi D(D + S - C)(S - C)[\sigma]}{4} = \text{Н} \cdot \text{мм}$$

Допускаемый изгибающий момент

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

3.977e+09

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости в пределах упругости

$$[Q]_{\text{Е}} = \frac{2.4E(S - C)^2}{n_y} \left[0.18 + 3.3 \frac{D(S - C)}{L^2} \right] = \text{Н}$$

3.929e+06

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности

$$[Q]_{\text{н}} = \frac{\pi D(S - C)[\sigma]}{4} = \text{Н}$$

1.905e+06

Допускаемое перерезывающее усилие

$$[Q] = \frac{[Q]_{\text{н}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\text{н}}}{[Q]_{\text{Е}}}\right)^2}} = \text{Н}$$

1.714e+06

Условие устойчивости (п.5.3.7 ГОСТ Р 52857.2-2007)

$$\frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0.006218 < 1$$

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

ми ГОСТ Р 52857.2-2007					
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	
19805					
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	
Е-107-2376.00.00.000 РР					Лист
					47

1.14. Коническая обечайка выпускной 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: Неотбортованный конический переход, работающий под действием внутреннего давления Кососимметричный конический переход
Режим: Рабочий

Исходные данные

Материал конической обечайки или днища 08X18H10T, Лист
Материал большего цилиндрического перехода 08X18H10T, Лист
Материал меньшего цилиндрического перехода 08X18H10T, Лист

Расчётная температура	T	450	°C
Расчётное давление	P	0.0204	МПа
Расчётная осевая сила	F	0	H
Расчётный изгибающий момент	M	2.12e+07	H·мм
Внутренний диаметр большей обечайки, перехода или днища	D	2188	мм
Внутренний диаметр меньшей цилиндрической обечайки	D ₁	1000	мм
Угол наклона кососимметричной обечайки	α_1	34	град
Исполнительная толщина стенки конической обечайки (днища)	S _к	12	мм
Исполнительная толщина стенки большей цилиндрической обечайки	S _б	8	мм
Исполнительная толщина стенки меньшей цилиндрической обечайки	S _м	8	мм
Прибавка к расчётной толщине конической обечайки (днища) для компенсации коррозии и эрозии	C _{к_1}	0	мм
Прибавка к расчётной толщине конической обечайки (днища) для компенсации минусового допуска	C _{к_2}	0.8	мм
Прибавка технологическая к расчётной толщине конической обечайки (днища)	C _{к_3}	0	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине конической обечайки (днища)	C _к	0.8	мм
Прибавка к расчётной толщине большей цилиндрической обечайки(перехода) для компенсации коррозии и эрозии	C _{2б_1}	0	мм
Прибавка к расчётной толщине большей цилиндрической обечайки(перехода) для компенсации минусового допуска	C _{2б_2}	0.8	мм
Прибавка технологическая к расчётной толщине большей цилиндрической обечайки (перехода)	C _{2б_3}	0	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине большей цилиндрической обечайки (перехода)	C _{2б}	0.8	мм
Прибавка к расчётной толщине меньшей цилиндрической обечайки(перехода) для компенсации коррозии и эрозии	C _{2м_1}	0	мм
Прибавка к расчётной толщине меньшей цилиндрической обечайки(перехода) для компенсации минусового допуска	C _{2м_2}	0.8	мм

Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	E-107-2376.00.00.000 PP	Лист
						48

ка

Прибавка технологическая к расчётной толщине меньшей цилиндрической обечайки (перехода)

$C_{2м_3}$ 0 мм

Сумма прибавок к расчётной толщине меньшей цилиндрической обечайки (перехода)

$C_{2м}$ 0.8 мм

Коэффициент прочности продольного сварного шва

ϕ_p 1

Коэффициент прочности кольцевого сварного шва

ϕ_t 1

Допускаемое напряжение для материала конической обечайки (днища)

$[\sigma]$ 99 МПа

Допускаемое напряжение для материала большей цилиндрической обечайки (перехода)

$[\sigma]_2$ 99 МПа

Допускаемое напряжение для материала меньшей цилиндрической обечайки (перехода)

$[\sigma]_2$ 99 МПа

Модуль продольной упругости материала конической обечайки (днища)

E 1.74e+05 МПа

Результаты расчёта

Расчётная длина переходной части конической обечайки:

$$a_1 = 0,7 \sqrt{\frac{D}{\cos \alpha_1}} (s_1 - c) = 96.49 \text{ мм}$$

Расчётная длина переходной части конической обечайки у меньшего конца:

$$a_1 = \sqrt{\frac{D}{\cos \alpha_1}} (s_1 - c) = 65.23 \text{ мм}$$

Расчётная длина переходной части цилиндрической обечайки:

$$a_2 = 0,7 \sqrt{D(s_2 - c)} = 109.6 \text{ мм}$$

Расчётная длина цилиндрической обечайки или штуцера у меньшего конца:

$$a_2 = 1,25 \sqrt{D(s_2 - c)} = 106.1 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр гладкой конической обечайки без тороидального перехода:

$$D_x = D - 1.4 a_1 \sin \alpha_1 = 2112 \text{ мм}$$

Эффективные толщины переходных участков:

- конической части соединения без тороидального перехода:

$$s_{1Э} = \max \left\{ \frac{a_{1D}}{a_1} s_1; s_x \right\} = 8 \text{ мм}$$

- цилиндрической части соединения без тороидального перехода:

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

Допускаемое внутреннее избыточное давление для конической обечайки или днища:

$$[p]_{ЭХ} = \frac{2[\sigma]\phi_p(s_x - c)}{\frac{D_x}{\cos \alpha_1} + (s_x - c)} = 0.5579 \text{ МПа}$$

Допускаемая растягивающая сила:

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	<div>Е-107-2376.00.00.000 РР</div>				Лист
19805									49
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата					

$$[F] = \pi D_1 (s_k - c) \varphi_T [\sigma] \cos \alpha_1 = 4.637e+06 \text{ Н}$$

Допускаемая осевая сжимающая сила:

где:

$$[F] = \min \left\{ \frac{[F]_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\text{п}}}{[F]_{\text{в}}} \right)^2}}; \frac{D_1}{D_F} [F]_{\text{п}} \right\} = 1.886e+06 \text{ Н}$$

- допускаемая осевая сила из условия прочности:

$$[F]_{\text{п}} = \pi D_F (s_k - c) [\sigma] \cos \alpha_1 = 1.886e+06 \text{ Н}$$

- допускаемая осевая сила из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[F]_{\text{в}} = \frac{310 \cdot 10^{-6} E}{n_y} (D_F \cos \alpha_1)^2 \cdot \left[\frac{100(s_k - c)}{D_F} \right]^{2.5} = 4.299e+06 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности:

$$[M] = \frac{D_1}{4} \pi D_1 (s_k - c) \varphi_T [\sigma] \cos \alpha_1 = 4.791e+08 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости:

где:

$$[M] = \frac{[M]_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\text{п}}}{[M]_{\text{в}}} \right)^2}} = 2.106e+09 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

- допускаемый изгибающий момент из условия прочности:

$$[M]_{\text{п}} = \frac{D_F}{4} \pi D_F (s_k - c) [\sigma] \cos \alpha_1 = 2.896e+09 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

- допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_{\text{в}} = \frac{D_F}{3.5} \cdot \frac{310 \cdot 10^{-6} E}{n_y} (D_F \cos \alpha_1)^2 \cdot \left[\frac{100(s_k - c)}{D_F} \right]^{2.5} = 3.068e+09 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

- эффективный диаметр конической обечайки при осевом сжатии и изгибе:

$$D_F = \frac{0,9D + 0,1D_1}{\cos \alpha_1} = 2498 \text{ мм}$$

- коэффициент запаса устойчивости:

$$n_y = 2.4$$

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

где:

$$[p] = \frac{2[\sigma]_2 \varphi_p (s_2 - c)}{D \beta_1 + (s_2 - c)} = 0.6529 \text{ МПа}$$

- коэффициент формы:

$$\beta_1 = \max \{0.5; \beta\} = 1.547$$

Подп. и дата																																				
Инв. №																																				
Взам. инв.																																				
Подп. и дата																																				
Инв. № подл.	19805																																			
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата																																

E-107-2376.00.00.000 PP

Лист

50

- коэффициент β :

$$\beta = 0,4 \sqrt{\frac{D}{s_2 - c}} \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{1 + \sqrt{\frac{1 + \chi \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)^2}{2 \cos \alpha_1} \chi \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)}} - 0,25 = 1.547$$

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

где:

$$[F] = \pi D \frac{(s_2 - c) [\sigma]_2 \varphi_r}{\beta_5} = 1.775 \text{e}+06 \text{ Н}$$

- коэффициент β_5 :

$$\beta_5 = \max \{1.0; (2\beta + 1.2)\} = 4.294$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности переходной части:

$$[M] = \frac{D}{4} [F] = 4.791 \text{e}+08 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

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

где:

$$[p]_{\text{кк}} = \frac{2[\sigma]_2 \varphi_p (s_2 - c)}{D \beta_4 + (s_2 - c)} = 0.7048 \text{ МПа}$$

- общий коэффициент формы для переходной части:

$$\beta_4 = \max \{1.0; \beta_x\} = 2.015$$

- коэффициент β_x :

$$\beta_x = \left\{ \begin{array}{ll} \beta + 0.75 & - \text{при } \chi \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)^2 \geq 1 \\ 0,4 \sqrt{\frac{D}{s_2 - c}} \times \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\chi \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right) \sqrt{\frac{s_1 - c}{(s_2 - c) \cos \alpha_1}} + \sqrt{\frac{1 + \chi \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)^2}{2}}} + & \\ + 0,5 & - \text{при } \chi \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)^2 < 1 \end{array} \right\} = 2.015$$

- коэффициент β :

$$\beta = 0,4 \sqrt{\frac{D}{s_2 - c}} \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{1 + \sqrt{\frac{1 + \chi \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)^2}{2 \cos \alpha_1} \chi \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)}} - 0,25 = 1.265$$

Инв. № подл.	19805	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	
Е-107-2376.00.00.000 РР					Лист
					51

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

$$[F] = \pi D \frac{(s_2 - c)[\sigma]_2 \cdot \varphi_p}{\beta_8} = 7.389\text{e}+05 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности переходной части:

$$[M] = \frac{D}{4}[F] = 1.847\text{e}+08 \text{ Н}\cdot\text{мм}$$

Условие устойчивости

$$-\frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} = 0.01007 < 1$$

Условие прочности большей переходной части

$$\left| \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} \right| + \frac{M}{[M]} = 0.05308 < 1$$

Условие прочности меньшей переходной части

$$\left| \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} \right| + \frac{M}{[M]} = 0.1437 < 1$$

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

Инв. № подл. 19805	Подп. и дата		Инв. №		Взам. инв.		Подп. и дата		
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	Е-107-2376.00.00.000 РР				Лист
									52

1.15. Укрепление отверстий под люк Ду 600

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

Внутреннее давление

Отверстие в конической обечайке

Отверстие в торосферическом или неотбортованном сферическом днище

Расчёт укрепления одиночного отверстия

Укрепление непропущенным (непроходящим) штуцером

Штуцер с осью нормальной к корпусу сосуда

Только расчёт укрепления отверстия

Режим: Рабочий

Исходные данные

Материал корпуса 08X18H10T, Лист
Материал штуцера 08X18H10T, Лист

Расчётная температура днища	T	450	°C
Расчётное давление	P	0.0204	МПа
Внутренний диаметр обечайки, днища или конического перехода, в месте расположения отверстия	D	1580	мм
Исполнительная толщина стенки обечайки, конического перехода или днища	δ	8	мм
Коэффициент прочности сварных соединений обечаек и днищ	φ	1	
Допускаемое напряжение для материала обечайки, перехода или днища при расчётной температуре	$[\sigma]$	99	МПа
Половина угла раствора при вершине конической обечайки	α	34	
Внутренний диаметр штуцера	d	594	мм
Исполнительная толщина стенки штуцера	δ_1	8	мм
Исполнительная длина штуцера (для заведомо длинных штуцеров $l_1=0$)	l_1	0	мм
Допускаемое напряжение для материала штуцера	$[\sigma]_1$	99	МПа
Коэффициент прочности продольного сварного шва штуцера	φ_1	1	
Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (или $L_k=0$)	L_k	0	мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии стенки корпуса	c_1	0	мм
Прибавка для компенсации минусового допуска стенки корпуса	c_2	0.8	мм
Прибавка технологическая стенки корпуса	c_3	0	мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии стенки штуцера	c_{s1}	1	мм
Прибавка для компенсации минусового допуска стенки штуцера	c_{s2}	0.8	мм

Инв. № подл. 19805	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата						Лист
										53
					Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	

E-107-2376.00.00.000 PP

Результаты расчёта

Расчётный внутренний диаметр конической обечайки, перехода или днища

$$D_p = \frac{D_k}{\cos \alpha} = 1906 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки корпуса

$$s_{kp} = \frac{p D_k}{2 \varphi_p [\sigma] - p \cos \alpha_1} = 0.1964 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия

$$d_p = d + 2c_s = 597.6 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки штуцера

$$s_{lp} = \frac{p(d + 2c_s)}{2[\sigma]_h \varphi_1 - p} = 0.06158 \text{ мм}$$

Расчётная длина штуцера

$$l_{lp} = \min \left\{ l_1; 1,25 \sqrt{(d + 2c_s)(s_1 - c_s)} \right\} = 76.09 \text{ мм}$$

Отношение допускаемых напряжений штуцера и корпуса

$$\chi_1 = \min \left\{ 1, 0, \frac{[\sigma]_h}{[\sigma]} \right\} = 1$$

Ширина зоны укрепления, прилегающей к штуцеру

$$L_o = \sqrt{D_p (s - c)} = 117.1 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления, прилегающей к штуцеру

$$l_p = 117.1 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр неукрепляемого отверстия

$$d_{op} = 0,4 \sqrt{D_p (s - c)} = 46.86 \text{ мм}$$

Коэффициент понижения прочности узла врезки штуцера

$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{lp}(s_1 - c_s) \chi_1 + l_{2p}s_2 \chi_2 + l_{3p}(s_3 - c_s - c_{s1}) \chi_3}{l_p(s - c)}}{1 + 0,5 \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1 \frac{d + 2c_s}{D_p} \frac{\varphi l_{lp}}{\varphi_1 l_p}} \right\} = 0.4387$$

Допускаемое давление для узла врезки штуцера

$$[p] = \frac{2K_1(s - c)\varphi[\sigma]}{D_p + (s - c)V} V = 0.3276 \text{ МПа}$$

где

$$K_1 = 1$$

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

Инв. № подл. 19805	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	<div>Е-107-2376.00.00.000 РР</div>					Лист
										54
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата						

1.16. Цилиндрический переход выпускной камеры Ду 1100

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	08X18H10T, Лист		
Расчётная температура	T	450	°C
Расчётное давление в сосуде	P	0.0204	МПа
Расчётный изгибающий момент	M	4.411e+04	Н·мм
Расчётное поперечное усилие	Q	802	Н
Внутренний диаметр обечайки	D	1100	мм
Фактическая длина обечайки	Lact	110	мм
Расчётная длина обечайки	L	357.1	мм
Толщина стенки обечайки	S	8	мм
Прибавка на коррозию	c ₁	0	мм
Прибавка – минусовый допуск	c ₂	0.8	мм
Прибавка технологическая	c ₃	0	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки	c	0.8	мм
Коэффициент прочности продольного сварного шва	φ _p	1	
Допускаемое напряжение	[σ]	99	МПа
Модуль продольной упругости	E	1.74e+05	МПа

Результаты расчёта

Расчётная толщина стенки обечайки от действия давления	$S_p = \frac{pD}{2[\sigma]\phi_p - p} =$	0.1133 мм
Расчётная толщина стенки обечайки от действия давления с учетом прибавки	$S \geq S_p + C =$	0.9133 мм
Допускаемое внутреннее давление	$[p] = \frac{2[\sigma]\phi_p(S - C)}{D + (S - C)} =$	1.288 МПа
Допускаемый изгибающий момент из условий устойчивости в пределах упругости	$[M]_E = \frac{89 \cdot 10^{-6} E}{n_y} D^3 \left[\frac{100(S - C)}{D} \right]^{2.5} =$	2.963e+09 Н·мм
Допускаемый изгибающий момент из условия прочности		

Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата

2. Расчет на наружное давление

2.1. Цилиндрический переход входной камеры Ду 1000

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: Рабочий

Исходные данные

Материал обечайки	09Г2С, Лист		
Расчётная температура	T	450	°C
Расчётное давление	P	0.102	МПа
Расчётный изгибающий момент	M	4.013e+04	Н·мм
Расчётное поперечное усилие	Q	729.6	Н
Внутренний диаметр обечайки	D	1000	мм
Фактическая длина обечайки	Lact	110	мм
Расчётная длина обечайки	L	650.6	мм
Толщина стенки обечайки	S	10	мм
Прибавка на коррозию	c ₁	2	мм
Прибавка – минусовый допуск	c ₂	0.8	мм
Прибавка технологическая	c ₃	1	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки	c	3.8	мм
Допускаемое напряжение	[σ]	71	МПа
Модуль продольной упругости	E	1.4e+05	МПа

Результаты расчёта

Допускаемое наружное давление

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_n}{[p]_f}\right)^2}} = 0.4743 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условий прочности

$$[p]_n = \frac{2[\sigma](s - c)}{D + (s - c)} = 0.875 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условий устойчивости в пределах упругости

$$[p]_f = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E D}{n_y \cdot B_1 L} \left[\frac{100(s - c)}{D} \right]^{2,5} = 0.5645$$

Коэффициент

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

Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	Е-107-2376.00.00.000 РР	Лист
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		57
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		

Допускаемый изгибающий момент из условий устойчивости в пределах упругости

$$[M]_{\text{Е}} = \frac{89 \cdot 10^{-6} E}{n_y} D^3 \left[\frac{100(S - C)}{D} \right]^{2,5} = 1.564\text{e}+09 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности

$$[M]_{\text{П}} = \frac{\pi D(D + S - C)(S - C)[\sigma]}{4} = 3.479\text{e}+08 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

Допускаемый изгибающий момент

$$[M] = \frac{[M]_{\text{П}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\text{П}}}{[M]_{\text{Е}}} \right)^2}} = 3.396\text{e}+08 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости в пределах упругости

$$[Q]_{\text{Е}} = \frac{2.4E(S - C)^2}{n_y} \left[0.18 + 3.3 \frac{D(S - C)}{L^2} \right] = 9.687\text{e}+05 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности

$$[Q]_{\text{П}} = \frac{\pi D(S - C)[\sigma]}{4} = 3.457\text{e}+05 \text{ Н}$$

Допускаемое перерезывающее усилие

$$[Q] = \frac{[Q]_{\text{П}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\text{П}}}{[Q]_{\text{Е}}} \right)^2}} = 3.256\text{e}+05 \text{ Н}$$

Условие устойчивости (п.5.3.7 ГОСТ Р 52857.2-2007)

$$\frac{P}{[P]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0.2152 < 1$$

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

Инв. № подл. 19805	Подп. и дата		Инв. №		Взам. инв.		Подп. и дата		
Изм.	Лист	№ док.	Подпись		Дата		Е-107-2376.00.00.000 РР		Лист 58

Условие устойчивости (п.5.3.7 ГОСТ Р 52857.2-2007)

$$\frac{P}{[P]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0.2152 < 1$$

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

2.2. Коническая обечайка входной 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: Неотбортованный конический переход, работающий под действием наружного давления Кососимметричный конический переход

Режим:Рабочий

Исходные данные

Материал конической обечайки или днища 09Г2С, Лист
Материал большего цилиндрического перехода 09Г2С, Лист
Материал меньшего цилиндрического перехода 09Г2С, Лист

Расчётная температура	T	450	°C
Расчётное давление	P	0.102	МПа
Расчётная осевая сила	F	0	Н
Расчётный изгибающий момент	M	2.107e+07	Н·мм
Внутренний диаметр большей обечайки, перехода или днища	D	2188	мм
Внутренний диаметр меньшей цилиндрической обечайки	D ₁	1000	мм
Угол наклона кососимметричной обечайки	α ₁	34	град
Исполнительная толщина стенки конической обечайки (днища)	S _к	10	мм
Исполнительная толщина стенки большей цилиндрической обечайки	S _б	16	мм
Исполнительная толщина стенки меньшей цилиндрической обечайки	S _м	10	мм
Прибавка к расчётной толщине конической обечайки (днища) для компенсации коррозии и эрозии	C _{к_1}	2	мм
Прибавка к расчётной толщине конической обечайки (днища) для компенсации минусового допуска	C _{к_2}	0.8	мм
Прибавка технологическая к расчётной толщине конической обечайки (днища)	C _{к_3}	1	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине конической обечайки (днища)	C _к	3.8	мм
Прибавка к расчётной толщине большей цилиндрической обечайки(перехода) для компенсации коррозии и эрозии	C _{2б_1}	2	мм
Прибавка к расчётной толщине большей цилиндрической обечайки(перехода) для компенсации минусового допуска	C _{2б_2}	0.8	мм
Прибавка технологическая к расчётной толщине большей цилиндрической обечайки (перехода)	C _{2б_3}	1	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине большей цилиндрической обечайки (перехода)	C _{2б}	3.8	мм
Прибавка к расчётной толщине меньшей цилиндрической обечайки(перехода) для компенсации коррозии и эрозии	C _{2м_1}	2	мм
Прибавка к расчётной толщине меньшей цилиндрической обечайки(перехода) для компенсации минусового допуска	C _{2м_2}	0.8	мм
Прибавка технологическая к расчётной толщине меньшей ци-	C _{2м_3}	1	мм

Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	E-107-2376.00.00.000 PP	Лист
						59

линдрической обечайки (перехода)

Сумма прибавок к расчётной толщине меньшей цилиндрической обечайки (перехода)

$C_{2м}$ 3.8 мм

Коэффициент прочности продольного сварного шва

ϕ_p 1

Коэффициент прочности кольцевого сварного шва

ϕ_r 1

Допускаемое напряжение для материала конической обечайки (днища)

$[\sigma]$ 71 МПа

Допускаемое напряжение для материала большей цилиндрической обечайки (перехода)

$[\sigma]_2$ 71 МПа

Допускаемое напряжение для материала меньшей цилиндрической обечайки (перехода)

$[\sigma]_2$ 71 МПа

Модуль продольной упругости материала конической обечайки (днища)

E 1.4e+05 МПа

Результаты расчёта

Расчётная длина переходной части конической обечайки:

$$a_1 = 0,7 \sqrt{\frac{D}{\cos \alpha_1}} (s_1 - c) = 89.54 \text{ мм}$$

Расчётная длина переходной части конической обечайки у меньшего конца:

$$a_1 = \sqrt{\frac{D}{\cos \alpha_1}} (s_1 - c) = 60.54 \text{ мм}$$

Расчётная длина переходной части цилиндрической обечайки:

$$a_2 = 0,7 \sqrt{D(s_2 - c)} = 114.4 \text{ мм}$$

Расчётная длина цилиндрической обечайки или штуцера у меньшего конца:

$$a_2 = 1,25 \sqrt{D(s_2 - c)} = 98.43 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр гладкой конической обечайки без тороидального перехода:

$$D_x = D - 1.4 a_1 \sin \alpha_1 = 2118 \text{ мм}$$

Эффективные толщины переходных участков:

- конической части соединения без тороидального перехода:

$$s_{1Э} = \max \left\{ \frac{a_{1D}}{a_1} s_1; s_x \right\} = 10 \text{ мм}$$

- цилиндрической части соединения без тороидального перехода:

$$s_{2Э} = \max \left\{ \frac{a_{2D}}{a_2} s_2; s \right\} = 16 \text{ мм}$$

Допускаемая растягивающая сила:

$$[F] = \pi D_1 (s_x - c) \phi_r [\sigma] \cos \alpha_1 = 2.864e+06 \text{ Н}$$

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

где:

$$[p] = \frac{[p]_x}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_x}{[p]_Э} \right)^2}} = 0.1221 \text{ МПа}$$

Инв. № подл.	Подл. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подл. и дата	конца: $a_2 = 1,25\sqrt{D(s_2 - c)} =$ Расчётный диаметр гладкой конической обечайки без тороидального перехода: $D_n = D - 1.4a_1 \sin \alpha_1 =$ Эффективные толщины переходных участков: - конической части соединения без тороидального перехода: $s_{1F} = \max \left\{ \frac{a_{1D}}{a_1} s_1; s_n \right\} =$ - цилиндрической части соединения без тороидального перехода: $s_{2F} = \max \left\{ \frac{a_{2D}}{a_2} s_2; s \right\} =$ Допускаемая растягивающая сила: $[F] = \pi D_1 (s_n - c) \varphi_T [\sigma] \cos \alpha_1 =$ Допускаемое наружное давление для гладкой конической обечайки или пологого конического днища: где: $[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_n}{[p]_F} \right)^2}} =$
19805					98.43 мм
					2118 мм
					10 мм
					16 мм
					2.864e+06 Н
					0.1221 МПа

- допускаемое давление из условия прочности:

$$[p]_n = \frac{2[\sigma](s_n - c)}{\frac{D_n}{\cos \alpha_1} + (s_n - c)} = 0.3438 \text{ МПа}$$

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

$$[p]_F = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E D_F}{n_y \cdot B_1 l_F} \left[\frac{100(s_n - c)}{D_F} \right]^{2,5} = 0.1307 \text{ МПа}$$

- эффективный диаметр конической обечайки при действии наружного давления:

$$D_F = \max \left\{ \frac{D + D_1}{2 \cos \alpha_1}; \frac{D}{\cos \alpha_1} - 0,31(D + D_1) \sqrt{\frac{D + D_1}{s_n - c}} \cdot \operatorname{tg} \alpha_1 \right\} = 1935$$

- эффективная длина конической обечайки при действии наружного давления:

$$l_F = \frac{D - D_1}{2 \sin \alpha_1} = 1044 \text{ мм}$$

- коэффициент B_1 :

$$B_1 = \min \left\{ 1,0; 9,45 \frac{D_F}{l_F} \sqrt{\frac{D_F}{100(s_n - c)}} \right\} = 1$$

Допускаемая осевая сжимающая сила:
где:

$$[F] = \min \left\{ \frac{[F]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_n}{[F]_F} \right)^2}}; \frac{D_1}{D_F} [F]_n \right\} = 1.169\text{e}+06 \text{ Н}$$

- допускаемая осевая сила из условия прочности:

$$[F]_n = \pi D_F (s_n - c) [\sigma] \cos \alpha_1 = 1.169\text{e}+06 \text{ Н}$$

- допускаемая осевая сила из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[F]_F = \frac{310 \cdot 10^{-6} E (D_F \cos \alpha_1)^2}{n_y} \cdot \left[\frac{100(s_n - c)}{D_F} \right]^{2,5} = 2.38\text{e}+06 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности:

$$[M] = \frac{D_1}{4} \pi D_1 (s_n - c) \varphi_T [\sigma] \cos \alpha_1 = 2.982\text{e}+08 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости:
где:

$$1.232\text{e}+09 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

Инв. № подл. 19805	Подп. и дата					Инв. №	Подп. и дата
	Взам. инв.						
где:							
$[F] = \min \left\{ \frac{[F]_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\text{п}}}{[F]_{\text{э}}} \right)^2}}; \frac{D_1}{D_F} [F]_{\text{п}} \right\} =$							
1.169e+06 Н							
- допускаемая осевая сила из условия прочности:							
$[F]_{\text{п}} = \pi D_F (s_{\text{к}} - c) [\sigma] \cos \alpha_1 =$							
1.169e+06 Н							
- допускаемая осевая сила из условия устойчивости в пределах упругости:							
$[F]_{\text{э}} = \frac{310 \cdot 10^{-6} E}{n_y} (D_F \cos \alpha_1)^2 \cdot \left[\frac{100(s_{\text{к}} - c)}{D_F} \right]^{2.5} =$							
2.38e+06 Н							
Допускаемый изгибающий момент из условия прочности:							
$[M] = \frac{D_1}{4} \pi D_1 (s_{\text{к}} - c) \varphi_T [\sigma] \cos \alpha_1 =$							
2.982e+08 Н·мм							
Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости:							
где:							
1.232e+09 Н·мм							
						Лист	
Е-107-2376.00.00.000 РР							
						61	
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата			

$$[M] = \frac{[M]_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\text{п}}}{[M]_{\text{в}}} \right)^2}} =$$

- допускаемый изгибающий момент из условия прочности:

$$[M]_{\text{п}} = \frac{D_{\text{ф}}}{4} \pi D_{\text{ф}} (s_{\text{к}} - c) [\sigma] \cos \alpha_1 = 1.789\text{e}+09 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

- допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_{\text{в}} = \frac{D_{\text{ф}}}{3.5} \cdot \frac{310 \cdot 10^{-6} E}{n_y} (D_{\text{ф}} \cos \alpha_1)^2 \cdot \left[\frac{100(s_{\text{к}} - c)}{D_{\text{ф}}} \right]^{2.5} = 1.699\text{e}+09 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

- эффективный диаметр конической обечайки при осевом сжатии и изгибе:

$$D_{\text{ф}} = \frac{0,9D + 0,1D_1}{\cos \alpha_1} = 2498 \text{ мм}$$

- коэффициент запаса устойчивости:

$$n_y = 2.4$$

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

где:

$$[p] = \frac{2[\sigma]_2 \varphi_{\text{п}} (s_2 - c)}{D \beta_1 + (s_2 - c)} = 0.5359 \text{ МПа}$$

- коэффициент формы:

$$\beta_1 = \max \{0.5; \beta\} = 1.472$$

- коэффициент β :

$$\beta = 0,4 \sqrt{\frac{D}{s_2 - c}} \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{1 + \sqrt{\frac{1 + \chi \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)^2}{2 \cos \alpha_1} \chi \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)}} - 0,25 = 1.472$$

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

где:

$$[F] = \pi D \frac{(s_2 - c) [\sigma]_2 \varphi_{\text{т}}}{\beta_3} = 1.437\text{e}+06 \text{ Н}$$

- коэффициент β_3 :

$$\beta_3 = \max \{1.0; (2\beta + 1.2)\} = 4.144$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности переходной части:

$$[M] = \frac{D}{4} [F] = 2.982\text{e}+08 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

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

где:

Подп. и дата																
Инв. №																
Взам. инв.																
Подп. и дата																
Инв. № подл.	19805															
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата												Лист
																62

E-107-2376.00.00.000 PP

$$[\varphi]_{\text{NN}} = \frac{2[\sigma]_2 \varphi_p(s_2 - c)}{D\beta_4 + (s_2 - c)} = 0.4116 \text{ MПа}$$

- общий коэффициент формы для переходной части:

$$\beta_4 = \max \{1.0, \beta_y\} = \quad 2.133$$

- коэффициент β_n :

$$\beta_x = \begin{cases} \beta + 0.75 & -npu & x \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)^2 \geq 1 \\ 0,4 \sqrt{\frac{D}{s_2 - c}} \times \\ \times \frac{tg \alpha_1}{x \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right) \sqrt{\frac{s_1 - c}{(s_2 - c) \cos \alpha_1}} + \sqrt{\frac{1 + x \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)^2}{2}}} + = \\ + 0,5 & -npu & x \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)^2 < 1 \end{cases} \quad 2.133$$

- коэффициент β :

$$\beta = 0,4 \sqrt{\frac{D}{s_2 - c}} \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{1 + \sqrt{\frac{1 + x \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)^2}{2 \cos \alpha_1} x \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)}} - 0,25 = \quad 1.383$$

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

где:

$$[F] = \pi D \frac{(s_2 - c)[\sigma]_2 \cdot \varphi_p}{\beta_s} = 4.234 \text{e}+05 \text{ H}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности переходной части:

$$[M] = \frac{D}{4}[F] = 1.059\text{e}+08 \text{ H}\cdot\text{MM}$$

Условие устойчивости

$$-\frac{p}{[p]} - \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} = 0.8522 < 1$$

Условие прочности большей переходной части

$$\left| \frac{p}{p} + \frac{F}{F} \right| + \frac{M}{M} = 0.2172 < 1$$

Условие прочности меньшей переходной части

$$\left| \frac{p}{p} + \frac{F}{F} \right| + \frac{M}{M} = 0.4469 < 1$$

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

Инв. № подл.	Подл. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подл. и дата
19805				
<p>Допускаемая осевая растягивающая или сжимающая сила из условия прочности переходной части:</p> <p>где:</p> $[F] = \pi D \frac{(s_2 - c) [\sigma]_2 \cdot \varphi_p}{\beta_8} = 4.234e+05 \text{ Н}$ <p>Допускаемый изгибающий момент из условия прочности переходной части:</p> $[M] = \frac{D}{4} [F] = 1.059e+08 \text{ Н} \cdot \text{мм}$ <p>Условие устойчивости</p> $-\frac{P}{[P]} - \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} = 0.8522 < 1$ <p>Условие прочности большей переходной части</p> $\left \frac{P}{[P]} + \frac{F}{[F]} \right + \frac{M}{[M]} = 0.2172 < 1$ <p>Условие прочности меньшей переходной части</p> $\left \frac{P}{[P]} + \frac{F}{[F]} \right + \frac{M}{[M]} = 0.4469 < 1$ <p>Конический переход (пологое коническое днище) отвечает условиям прочности и устойчивости в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52857.2-2007</p>				
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата
E-107-2376.00.00.000 PP				Лист
				63

2.3. Цилиндрический переход входной камеры Двн 2188

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: Рабочий

Исходные данные

Материал обечайки	09Г2С, Лист		
Расчётная температура	T	450	°C
Расчётное давление	P	0.1	МПа
Внутренний диаметр обечайки	D	2188	мм
Фактическая длина обечайки	Lact	112	мм
Расчётная длина обечайки	L	5212	мм
Толщина стенки обечайки	S	16	мм
Прибавка на коррозию	c ₁	2	мм
Прибавка – минусовый допуск	c ₂	0.8	мм
Прибавка технологическая	c ₃	1	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки	c	3.8	мм
Допускаемое напряжение	[σ]	71	МПа
Модуль продольной упругости	E	1.4e+05	МПа

Результаты расчёта

Допускаемое наружное давление

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_n}{[p]_E}\right)^2}} = 0.1169 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условий прочности

$$[p]_n = \frac{2[\sigma](s - c)}{D + (s - c)} = 0.7874 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условий устойчивости в пределах упругости

$$[p]_E = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E D}{n_y \cdot B_1 L} \left[\frac{100(s - c)}{D} \right]^{2,5} = 0.1183$$

Коэффициент

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

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

Инв. № подл. 19805	Подп. и дата		Результаты расчёта			Лист 64
	Инв. №		Допускаемое наружное давление			
	Взам. инв.		$[p] = \frac{[p]_н}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_н}{[p]_ф}\right)^2}} =$			
	Подп. и дата		0.1169 МПа			
	Инв. №		Допускаемое наружное давление из условий прочности			
Взам. инв.		$[p]_н = \frac{2[\sigma](s - c)}{D + (s - c)} =$			0.7874 МПа	
Подп. и дата		Допускаемое наружное давление из условий устойчивости в пределах упругости			0.1183	
Инв. №		$[p]_ф = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E D}{n_y \cdot B_1 L} \left[\frac{100(s - c)}{D} \right]^{2,5} =$				
Взам. инв.		Коэффициент				
Подп. и дата		$B_1 = \min \left\{ 1,0; \quad 9,45 \frac{D}{L} \sqrt{\frac{D}{100(s - c)}} \right\} =$			1	
Инв. № подл.		Обечайка отвечает условиям прочности и устойчивости в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52857.2-2007				

					E-107-2376.00.00.000 PP	Лист 64
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		

2.4. Кожух

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: Рабочий

Исходные данные

Материал обечайки	09Г2С, Лист		
Расчётная температура	T	289	°C
Расчётное давление	P	0.1	МПа
Расчётный изгибающий момент	M	7.889e+07	Н·мм
Расчётное поперечное усилие	Q	1.781e+05	Н
Внутренний диаметр обечайки	D	2200	мм
Фактическая длина обечайки	Lact	4200	мм
Расчётная длина обечайки	L	5212	мм
Толщина стенки обечайки	S	66	мм
Прибавка на коррозию	c ₁	1.6	мм
Прибавка – минусовый допуск	c ₂	1.3	мм
Прибавка технологическая	c ₃	1	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки	c	3.9	мм
Допускаемое напряжение	[σ]	136	МПа
Модуль продольной упругости	E	1.72e+05	МПа

Результаты расчёта

Допускаемое наружное давление

$$[p] = \frac{[p]_H}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_H}{[p]_E} \right)^2}} = 5.588 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условий прочности

$$[p]_H = \frac{2[\sigma](s - c)}{D + (s - c)} = 7.467 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условий устойчивости в пределах упругости

$$[p]_E = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E D}{n_y \cdot B_1} \frac{D}{L} \left[\frac{100(s - c)}{D} \right]^{2,5} = 8.424$$

Коэффициент

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

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчиво-

Инв. № подл.	19805	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	
E-107-2376.00.00.000 PP					Лист
					65

1.439e+09 H

$$[F]_{E1} = \frac{31 \cdot 10^{-5} E}{n_v} D^2 \left[\frac{100(S-C)}{D} \right]^{2.5} =$$

1.439e+09 H

$$[F]_E = \text{Min} \{ [F]_{E1}; [F]_{E2} \} =$$

6.002e+07 H

$$[F]_{\pi} = \pi(D + S - C)(S - C)[\sigma] =$$

9.048e+11
H·MM

$$[M]_E = \frac{89 \cdot 10^{-6} E}{n_v} D^3 \left[\frac{100(S - C)}{D} \right]^{2.5} =$$

3.301e+10
H·MM

$$[M]_{\pi} = \frac{\pi D(D + S - C)(S - C)[\sigma]}{4} =$$

3.299e+10
H·MM

$$[M] = \frac{[M]_{\text{IT}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\text{IT}}}{[M]_{\text{E}}} \right)^2}} =$$

1.194e+08 H

$$[Q]_E = \frac{2.4E(S-C)^2}{n_y} \left[0.18 + 3.3 \frac{D(S-C)}{L^2} \right] =$$

1.459e+07 H

$$[Q]_K = \frac{\pi D(S-C)[\sigma]}{4} =$$

1.449e+07 H

$$[Q] = \frac{[Q]_{\text{I}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\text{I}}}{[Q]_{\text{E}}} \right)^2}} =$$

$$0.02044 < 1$$

$$\frac{p}{[p]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 =$$

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

Инв. № подл. 19805	Подп. и дата					Инв. №	Подп. и дата																									
	Допускаемое поперечное усилие из условия прочности						$[Q]_{\pi} = \frac{\pi D(S - C)[\sigma]}{4} =$					1.459e+07 Н																				
	Допускаемое перерезывающее усилие						$[Q] = \frac{[Q]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\pi}}{[Q]_{\text{E}}}\right)^2}} =$					1.449e+07 Н																				
	Условие устойчивости (п.5.3.7 ГОСТ Р 52857.2-2007)						$\frac{p}{[p]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 =$					0.02044 < 1																				
	Обечайка отвечает условиям прочности и устойчивости в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52857.2-2007																															
<table><tr><td>Изм.</td><td>Лист</td><td>№ док.</td><td>Подпись</td><td>Дата</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>											Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата						Е-107-2376.00.00.000 РР										Лист 66	
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата																												

2.5. Укрепление отверстий В2 Ду 100

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 по ГОСТ Р -52857.3-2007

Внешние нагрузки определялись без учета стесненности температурных деформаций

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

Режим:Рабочий

Исходные данные

Материал корпуса

09Г2С, Лист

Материал штуцера

09Г2С КП 245, Поковка

Расчётная температура днища

T 289 °С

Расчётное давление

P 0.1 МПа

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

D 2200 мм

Исполнительная толщина стенки обечайки, конического перехода или днища

s 66 мм

Коэффициент прочности сварных соединений обечаек и днищ

φ 1

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

$[\sigma]$ 136 МПа

Допускаемое наружное давление в пределах упругости

$[p]_E$ 8.424 МПа

Внутренний диаметр штуцера

d 92 мм

Исполнительная толщина стенки штуцера

s_1 34 мм

Исполнительная длина штуцера (для заведомо длинных штуцеров $l_1=0$)

l_1 235 мм

Допускаемое напряжение для материала штуцера

$[\sigma]_1$ 119 МПа

Коэффициент прочности продольного сварного шва штуцера

φ_1 1

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

L_k 348 мм

Вылет штуцера

L_f 235 мм

Осевая нагрузка на штуцер

F_z 4500 Н

Изгибающий момент вокруг оси X действующий на штуцер

M_x 1.73e+06 Н*мм

Изгибающий момент вокруг оси Y действующий на штуцер

M_y 2.3e+06 Н*мм

Инв. № подл. 19805	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Внутренний диаметр обечайки, днища или конического перехода, в месте расположения отверстия	D	2200	мм
					Исполнительная толщина стенки обечайки, конического перехода или днища	s	66	мм
					Коэффициент прочности сварных соединений обечаек и днищ	φ	1	
					Допускаемое напряжение для материала обечайки, перехода или днища при расчётной температуре	$[\sigma]$	136	МПа
					Допускаемое наружное давление в пределах упругости	$[p]_E$	8.424	МПа
					Внутренний диаметр штуцера	d	92	мм
					Исполнительная толщина стенки штуцера	s_1	34	мм
					Исполнительная длина штуцера (для заведомо длинных штуцеров l1=0)	l_1	235	мм
					Допускаемое напряжение для материала штуцера	$[\sigma]_1$	119	МПа
					Коэффициент прочности продольного сварного шва штуцера	φ_1	1	
					Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (или Lк=0)	L_k	348	мм
					Вылет штуцера	L_f	235	мм
					Осевая нагрузка на штуцер	F_z	4500	Н
Инв. № подл. 19805	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Изгибающий момент вокруг оси Х действующий на штуцер	M_x	1.73e+06	Н*мм
					Изгибающий момент вокруг оси Y действующий на штуцер	M_y	2.3e+06	Н*мм
					Е-107-2376.00.00.000 РР			Лист
								67
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата				

Перерезывающая сила вдоль оси X действующая на штуцер	F_x	6770	Н
Перерезывающая сила вдоль оси Y действующая на штуцер	F_y	6770	Н
Модуль продольной упругости материала штуцера	E_1	1.72e+05	МПа
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии стенки корпуса	c_1	1.6	мм
Прибавка для компенсации минусового допуска стенки корпуса	c_2	1.3	мм
Прибавка технологическая стенки корпуса	c_3	1	мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии стенки штуцера	$c_{,1}$	1.6	мм
Прибавка для компенсации минусового допуска стенки штуцера	$c_{,2}$	0	мм
Прибавка технологическая стенки штуцера	$c_{,3}$	1	мм

Результаты расчёта

Расчётный внутренний диаметр цилиндрической обечайки

$$D_p = D = 2200 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки корпуса

$$s_p = \frac{pD}{2[\sigma]\varphi_p - p} = 0.8091 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия

$$d_p = d + 2c_s = 97.2 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки штуцера

$$s_{1p} = \frac{p(d + 2c_s)}{2[\sigma]_1\varphi_1 - p} = 0.04086 \text{ мм}$$

Расчётная длина штуцера

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25\sqrt{(d + 2c_s)(s_1 - c_s)} \right\} = 69.06 \text{ мм}$$

Отношение допускаемых напряжений штуцера и корпуса

$$\chi_1 = \min \left\{ 1, 0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = 0.875$$

Ширина зоны укрепления, прилегающей к штуцеру

$$L_o = \sqrt{D_p(s - c)} = 369.6 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления, прилегающей к штуцеру

$$l_p = 348 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр неукрепленного отверстия

$$d_{op} = 0,4\sqrt{D_p(s - c)} = 147.8 \text{ мм}$$

Коэффициент понижения прочности узла врезки штуцера

1

Инв. № подл.	Подл. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подл. и дата	<div>Е-107-2376.00.00.000 PP</div>					Лист
19805										68
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата						

$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p}(s_1 - c_s) \chi_1 + l_{2p}s_2 \chi_2 + l_{3p}(s_3 - c_s - c_{s1}) \chi_3}{l_p(s - c)}}{1 + 0,5 \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1 \frac{d + 2c_s}{D_p} \frac{\varphi l_{1p}}{\varphi_1 l_p}} \right\} =$$

Допускаемое давление в пределах пластичности

$$[p]_n = \frac{2K_1(s - c)[\sigma]}{D_p + (s - c)V} V = 7.467 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление для узла врезки штуцера

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_n}{[p]_f} \right)^2}} = 5.588 \text{ МПа}$$

где

$$K_1 = 1$$

Допускаемое осевое усилие

$$[F_z] = [\sigma](s - c)^2 \max[C_1; 1,81] = 9.493e+05 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент вдоль оси X

$$[M_x] = [\sigma](s - c)^2 \frac{d_c}{4} \max[C_2; 4,9] = 8.095e+07 \text{ Н*мм}$$

Допускаемый изгибающий момент вдоль оси Y

$$[M_y] = [\sigma](s - c)^2 \frac{d_c}{4} \max[C_3; 4,9] = 9.212e+07 \text{ Н*мм}$$

Условие прочности по давлению

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| \leq 1 = 0.0179$$

Условие прочности по осевой нагрузке

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{[F_z]} \right| \leq 1 = 0.00474$$

Условие прочности по изгибающему моменту

$$\Phi_\delta = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]} \right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]} \right)^2} \leq 1 = 0.03287$$

Условие прочности при совместном действии нагрузок

$$\sqrt{\left[\max \left(\left| \frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z \right|, \left| \Phi_z \right|, \left| \frac{\Phi_p}{C_4} - 0,2\Phi_z \right| \right) \right]^2 + \Phi_\delta^2} \leq 1 = 0.03991$$

Максимальное продольное растягивающее напряжение в штуцере

$$\frac{p(d + s_1)}{4(s_1 - c_s)} + \frac{4\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi(d + s_1)^2(s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi(d + s_1)(s_1 - c_s)} \leq [\sigma] = 7.813 \text{ МПа}$$

Условие устойчивости штуцера

$$0.08803$$

Инв. № подл.	19805	Подп. и дата	Подп. и дата
Взам. инв.		Инв. №	
Инв. №		Подп. и дата	
Изм.	Лист	№ док.	Подпись
Дата			
Е-107-2376.00.00.000 PP			
Лист			
69			

2.6. Укрепление отверстий А2 Ду 80

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 по ГОСТ Р -52857.3-2007

Внешние нагрузки определялись без учета стесненности температурных деформаций

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

Режим:Рабочий

Исходные данные

Материал корпуса

09Г2С, Лист

Материал штуцера

09Г2С КП 245, Поковка

Расчётная температура днища

T 289 °С

Расчётное давление

P 0.1 МПа

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

D 2200 мм

Исполнительная толщина стенки обечайки, конического перехода или днища

s 66 мм

Коэффициент прочности сварных соединений обечаек и днищ

φ 1

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

$[\sigma]$ 136 МПа

Допускаемое наружное давление в пределах упругости

$[p]_E$ 8.424 МПа

Внутренний диаметр штуцера

d 75 мм

Исполнительная толщина стенки штуцера

s_1 32 мм

Исполнительная длина штуцера (для заведомо длинных штуцеров $l_1=0$)

l_1 240 мм

Допускаемое напряжение для материала штуцера

$[\sigma]_1$ 119 МПа

Коэффициент прочности продольного сварного шва штуцера

φ_1 1

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

L_k 290 мм

Вылет штуцера

L_z 240 мм

Осевая нагрузка на штуцер

F_z 2760 Н

Изгибающий момент вокруг оси X действующий на штуцер

M_x 1.01e+06 Н*мм

Изгибающий момент вокруг оси Y действующий на штуцер

M_y 1.35e+06 Н*мм

Подп. и дата	Инд. №	Взам. инв.	Подп. и дата	Инд. № подл.	19805
Изм.					Лист
Лист					71
№ док.					
Подпись					
Дата					
Е-107-2376.00.00.000 РР					

Перерезывающая сила вдоль оси Х действующая на штуцер	F_x	4220	Н
Перерезывающая сила вдоль оси Y действующая на штуцер	F_y	4220	Н
Модуль продольной упругости материала штуцера	E_1	1.72e+05	МПа
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии стенки корпуса	c_1	1.6	мм
Прибавка для компенсации минусового допуска стенки корпуса	c_2	1.3	мм
Прибавка технологическая стенки корпуса	c_3	1	мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии стенки штуцера	$c_{,1}$	1.6	мм
Прибавка для компенсации минусового допуска стенки штуцера	$c_{,2}$	0	мм
Прибавка технологическая стенки штуцера	$c_{,3}$	1	мм

Результаты расчёта

Расчётный внутренний диаметр цилиндрической обечайки

$$D_p = D = 2200 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки корпуса

$$s_p = \frac{pD}{2[\sigma]\varphi_p - p} = 0.8091 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия

$$d_p = d + 2c_s = 80.2 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки штуцера

$$s_{1p} = \frac{p(d + 2c_s)}{2[\sigma]_1\varphi_1 - p} = 0.03371 \text{ мм}$$

Расчётная длина штуцера

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25\sqrt{(d + 2c_s)(s_1 - c_s)} \right\} = 60.7 \text{ мм}$$

Отношение допускаемых напряжений штуцера и корпуса

$$\chi_1 = \min \left\{ 1, 0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = 0.875$$

Ширина зоны укрепления, прилегающей к штуцеру

$$L_o = \sqrt{D_p(s - c)} = 369.6 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления, прилегающей к штуцеру

$$l_p = 290 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр неукрепленного отверстия

$$d_{op} = 0,4\sqrt{D_p(s - c)} = 147.8 \text{ мм}$$

Коэффициент понижения прочности узла врезки штуцера

1

Инв. № подл.	Подл. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подл. и дата						Лист
19805										72
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	Е-107-2376.00.00.000 РР					

$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p}(s_1 - c_s) \chi_1 + l_{2p}s_2 \chi_2 + l_{3p}(s_3 - c_s - c_{s1}) \chi_3}{l_p(s - c)}}{1 + 0,5 \frac{d_p - d_{оп}}{l_p} + K_1 \frac{d + 2c_s}{D_p} \frac{\varphi l_{1p}}{\varphi_1 l_p}} \right\} =$$

Допускаемое давление в пределах пластичности

$$[p]_н = \frac{2K_1(s - c)[\sigma]}{D_p + (s - c)V} V = 7.467 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление для узла врезки штуцера

$$[p] = \frac{[p]_н}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_н}{[p]_ф} \right)^2}} = 5.588 \text{ МПа}$$

где

$$K_1 = 1$$

Допускаемое осевое усилие

$$[F_z] = [\sigma](s - c)^2 \max[C_1; 1,81] = 9.493e+05 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент вдоль оси X

$$[M_x] = [\sigma](s - c)^2 \frac{d_c}{4} \max[C_2; 4,9] = 6.875e+07 \text{ Н*мм}$$

Допускаемый изгибающий момент вдоль оси Y

$$[M_y] = [\sigma](s - c)^2 \frac{d_c}{4} \max[C_3; 4,9] = 7.853e+07 \text{ Н*мм}$$

Условие прочности по давлению

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| \leq 1 = 0.0179$$

Условие прочности по осевой нагрузке

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{[F_z]} \right| \leq 1 = 0.002907$$

Условие прочности по изгибающему моменту

$$\Phi_\delta = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]} \right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]} \right)^2} \leq 1 = 0.02261$$

Условие прочности при совместном действии нагрузок

$$\sqrt{\left[\max \left(\left| \frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z \right|, \left| \Phi_z \right|, \left| \frac{\Phi_p}{C_4} - 0,2\Phi_z \right| \right) \right]^2 + \Phi_\delta^2} \leq 1 = 0.03073$$

Максимальное продольное растягивающее напряжение в штуцере

$$\frac{p(d + s_1)}{4(s_1 - c_s)} + \frac{4\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi(d + s_1)^2(s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi(d + s_1)(s_1 - c_s)} \leq [\sigma] = 6.748 \text{ МПа}$$

Условие устойчивости штуцера

$$0.07986$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата
19805				
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата
Е-107-2376.00.00.000 PP				Лист
				73

Изгибающий момент вокруг оси Y действующий на штуцер	M_y	4.2e+05	Н*мм
Перерезывающая сила вдоль оси X действующая на штуцер	F_x	2080	Н
Перерезывающая сила вдоль оси Y действующая на штуцер	F_y	2080	Н
Модуль продольной упругости материала штуцера	E_1	1.72e+05	МПа
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии стенки корпуса	c_1	1.6	мм
Прибавка для компенсации минусового допуска стенки корпуса	c_2	1.3	мм
Прибавка технологическая стенки корпуса	c_3	1	мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии стенки штуцера	c_{s1}	1.6	мм
Прибавка для компенсации минусового допуска стенки штуцера	c_{s2}	0	мм
Прибавка технологическая стенки штуцера	c_{s3}	1	мм

Результаты расчёта

Расчётный внутренний диаметр цилиндрической обечайки

$$D_p = D = 2200 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки корпуса

$$s_p = \frac{pD}{2[\sigma]\varphi_p - p} = 0.8091 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия

$$d_p = d + 2c_s = 52.2 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки штуцера

$$s_{1p} = \frac{p(d + 2c_s)}{2[\sigma_1]\varphi_1 - p} = 0.02194 \text{ мм}$$

Расчётная длина штуцера

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \sqrt{(d + 2c_s)(s_1 - c_s)} \right\} = 51.41 \text{ мм}$$

Отношение допускаемых напряжений штуцера и корпуса

$$\chi_1 = \min \left\{ 1, 0, \frac{[\sigma_1]}{[\sigma]} \right\} = 0.875$$

Ширина зоны укрепления, прилегающей к штуцеру

$$L_o = \sqrt{D_p(s - c)} = 369.6 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления, прилегающей к штуцеру

$$l_p = 369.6 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр неукрепляемого отверстия

$$d_{op} = 0,4 \sqrt{D_p(s - c)} = 147.8 \text{ мм}$$

Коэффициент понижения прочности узла врезки штуцера

$$1$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата					
19805									
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата					
					Е-107-2376.00.00.000 PP				
					Лист				
					76				

$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p}(s_1 - c_s) \chi_1 + l_{2p}s_2 \chi_2 + l_{3p}(s_3 - c_s - c_{s1}) \chi_3}{l_p(s - c)}}{1 + 0,5 \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1 \frac{d + 2c_s}{D_p} \frac{\varphi l_{1p}}{\varphi_1 l_p}} \right\} =$$

Допускаемое давление в пределах пластичности

$$[p]_n = \frac{2K_1(s - c)[\sigma]}{D_p + (s - c)V} V = 7.467 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление для узла врезки штуцера

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_n}{[p]_f} \right)^2}} = 5.588 \text{ МПа}$$

где

$$K_1 = 1$$

Допускаемое осевое усилие

$$[F_z] = [\sigma](s - c)^2 \max[C_1; 1,81] = 9.493e+05 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент вдоль оси X

$$[M_x] = [\sigma](s - c)^2 \frac{d_c}{4} \max[C_2; 4,9] = 5.268e+07 \text{ Н*мм}$$

Допускаемый изгибающий момент вдоль оси Y

$$[M_y] = [\sigma](s - c)^2 \frac{d_c}{4} \max[C_3; 4,9] = 6.168e+07 \text{ Н*мм}$$

Условие прочности по давлению

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| \leq 1 = 0.0179$$

Условие прочности по осевой нагрузке

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{[F_z]} \right| \leq 1 = 0.001454$$

Условие прочности по изгибающему моменту

$$\Phi_\delta = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]} \right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]} \right)^2} \leq 1 = 0.009062$$

Условие прочности при совместном действии нагрузок

$$\sqrt{\left[\max \left(\left| \frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z \right|, \left| \Phi_z \right|, \left| \frac{\Phi_p}{C_4} - 0,2\Phi_z \right| \right) \right]^2 + \Phi_\delta^2} \leq 1 = 0.02137$$

Максимальное продольное растягивающее напряжение в штуцере

$$\frac{p(d + s_1)}{4(s_1 - c_s)} + \frac{4\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi(d + s_1)^2(s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi(d + s_1)(s_1 - c_s)} \leq [\sigma] = 3.297 \text{ МПа}$$

Условие устойчивости штуцера

$$0.04749$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата
19805				
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата
Е-107-2376.00.00.000 РР				Лист
				77

$$\frac{p}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} \leq 1 =$$

Коэффициент по п. 6.1.1.а

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} = 0.212$$

Допускаемая сжимающая продольная сила из условия устойчивости по ГОСТ Р 52857.2-2007

$$[F]_{\text{уст}} = 9.618\text{e}+05 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости по ГОСТ Р 52857.2-2007

$$[M]_{\text{уст}} = 1.13\text{e}+07 \text{ Н*мм}$$

Расчётный изгибающий момент вокруг оси Х в точке пересечения образующей корпуса с осью штуцера

$$M_{X_{\text{расч}}} = 3.15\text{e}+05 \text{ Н*мм}$$

Расчётный изгибающий момент вокруг оси Y в точке пересечения образующей корпуса с осью штуцера

$$M_{Y_{\text{расч}}} = 4.2\text{e}+05 \text{ Н*мм}$$

Эквивалентная толщина обечайки

$$s_3 = (s - c) = 66 \text{ мм}$$

Коэффициент C1 по п. 6.1.2.2.

$$C_1 = 1.81$$

Коэффициент C2 по п. 6.1.2.3.

$$C_2 = 4.9$$

Коэффициент C3 по п. 6.1.2.5.

$$C_3 = 5.737$$

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

Инв. № подл. 19805	Подп. и дата		Инв. №		Взам. инв.		Подп. и дата		
Изм.		Лист	№ док.	Подпись	Дата	Е-107-2376.00.00.000 РР			Лист
									78

Коэффициент С3 по п. 6.1.2.5.

$C_2 =$

$C_3 =$

4.9

5.737

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

2.8. Труба 57×6

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: Рабочий

Исходные данные

Материал обечайки	Сталь20, Труба		
Расчётная температура	T	289	°C
Расчётное давление	P	0.1	МПа
Внутренний диаметр обечайки	D	45	мм
Фактическая длина обечайки	Lact	500	мм
Расчётная длина обечайки	L	250	мм
Толщина стенки обечайки	S	6	мм
Прибавка на коррозию	c ₁	1.6	мм
Прибавка – минусовый допуск	c ₂	0.9	мм
Прибавка технологическая	c ₃	0	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки	c	2.5	мм
Допускаемое напряжение	[σ]	121.5	МПа
Модуль продольной упругости	E	1.72e+05	МПа

Результаты расчёта

Допускаемое наружное давление

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_n}{[p]_E}\right)^2}} = 17.07 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условий прочности

$$[p]_n = \frac{2[\sigma](s - c)}{D + (s - c)} = 17.54 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условий устойчивости в пределах упругости

$$[p]_E = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E D}{n_y \cdot B_1 L} \left[\frac{100(s - c)}{D} \right]^{2,5} = 74.22$$

Коэффициент

$$B_1 = \min \left\{ 1,0; \quad 9,45 \frac{D}{L} \sqrt{\frac{D}{100(s - c)}} \right\} = 0.6099$$

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

Модуль продольной упругости						E	1.72e+05	МПа	
Результаты расчёта									
Допускаемое наружное давление						$[p] = \frac{[p]_н}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_н}{[p]_в}\right)^2}} =$			
						17.07 МПа			
Допускаемое наружное давление из условий прочности						$[p]_н = \frac{2[\sigma](s - c)}{D + (s - c)} =$			
						17.54 МПа			
Допускаемое наружное давление из условий устойчивости в пределах упругости						$[p]_в = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E D}{n_y \cdot B_1 L} \left[\frac{100(s - c)}{D} \right]^{2,5} =$			
						74.22			
Коэффициент						$B_1 = \min \left\{ 1,0; \quad 9,45 \frac{D}{L} \sqrt{\frac{D}{100(s - c)}} \right\} =$			
						0.6099			
Обечайка отвечает условиям прочности и устойчивости в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52857.2-2007									
Инв. № подл. 19805						E-107-2376.00.00.000 PP			Лист
									79
	Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата				

Результаты расчёта

Расчётный внутренний диаметр цилиндрической обечайки

$$D_p = D = 2200 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки корпуса

$$s_p = \frac{pD}{2[\sigma]\varphi_p - p} = 0.8091 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия

$$d_p = d + 2c_s = 51.2 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки штуцера

$$s_{1p} = \frac{p(d + 2c_s)}{2[\sigma]_1 \varphi_1 - p} = 0.02152 \text{ мм}$$

Расчётная длина штуцера

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \sqrt{(d + 2c_s)(s_1 - c_s)} \right\} = 50.12 \text{ мм}$$

Отношение допускаемых напряжений штуцера и корпуса

$$\chi_1 = \min \left\{ 1, 0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = 0.875$$

Ширина зоны укрепления, прилегающей к штуцеру

$$L_o = \sqrt{D_p(s - c)} = 369.6 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления, прилегающей к штуцеру

$$l_p = 369.6 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр неукрепляемого отверстия

$$d_{op} = 0,4 \sqrt{D_p(s - c)} = 147.8 \text{ мм}$$

Коэффициент понижения прочности узла врезки штуцера

$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p}(s_1 - c_s)}{l_p} \chi_1 + l_{2p}s_2 \chi_2 + l_{3p}(s_3 - c_s - c_{s1}) \chi_3}{l_p(s - c)} \right\} = 1$$

$$1 + 0,5 \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1 \frac{d + 2c_s}{D_p} \frac{\varphi l_{1p}}{\varphi_1 l_p}$$

Допускаемое давление в пределах пластичности

$$[p]_n = \frac{2K_1(s - c)[\sigma]V}{D_p + (s - c)V} = 7.467 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление для узла врезки штуцера

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_n}{[p]_s} \right)^2}} = 5.588 \text{ МПа}$$

где

$$K_1 = 1$$

Допускаемое осевое усилие

$$[F_x] = [\sigma](s - c)^2 \max [C_1; 1,81] = 9.493e+05 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент вдоль оси X

$$5.14e+07 \text{ Н*мм}$$

Инв. № подл.	19805	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	
Е-107-2376.00.00.000 PP					Лист
					81

$$[M_x] = [\sigma](s - c)^2 \frac{d_c}{4} \max[C_2; 4,9] =$$

Допускаемый изгибающий момент вдоль оси Y

$$[M_y] = [\sigma](s - c)^2 \frac{d_c}{4} \max[C_3; 4,9] =$$

6.027e+07 Н*мм

Условие прочности по давлению

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| \leq 1 =$$

0.0179

Условие прочности по осевой нагрузке

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{[F_z]} \right| \leq 1 =$$

0.001454

Условие прочности по изгибающему моменту

$$\Phi_\delta = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]} \right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]} \right)^2} \leq 1$$

0.01545

Условие прочности при совместном действии нагрузок

$$\sqrt{\left[\max \left(\left| \frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z \right|, \left| \Phi_z \right|, \left| \frac{\Phi_p}{C_4} - 0,2\Phi_z \right| \right) \right]^2 + \Phi_\delta^2} \leq 1$$

0.02476

Максимальное продольное растягивающее напряжение в штуцере

$$\frac{p(d + s_1)}{4(s_1 - c_s)} + \frac{4\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi(d + s_1)^2(s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi(d + s_1)(s_1 - c_s)} \leq [\sigma] =$$

6.101 МПа

Условие устойчивости штуцера

$$\frac{p}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} \leq 1 =$$

0.08959

Коэффициент по п. 6.1.1.а

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} =$$

0.2069

Допускаемая сжимающая продольная сила из условия устойчивости по ГОСТ Р 52857.2-2007

$$[F]_{уст} =$$

9.086e+05 Н

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости по ГОСТ Р 52857.2-2007

$$[M]_{уст} =$$

1.045e+07 Н*мм

Расчётный изгибающий момент вокруг оси X в точке пересечения образующей корпуса с осью штуцера

$$M_{x_{расч}} =$$

-1.738e+05 Н*мм

Расчётный изгибающий момент вокруг оси Y в точке пересечения образующей корпуса с осью штуцера

$$M_{y_{расч}} =$$

9.088e+05 Н*мм

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата
19805				
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата
Е-107-2376.00.00.000 PP				Лист
				82

2.10. 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:Рабочий

Исходные данные

Материал обечайки

09Г2С, Лист

Расчётная температура	T	289	°C
Расчётное давление	P	0.1	МПа
Опорное усилие, действующее на опору	F	2.711e+05	H
Максимальный момент над опорой	M	6.445e+07	H*мм
Расчётное поперечное усилие	Q	1.674e+05	H
Внутренний диаметр обечайки	D	2200	мм
Исполнительная толщина стенки обечайки	s	66	мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии	c1	1.6	мм
Прибавка для компенсации минусового допуска	c2	1.3	мм
Прибавка технологическая	c3	1	мм
Сумма прибавок к толщине стенки обечайки	c	3.9	мм
Расстояние от края родительского элемента до седловой опоры	L_p	635	мм
Длина цилиндрической выступающей части, включая отбортовку	a	2618	мм
Коэффициент прочности сварных швов, расположенных в области опорного узла	φ	1	
Угол охвата седловой опоры, градусов	δ ₁	120	
Ширина седловой опоры	b	300	мм
Допускаемое напряжение для материала обечайки	[σ]	136	МПа
Допускаемое наружное давление для обечайки без колец жесткости или между кольцами по ГОСТ Р 52857.2-2007	[p]	8.424	МПа
Допускаемое осевое усилие из условий устойчивости по ГОСТ Р 52857.2-2007	[F]	5.997e+07	H
Допускаемый изгибающий момент из условий устойчивости по ГОСТ Р 52857.2-2007	[M]	3.299e+10	H·мм
Допускаемая перерезывающая сила по ГОСТ Р 52857.2-2007	[Q]	1.449e+07	H

Результаты расчёта

Проверка несущей способности обечайки без подкладного листа в области опорного узла

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

0.7386

Инов. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инов. №	Подп. и дата
19805				

Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	E-107-2376.00.00.000 PP	Лист
						84

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

Общее осевое мембранное напряжение, действующее в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{mx} = \frac{4M_i}{\pi D^2 (s-c)} = 0.273 \text{ МПа}$$

Коэффициенты, учитывающие влияние ширины пояса опоры:

$$K_{10} = 0.4355$$

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:

$$\beta_1 = -\frac{0.23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0.1864$$

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями

$$\beta_{2,1} = \frac{-\bar{\sigma}_{mx}}{K_2[\sigma]} = -0.001606$$

$$\beta_{2,2} = \left(\frac{pD}{4(s-c)} - \bar{\sigma}_{mx} \right) \frac{1}{K_2[\sigma]} = -0.006816$$

Коэффициент K_1 (принимается меньшее значение из двух):

$$K_1(\beta_1; \beta_{2,1}) = 1.397$$

$$K_1(\beta_1; \beta_{2,2}) = 1.393$$

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_i = K_1 K_2 [\sigma] = 236.9 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0.7[\sigma]_i \sqrt{D(s-c)}(s-c)}{K_{10} K_{12}} = 8.903e+06 \text{ Н}$$

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

$$\beta_1 = -\frac{0.53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0.5\delta_1)} = -1.37$$

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мем-

Инв. № подл.	19805	Подп. и дата	Подп. и дата
Взам. инв.		Инв. №	
Изм.	Лист	№ док.	Подпись
Дата			
Е-107-2376.00.00.000 РР			
Лист			
85			

бранными напряжениями

0

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

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

-0.01042

Коэффициент K_1 (принимается меньшее значение из двух):

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

0.5735

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

0.5677

Предельное напряжение изгиба:

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

96.51 МПа

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

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

5.098e+06 Н

Проверка прочности обечайки в области опорного узла:

Допускаемое усилие на опору:

$$[F]_i = \min \{ [F]_2; [F]_3 \} =$$

5.098e+06 Н

Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в осевом направлении:

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

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

-0.1864

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями

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

-0.001606

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

-0.006816

Коэффициент K_1 (принимается меньшее значение из двух):

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

1.397

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

1.393

Предельное напряжение изгиба:

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

236.9 МПа

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

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

8.903e+06 Н

Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в окружном направлении:

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

-1.37

Инв. № подл. 19805	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями	$\mathfrak{A}_{2,1} = \frac{-\overline{\sigma_{mx}}}{K_2[\sigma]} =$	-0.001606
					$\mathfrak{A}_{2,2} = \left(\frac{pD}{4(s_{\varphi} - c)} - \overline{\sigma_{mx}} \right) \frac{1}{K_2[\sigma]} =$	-0.006816	
					Коэффициент K_1 (принимается меньшее значение из двух): $K_1(\mathfrak{A}_1; \mathfrak{A}_{2,1}) =$ $K_1(\mathfrak{A}_1; \mathfrak{A}_{2,2}) =$	1.397 1.393	
Инв. № подл. 19805	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата	Предельное напряжение изгиба: $[\sigma]_i = K_1 K_2 [\sigma] =$	236.9 МПа	
					Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении: $[F]_2 = \frac{0.7[\sigma]_2 \sqrt{D(s_{\varphi} - c)(s_{\varphi} - c)}}{K_{10} K_{12}} =$	8.903e+06 Н	
					Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в окружном направлении: Коэффициент, представляющий отношение местных мембранных напряжений к местным напряжениям изгиба: -1.37		
					E-107-2376.00.00.000 PP		
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	86		

2.11. 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:Рабочий

Исходные данные

Материал обечайки

09Г2С, Лист

Расчётная температура	T	289	°C
Расчётное давление	P	0.1	МПа
Опорное усилие, действующее на опору	F	2.97e+05	H
Максимальный момент над опорой	M	7.889e+07	H*мм
Расчётное поперечное усилие	Q	1.781e+05	H
Внутренний диаметр обечайки	D	2200	мм
Исполнительная толщина стенки обечайки	s	66	мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии	c1	1.6	мм
Прибавка для компенсации минусового допуска	c2	1.3	мм
Прибавка технологическая	c3	1	мм
Сумма прибавок к толщине стенки обечайки	c	3.9	мм
Расстояние от края родительского элемента до седловой опоры	L_p	3435	мм
Длина цилиндрической выступающей части, включая отбортовку	a	2748	мм
Коэффициент прочности сварных швов, расположенных в области опорного узла	φ	1	
Угол охвата седловой опоры, градусов	δ ₁	120	
Ширина седловой опоры	b	300	мм
Допускаемое напряжение для материала обечайки	[σ]	136	МПа
Допускаемое наружное давление для обечайки без колец жесткости или между кольцами по ГОСТ Р 52857.2-2007	[p]	8.424	МПа
Допускаемое осевое усилие из условий устойчивости по ГОСТ Р 52857.2-2007	[F]	5.997e+07	H
Допускаемый изгибающий момент из условий устойчивости по ГОСТ Р 52857.2-2007	[M]	3.299e+10	H·мм
Допускаемая перерезывающая сила по ГОСТ Р 52857.2-2007	[Q]	1.449e+07	H

Результаты расчёта

Проверка несущей способности обечайки без подкладного листа в области опорного узла

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

0.7386

Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	E-107-2376.00.00.000 PP	Лист
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		88
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		

бранными напряжениями

0

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

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

-0.01042

Коэффициент K_1 (принимается меньшее значение из двух):

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

0.5749

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

0.5691

Предельное напряжение изгиба:

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

96.75 МПа

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

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

5.095e+06 Н

Проверка прочности обечайки в области опорного узла:

Допускаемое усилие на опору:

$$[F]_i = \min \{ [F]_2; [F]_3 \} =$$

5.095e+06 Н

Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в осевом направлении:

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

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

-0.1864

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями

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

-0.001966

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

-0.007176

Коэффициент K_1 (принимается меньшее значение из двух):

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

1.397

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

1.393

Предельное напряжение изгиба:

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

236.8 МПа

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

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

8.902e+06 Н

Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в окружном направлении:

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

-1.366

Инв. № подл. 19805	Подп. и дата		Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мем- бранными напряжениями		
			$\mathfrak{A}_{2,1} = \frac{-\overline{\sigma_{mx}}}{K_2[\sigma]} =$		
			-0.001966		
Инв. №	Подп. и дата		$\mathfrak{A}_{2,2} = \left(\frac{pD}{4(s_{\varphi} - c)} - \overline{\sigma_{mx}} \right) \frac{1}{K_2[\sigma]} =$		
			-0.007176		
			Коэффициент K_1 (принимается меньшее значение из двух):		
Взам. инв.	Инв. №		$K_1(\mathfrak{A}_1; \mathfrak{A}_{2,1}) =$		
			1.397		
			$K_1(\mathfrak{A}_1; \mathfrak{A}_{2,2}) =$		
			1.393		
			Предельное напряжение изгиба:		
			$[\sigma]_i = K_1 K_2 [\sigma] =$		
			236.8 МПа		
			Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направле- нии:		
			$[F]_2 = \frac{0.7[\sigma]_2 \sqrt{D(s_{\varphi} - c)(s_{\varphi} - c)}}{K_{10} K_{12}} =$		
			8.902e+06 Н		
			Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в окружном направлении:		
			Коэффициент, представляющий отношение местных мембран- ных напряжений к местным напряжениям изгиба:		
			-1.366		

2.12. Цилиндрический переход выпускной камеры Двн 2188

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: Рабочий

Исходные данные

Материал обечайки	08X18H10T, Лист		
Расчётная температура	T	450	°C
Расчётное давление	P	0.102	МПа
Расчётный изгибающий момент	M	2.389e+07	Н·мм
Расчётное поперечное усилие	Q	2.484e+04	Н
Внутренний диаметр обечайки	D	2188	мм
Фактическая длина обечайки	Lact	112	мм
Расчётная длина обечайки	L	5212	мм
Толщина стенки обечайки	S	12	мм
Прибавка на коррозию	c ₁	0	мм
Прибавка – минусовый допуск	c ₂	0.8	мм
Прибавка технологическая	c ₃	0	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки	c	0.8	мм
Допускаемое напряжение	[σ]	99	МПа
Модуль продольной упругости	E	1.74e+05	МПа

Результаты расчёта

Допускаемое наружное давление

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_n}{[p]_f}\right)^2}} = 0.1179 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условий прочности

$$[p]_n = \frac{2[\sigma](s - c)}{D + (s - c)} = 1.008 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условий устойчивости в пределах упругости

$$[p]_f = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E D}{n_y \cdot B_1 L} \left[\frac{100(s - c)}{D} \right]^{2,5} = 0.1187$$

Коэффициент

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

Допускаемый изгибающий момент из условий устойчивости в пределах

Инв. № подл.	19805	Подп. и дата		Взам. инв.		Инв. №		Подп. и дата	
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	E-107-2376.00.00.000 PP				Лист
									92

упругости

1.261e+10
Н·мм

$$[M]_{\text{E}} = \frac{89 \cdot 10^{-6} E}{n_y} D^3 \left[\frac{100(S-C)}{D} \right]^{2,5} =$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности

$$[M]_{\text{н}} = \frac{\pi D(D+S-C)(S-C)[\sigma]}{4} =$$

4.19e+09
Н·мм

Допускаемый изгибающий момент

$$[M] = \frac{[M]_{\text{н}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\text{н}}}{[M]_{\text{E}}} \right)^2}} =$$

3.977e+09
Н·мм

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости в пределах упругости

$$[Q]_{\text{E}} = \frac{2.4E(S-C)^2}{n_y} \left[0.18 + 3.3 \frac{D(S-C)}{L^2} \right] =$$

3.929e+06 Н

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности

$$[Q]_{\text{н}} = \frac{\pi D(S-C)[\sigma]}{4} =$$

1.905e+06 Н

Допускаемое перерезывающее усилие

$$[Q] = \frac{[Q]_{\text{н}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\text{н}}}{[Q]_{\text{E}}} \right)^2}} =$$

1.714e+06 Н

Условие устойчивости (п.5.3.7 ГОСТ Р 52857.2-2007)

$$\frac{p}{[p]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 =$$

0.8716 < 1

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

Инв. № подл. 19805	Подп. и дата				Инв. №	Взам. инв.	Подп. и дата	$\frac{P}{[P]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 = 0.8716 < 1$
								Обечайка отвечает условиям прочности и устойчивости в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52857.2-2007
								Е-107-2376.00.00.000 РР
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата				Лист
								93

2.13. Коническая обечайка выпускной 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: Неотбортованный конический переход, работающий под действием наружного давления Кососимметричный конический переход
Режим: Рабочий

Исходные данные

Материал конической обечайки или днища 08X18H10T, Лист
Материал большего цилиндрического перехода 08X18H10T, Лист
Материал меньшего цилиндрического перехода 08X18H10T, Лист

Расчётная температура	T	450	°C
Расчётное давление	P	0.102	МПа
Расчётная осевая сила	F	0	H
Расчётный изгибающий момент	M	2.12e+07	H·мм
Внутренний диаметр большей обечайки, перехода или днища	D	2188	мм
Внутренний диаметр меньшей цилиндрической обечайки	D ₁	1000	мм
Угол наклона кососимметричной обечайки	α_1	34	град
Исполнительная толщина стенки конической обечайки (днища)	S _к	8	мм
Исполнительная толщина стенки большей цилиндрической обечайки	S _б	12	мм
Исполнительная толщина стенки меньшей цилиндрической обечайки	S _м	8	мм
Прибавка к расчётной толщине конической обечайки (днища) для компенсации коррозии и эрозии	C _{к_1}	0	мм
Прибавка к расчётной толщине конической обечайки (днища) для компенсации минусового допуска	C _{к_2}	0.8	мм
Прибавка технологическая к расчётной толщине конической обечайки (днища)	C _{к_3}	0	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине конической обечайки (днища)	C _к	0.8	мм
Прибавка к расчётной толщине большей цилиндрической обечайки(перехода) для компенсации коррозии и эрозии	C _{2б_1}	0	мм
Прибавка к расчётной толщине большей цилиндрической обечайки(перехода) для компенсации минусового допуска	C _{2б_2}	0.8	мм
Прибавка технологическая к расчётной толщине большей цилиндрической обечайки (перехода)	C _{2б_3}	0	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине большей цилиндрической обечайки (перехода)	C _{2б}	0.8	мм
Прибавка к расчётной толщине меньшей цилиндрической обечайки(перехода) для компенсации коррозии и эрозии	C _{2м_1}	0	мм
Прибавка к расчётной толщине меньшей цилиндрической обечайки(перехода) для компенсации минусового допуска	C _{2м_2}	0.8	мм

Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	E-107-2376.00.00.000 PP	Лист
						94

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_n}{[p]_F}\right)^2}} =$$

- допускаемое давление из условия прочности:

$$[p]_n = \frac{2[\sigma](s_n - c)}{\frac{D_n}{\cos \alpha_1} + (s_n - c)} = 0.5579 \text{ МПа}$$

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

$$[p]_F = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E}{n_y \cdot B_1} \frac{D_F}{l_F} \left[\frac{100(s_n - c)}{D_F} \right]^{2,5} = 0.2356 \text{ МПа}$$

- эффективный диаметр конической обечайки при действии наружного давления:

$$D_F = \max \left\{ \frac{D + D_1}{2 \cos \alpha_1}; \frac{D}{\cos \alpha_1} - 0,31(D + D_1) \sqrt{\frac{D + D_1}{s_n - c}} \cdot \operatorname{tg} \alpha_1 \right\} = 1932$$

- эффективная длина конической обечайки при действии наружного давления:

$$l_F = \frac{D - D_1}{2 \sin \alpha_1} = 1048 \text{ мм}$$

- коэффициент B_1 :

$$B_1 = \min \left\{ 1,0; 9,45 \frac{D_F}{l_F} \sqrt{\frac{D_F}{100(s_n - c)}} \right\} = 1$$

Допускаемая осевая сжимающая сила:

где:

$$[F] = \min \left\{ \frac{[F]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_n}{[F]_F}\right)^2}}; \frac{D_1}{D_F} [F]_n \right\} = 1.886\text{e}+06 \text{ Н}$$

- допускаемая осевая сила из условия прочности:

$$[F]_n = \pi D_F (s_n - c) [\sigma] \cos \alpha_1 = 1.886\text{e}+06 \text{ Н}$$

- допускаемая осевая сила из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[F]_F = \frac{310 \cdot 10^{-6} E}{n_y} (D_F \cos \alpha_1)^2 \cdot \left[\frac{100(s_n - c)}{D_F} \right]^{2,5} = 4.299\text{e}+06 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности:

$$[M] = \frac{D_1}{4} \pi D_1 (s_n - c) \varphi_T [\sigma] \cos \alpha_1 = 4.791\text{e}+08 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости:

Инв. № подл.	19805	Подп. и дата		Инв. №		Подп. и дата	
Взам. инв.							
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	Е-107-2376.00.00.000 РР		
					Лист		
					96		

где:

$$2.106\text{e}+09 \text{ Н}\cdot\text{мм}$$

$$[M] = \frac{[M]_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\text{п}}}{[M]_{\text{в}}}\right)^2}} =$$

- допускаемый изгибающий момент из условия прочности:

$$[M]_{\text{п}} = \frac{D_{\text{ф}}}{4} \pi D_{\text{ф}} (s_{\text{к}} - c) [\sigma] \cos \alpha_1 = 2.896\text{e}+09 \text{ Н}\cdot\text{мм}$$

- допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_{\text{в}} = \frac{D_{\text{ф}}}{3.5} \cdot \frac{310 \cdot 10^{-6} E}{n_y} (D_{\text{ф}} \cos \alpha_1)^2 \cdot \left[\frac{100(s_{\text{к}} - c)}{D_{\text{ф}}} \right]^{2.5} = 3.068\text{e}+09 \text{ Н}\cdot\text{мм}$$

- эффективный диаметр конической обечайки при осевом сжатии и изгибе:

$$D_{\text{ф}} = \frac{0,9D + 0,1D_1}{\cos \alpha_1} = 2498 \text{ мм}$$

- коэффициент запаса устойчивости:

$$n_y = 2.4$$

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

где:

$$[p] = \frac{2[\sigma]_2 \varphi_p (s_2 - c)}{D \beta_1 + (s_2 - c)} = 0.6529 \text{ МПа}$$

- коэффициент формы:

$$\beta_1 = \max\{0.5; \beta\} = 1.547$$

- коэффициент β :

$$\beta = 0,4 \sqrt{\frac{D}{s_2 - c}} \frac{\text{tg } \alpha_1}{1 + \sqrt{\frac{1 + \chi \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)^2}{2 \cos \alpha_1} \chi \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)}} - 0,25 = 1.547$$

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

где:

$$[F] = \pi D \frac{(s_2 - c) [\sigma]_2 \varphi_{\tau}}{\beta_5} = 1.775\text{e}+06 \text{ Н}$$

- коэффициент β_5 :

$$\beta_5 = \max\{1.0; (2\beta + 1.2)\} = 4.294$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности переходной части:

$$[M] = \frac{D}{4} [F] = 4.791\text{e}+08 \text{ Н}\cdot\text{мм}$$

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

Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	E-107-2376.00.00.000 PP	Лист
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		97
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		

где:

$$[\sigma]_{\text{нн}} = \frac{2[\sigma]_2 \varphi_p (s_2 - c)}{D \beta_4 + (s_2 - c)} = 0.7048 \text{ МПа}$$

- общий коэффициент формы для переходной части:

$$\beta_4 = \max \{1.0; \beta_x\} = 2.015$$

- коэффициент β_x :

$$\beta_x = \begin{cases} \beta + 0.75 & \text{при } x \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)^2 \geq 1 \\ 0.4 \sqrt{\frac{D}{s_2 - c}} \times \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{x \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right) \sqrt{\frac{s_1 - c}{(s_2 - c) \cos \alpha_1}} + \sqrt{\frac{1 + x \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)^2}{2}}} + & \\ + 0.5 & \text{при } x \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)^2 < 1 \end{cases} = 2.015$$

- коэффициент β :

$$\beta = 0.4 \sqrt{\frac{D}{s_2 - c}} \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{1 + \sqrt{\frac{1 + x \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)^2}{2 \cos \alpha_1}} x \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right)} - 0.25 = 1.265$$

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

где:

$$[F] = \pi D \frac{(s_2 - c) [\sigma]_2 \cdot \varphi_p}{\beta_8} = 7.389 \text{e}+05 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности переходной части:

$$[M] = \frac{D}{4} [F] = 1.847 \text{e}+08 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

Условие устойчивости

$$-\frac{p}{[p]} - \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} = 0.4799 < 1$$

Условие прочности большей переходной части

$$\left| \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} \right| + \frac{M}{[M]} = 0.1781 < 1$$

Условие прочности меньшей переходной части

$$\left| \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} \right| + \frac{M}{[M]} = 0.2595 < 1$$

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

Инв. № подл. 19805	Подп. и дата					Инв. №	Подп. и дата																						
	Взам. инв.						Подп. и дата																						
Изм.						Лист						№ док.						Подпись						Дата					
Е-107-2376.00.00.000 РР												Лист																	
												98																	

прочности переходной части:											
где:											
$[F] = \pi D \frac{(s_2 - c)[\sigma]_2 \cdot \varphi_p}{\beta_8} =$											
7.389e+05 Н											
Допускаемый изгибающий момент из условия прочности переходной части:											
$[M] = \frac{D}{4}[F] =$											
1.847e+08 Н·мм											
Условие устойчивости											
$-\frac{p}{[p]} - \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} =$											
0.4799< 1											
Условие прочности большей переходной части											
$\left \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} \right + \frac{M}{[M]} =$											
0.1781< 1											
Условие прочности меньшей переходной части											
$\left \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} \right + \frac{M}{[M]} =$											
0.2595< 1											
Конический переход (пологое коническое днище) отвечает условиям прочности и устойчивости в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52857.2-2007											

$$[p] = \frac{[p]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\pi}}{[p]_{\beta}} \right)^2}} = 0.1913 \text{ МПа}$$

где

$$K_1 = 1$$

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
19805				
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата
Е-107-2376.00.00.000 РР				Лист
				101

2.15. Цилиндрический переход выпускной камеры Ду 1100

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: Рабочий

Исходные данные

Материал обечайки

08X18H10T,
Лист

Расчётная температура

T 450 °C

Расчётное давление

P 0.102 MПа

Расчётный изгибающий момент

M	4.411e+04	H·MM
---	-----------	------

Расчётное поперечное усилие

Q 802 H

Внутренний диаметр обечайки

D 1100 MM

Фактическая длина обечайки

Lact 110 MM

Расчётная длина обечайки

L 357.1 MM

Толщина стенки обечайки

S 8 MM

Прибавка на коррозию

c_1	0	MM
-------	---	----

Прибавка – минусовый допуск

c_2	0.8	MM
-------	-----	----

Прибавка технологическая

$$c_3 = 0 \quad \text{MM}$$

Сумма прибавок к расчётной толщине стенки

c 0.8 MM

Допускаемое напряжение

[σ] 99 МПа

Модуль продольной упругости

E	1.74e+05	МПа
---	----------	-----

Результаты расчёта

Допускаемое наружное давление

$$[p] = \frac{[p]_{\text{H}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\text{H}}}{[p]_{\text{E}}} \right)^2}} = 1.006 \text{ MПа}$$

Допускаемое наружное давление из условий прочности

$$[\rho]_n = \frac{2[\sigma](s-c)}{D+(s-c)} = 1.288 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условий устойчивости в пределах упругости

$$[\mathcal{P}]_E = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E}{n_v \cdot B_1} \frac{D}{L} \left[\frac{100(s-c)}{D} \right]^{2,5} = \quad 1.61$$

Коэффициент

1

Подп. и дата		Прибавка технологическая	c_3	0	мм
		Сумма прибавок к расчётной толщине стенки	c	0.8	мм
Инв. №		Допускаемое напряжение	$[\sigma]$	99	МПа
		Модуль продольной упругости	E	1.74e+05	МПа
Результаты расчёта					
		Допускаемое наружное давление	$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_n}{[p]_f}\right)^2}} =$		
			1.006 МПа		
		Допускаемое наружное давление из условий прочности	$[p]_n = \frac{2[\sigma](s - c)}{D + (s - c)} =$		
			1.288 МПа		
		Допускаемое наружное давление из условий устойчивости в пределах упругости	$[p]_f = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E D}{n_y \cdot B_1} \left[\frac{100(s - c)}{D} \right]^{2,5} =$		
			1.61		
		Коэффициент	1		
Инв. № подл.	19805	<div>E-107-2376.00.00.000 PP</div>			
Подп. и дата					
Взам. инв.					
Инв. №					
		Изм.	Лист	№ док.	Подпись
					Дата

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

Допускаемый изгибающий момент из условий устойчивости в пределах упругости

$$[M]_{\text{Э}} = \frac{89 \cdot 10^{-6} E}{n_y} D^3 \left[\frac{100(S-C)}{D} \right]^{2,5} = 2.963\text{e}+09 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности

$$[M]_{\text{П}} = \frac{\pi D(D+S-C)(S-C)[\sigma]}{4} = 6.818\text{e}+08 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

Допускаемый изгибающий момент

$$[M] = \frac{[M]_{\text{П}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\text{П}}}{[M]_{\text{Э}}} \right)^2}} = 6.645\text{e}+08 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости в пределах упругости

$$[Q]_{\text{Э}} = \frac{2.4E(S-C)^2}{n_y} \left[0.18 + 3.3 \frac{D(S-C)}{L^2} \right] = 1.624\text{e}+06 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности

$$[Q]_{\text{П}} = \frac{\pi D(S-C)[\sigma]}{4} = 6.158\text{e}+05 \text{ Н}$$

Допускаемое перерезывающее усилие

$$[Q] = \frac{[Q]_{\text{П}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\text{П}}}{[Q]_{\text{Э}}} \right)^2}} = 5.758\text{e}+05 \text{ Н}$$

Условие устойчивости (п.5.3.7 ГОСТ Р 52857.2-2007)

$$\frac{P}{[P]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0.1015 < 1$$

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

Инв. № подл. 19805	Подп. и дата				Инв. №	Подп. и дата				5.758e+05 Н
Условие устойчивости (п.5.3.7 ГОСТ Р 52857.2-2007)					$\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\text{н}}}{[Q]_{\text{е}}}\right)^4}$					0.1015< 1
$\frac{P}{[P]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 =$										
Обечайка отвечает условиям прочности и устойчивости в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52857.2-2007										
										Лист 103
					E-107-2376.00.00.000 PP					
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата						

2.16. Расчет линейного расширения от неподвижной опоры

2.16.1. Удлинение аппарата $\Delta L1$ от неподвижной опоры при максимальной температуре

Исходные данные

Материал обечайки входной камеры	09Г2С		
Расчётная температура	T	450	°C
Длина обечайки входной камеры	Lк1	2072	мм
Коэффициент линейного расширения	$\alpha 1$	13,7E-6	1/°C
Материал обечайки корпуса	09Г2С		
Длина обечайки корпуса	L к2	778	мм
Расчётная температура	T	275	°C
Коэффициент линейного расширения	$\alpha 2$	12,7E-6	1/°C

Результаты расчёта

Удлинение входной камеры	$\Delta L_{к1} = L_{к1} * \alpha 1 * (T - T_0)$	12,2	мм
Удлинение корпуса	$\Delta L_{к2} = L_{к2} * \alpha 2 * (T - T_0)$	2,5	мм
Общее удлинение	$\Delta L1 = \Delta L_{к1} + \Delta L_{к2}$	14,7	мм

2.16.2. Удлинение аппарата $\Delta L2$ от неподвижной опоры при максимальной температуре

Исходные данные

Материал обечайки выходной камеры	08X18H10T		
Расчётная температура	T	450	°C
Длина обечайки входной камеры	Lк1	2072	мм
Коэффициент линейного расширения	$\alpha 1$	18E-6	1/°C
Материал обечайки корпуса	09Г2С		
Длина обечайки корпуса	L к2	3578	мм
Расчётная температура	T	275	°C
Коэффициент линейного расширения	$\alpha 2$	12,7E-6	1/°C

Результаты расчёта

Удлинение выходной камеры	$\Delta L_{к1} = L_{к1} * \alpha 1 * (T - T_0)$	16	мм
Удлинение корпуса	$\Delta L_{к2} = L_{к2} * \alpha 2 * (T - T_0)$	11,6	мм
Общее удлинение	$\Delta L2 = \Delta L_{к1} + \Delta L_{к2}$	27,6	мм

Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	Е-107-2376.00.00.000 РР	Лист
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		104
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата
19805				

Материал обечайки входной камеры	09Г2С		
Расчётная температура	T	минус 46	°C
Длина обечайки входной камеры	Lк1	2072	мм
Коэффициент линейного расширения	$\alpha 1$	11,6E-6	1/°C
Материал обечайки корпуса	09Г2С		
Длина обечайки корпуса	L к2	778	мм
Расчётная температура	T	минус 46	°C
Коэффициент линейного расширения	$\alpha 2$	11,6E-6	1/°C

Удлинение входной камеры	$\Delta L_{\kappa 1} = L_{\kappa 1} * \alpha_1 * (T - T_0)$	- 1,59	мм
Удлинение корпуса	$\Delta L_{\kappa 2} = L_{\kappa 2} * \alpha_2 * (T - T_0)$	- 0,595	мм
Общее удлинение	$\Delta L_1 = \Delta L_{\kappa 1} + \Delta L_{\kappa 2}$	- 2,2	мм

Исходные данные

Материал обечайки выходной камеры	08X18H10T		
Расчётная температура	T	минус 46	°C
Длина обечайки входной камеры	Lк1	2072	мм
Коэффициент линейного расширения	α 1	18E-6	1/°C
Материал обечайки корпуса	09Г2С		
Длина обечайки корпуса	L к2	3578	мм
Расчётная температура	T	минус 46	°C
Коэффициент линейного расширения	α 2	12,7E-6	1/°C

Удлинение выходной камеры	$\Delta L_{k1} = L_{k1} * \alpha_1 * (T - T_0)$	-2,27	мм
Удлинение корпуса	$\Delta L_{k2} = L_{k2} * \alpha_2 * (T - T_0)$	-2,7	мм
Общее удлинение	$\Delta L_2 = \Delta L_{k1} + \Delta L_{k2}$	-5	мм

2.17. Лист регистрации изменений

[illegible]

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв.	Инв. №	Подп. и дата
1805				

					E-107-2376.00.00.000 PP	Лист
						106
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		