АО «ВНИИНЕФТЕМАШ»

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

2-й межполочный охладитель
поз. Е-106

Расчеты

Е-106-2375.00.00.000 РР

Москва
2016 г.

Подп. и дата	
Инв. №	
Взам. инв.	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	19804

СОДЕРЖАНИЕ

1. Расчет на внутреннее давление 4
1.1. Конический переход входной камеры 4
1.2. Цилиндрический переход 9
1.3. Кожух 11
1.4. Укрепление отверстия В2 Ду 100 13
1.5. Укрепление отверстий А2 Ду 80 16
1.6. Укрепление отверстий U1, U2 19
1.7. Труба 57×6 22
1.8. Цилиндрическая обечайка выпускной камеры 23
1.9. Укрепление отверстия люка М1 25
1.10. Конический переход выпускной камеры 27
1.11. Элементы теплообменных аппаратов 32
1.12. Неподвижная опора 40
1.13. Подвижная опора 44
2. Расчет на наружное давление 48
2.1. Конический переход входной камеры 48
2.2. Цилиндрический переход 54
2.3. Кожух 56
2.4. Укрепление отверстий В2 Ду 100 58
2.5. Укрепление отверстий А2 Ду 80 61
2.6. Укрепление отверстий U1, U2 64
2.7. Труба 57×6 67
2.8. Цилиндрическая обечайка выпускной камеры 68
2.9. Укрепление отверстия люка М1 70
2.10. Конический переход выпускной камеры 72
2.11. Неподвижная опора 77
2.12. Подвижная опора 81
3. Расчет температурного удлинения② 85
3.1. При максимальной температуре② 85
3.2. При минимальной температуре② 86
Лист регистрации изменений 87

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»).

1. Расчет на внутреннее давление

1.1. Конический переход 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	08Х18Н10Т, Лист①
Материал большего цилиндрического перехода	08Х18Н10Т, Лист①
Материал меньшего цилиндрического перехода	08Х18Н10Т, Лист①

Расчётная температура	T	485	ºС
Расчётное давление	P	0.02	МПа
Расчётная осевая сила	F	0	Н
Расчётный изгибающий момент	M	7.412e+06	Н·мм
Внутренний диаметр большей обечайки, перехода или днища	D	1700	мм
Внутренний диаметр меньшей цилиндрической обечайки	D_1	1020	мм
Угол наклона кососимметричной обечайки	α_1	33.18	град
Исполнительная толщина стенки конической обечайки (днища)	$S_к$	8	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	$C_{к_1}$	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 цилиндрической обечайки (перехода)	$C_{2м_3}$	1	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине меньшей цилиндрической обечайки (перехода)	$C_{2м}$	3.8	мм
Коэффициент прочности продольного сварного шва	$\varphi_р$	1	
Коэффициент прочности кольцевого сварного шва	$\varphi_т$	1	
Допускаемое напряжение для материала конической обечайки (днища)	$[\sigma]$	96.5	МПа
Допускаемое напряжение для материала большей цилиндрической обечайки (перехода)	$[\sigma]_2$	96.5	МПа
Допускаемое напряжение для материала меньшей цилиндрической обечайки (перехода)	$[\sigma]_2$	96.5	МПа
Модуль продольной упругости материала конической обечайки (днища)	E	1.69e+05	МПа

Результаты расчёта

Расчётная длина переходной части конической обечайки:

$$a_1 = 0{,}7\sqrt{\frac{D}{\cos\alpha_1}(s_1 - c)} =$$ 64.65 мм

Расчётная длина переходной части конической обечайки у меньшего конца:

$$a_1 = \sqrt{\frac{D}{\cos\alpha_1}(s_1 - c)} =$$ 50.08 мм

Расчётная длина переходной части цилиндрической обечайки:

$$a_2 = 0{,}7\sqrt{D(s_2 - c)} =$$ 59.15 мм

Расчётная длина цилиндрической обечайки или штуцера у меньшего конца:

$$a_2 = 1{,}25\sqrt{D(s_2 - c)} =$$ 81.82 мм

Расчётный диаметр гладкой конической обечайки без тороидального перехода:

$$D_к = D - 1.4a_1 \sin\alpha_1 =$$ 1650 мм

Эффективные толщины переходных участков:

- конической части соединения без тороидального перехода:

$$s_{1E} = \max\left\{\frac{a_{1D}}{a_1}s_1; s_к\right\} =$$ 8 мм

- цилиндрической части соединения без тороидального перехода:

$$s_{2E} = \max\left\{\frac{a_{2D}}{a_2}s_2; s\right\} =$$ 8 мм

Допускаемое внутреннее избыточное давление для конической обечайки или днища: 0.4102 МПа

$$[p]_{ex} = \frac{2[\sigma]\varphi_p(s_x - c)}{\frac{D_x}{\cos\alpha_i} + (s_x - c)} =$$

Допускаемая растягивающая сила:

$$[F] = \pi D_1 (s_x - c)\varphi_T [\sigma]\cos\alpha_1 =$$ 2.08e+06 Н

Допускаемая осевая сжимающая сила:

где:

$$[F] = \min\left\{\frac{[F]_{\text{п}}}{\sqrt{1+\left(\frac{[F]_{\text{п}}}{[F]_E}\right)^2}}; \frac{D_1}{D_F}[F]_{\text{п}}\right\} =$$ 1.072e+06 Н

- допускаемая осевая сила из условия прочности:

$$[F]_x = \pi D_F (s_x - c)[\sigma]\cos\alpha_1 =$$ 1.104e+06 Н

- допускаемая осевая сила из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[F]_E = \frac{310\cdot 10^{-6} E}{n_y}(D_F\cos\alpha_1)^2 \cdot \left[\frac{100(s_x - c)}{D_F}\right]^{2,5} =$$ 1.251e+06 Н

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности:

$$[M] = \frac{D_1}{4}\pi D_1 (s_x - c)\varphi_T [\sigma]\cos\alpha_1 =$$ 2.86e+08 Н·мм

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости:

где:

$$[M] = \frac{[M]_{\text{п}}}{\sqrt{1+\left(\frac{[M]_{\text{п}}}{[M]_E}\right)^2}} =$$ 5.75e+08 Н·мм

- допускаемый изгибающий момент из условия прочности:

$$[M]_x = \frac{D_F}{4}\pi D_F (s_x - c)[\sigma]\cos\alpha_1 =$$ 1.015e+09 Н·мм

- допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_E = \frac{D_F}{3.5}\cdot\frac{310\cdot 10^{-6} E}{n_y}(D_F\cos\alpha_1)^2 \cdot \left[\frac{100(s_x - c)}{D_F}\right]^{2,5} =$$ 6.978e+08 Н·мм

- эффективный диаметр конической обечайки при осевом сжатии и изгибе:

$$D_F = \frac{0,9D + 0,1D_1}{\cos\alpha_1} =$$ 1952 мм

- коэффициент запаса устойчивости:

$$n_y =$$ 2.4

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

где:

$$[p] = \frac{2[\sigma]_2 \varphi_p (s_2 - c)}{D\beta_1 + (s_2 - c)} =$$ 0.2104 МПа

- коэффициент формы:

$$\beta_1 = \max\{0.5; \beta\} =$$ 2.264

- коэффициент β:

$$\beta = 0{,}4\sqrt{\frac{D}{s_2 - c}} \frac{\operatorname{tg}\ \alpha_1}{1 + \sqrt{\frac{1 + \chi\left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)^2}{2\cos\ \alpha_1}}\ \chi\left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)} - 0{,}25 =$$ 2.264

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

$$[F] = \pi D \frac{(s_2 - c)[\sigma]_2 \varphi_г}{\beta_5} =$$ 3.779e+05 Н

- коэффициент β_5:

$$\beta_5 = \max\{1.0; (2\beta + 1.2)\} =$$ 5.728

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности переходной части:

$$[M] = \frac{D}{4}[F] =$$ 2.86e+08 Н·мм

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

$$[p]_{кн} = \frac{2[\sigma]_2 \varphi_p (s_2 - c)}{D\beta_4 + (s_2 - c)} =$$ 0.3242 МПа

- общий коэффициент формы для переходной части:

$$\beta_4 = \max\{1.0; \beta_н\} =$$ 2.447

- коэффициент $\beta_н$:

$$\beta_н = \left\{ \begin{array}{ll} \beta + 0.75 & - при \quad x\left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)^2 \geq 1 \\ 0{,}4\sqrt{\frac{D}{s_2 - c}} \times & \\ \times \frac{tg\alpha_1}{x\left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)\sqrt{\frac{s_1 - c}{(s_2 - c)\cos\alpha_1}} + \sqrt{\frac{1 + x\left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)^2}{2}}} + & \\ + 0{,}5 & - при \quad x\left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)^2 < 1 \end{array} \right\} =$$ 2.447

- коэффициент β: 1.697

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

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

$$[F] = \pi D \frac{(s_2 - c)[\sigma]_2 \cdot \varphi_p}{\beta_8} =$$ 3.335e+05 Н

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности переходной части:

$$[M] = \frac{D}{4}[F] =$$ 8.504e+07 Н·мм

Условие устойчивости

$$-\frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} =$$ 0.01289< 1

Условие прочности большей переходной части

$$\left|\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]}\right| + \frac{M}{[M]} =$$ 0.1412< 1

Условие прочности меньшей переходной части

$$\left|\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]}\right| + \frac{M}{[M]} =$$ 0.1489< 1

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

1.2. Цилиндрический переход

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 08Х18Н10Т, Лист①

Расчётная температура	T	485	ºC
Расчётное давление в сосуде	P	0.02	МПа
Расчётный изгибающий момент	M	8.664e+06	Н·мм
Расчётное поперечное усилие	Q	1.448e+04	Н
Внутренний диаметр обечайки	D	1700	мм
Фактическая длина обечайки	Lact	110	мм
Расчётная длина обечайки	L	530	мм
Толщина стенки обечайки	S	8	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	$[\sigma]$	96.5	МПа
Модуль продольной упругости	E	1.69e+05	МПа

Результаты расчёта

Расчётная толщина стенки обечайки от действия давления

$$S_p = \frac{pD}{2[\sigma]\varphi_p - p} =$$ 0.1762 мм

Расчётная толщина стенки обечайки от действия давления с учетом прибавки

$$S \geq S_p + C =$$ 3.976 мм

Допускаемое внутреннее давление

$$[p] = \frac{2[\sigma]\varphi_p(S-C)}{D+(S-C)} =$$ 0.4756 МПа

Допускаемый изгибающий момент из условий устойчивости в пределах упругости

$$[M]_E = \frac{89\cdot 10^{-6}E}{n_y}D^3\left[\frac{100(S-C)}{D}\right]^{2,5} =$$ 9.296e+08 Н·мм

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности

$$[M]_п = \frac{\pi D(D+S-C)(S-C)[\sigma]}{4} =$$ 9.222e+08 Н·мм

Допускаемый изгибающий момент

$$[M] = \frac{[M]_п}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_п}{[M]_Е}\right)^2}} =$$

6.547e+08 Н·мм

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости в пределах упругости

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

5.366e+05 Н

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности

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

5.411e+05 Н

Допускаемое перерезывающее усилие

$$[Q] = \frac{[Q]_п}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_п}{[Q]_Е}\right)^2}} =$$

3.81e+05 Н

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

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

0.01468< 1

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

1.3. 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 внутреннего давления - изгибающего момента
Режим: Рабочий

Исходные данные

Материал обечайки 09Г2С, Лист

Расчётная температура	T	289	ºC
Расчётное давление в сосуде	P	7.34	МПа
Расчётный изгибающий момент	M	1.66e+08	Н·мм
Расчётное поперечное усилие	Q	1.772e+05	Н
Внутренний диаметр обечайки	D	2000	мм
Фактическая длина обечайки	Lact	3300	мм
Расчётная длина обечайки	L	5308	мм
Толщина стенки обечайки	S	60	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	$[\sigma]$	136	МПа
Модуль продольной упругости	E	1.72e+05	МПа

Результаты расчёта

Расчётная толщина стенки обечайки от действия давления

$$S_p = \frac{pD}{2[\sigma]\varphi_p - p} =$$ 55.47 мм

Расчётная толщина стенки обечайки от действия давления с учетом прибавки

$$S \geq S_p + C =$$ 59.37 мм

Допускаемое внутреннее давление

$$[p] = \frac{2[\sigma]\varphi_p(S-C)}{D+(S-C)} =$$ 7.421 МПа

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости в пределах упругости

$$[F]_{E1} = \frac{31\cdot 10^{-5}E}{n_y}D^2\left[\frac{100(S-C)}{D}\right]^{2.5} =$$ 1.171e+09 Н

Допускаемое осевое усилие из условия устойчивости в пределах упругости

$$[F]_E = \mathrm{Min}\{[F]_{E1};[F]_{E2}\} =$$ 1.171e+09 Н

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности

$$[F]_п = \pi(D + S - C)(S - C)[\sigma] =$$ 4.928e+07 Н

Допускаемый изгибающий момент из условий устойчивости в пределах упругости

$$[M]_E = \frac{89 \cdot 10^{-6} E}{n_y} D^3 \left[\frac{100(S - C)}{D}\right]^{2,5} =$$ 6.692e+11 Н·мм

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности

$$[M]_п = \frac{\pi D(D + S - C)(S - C)[\sigma]}{4} =$$ 2.464e+10 Н·мм

Допускаемый изгибающий момент

$$[M] = \frac{[M]_п}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_п}{[M]_E}\right)^2}} =$$ 2.462e+10 Н·мм

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости в пределах упругости

$$[Q]_E = \frac{2.4E(S - C)^2}{n_y}\left[0.18 + 3.3\frac{D(S - C)}{L^2}\right] =$$ 9.744e+07 Н

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности

$$[Q]_п = \frac{\pi D(S - C)[\sigma]}{4} =$$ 1.198e+07 Н

Допускаемое перерезывающее усилие

$$[Q] = \frac{[Q]_п}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_п}{[Q]_E}\right)^2}} =$$ 1.189e+07 Н

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

$$\frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 =$$ 0.006964< 1

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

1.4. Укрепление отверстия 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 методом конечных элементов
Внешние нагрузки определялись без учета стесненности температурных деформаций
Внешние нагрузки приложены в месте пересечения оси штуцера с образующей обечайки или днища
Режим:Рабочий

Исходные данные

Материал корпуса		09Г2С, Лист	
Материал штуцера		09Г2С КП 245, Поковка	
Расчётная температура корпуса	T	289	°C
Расчётное давление	P	7.34	МПа
Внутренний диаметр обечайки, днища или конического перехода, в месте расположения отверстия	D	2000	мм
Исполнительная толщина стенки обечайки, конического перехода или днища	s	60	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 l1=0)	l_1	254	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
Размер сварного шва приварки штуцера (по образующей обечайки)	a	0	мм
Размер сварного шва приварки штуцера (по образующей штуцера)	b	0	мм
Вылет штуцера	L_f	400	мм
Осевая нагрузка на штуцер	F_z	3414	Н
Изгибающий момент вокруг оси X действующий на штуцер	M_x	2.053e+06	Н*мм
Изгибающий момент вокруг оси Y действующий на штуцер	M_y	1.543e+06	Н*мм

Изгибающий момент вокруг оси Z действующий на штуцер	M_z	2.564e+06	Н*мм
Перерезывающая сила вдоль оси X действующая на штуцер	F_x	5139	Н
Перерезывающая сила вдоль оси Y действующая на штуцер	F_y	5139	Н
Модуль продольной упругости материала обечайки	E	1.72e+05	МПа
Коэффициент Пуассона обечайки	μ	0.3	
Модуль продольной упругости материала штуцера	E_1	1.72e+05	МПа
Коэффициент Пуассона штуцера	μ_1	0.3	
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

$$D_р = D =$$ 2000 мм

Расчётная толщина стенки корпуса

$$s_р = \frac{pD}{2[\sigma]\varphi_р - p} =$$ 55.47 мм

Расчётный диаметр отверстия

$$d_р = d + 2c_s =$$ 97.2 мм

Расчётная толщина стенки штуцера

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

Расчётная длина штуцера

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

$$L_o = \sqrt{D_р(s - c)} =$$ 335 мм

Расчётная ширина зоны укрепления, прилегающей к штуцеру

$$l_р =$$ 335 мм

Расчётный диаметр неукрепляемого отверстия

$$d_{ор} = 0{,}4\sqrt{D_р(s - c)} =$$ 134 мм

Коэффициент понижения прочности узла врезки штуцера

$$V = \min\left\{1; \frac{1 + \frac{l_{1р}(s_1 - c_s)\chi_1 + l_{2р}s_2\chi_2 + l_{3р}(s_3 - c_s - c_{s1})\chi_3}{l_р(s - c)}}{1 + 0{,}5\frac{d_р - d_{ор}}{l_р} + K_1\frac{d + 2c_s}{D_р}\frac{\varphi}{\varphi_1}\frac{l_{1р}}{l_р}}\right\} =$$ 1

Допускаемое давление для узла врезки штуцера

$$[p] = \frac{2K_1(s - c)\varphi[\sigma]}{D_р + (s - c)V} =$$ 7.421 МПа

где

$$K_1 =$$ 1

Приведенное суммарное напряжение в зоне обечайки

$$\sigma_{p_o} =$$ 180.9 МПа

Приведенное мембранное напряжение в зоне обечайки

$$\sigma_{pm_o} =$$ 166.3 МПа

Приведенное суммарное напряжение в зоне штуцера

$$\sigma_{p_шт} =$$ 199.1 МПа

Приведенное мембранное напряжение в зоне штуцера

$$\sigma_{pm_шт} =$$ 173.2 МПа

Приведенное суммарное напряжение на внутренней поверхности

$$\sigma_{p_вн_o} =$$ 216.5 МПа

Приведенное суммарное напряжение на внутренней поверхности

$$\sigma_{p_вн_шт} =$$ 375.5 МПа

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

1.5. 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 методом конечных элементов
Внешние нагрузки определялись без учета стесненности температурных деформаций
Внешние нагрузки приложены в месте пересечения оси штуцера с образующей обечайки или днища
Режим:Рабочий

Исходные данные

Материал корпуса		09Г2С, Лист	
Материал штуцера		09Г2С КП 245, Поковка	
Расчётная температура корпуса	T	289	°C
Расчётное давление	P	7.34	МПа
Внутренний диаметр обечайки, днища или конического перехода, в месте расположения отверстия	D	2000	мм
Исполнительная толщина стенки обечайки, конического перехода или днища	s	60	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	s_1	30	мм
Исполнительная длина штуцера (для заведомо длинных штуцеров l1=0)	l_1	260	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	160	мм
Размер сварного шва приварки штуцера (по образующей обечайки)	a	0	мм
Размер сварного шва приварки штуцера (по образующей штуцера)	b	0	мм
Вылет штуцера	L_f	400	мм
Осевая нагрузка на штуцер	F_z	4034	Н
Изгибающий момент вокруг оси X действующий на штуцер	M_x	1.944e+06	Н*мм
Изгибающий момент вокруг оси Y действующий на штуцер	M_y	1.458e+06	Н*мм

Изгибающий момент вокруг оси Z действующий на штуцер	M_z	2.43e+06	Н*мм
Перерезывающая сила вдоль оси X действующая на штуцер	F_x	6063	Н
Перерезывающая сила вдоль оси Y действующая на штуцер	F_y	6063	Н
Модуль продольной упругости материала обечайки	E	1.72e+05	МПа
Коэффициент Пуассона обечайки	μ	0.3	
Модуль продольной упругости материала штуцера	E_1	1.72e+05	МПа
Коэффициент Пуассона штуцера	μ_1	0.3	
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

$$D_р = D =$$ 2000 мм

Расчётная толщина стенки корпуса

$$s_р = \frac{pD}{2[\sigma]\varphi_р - p} =$$ 55.47 мм

Расчётный диаметр отверстия

$$d_р = d + 2c_s =$$ 80.2 мм

Расчётная толщина стенки штуцера

$$s_{1р} = \frac{p(d + 2c_s)}{2[\sigma]_1\varphi_1 - p} =$$ 2.552 мм

Расчётная длина штуцера

$$l_{1р} = \min\left\{l_1; 1{,}25\sqrt{(d + 2c_s)(s_1 - c_s)}\right\} =$$ 58.6 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

$$L_o = \sqrt{D_р(s - c)} =$$ 335 мм

Расчётная ширина зоны укрепления, прилегающей к штуцеру

$$l_р =$$ 160 мм

Расчётный диаметр неукрепляемого отверстия

$$d_{ор} = 0{,}4\sqrt{D_р(s - c)} =$$ 134 мм

Коэффициент понижения прочности узла врезки штуцера

$$V = \min\left\{1; \frac{1 + \frac{l_{1р}(s_1 - c_s)\chi_1 + l_{2р}s_2\chi_2 + l_{3р}(s_3 - c_s - c_{s1})\chi_3}{l_р(s-c)}}{1 + 0{,}5\frac{d_р - d_{ор}}{l_р} + K_1\frac{d + 2c_s}{D_р}\frac{\varphi}{\varphi_1}\frac{l_{1р}}{l_р}}\right\} =$$ 1

Допускаемое давление для узла врезки штуцера

$$[p] = \frac{2K_1(s-c)\varphi[\sigma]}{D_р + (s-c)V} =$$ 7.421 МПа

где

$$K_1 =$$ 1

Приведенное суммарное напряжение в зоне обечайки

$$\sigma_{p_o} =$$ 179.8 МПа

Приведенное мембранное напряжение в зоне обечайки

$$\sigma_{pm_o} =$$ 165.8 МПа

Приведенное суммарное напряжение в зоне штуцера

$$\sigma_{p_шт} =$$ 197 МПа

Приведенное мембранное напряжение в зоне штуцера

$$\sigma_{pm_шт} =$$ 172.6 МПа

Приведенное суммарное напряжение на внутренней поверхности

$$\sigma_{p_вн_o} =$$ 212.6 МПа

Приведенное суммарное напряжение на внутренней поверхности

$$\sigma_{p_вн_шт} =$$ 369.7 МПа

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

1.6. 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 методом конечных элементов
Внешние нагрузки определялись без учета стесненности температурных деформаций
Внешние нагрузки приложены в месте пересечения оси штуцера с образующей обечайки или днища
Режим:Рабочий

Исходные данные

Материал корпуса		09Г2С, Лист	
Материал штуцера		09Г2С КП 245, Поковка	
Расчётная температура корпуса	T	289	°С
Расчётное давление	p	7.34	МПа
Внутренний диаметр обечайки, днища или конического перехода, в месте расположения отверстия	D	2000	мм
Исполнительная толщина стенки обечайки, конического перехода или днища	s	60	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	60	мм
Исполнительная толщина усиленной части штуцера	s_1	35	мм
Исполнительная длина усиленной части штуцера	l_1	180	мм
Исполнительная толщина стенки штуцера	$s_{1ш}$	12	мм
Исполнительная длина штуцера	$\ell_{1ш}$	230	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)	$L_к$	0	мм
Размер сварного шва приварки штуцера (по образующей обечайки)	a	0	мм
Размер сварного шва приварки штуцера (по образующей штуцера)	b	0	мм
Вылет штуцера	L_f	400	мм
Осевая нагрузка на штуцер	F_z	1227	Н

Изгибающий момент вокруг оси X действующий на штуцер	M_x	3.766e+05	Н*мм
Изгибающий момент вокруг оси Y действующий на штуцер	M_y	2.794e+05	Н*мм
Изгибающий момент вокруг оси Z действующий на штуцер	M_z	4.617e+05	Н*мм
Перерезывающая сила вдоль оси X действующая на штуцер	F_x	1859	Н
Перерезывающая сила вдоль оси Y действующая на штуцер	F_y	1859	Н
Модуль продольной упругости материала обечайки	E	1.72e+05	МПа
Коэффициент Пуассона обечайки	μ	0.3	
Модуль продольной упругости материала штуцера	E_1	1.72e+05	МПа
Коэффициент Пуассона штуцера	μ_1	0.3	
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

$$D_р = D =$$ 2000 мм

Расчётная толщина стенки корпуса

$$s_р = \frac{pD}{2[\sigma]\varphi_р - p} =$$ 55.47 мм

Расчётный диаметр отверстия

$$d_р = d + 2c_s =$$ 65.2 мм

Расчётная толщина стенки штуцера

$$s_{1р} = \frac{p(d + 2c_s)}{2[\sigma]_1\varphi_1 - p} =$$ 2.075 мм

Расчётная длина штуцера

$$l_{1р} = \min\left\{l_1; 1{,}25\sqrt{(d + 2c_s)(s_1 - c_s)}\right\} =$$ 57.45 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

$$L_o = \sqrt{D_р(s - c)} =$$ 335 мм

Расчётная ширина зоны укрепления, прилегающей к штуцеру

$$l_р =$$ 335 мм

Расчётный диаметр неукрепляемого отверстия

$$d_{\text{ор}} = 0{,}4\sqrt{D_{\text{р}}(s-c)} =$$ 134 мм

Коэффициент понижения прочности узла врезки штуцера

$$V = \min\left\{1;\ \frac{1+\dfrac{l_{1\text{р}}(s_1-c_s)\chi_1 + l_{2\text{р}}s_2\chi_2 + l_{3\text{р}}(s_3-c_s-c_{s1})\chi_3}{l_{\text{р}}(s-c)}}{1+0{,}5\dfrac{d_{\text{р}}-d_{\text{ор}}}{l_{\text{р}}} + K_1\dfrac{d+2c_s}{D_{\text{р}}}\dfrac{\varphi}{\varphi_1}\dfrac{l_{1\text{р}}}{l_{\text{р}}}}\right\} =$$ 1

Допускаемое давление для узла врезки штуцера

$$[p] = \frac{2K_1(s-c)\varphi[\sigma]}{D_{\text{р}}+(s-c)V}V =$$ 7.421 МПа

где

$$K_1 =$$ 1

Приведенное суммарное напряжение в зоне обечайки

$$\sigma_{p_o} =$$ 175.9 МПа

Приведенное мембранное напряжение в зоне обечайки

$$\sigma_{pm_o} =$$ 157.6 МПа

Приведенное суммарное напряжение в зоне штуцера

$$\sigma_{p_шт} =$$ 213.8 МПа

Приведенное мембранное напряжение в зоне штуцера

$$\sigma_{pm_шт} =$$ 177.1 МПа

Приведенное суммарное напряжение на внутренней поверхности

$$\sigma_{p_вн_o} =$$ 249.9 МПа

Приведенное суммарное напряжение на внутренней поверхности

$$\sigma_{p_вн_шт} =$$ 370.5 МПа

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

1.7. 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 09Г2С, Труба

Расчётная температура	T	289	ºC
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	3.2	мм
Прибавка – минусовый допуск	c_2	0.9	мм
Прибавка технологическая	c_3	0	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки	c	4.1	мм
Коэффициент прочности продольного сварного шва	φ_p	1	
Допускаемое напряжение	$[\sigma]$	136	МПа

Результаты расчёта

Расчётная толщина стенки обечайки от действия давления

$$S_p = \frac{pD}{2[\sigma]\varphi_p - p} =$$ 1.248 мм

Расчётная толщина стенки обечайки от действия давления с учетом прибавки

$$S \geq S_p + C =$$ 5.348 мм

Допускаемое внутреннее давление

$$[p] = \frac{2[\sigma]\varphi_p(S-C)}{D+(S-C)} =$$ 11.02 МПа

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

1.8. Цилиндрическая 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: Гладкая цилиндрическая обечайка, работающая под действием внутреннего давления - изгибающего момента
Режим: Рабочий

Исходные данные

Материал обечайки 09Г2С, Лист

Расчётная температура	T	450	ºC
Расчётное давление в сосуде	P	0.02	МПа
Расчётный изгибающий момент	M	9.308e+07	Н·мм
Расчётное поперечное усилие	Q	6.753e+04	Н
Внутренний диаметр обечайки	D	2092	мм
Фактическая длина обечайки	Lact	1400	мм
Расчётная длина обечайки	L	1840	мм
Толщина стенки обечайки	S	14	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	$[\sigma]$	71	МПа
Модуль продольной упругости	E	1.4e+05	МПа

Результаты расчёта

Расчётная толщина стенки обечайки от действия давления

$$S_p = \frac{pD}{2[\sigma]\varphi_p - p} =$$ 0.2947 мм

Расчётная толщина стенки обечайки от действия давления с учетом прибавки

$$S \geq S_p + C =$$ 4.095 мм

Допускаемое внутреннее давление

$$[p] = \frac{2[\sigma]\varphi_p(S-C)}{D+(S-C)} =$$ 0.689 МПа

Допускаемый изгибающий момент из условий устойчивости в пределах упругости

$$[M]_E = \frac{89\cdot 10^{-6}E}{n_y}D^3\left[\frac{100(S-C)}{D}\right]^{2,5} =$$ 7.852e+09 Н·мм

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности

$$[M]_п = \frac{\pi D(D+S-C)(S-C)[\sigma]}{4} =$$ 2.501e+09 Н·мм

Допускаемый изгибающий момент

$$[M] = \frac{[M]_п}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_п}{[M]_E}\right)^2}} =$$

2.383e+09 Н·мм

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости в пределах упругости

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

2.622e+06 Н

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности

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

1.19e+06 Н

Допускаемое перерезывающее усилие

$$[Q] = \frac{[Q]_п}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_п}{[Q]_E}\right)^2}} =$$

1.084e+06 Н

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

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

0.04294< 1

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

1.9. Укрепление отверстия люка М1

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
Только расчёт укрепления отверстия
Режим:Рабочий

Исходные данные

Материал корпуса		09Г2С, Лист	
Материал штуцера		09Г2С, Лист	
Расчётная температура корпуса	T	450	°С
Расчётное давление	p	0.02	МПа
Внутренний диаметр обечайки, днища или конического перехода, в месте расположения отверстия	D	2092	мм
Исполнительная толщина стенки обечайки, конического перехода или днища	s	14	мм
Коэффициент прочности сварных соединений обечаек и днищ	φ	1	
Допускаемое напряжение для материала обечайки, перехода или днища при расчётной температуре	$[\sigma]$	71	МПа
Внутренний диаметр штуцера	d	800	мм
Исполнительная толщина стенки штуцера	s_1	14	мм
Исполнительная длина штуцера (для заведомо длинных штуцеров l1=0)	l_1	0	мм
Допускаемое напряжение для материала штуцера	$[\sigma]_1$	71	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	0	мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии стенки корпуса	c_1	2	мм
Прибавка для компенсации минусового допуска стенки корпуса	c_2	0.8	мм
Прибавка технологическая стенки корпуса	c_3	1	мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии стенки штуцера	c_{s1}	2	мм
Прибавка для компенсации минусового допуска стенки штуцера	c_{s2}	0.8	мм
Прибавка технологическая стенки штуцера	c_{s3}	1	мм

Результаты расчёта

Расчётный внутренний диаметр цилиндрической обечайки

$$D_р = D =$$ 2092 мм

Расчётная толщина стенки корпуса

$$s_р = \frac{pD}{2[\sigma]\varphi_р - p} =$$ 0.2947 мм

Расчётный диаметр отверстия

$$d_р = d + 2c_s =$$ 807.6 мм

Расчётная толщина стенки штуцера

$$s_{1р} = \frac{p(d + 2c_s)}{2[\sigma]_1\varphi_1 - p} =$$ 0.1138 мм

Расчётная длина штуцера

$$l_{1р} = \min\left\{l_1; 1{,}25\sqrt{(d + 2c_s)(s_1 - c_s)}\right\} =$$ 113.5 мм

Отношение допускаемых напряжений штуцера и корпуса

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

Ширина зоны укрепления, прилегающей к штуцеру

$$L_o = \sqrt{D_р(s - c)} =$$ 146.1 мм

Расчётная ширина зоны укрепления, прилегающей к штуцеру

$$l_р =$$ 146.1 мм

Расчётный диаметр неукрепляемого отверстия

$$d_{op} = 0{,}4\sqrt{D_р(s - c)} =$$ 58.43 мм

Коэффициент понижения прочности узла врезки штуцера

$$V = \min\left\{1; \frac{1 + \dfrac{l_{1р}(s_1 - c_s)\chi_1 + l_{2р}s_2\chi_2 + l_{3р}(s_3 - c_s - c_{s1})\chi_3}{l_р(s - c)}}{1 + 0{,}5\dfrac{d_р - d_{op}}{l_р} + K_1\dfrac{d + 2c_s}{D_р}\dfrac{\varphi}{\varphi_1}\dfrac{l_{1р}}{l_р}}\right\} =$$ 0.4598

Допускаемое давление для узла врезки штуцера

$$[p] = \frac{2K_1(s - c)\varphi[\sigma]}{D_р + (s - c)V}V =$$ 0.3176 МПа

где

$$K_1 =$$ 1

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

1.10. Конический переход 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	09Г2С, Лист
Материал большего цилиндрического перехода	09Г2С, Лист
Материал меньшего цилиндрического перехода	09Г2С, Лист

Расчётная температура	T	450	ºC
Расчётное давление	P	0.02	МПа
Расчётная осевая сила	F	0	Н
Расчётный изгибающий момент	M	2.452e+07	Н·мм
Внутренний диаметр большей обечайки, перехода или днища	D	2092	мм
Внутренний диаметр меньшей цилиндрической обечайки	D_1	1000	мм
Угол наклона кососимметричной обечайки	α_1	45②	град
Исполнительная толщина стенки конической обечайки (днища)	$S_к$	10	мм
Исполнительная толщина стенки большей цилиндрической обечайки	$S_б$	14	мм
Исполнительная толщина стенки меньшей цилиндрической обечайки	$S_м$	8	мм
Прибавка к расчётной толщине конической обечайки (днища) для компенсации коррозии и эрозии	$C_{к_1}$	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	$C_{2м_2}$	0.8	мм

обечайки(перехода) для компенсации минусового допуска			
Прибавка технологическая к расчётной толщине меньшей цилиндрической обечайки (перехода)	$C_{2м_3}$	1	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине меньшей цилиндрической обечайки (перехода)	$C_{2м}$	3.8	мм
Коэффициент прочности продольного сварного шва	$\varphi_р$	1	
Коэффициент прочности кольцевого сварного шва	$\varphi_т$	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:

$$a_1 = 0{,}7\sqrt{\frac{D}{\cos\alpha_1}(s_1 - c)} =$$ 94.81 мм

Расчётная длина переходной части конической обечайки у меньшего конца:

$$a_1 = \sqrt{\frac{D}{\cos\alpha_1}(s_1 - c)} =$$ 65.55 мм

Расчётная длина переходной части цилиндрической обечайки:

$$a_2 = 0{,}7\sqrt{D(s_2 - c)} =$$ 102.3 мм

Расчётная длина цилиндрической обечайки или штуцера у меньшего конца:

$$a_2 = 1{,}25\sqrt{D(s_2 - c)} =$$ 81.01 мм

Расчётный диаметр гладкой конической обечайки без тороидального перехода:

$$D_к = D - 1.4a_1 \sin\alpha_1 =$$ 1998 мм

Эффективные толщины переходных участков:

- конической части соединения без тороидального перехода:

$$s_{1E} = \max\left\{\frac{a_{1D}}{a_1}s_1; s_к\right\} =$$ 10 мм

- цилиндрической части соединения без тороидального перехода:

$$s_{2E} = \max\left\{\frac{a_{2D}}{a_2}s_2; s\right\} =$$ 14 мм

Допускаемое внутреннее избыточное давление для конической обечайки или днища:

$$[p]_{ек} = \frac{2[\sigma]\varphi_p(s_к - c)}{\frac{D_к}{\cos\alpha_i} + (s_к - c)} =$$ 0.3109 МПа

Допускаемая растягивающая сила:

$$[F] = \pi D_1 (s_к - c)\varphi_T [\sigma] \cos\alpha_1 =$$ 2.744e+06 Н

Допускаемая осевая сжимающая сила:

где:

$$[F] = \min\left\{ \frac{[F]_п}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_п}{[F]_E}\right)^2}} ; \frac{D_1}{D_F}[F]_п \right\} =$$ 9.935e+05 Н

- допускаемая осевая сила из условия прочности:

$$[F]_к = \pi D_F (s_к - c)[\sigma] \cos\alpha_1 =$$ 9.935e+05 Н

- допускаемая осевая сила из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[F]_E = \frac{310 \cdot 10^{-6} E}{n_y} (D_F \cos\alpha_1)^2 \cdot \left[\frac{100(s_к - c)}{D_F}\right]^{2,5} =$$ 1.634e+06 Н

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности:

$$[M] = \frac{D_1}{4} \pi D_1 (s_к - c)\varphi_T [\sigma] \cos\alpha_1 =$$ 2.524e+08 Н·мм

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости:

где:

$$[M] = \frac{[M]_п}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_п}{[M]_E}\right)^2}} =$$ 1.083e+09 Н·мм

- допускаемый изгибающий момент из условия прочности:

$$[M]_к = \frac{D_F}{4} \pi D_F (s_к - c)[\sigma] \cos\alpha_1 =$$ 1.925e+09 Н·мм

- допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_E = \frac{D_F}{3.5} \cdot \frac{310 \cdot 10^{-6} E}{n_y} (D_F \cos\alpha_1)^2 \cdot \left[\frac{100(s_к - c)}{D_F}\right]^{2,5} =$$ 1.31e+09 Н·мм

- эффективный диаметр конической обечайки при осевом сжатии и изгибе:

$$D_F = \frac{0,9D + 0,1D_1}{\cos\alpha_1} =$$ 2806 мм

- коэффициент запаса устойчивости:

$$n_y =$$ 2.4

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

где:

$$[p] = \frac{2[\sigma]_2 \varphi_р (s_2 - c)}{D\beta_1 + (s_2 - c)} =$$ 0.2919 МПа

- коэффициент формы:

$$\beta_1 = \max\{0.5;\ \beta\} =$$ 2.367

- коэффициент β:

$$\beta = 0{,}4\sqrt{\frac{D}{s_2 - c}}\ \frac{\operatorname{tg}\ \alpha_1}{1 + \sqrt{\dfrac{1 + \chi\left(\dfrac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)^2}{2\cos\ \alpha_1}}\ \chi\left(\dfrac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)} - 0{,}25 =$$ 2.367

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

$$[F] = \pi D\,\frac{(s_2 - c)[\sigma]_2\,\varphi_т}{\beta_5} =$$ 8.022e+05 Н

- коэффициент β_5:

$$\beta_5 = \max\{1.0;\ (2{,}\beta + 1.2)\} =$$ 5.933

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности переходной части:

$$[M] = \frac{D}{4}[F] =$$ 2.524e+08 Н·мм

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

$$[p]_{кн} = \frac{2[\sigma]_2\,\varphi_p\,(s_2 - c)}{D\beta_4 + (s_2 - c)} =$$ 0.2216 МПа

- общий коэффициент формы для переходной части:

$$\beta_4 = \max\{1.0;\ \beta_н\} =$$ 2.687

- коэффициент $\beta_н$:

$$\beta_н = \left\{\begin{array}{ll} \beta + 0.75 & -\ при\quad x\left(\dfrac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)^2 \geq 1 \\ 0{,}4\sqrt{\dfrac{D}{s_2 - c}} \times & \\ \times\dfrac{tg\,\alpha_1}{x\left(\dfrac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)\sqrt{\dfrac{s_1 - c}{(s_2 - c)\cos\alpha_1}} + \sqrt{\dfrac{1 + x\left(\dfrac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)^2}{2}}} + & \\ +\,0{,}5 & -\ при\quad x\left(\dfrac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)^2 < 1 \end{array}\right\} =$$ 2.687

- коэффициент β: 1.937

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

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

$$[F] = \pi D \frac{(s_2 - c)[\sigma]_2 \cdot \varphi_p}{\beta_8} =$$ 2.141e+05 Н

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности переходной части:

$$[M] = \frac{D}{4}[F] =$$ 5.353e+07 Н·мм

Условие устойчивости

$$-\frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} =$$ 0.02264< 1

Условие прочности большей переходной части

$$\left|\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]}\right| + \frac{M}{[M]} =$$ 0.127< 1

Условие прочности меньшей переходной части

$$\left|\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]}\right| + \frac{M}{[M]} =$$ 0.5483< 1

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

1.11. 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, приваренная встык к обечайке кожуха
Крепление труб к решетке развальцовкой с обваркой
Трубы развальцованные в пазы при наличии одного паза
Специальная проверка жесткости решеток не нужна

Исходные данные

Материал кожуха	09Г2С, Лист
Материал труб	09Г2С, Труба①
Материал решеток	09Г2С КП 245, Поковка
Материал камер	09Г2С, Лист

Средняя температура стенки кожуха	$t_к$	276.4	ºC
Средняя температура труб	$t_т$	279.3	ºC
Расчётная температура кожуха	$T_к$	289	ºC
Расчётная температура труб	$T_т$	300	ºC
Расчётная температура решетки	$T_р$	400	ºC
Расчётное давление в межтрубном пространстве	$P_м$	7.34	МПа
Расчётное давление в трубном пространстве	$P_т$	0.02	МПа
Максимально возможный перепад давлений, действующих на решетку	$P_г$	7.34	МПа
Количество циклов нагружения за расчётный срок службы	N	2000	
Модуль продольной упругости материала кожуха	$E_к$	1.73e+05	МПа
Модуль продольной упругости материала фланцев кожуха	E_1	1.55e+05	МПа
Модуль продольной упругости материала камеры	E_d	1.71e+05	МПа
Модуль продольной упругости материала труб	$E_т$	1.71e+05	МПа
Модуль продольной упругости материала решетки	$E_р$	1.55e+05	МПа
Коэффициент линейного расширения материала кожуха при температуре $t_к$	$\alpha_к$	1.295e-05	1/ºC
Коэффициент линейного расширения материала труб при температуре $t_т$	$\alpha_т$	1.295e-05	1/ºC
Допускаемое напряжение для материала кожуха при температуре $T_к$	$[\sigma]_к$	136	МПа
Допускаемое напряжение для материала труб при температуре $T_т$	$[\sigma]_т$	134	МПа
Допускаемое напряжение для материала решетки при температуре $T_р$	$[\sigma]_р$	91.5	МПа
Допускаемая амплитуда напряжений для материала кожуха при температуре $T_к$	$[\sigma_a]_к$	367	МПа
Допускаемая амплитуда напряжений для материала труб при температуре $T_т$	$[\sigma_a]_т$	365.5	МПа

Допускаемая амплитуда напряжений для материала решетки при температуре $T_р$	$[\sigma_а]_р$	320	МПа
Внутренний диаметр кожуха	D	2000	мм
Толщина стенки кожуха	$S_к$	60	мм
Толщина стенки кожуха в месте приварки решетки (для приваренных в стык фланцев – $S_1 = S_э$ по ГОСТ Р 52857.4–2007)	S_1	60	мм
Прибавка к толщине стенки кожуха для компенсации коррозии и эрозии	Ск1	1.6	мм
Прибавка к толщине стенки кожуха для компенсации минусового допуска	Ск2	1.3	мм
Прибавка технологическая к толщине стенки кожуха	Ск3	1	мм
Расчётная прибавка к толщине стенки кожуха	$C_к$	3.9	мм
Толщина тарелки фланца кожуха (для решеток вваренных в кожух – $h_1 = S_{1р}$)	h_1	40	мм
Ширина тарелки фланца кожуха (для решеток вваренных в кожух – $b_1 = (D_н-D)/2$)	b_1	60	мм
Радиус центра тяжести тарелки фланца кожуха ($(D_н+D)/4$)	R_1	1030	мм
Толщина стенки камеры в месте приварки решетки (для приваренных в стык фланцев – $S_2 = S_э$ по ГОСТ Р 52857.4–2007)	S_2	60	мм
Толщина тарелки фланца камеры (для решеток вваренных в кожух – $h_2 = S_{1р}$)	h_2	60	мм
Ширина тарелки фланца камеры (для решеток вваренных в кожух – $b_2 = 0$)	b_2	0	мм
Радиус центра тяжести тарелки фланца камеры ($(D_н+D)/4$)	R_2	1030	мм
Количество труб в пучке	$i_т$	130	
Половина длины трубы	l	1500①	мм
Наружный диаметр трубы	$d_т$	76	мм
Толщина стенки трубы	$S_т$	6	мм
Расстояние от оси кожуха до оси наиболее удаленной трубы	a_1	756	мм
Толщина трубной решетки	$S_р$	40①	мм
Толщина трубной решетки в зоне кольцевой канавки	$S_{р1}$	40	мм
Прибавка к толщине трубной решетки для компенсации коррозии и эрозии	Ср1	3.6	мм
Прибавка к толщине трубной решетки для компенсации минусового допуска	Ср2	0	мм
Прибавка технологическая к толщине трубной решетки	Ср3	1	мм
Расчётная прибавка к толщине трубной решетки	C	4.6	мм
Диаметр отверстий под трубы в решетке	$d_о$	76.7	мм
Шаг расположения отверстий под трубы в решетке	$t_р$	108	мм
Глубина развальцовки труб	$l_в$	15	мм
Высота сварного шва в месте приварки трубы к решетке	δ	4.5	мм
Диаметр окружности, вписанной в максимальную беструбную площадь	$D_е$	94	мм
Эффективный коэффициент концентрации напряжений в месте приварки решетки	$K_σ$	1.2	
Максимальный пролет трубы между решеткой и перегородкой	$l_{1г}$	1700	мм
Максимальный пролет трубы между перегородками	$l_{2г}$	0	мм

Результаты расчёта

Внутренний радиус кожуха:

$$a = \frac{D}{2} =$$ 1000 мм

Относительная характеристика беструбного края:

$$m_н = a / a_1 =$$ 1.323

Коэффициент влияния давления в межтрубном пространстве на трубную решетку:

$$\eta_M = 1 - \frac{i d_T^2}{4 a_1^2} =$$ 0.6716

Коэффициент влияния давления в трубном пространстве на трубную решетку:

$$\eta_T = 1 - \frac{i (d_T - 2S_T)^2}{4 a_1^2} =$$ 0.7671

Коэффициент ослабления трубной решетки:

$$\varphi_p = 1 - \frac{d_o}{t_o} =$$ 0.2898

Коэффициент жесткости перфорированной плиты:

$$\psi_o =$$ 0.5386

Модуль упругости основания (системы труб):

$$K_y = \frac{E_T (\eta_T - \eta_M)}{l} =$$ 10.89 Н/мм^3

Приведенное отношение жесткости труб к жесткости кожуха:

$$\rho = \frac{K_y a_1 l}{E_x S_x} =$$ 1.19

Коэффициенты изменения жесткости системы трубы-кожух:

$$K_q =$$ 1

$$K_p =$$ 1

Приведенное давление:

$$\begin{aligned} P_o = {} & [\alpha_k (t_k - t_o) - \alpha_T (t_T - t_o)] K_y l + \\ & + [\eta_T - 1 + m_{cp} + m_н (m_н + 0.5 \rho K_q)] P_T - \\ & + [\eta_M - 1 + m_{cp} + m_н (m_н + 0.3 \rho K_p)] P_M = \end{aligned}$$ -15.68

где:

$$m_{cp} = 0.15 \frac{i (d_T - S_T)^2}{a_1^2} =$$ 0.1672

Коэффициент системы решетка - трубы:

$$\beta = \frac{1.82}{S_p} \sqrt[4]{\frac{K_y S_p}{\psi_o E_p}} =$$ 0.01223 1/мм

Коэффициент системы кожух-решетка камеры:

$$\beta_1 = \frac{1.3}{\sqrt{a S_1}} =$$ 0.005307 1/мм

Коэффициент системы обечайка-фланец камеры:

$$\beta_2 = \frac{1.3}{\sqrt{a S_2}} =$$ 0.005307 1/мм

Жесткость фланцевого соединения при изгибе:

$$K_{ф} = K_{ф1} + K_{ф2} =$$ 7.888e+07 Н·мм/мм

где:

$$K_{ф1} = \frac{E_1 h_1^3 b_1}{12 R_1^2} + K_1 (1 + \frac{\beta_1 h_1}{2}) =$$ 3.877e+07 Н·мм/мм

$$K_{ф2} = \frac{E_2 h_2^3 b_2}{12 R_2^2} + K_2 (1 + \frac{\beta_2 h_2}{2}) =$$ 4.011e+07 Н·мм/мм

$$K_1 = \frac{\beta_1 a E_K S_1^3}{5.5 R_1} =$$ 3.501e+07 Н·мм/мм

$$K_2 = \frac{\beta_2 a E_D S_2^3}{5.5 R_2} =$$ 3.46e+07 Н·мм/мм

Коэффициент влияния давления на изгиб фланцев:

$$m_1 = \frac{1 + \beta_1 h_1}{2 \beta_1^2} =$$ 2.152e+04 мм^2

Коэффициент влияния давления на изгиб фланцев:

$$m_2 = \frac{1 + \beta_2 h_2}{2 \beta_2^2} =$$ 2.34e+04 мм^2

Приведенное отношение жесткости труб к жесткости фланцевого соединения:

$$\rho_1 = \frac{K_y a a_1}{\beta^2 K_{ф} R_1} =$$ 0.6776

Приведенный безразмерный радиус трубного пучка:

$$\varpi = \beta a_1 =$$ 9.245

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

$$\Phi_1 =$$ 13.71

$$\Phi_2 =$$ 9.447

$$\Phi_3 =$$ 13.43

Коэффициент T_1:

$$T_1 = \Phi_1 [m_н + 0.5(1 + m_н t)(t - 1)] =$$ 242.8

Коэффициент T_2:

$$T_2 = \Phi_2 t =$$ 48.91

Коэффициент T_3:

$$T_3 = \Phi_3 m_н =$$ 17.76

где:

$$t = 1 + 1.4 \varpi (m_н - 1) =$$ 5.177

Изгибающий момент, распределенный по краю трубной решетки:

$$M = (\frac{a_1}{\beta}) \frac{P_1 (T_1 + \rho K_q) - P_o T_2}{(T_1 + \rho K_q)(T_3 + \rho_1) - T_2^2} =$$ 3.523e+04 Н·мм/мм

Перерезывающая сила, распределенная по краю трубной решетки: -135 Н/мм

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

где:

$$P_1 = \frac{K_y}{\beta K_\Phi}(m_1 P_M - m_2 P_T) =$$ 1.778 МПа

Изгибающий момент, распределенный по периметру перфорированной зоны решетки:

$$M_a = M + (a - a_1)Q =$$ 2306 Н·мм/мм

Перерезывающая сила, распределенная по периметру перфорированной зоны решетки:

$$Q_a = m_n Q =$$ -178.5 Н/мм

Осевая сила, действующая на трубу:

$$N_T = \frac{\pi a_1}{i}[(\eta_M P_M - \eta_T P_T)a_1 + \Phi_1 Q_a + \Phi_2 \beta M_a] =$$ 2.803e+04 Н

Изгибающий момент, действующий на трубу:

$$M_T = \frac{E_T J_T \beta}{K_y a_1 l_{np}}(\Phi_2 Q_a + \Phi_3 \beta M_a) =$$ -4.772e+05 Н·мм

где:

$$l_{np} =$$ 566.7 мм

Осевая сила, распределенная по периметру кожуха:

$$Q_K = \frac{a}{2} P_T - Q =$$ 145 Н/мм

Изгибающий момент, распределенный по периметру кожуха:

$$M_K = \frac{K_1}{\rho_1 K_\Phi \beta}(T_2 Q_n + T_3 \beta M) - \frac{P_M}{2\beta_1^2} =$$ -7.394e+04 Н·мм/мм

Осевая сила, действующая на кожух:

$$F = \pi D Q_K =$$ 9.108e+05 Н

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

$$\sigma_{P1} = \frac{6|M|}{(S_{1P} - C)^2} =$$ 168.7 МПа

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

$$\tau_{P1} = \frac{|Q|}{(S_{1P} - C)} =$$ 3.812 МПа

Максимальный расчётный изгибающий момент в перфорированной части трубной решетки:

$$M_{max} = \left\{ \begin{array}{l} A\dfrac{|Q_a|}{\beta} \; при \; -1.0 \le \dfrac{\beta M_a}{Q_a} \le 1.0 \\ B|M_a| \; при \; \dfrac{\beta M_a}{Q_a} < -1.0 \; и \; \dfrac{\beta M_a}{Q_a} > 1.0 \end{array} \right\} =$$ 4765

где: 0.3264

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

Расчётное изгибное напряжение в перфорированной части трубной решетки:

$$\sigma_{P2} = \frac{6M_{\max}}{\varphi_P (S_P - C)^2} =$$ 78.72 МПа

Расчётное касательное напряжение в перфорированной части трубной решетки:

$$\tau_{P2} = \frac{|Q_a|}{\varphi_P (S_P - C)} =$$ 17.4 МПа

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

$$\sigma_{MX} = \frac{|Q_K|}{(S_1 - C_K)} =$$ 2.584 МПа

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

$$\sigma_{UX} = \frac{6|M_K|}{(S_1 - C_K)^2} =$$ 141 МПа

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

$$\sigma_{M\varphi} = \frac{|P_M| a}{(S_1 - C_K)} =$$ 130.8 МПа

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

$$\sigma_{U\varphi} = 0.3\sigma_{UX} =$$ 42.29 МПа

Расчётные мембранные напряжения в трубах в осевом направлении:

$$\sigma_{1T} = \frac{|N_T|}{\pi (d_T - S_T) S_T} =$$ 21.26 МПа

Расчётные суммарные напряжения в трубах в осевом направлении:

$$\sigma_1 = \sigma_{1T} + \frac{d_T |M_T|}{2J_T} =$$ 43.53 МПа

Расчётные напряжения в трубах в окружном направлении:

$$\sigma_{2T} = \frac{(d_T - S_T)\max\{|P_T|; |P_M|; |P_T - P_M|\}}{2S_T} =$$ 42.82 МПа

Условия статической прочности решетки:

Максимальное касательное напряжение в решетке:

$$\max\{\tau_{P1}; \tau_{P2}\} =$$ 17.4 МПа

Допускаемое касательное напряжение в решетке:

$$0.8[\sigma]_P =$$ 73.2 МПа

Необходимая толщина решетки из условия прочности беструбной зоны: 17.91 мм

$$S_p \geq 0.5 D_B \sqrt{\frac{P_R}{[\sigma]_p}} + C =$$

Условия малоцикловой прочности решетки:

Расчётная амплитуда напряжений в решетке в месте соединения с кожухом:

$$\sigma_a = K_\sigma \frac{\sigma_{p1}}{2} =$$ 101.2 МПа

Расчётная амплитуда напряжений в перфорированной зоне решетки:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{p2}}{2} =$$ 39.36 МПа

Допускаемая амплитуда напряжений для материала решетки:

$$[\sigma_a]_p =$$ 320 МПа

Проверка жесткости трубных решеток:

Условие статической прочности кожуха:

Мембранное напряжение в кожухе в месте приварки к решетке:

$$\sigma_{MX} =$$ 2.584 МПа

Допускаемое местное мембранное напряжение в кожухе:

$$1.3[\sigma]_K =$$ 176.8 МПа

Условие малоцикловой прочности кожуха:

Расчётная амплитуда напряжений в кожухе в месте приварки к решетке:

$$\sigma_a = K_\sigma \max\left\{\begin{matrix} |\sigma_{MX} + \sigma_{UX}|; |\sigma_{M\varphi} + \sigma_{U\varphi}|; \\ |(\sigma_{MX} + \sigma_{UX}) - (\sigma_{M\varphi} + \sigma_{U\varphi})| \end{matrix}\right\} =$$ 103.9 МПа

Допускаемая амплитуда напряжений для материала кожуха:

$$[\sigma_a]_K =$$ 367 МПа

Условие устойчивости кожуха (по ГОСТ Р 52857.2):

Условие статической прочности труб:

Максимальное мембранное напряжение в трубах:

$$\max\{\sigma_{1T}; \sigma_{2T}\} =$$ 42.82 МПа

Допускаемое напряжение для материала труб:

$$[\sigma]_T =$$ 134 МПа

Расчётная амплитуда напряжений в трубах:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_1}{2} =$$ 21.76 МПа

Допускаемая амплитуда напряжений для материала труб:

$$[\sigma_a]_T =$$ 365.5МПа

Проверка прочности крепления труб в решетке:

Расчётная нагрузка на соединение трубы с решеткой:

$$|N_T| =$$ 2.803e+04 Н

Допускаемая нагрузка на соединение трубы с решеткой с помощью развальцовки:

$$[N]_{TP} =$$ 7.244e+04 Н

Напряжение сдвига в сварном шве приварки трубы к решетке:

$$\tau = \frac{|N_T| d_T + 4|M_T|}{\pi d_r^2 \delta} =$$ 49.49 МПа

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

$$[\tau] = \varphi_C \min\{[\sigma]_T; [\sigma]_P\} =$$ 26.52 МПа

где:

$$\varphi_C = \min\{0.5; (095 - 0.21\lg N)\} =$$ 0.2898

Условие прочности крепления труб к решетке способом развальцовки с обваркой:

$$\max\left\{\frac{\varphi_c \min\left\{[\sigma]_т; [\sigma]_р\right\}}{\tau} + 0,6\frac{[N]_{тр}}{|N_т|}; \frac{[N]_{тр}}{|N_т|}\right\} =$$ 2.584> 1

Условия прочности и устойчивости элементов теплообменного аппарата выполняются

1.12. 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	ºC
Расчётное давление	P	7.34	МПа
Опорное усилие, действующее на опору	F	1.385e+05	Н
Максимальный момент над опорой	M	3.992e+07	Н*мм
Расчётное поперечное усилие	Q	8.721e+04	Н
Внутренний диаметр обечайки	D	2000	мм
Исполнительная толщина стенки обечайки	s	60	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	620	мм
Длина цилиндрической выступающей части, включая отбортовку	a	1860	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]	4.924e+07	Н
Допускаемый изгибающий момент из условий устойчивости по ГОСТ Р 52857.2-2007	[M]	2.462e+10	Н·мм
Допускаемая перерезывающая сила по ГОСТ Р 52857.2-2007	[Q]	1.189e+07	Н

Результаты расчёта

Проверка несущей способности обечайки без подкладного листа в области опорного узла

Параметр, определяемый шириной пояса опоры: 0.815

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

Общее осевое мембранное напряжение, действующее в области опорного узла:

$$\overline{\sigma}_{mx} = \frac{4M_i}{\pi D^2(s-c)} =$$ 0.2265 МПа

Коэффициенты, учитывающие влияние ширины пояса опоры:

$$K_{10} =$$ 0.3952

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:

$$\vartheta_1 = -\frac{0.23\cdot K_{13}\cdot K_{15}}{K_{12}\cdot K_{10}} =$$ -0.2054

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями

$$\vartheta_{2,1} = \frac{-\overline{\sigma}_{mx}}{K_2[\sigma]} =$$ -0.001332

$$\vartheta_{2,2} = \left(\frac{pD}{4(s-c)} - \overline{\sigma}_{mx}\right)\frac{1}{K_2[\sigma]} =$$ 0.3835

Коэффициент K_1 (принимается меньшее значение из двух):

$$K_1(\vartheta_1;\vartheta_{2,1}) =$$ 1.379

$$K_1(\vartheta_1;\vartheta_{2,2}) =$$ 1.491

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_i = K_1K_2[\sigma] =$$ 234.4 МПа

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0.7[\sigma_i]_2\sqrt{D(s-c)}(s-c)}{K_{10}K_{12}} =$$ 7.946e+06 Н

Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в окружном направлении:

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

$$\vartheta_1 = -\frac{0.53\cdot K_{11}}{K_{14}\cdot K_{16}\cdot K_{17}\cdot\sin(0.5\delta_1)} =$$ -1.417

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мем-

бранными напряжениями 0

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

$$\vartheta_{2,2} = \frac{pD}{2(s-c)}\frac{1}{K_2[\sigma]} =$$ 0.7696

Коэффициент K_1 (принимается меньшее значение из двух):

$$K_1(\vartheta_1;\vartheta_{2,1}) =$$ 0.5589

$$K_1(\vartheta_1;\vartheta_{2,2}) =$$ 0.9647

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_i = K_1K_2[\sigma] =$$ 95.02 МПа

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0.9[\sigma_i]_3\sqrt{D(s-c)}(s-c)}{K_{14}K_{16}K_{17}} =$$ 4.355e+06 Н

Проверка прочности обечайки в области опорного узла:

Допускаемое усилие на опору:

$$[F_i] = \min\{[F]_2;[F]_3\} =$$ 4.355e+06 Н

Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в осевом направлении:

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

$$\vartheta_1 = -\frac{0.23\cdot K_{13}\cdot K_{15}}{K_{12}\cdot K_{10}} =$$ -0.2054

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями

$$\vartheta_{2,1} = \frac{-\bar{\sigma}_{mx}}{K_2[\sigma]} =$$ -0.001332

$$\vartheta_{2,2} = \left(\frac{pD}{4(s_{ef}-c)} - \bar{\sigma}_{mx}\right)\frac{1}{K_2[\sigma]} =$$ 0.3835

Коэффициент K_1 (принимается меньшее значение из двух):

$$K_1(\vartheta_1;\vartheta_{2,1}) =$$ 1.379

$$K_1(\vartheta_1;\vartheta_{2,2}) =$$ 1.491

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_i = K_1K_2[\sigma] =$$ 234.4 МПа

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0.7[\sigma_i]_2\sqrt{D(s_{ef}-c)}(s_{ef}-c)}{K_{10}K_{12}} =$$ 7.946e+06 Н

Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в окружном направлении:

Коэффициент, представляющий отношение местных мембранных напряжений к местным напряжениям изгиба: -1.417

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

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями

$$\vartheta_{2,1} = \qquad 0$$

$$\vartheta_{2,2} = \frac{pD}{2(s_{ef} - c)} \frac{1}{K_2[\sigma]} = \qquad 0.7696$$

Коэффициент K_1 (принимается меньшее значение из двух):

$$K_1(\vartheta_1; \vartheta_{2,1}) = \qquad 0.5589$$

$$K_1(\vartheta_1; \vartheta_{2,2}) = \qquad 0.9647$$

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_i = K_1 K_2 [\sigma] = \qquad 95.02 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[\mathrm{F}]_3 = \frac{0.9[\sigma_i]_3 \sqrt{D(s_{ef} - c)}(s_{ef} - c)}{K_{14} K_{16} K_{17}} = \qquad 4.355\text{e+06 Н}$$

Проверка прочности обечайки в области опорного узла:

Допускаемое усилие на опору:

$$[F_i] = \min\{[F]_2; [F]_3\} = \qquad 4.355\text{e+06 Н}$$

Проверка устойчивости обечайки в области опорного узла:

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

$$F_e = F_i \cdot \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{D}{(s - c)}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} = \qquad 2.248\text{e+05 Н}$$

Условие устойчивости обечайки, работающей под внутренним давлением:

$$\frac{|M_i|}{[M]} + \frac{|F_e|}{[F]} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 = \qquad 0.006241 < 1$$

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

1.13. 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	ºC
Расчётное давление	P	7.34	МПа
Опорное усилие, действующее на опору	F	3.237e+05	Н
Максимальный момент над опорой	M	1.66e+08	Н*мм
Расчётное поперечное усилие	Q	1.772e+05	Н
Внутренний диаметр обечайки	D	2000	мм
Исполнительная толщина стенки обечайки	s	60	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	2620	мм
Длина цилиндрической выступающей части, включая отбортовку	a	3850	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]	4.924e+07	Н
Допускаемый изгибающий момент из условий устойчивости по ГОСТ Р 52857.2-2007	[M]	2.462e+10	Н·мм
Допускаемая перерезывающая сила по ГОСТ Р 52857.2-2007	[Q]	1.189e+07	Н

Результаты расчёта

Проверка несущей способности обечайки без подкладного листа в области опорного узла

Параметр, определяемый шириной пояса опоры: 0.815

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

Общее осевое мембранное напряжение, действующее в области опорного узла:

$$\overline{\sigma}_{mx} = \frac{4M_i}{\pi D^2(s-c)} =$$ 0.942 МПа

Коэффициенты, учитывающие влияние ширины пояса опоры:

$$K_{10} =$$ 0.3952

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:

$$\vartheta_1 = -\frac{0.23\cdot K_{13}\cdot K_{15}}{K_{12}\cdot K_{10}} =$$ -0.2054

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями

$$\vartheta_{2,1} = \frac{-\overline{\sigma}_{mx}}{K_2[\sigma]} =$$ -0.005541

$$\vartheta_{2,2} = \left(\frac{pD}{4(s-c)} - \overline{\sigma}_{mx}\right)\frac{1}{K_2[\sigma]} =$$ 0.3793

Коэффициент K_1 (принимается меньшее значение из двух):

$$K_1(\vartheta_1;\vartheta_{2,1}) =$$ 1.376

$$K_1(\vartheta_1;\vartheta_{2,2}) =$$ 1.492

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_i = K_1K_2[\sigma] =$$ 233.8 МПа

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0.7[\sigma_i]_2\sqrt{D(s-c)}(s-c)}{K_{10}K_{12}} =$$ 7.929e+06 Н

Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в окружном направлении:

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

$$\vartheta_1 = -\frac{0.53\cdot K_{11}}{K_{14}\cdot K_{16}\cdot K_{17}\cdot\sin(0.5\delta_1)} =$$ -1.356

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мем-

бранными напряжениями 0

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

$$\vartheta_{2,2} = \frac{pD}{2(s-c)}\frac{1}{K_2[\sigma]} =$$ 0.7696

Коэффициент K_1 (принимается меньшее значение из двух):

$$K_1(\vartheta_1;\vartheta_{2,1}) =$$ 0.5782

$$K_1(\vartheta_1;\vartheta_{2,2}) =$$ 0.9954

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_i = K_1K_2[\sigma] =$$ 98.29 МПа

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0.9[\sigma_i]_3\sqrt{D(s-c)}(s-c)}{K_{14}K_{16}K_{17}} =$$ 4.31e+06 Н

Проверка прочности обечайки в области опорного узла:

Допускаемое усилие на опору:

$$[F_i] = \min\{[F]_2;[F]_3\} =$$ 4.31e+06 Н

Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в осевом направлении:

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

$$\vartheta_1 = -\frac{0.23\cdot K_{13}\cdot K_{15}}{K_{12}\cdot K_{10}} =$$ -0.2054

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями

$$\vartheta_{2,1} = \frac{-\bar{\sigma}_{mx}}{K_2[\sigma]} =$$ -0.005541

$$\vartheta_{2,2} = \left(\frac{pD}{4(s_{ef}-c)} - \bar{\sigma}_{mx}\right)\frac{1}{K_2[\sigma]} =$$ 0.3793

Коэффициент K_1 (принимается меньшее значение из двух):

$$K_1(\vartheta_1;\vartheta_{2,1}) =$$ 1.376

$$K_1(\vartheta_1;\vartheta_{2,2}) =$$ 1.492

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_i = K_1K_2[\sigma] =$$ 233.8 МПа

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0.7[\sigma_i]_2\sqrt{D(s_{ef}-c)}(s_{ef}-c)}{K_{10}K_{12}} =$$ 7.929e+06 Н

Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в окружном направлении:

Коэффициент, представляющий отношение местных мембранных напряжений к местным напряжениям изгиба: -1.356

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

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями

$$\vartheta_{2,1} = \qquad 0$$

$$\vartheta_{2,2} = \frac{pD}{2(s_{ef} - c)} \frac{1}{K_2[\sigma]} = \qquad 0.7696$$

Коэффициент K_1 (принимается меньшее значение из двух):

$$K_1(\vartheta_1; \vartheta_{2,1}) = \qquad 0.5782$$

$$K_1(\vartheta_1; \vartheta_{2,2}) = \qquad 0.9954$$

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_i = K_1 K_2 [\sigma] = \qquad 98.29 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[\mathrm{F}]_3 = \frac{0.9[\sigma_i]_3 \sqrt{D(s_{ef} - c)}(s_{ef} - c)}{K_{14} K_{16} K_{17}} = \qquad 4.31\text{e+06 Н}$$

Проверка прочности обечайки в области опорного узла:

Допускаемое усилие на опору:

$$[F_i] = \min\{[F]_2; [F]_3\} = \qquad 4.31\text{e+06 Н}$$

Проверка устойчивости обечайки в области опорного узла:

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

$$F_e = F_i \cdot \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{D}{(s - c)}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} = \qquad 5.256\text{e+05 Н}$$

Условие устойчивости обечайки, работающей под внутренним давлением:

$$\frac{|M_i|}{[M]} + \frac{|F_e|}{[F]} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 = \qquad 0.01764 < 1$$

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

2. Расчет на наружное давление

2.1. Конический переход 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	08Х18Н10Т, Лист①
Материал большего цилиндрического перехода	08Х18Н10Т, Лист①
Материал меньшего цилиндрического перехода	08Х18Н10Т, Лист①

Расчётная температура	T	485	ºС
Расчётное давление	P	0.1	МПа
Расчётная осевая сила	F	0	Н
Расчётный изгибающий момент	M	7.5e+06	Н·мм
Внутренний диаметр большей обечайки, перехода или днища	D	1700	мм
Внутренний диаметр меньшей цилиндрической обечайки	D_1	1020	мм
Угол наклона кососимметричной обечайки	α_1	33.18	град
Исполнительная толщина стенки конической обечайки (днища)	$S_к$	8	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	$C_{к_1}$	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	$C_{2м_2}$	0.8	мм

обечайки(перехода) для компенсации минусового допуска			
Прибавка технологическая к расчётной толщине меньшей цилиндрической обечайки (перехода)	$C_{2м_3}$	1	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине меньшей цилиндрической обечайки (перехода)	$C_{2м}$	3.8	мм
Коэффициент прочности продольного сварного шва	$\varphi_р$	1	
Коэффициент прочности кольцевого сварного шва	$\varphi_т$	1	
Допускаемое напряжение для материала конической обечайки (днища)	$[\sigma]$	96.5	МПа
Допускаемое напряжение для материала большей цилиндрической обечайки (перехода)	$[\sigma]_2$	96.5	МПа
Допускаемое напряжение для материала меньшей цилиндрической обечайки (перехода)	$[\sigma]_2$	96.5	МПа
Модуль продольной упругости материала конической обечайки (днища)	E	1.69e+05	МПа

Результаты расчёта

Расчётная длина переходной части конической обечайки:

$$a_1 = 0{,}7\sqrt{\frac{D}{\cos\alpha_1}(s_1 - c)} =$$ 64.65 мм

Расчётная длина переходной части конической обечайки у меньшего конца:

$$a_1 = \sqrt{\frac{D}{\cos\alpha_1}(s_1 - c)} =$$ 50.08 мм

Расчётная длина переходной части цилиндрической обечайки:

$$a_2 = 0{,}7\sqrt{D(s_2 - c)} =$$ 59.15 мм

Расчётная длина цилиндрической обечайки или штуцера у меньшего конца:

$$a_2 = 1{,}25\sqrt{D(s_2 - c)} =$$ 81.82 мм

Расчётный диаметр гладкой конической обечайки без тороидального перехода:

$$D_к = D - 1.4a_1 \sin\alpha_1 =$$ 1650 мм

Эффективные толщины переходных участков:

- конической части соединения без тороидального перехода:

$$s_{1E} = \max\left\{\frac{a_{1D}}{a_1}s_1; s_к\right\} =$$ 8 мм

- цилиндрической части соединения без тороидального перехода:

$$s_{2E} = \max\left\{\frac{a_{2D}}{a_2}s_2; s\right\} =$$ 8 мм

Допускаемая растягивающая сила:

$$[F] = \pi D_1(s_к - c)\varphi_T[\sigma]\cos\alpha_1 =$$ 2.08e+06 Н

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

где:

$$[p] = \frac{[p]_н}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_н}{[p]_E}\right)^2}} =$$ 0.1257 МПа

- допускаемое давление из условия прочности:

$$[p]_н = \frac{2[\sigma](s_к - c)}{\frac{D_к}{\cos\alpha_1} + (s_к - c)} =$$ 0.4102 МПа

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

$$[p]_E = \frac{20{,}8 \cdot 10^{-6} E}{n_y \cdot B_1} \frac{D_E}{l_E} \left[\frac{100(s_к - c)}{D_E}\right]^{2,5} =$$ 0.1321 МПа

- эффективный диаметр конической обечайки при действии наружного давления:

$$D_E = \max\left\{\begin{array}{l} \frac{D + D_1}{2\cos\alpha_1}; \\ \frac{D}{\cos\alpha_1} - 0{,}31(D + D_1)\sqrt{\frac{D + D_1}{s_к - c}} \cdot tg\alpha_1 \end{array}\right\} =$$ 1634

- эффективная длина конической обечайки при действии наружного давления:

$$l_E = \frac{D - D_1}{2\sin\alpha_1} =$$ 606.7 мм

- коэффициент B_1:

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

Допускаемая осевая сжимающая сила:
где:

$$[F] = \min\left\{\begin{array}{l} \frac{[F]_п}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_п}{[F]_E}\right)^2}}; \frac{D_1}{D_F}[F]_п \end{array}\right\} =$$ 1.072e+06 Н

- допускаемая осевая сила из условия прочности:

$$[F]_н = \pi D_F(s_к - c)[\sigma]\cos\alpha_1 =$$ 1.104e+06 Н

- допускаемая осевая сила из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[F]_E = \frac{310 \cdot 10^{-6} E}{n_y}(D_F\cos\alpha_1)^2 \cdot \left[\frac{100(s_к - c)}{D_F}\right]^{2,5} =$$ 1.251e+06 Н

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности:

$$[M] = \frac{D_1}{4}\pi D_1(s_к - c)\varphi_T[\sigma]\cos\alpha_1 =$$ 2.86e+08 Н·мм

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости:

где: 5.75e+08 Н·мм

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

- допускаемый изгибающий момент из условия прочности:

$$[M]_{\text{к}} = \frac{D_F}{4}\pi D_F (s_{\text{к}} - c)[\sigma]\cos\alpha_1 =$$ 1.015e+09 Н·мм

- допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_F = \frac{D_F}{3.5} \cdot \frac{310 \cdot 10^{-6} E}{n_y}(D_F \cos\alpha_1)^2 \cdot \left[\frac{100(s_{\text{к}} - c)}{D_F}\right]^{2,5} =$$ 6.978e+08 Н·мм

- эффективный диаметр конической обечайки при осевом сжатии и изгибе:

$$D_F = \frac{0,9D + 0,1D_1}{\cos\alpha_1} =$$ 1952 мм

- коэффициент запаса устойчивости:

$$n_y =$$ 2.4

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

$$[p] = \frac{2[\sigma]_2 \varphi_{\text{р}} (s_2 - c)}{D\beta_1 + (s_2 - c)} =$$ 0.2104 МПа

- коэффициент формы:

$$\beta_1 = \max\{0.5; \beta\} =$$ 2.264

- коэффициент β:

$$\beta = 0,4\sqrt{\frac{D}{s_2 - c}} \frac{\text{tg}\ \alpha_1}{1 + \sqrt{\frac{1 + \chi\left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)^2}{2\cos\ \alpha_1}}\ \chi\left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)} - 0,25 =$$ 2.264

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

$$[F] = \pi D \frac{(s_2 - c)[\sigma]_2 \varphi_{\text{т}}}{\beta_5} =$$ 3.779e+05 Н

- коэффициент β_5:

$$\beta_5 = \max\{1.0; (2\beta + 1.2)\} =$$ 5.728

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности переходной части:

$$[M] = \frac{D}{4}[F] =$$ 2.86e+08 Н·мм

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

где:

$$[p]_{нп} = \frac{2[\sigma]_2 \varphi_p (s_2 - c)}{D\beta_4 + (s_2 - c)} =$$ 0.3242 МПа

- общий коэффициент формы для переходной части:

$$\beta_4 = \max\{1.0;\ \beta_н\} =$$ 2.447

- коэффициент $\beta_н$:

$$\beta_н = \left\{ \begin{array}{ll} \beta + 0.75 & -при \quad x\left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)^2 \geq 1 \\ 0{,}4\sqrt{\frac{D}{s_2 - c}} \times & \\ \times \frac{tg\alpha_1}{x\left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)\sqrt{\frac{s_1 - c}{(s_2 - c)\cos\alpha_1}} + \sqrt{\frac{1 + x\left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)^2}{2}}} + & \\ + 0{,}5 & -при \quad x\left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)^2 < 1 \end{array} \right\} =$$ 2.447

- коэффициент β:

$$\beta = 0{,}4\sqrt{\frac{D}{s_2 - c}} \cdot \frac{tg\alpha_1}{1 + \sqrt{\frac{1 + x\left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)^2}{2\cos\alpha_1}}\, x\left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)} - 0{,}25 =$$ 1.697

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

$$[F] = \pi D \frac{(s_2 - c)[\sigma]_2 \cdot \varphi_p}{\beta_8} =$$ 3.335e+05 Н

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности переходной части:

$$[M] = \frac{D}{4}[F] =$$ 8.504e+07 Н·мм

Условие устойчивости

$$-\frac{p}{[p]} - \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} =$$ 0.8084< 1

Условие прочности большей переходной части

$$\left|\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]}\right| + \frac{M}{[M]} =$$ 0.522< 1

Условие прочности меньшей переходной части

$$\left|\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]}\right| + \frac{M}{[M]} =$$ 0.3967< 1

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

2.2. Цилиндрический переход

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 08Х18Н10Т, Лист①

Расчётная температура	T	485	ºC
Расчётное давление	P	0.1	МПа
Расчётный изгибающий момент	M	8.739e+06	Н·мм
Расчётное поперечное усилие	Q	1.41e+04	Н
Внутренний диаметр обечайки	D	1700	мм
Фактическая длина обечайки	Lact	110	мм
Расчётная длина обечайки	L	530	мм
Толщина стенки обечайки	S	8	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]	96.5	МПа
Модуль продольной упругости	E	1.69e+05	МПа

Результаты расчёта

Допускаемое наружное давление

$$[p] = \frac{[p]_п}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_п}{[p]_E}\right)^2}} =$$ 0.1365 МПа

Допускаемое наружное давление из условий прочности

$$[p]_п = \frac{2[\sigma](s-c)}{D + (s-c)} =$$ 0.4756 МПа

Допускаемое наружное давление из условий устойчивости в пределах упругости

$$[p]_E = \frac{20{,}8 \cdot 10^{-6} E}{n_y \cdot B_1} \frac{D}{L} \left[\frac{100(s-c)}{D}\right]^{2,5} =$$ 0.1425

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 упругости 9.296e+08

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

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности

$$[M]_п = \frac{\pi D(D+S-C)(S-C)[\sigma]}{4} =$$ 9.222e+08 Н·мм

Допускаемый изгибающий момент

$$[M] = \frac{[M]_п}{\sqrt{1+\left(\frac{[M]_п}{[M]_E}\right)^2}} =$$ 6.547e+08 Н·мм

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости в пределах упругости

$$[Q]_E = \frac{2.4E(S-C)^2}{n_y}\left[0.18+3.3\frac{D(S-C)}{L^2}\right] =$$ 5.366e+05 Н

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности

$$[Q]_п = \frac{\pi D(S-C)[\sigma]}{4} =$$ 5.411e+05 Н

Допускаемое перерезывающее усилие

$$[Q] = \frac{[Q]_п}{\sqrt{1+\left(\frac{[Q]_п}{[Q]_E}\right)^2}} =$$ 3.81e+05 Н

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 =$$ 0.7471< 1

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

2.3. 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	ºC
Расчётное давление	P	0.1	МПа
Расчётный изгибающий момент	M	1.643e+08	Н·мм
Расчётное поперечное усилие	Q	1.765e+05	Н
Внутренний диаметр обечайки	D	2000	мм
Фактическая длина обечайки	Lact	3300	мм
Расчётная длина обечайки	L	5288	мм
Толщина стенки обечайки	S	60	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

$$[p] = \frac{[p]_п}{\sqrt{1+\left(\frac{[p]_п}{[p]_E}\right)^2}} =$$ 5.251 МПа

Допускаемое наружное давление из условий прочности

$$[p]_п = \frac{2[\sigma](s-c)}{D+(s-c)} =$$ 7.421 МПа

Допускаемое наружное давление из условий устойчивости в пределах упругости

$$[p]_E = \frac{20{,}8\cdot 10^{-6}\,E}{n_y\cdot B_1}\,\frac{D}{L}\left[\frac{100(s-c)}{D}\right]^{2,5} =$$ 7.429

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 устойчивости в пределах упругости 1.171e+09 Н

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

Допускаемое осевое усилие из условия устойчивости в пределах упругости

$$[F]_E = \mathrm{Min}\{[F]_{E1}; [F]_{E2}\} =$$ 1.171e+09 Н

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности

$$[F]_п = \pi(D+S-C)(S-C)[\sigma] =$$ 4.928e+07 Н

Допускаемый изгибающий момент из условий устойчивости в пределах упругости

$$[M]_E = \frac{89 \cdot 10^{-6} E}{n_y} D^3 \left[\frac{100(S-C)}{D}\right]^{2,5} =$$ 6.692e+11 Н·мм

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности

$$[M]_п = \frac{\pi D(D+S-C)(S-C)[\sigma]}{4} =$$ 2.464e+10 Н·мм

Допускаемый изгибающий момент

$$[M] = \frac{[M]_п}{\sqrt{1+\left(\frac{[M]_п}{[M]_E}\right)^2}} =$$ 2.462e+10 Н·мм

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости в пределах упругости

$$[Q]_E = \frac{2.4E(S-C)^2}{n_y}\left[0.18 + 3.3\frac{D(S-C)}{L^2}\right] =$$ 9.744e+07 Н

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности

$$[Q]_п = \frac{\pi D(S-C)[\sigma]}{4} =$$ 1.198e+07 Н

Допускаемое перерезывающее усилие

$$[Q] = \frac{[Q]_п}{\sqrt{1+\left(\frac{[Q]_п}{[Q]_E}\right)^2}} =$$ 1.189e+07 Н

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 =$$ 0.02594< 1

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

2.4. 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 методом конечных элементов
Внешние нагрузки определялись без учета стесненности температурных деформаций
Внешние нагрузки приложены в месте пересечения оси штуцера с образующей обечайки или днища
Режим:Рабочий

Исходные данные

Материал корпуса		09Г2С, Лист	
Материал штуцера		09Г2С КП 245, Поковка	
Расчётная температура корпуса	T	289	°C
Расчётное давление	P	0.1	МПа
Внутренний диаметр обечайки, днища или конического перехода, в месте расположения отверстия	D	2000	мм
Исполнительная толщина стенки обечайки, конического перехода или днища	s	60	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	$[p]_E$	7.429	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	254	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
Размер сварного шва приварки штуцера (по образующей обечайки)	a	0	мм
Размер сварного шва приварки штуцера (по образующей штуцера)	b	0	мм
Вылет штуцера	L_f	400	мм
Осевая нагрузка на штуцер	F_z	3414	Н

Изгибающий момент вокруг оси X действующий на штуцер	M_x	2.053e+06	Н*мм
Изгибающий момент вокруг оси Y действующий на штуцер	M_y	1.543e+06	Н*мм
Изгибающий момент вокруг оси Z действующий на штуцер	M_z	2.564e+06	Н*мм
Перерезывающая сила вдоль оси X действующая на штуцер	F_x	5139	Н
Перерезывающая сила вдоль оси Y действующая на штуцер	F_y	5139	Н
Модуль продольной упругости материала обечайки	E	1.72e+05	МПа
Коэффициент Пуассона обечайки	μ	0.3	
Модуль продольной упругости материала штуцера	E_1	1.72e+05	МПа
Коэффициент Пуассона штуцера	μ_1	0.3	
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

$$D_р = D =$$ 2000 мм

Расчётная толщина стенки корпуса

$$s_р = \frac{pD}{2[\sigma]\varphi_р - p} =$$ 0.7356 мм

Расчётный диаметр отверстия

$$d_р = d + 2c_s =$$ 97.2 мм

Расчётная толщина стенки штуцера

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

Расчётная длина штуцера

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

$$L_o = \sqrt{D_р(s - c)} =$$ 335 мм

Расчётная ширина зоны укрепления, прилегающей к штуцеру

$$l_р =$$ 335 мм

Расчётный диаметр неукрепляемого отверстия

$$d_{\text{ор}} = 0{,}4\sqrt{D_{\text{р}}(s-c)} =$$ 134 мм

Коэффициент понижения прочности узла врезки штуцера

$$V = \min\left\{1;\ \frac{1+\dfrac{l_{1\text{р}}(s_1-c_s)\gamma_1 + l_{2\text{р}}s_2\gamma_2 + l_{3\text{р}}(s_3-c_s-c_{s1})\gamma_3}{l_{\text{р}}(s-c)}}{1+0{,}5\dfrac{d_{\text{р}}-d_{\text{ор}}}{l_{\text{р}}} + K_1\dfrac{d+2c_s}{D_{\text{р}}}\dfrac{\varphi}{\varphi_1}\dfrac{l_{1\text{р}}}{l_{\text{р}}}}\right\} =$$ 1

Допускаемое давление в пределах пластичности

$$[p]_{\text{м}} = \frac{2K_1(s-c)[\sigma]}{D_{\text{р}}+(s-c)V}V =$$ 7.421 МПа

Допускаемое давление для узла врезки штуцера

$$[p] = \frac{[p]_{\text{п}}}{\sqrt{1+\left(\dfrac{[p]_{\text{п}}}{[p]_{\text{Е}}}\right)^2}} =$$ 5.251 МПа

где

$$K_1 =$$ 1

Приведенное суммарное напряжение в зоне обечайки

$$\sigma_{p_o} =$$ 10.54 МПа

Приведенное мембранное напряжение в зоне обечайки

$$\sigma_{pm_o} =$$ 9.84 МПа

Приведенное суммарное напряжение в зоне штуцера

$$\sigma_{p_шт} =$$ 14.38 МПа

Приведенное мембранное напряжение в зоне штуцера

$$\sigma_{pm_шт} =$$ 13.86 МПа

Приведенное суммарное напряжение на внутренней поверхности

$$\sigma_{p_вн_o} =$$ 13.54 МПа

Приведенное суммарное напряжение на внутренней поверхности

$$\sigma_{p_вн_шт} =$$ 25.52 МПа

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

2.5. 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 методом конечных элементов
Внешние нагрузки определялись без учета стесненности температурных деформаций
Внешние нагрузки приложены в месте пересечения оси штуцера с образующей обечайки или днища
Режим:Рабочий

Исходные данные

Материал корпуса		09Г2С, Лист	
Материал штуцера		09Г2С КП 245, Поковка	
Расчётная температура корпуса	T	289	°С
Расчётное давление	P	0.1	МПа
Внутренний диаметр обечайки, днища или конического перехода, в месте расположения отверстия	D	2000	мм
Исполнительная толщина стенки обечайки, конического перехода или днища	s	60	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	$[p]_E$	7.429	МПа
Внутренний диаметр штуцера	d	75	мм
Исполнительная толщина стенки штуцера	s_1	30	мм
Исполнительная длина штуцера (для заведомо длинных штуцеров l1=0)	l_1	260	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	160	мм
Размер сварного шва приварки штуцера (по образующей обечайки)	a	0	мм
Размер сварного шва приварки штуцера (по образующей штуцера)	b	0	мм
Вылет штуцера	L_f	400	мм
Осевая нагрузка на штуцер	F_z	4034	Н

Изгибающий момент вокруг оси X действующий на штуцер	M_x	1.944e+06	Н*мм
Изгибающий момент вокруг оси Y действующий на штуцер	M_y	1.458e+06	Н*мм
Изгибающий момент вокруг оси Z действующий на штуцер	M_z	2.43e+06	Н*мм
Перерезывающая сила вдоль оси X действующая на штуцер	F_x	6063	Н
Перерезывающая сила вдоль оси Y действующая на штуцер	F_y	6063	Н
Модуль продольной упругости материала обечайки	E	1.72e+05	МПа
Коэффициент Пуассона обечайки	μ	0.3	
Модуль продольной упругости материала штуцера	E_1	1.72e+05	МПа
Коэффициент Пуассона штуцера	μ_1	0.3	
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

$$D_р = D =$$ 2000 мм

Расчётная толщина стенки корпуса

$$s_р = \frac{pD}{2[\sigma]\varphi_р - p} =$$ 0.7356 мм

Расчётный диаметр отверстия

$$d_р = d + 2c_s =$$ 80.2 мм

Расчётная толщина стенки штуцера

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

Расчётная длина штуцера

$$l_{1р} = \min\left\{l_1; 1{,}25\sqrt{(d + 2c_s)(s_1 - c_s)}\right\} =$$ 58.6 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

$$L_o = \sqrt{D_р(s - c)} =$$ 335 мм

Расчётная ширина зоны укрепления, прилегающей к штуцеру

$$l_р =$$ 160 мм

Расчётный диаметр неукрепляемого отверстия

$$d_{\text{ор}} = 0{,}4\sqrt{D_{\text{р}}(s-c)} =$$ 134 мм

Коэффициент понижения прочности узла врезки штуцера

$$V = \min\left\{1;\ \frac{1+\dfrac{l_{1\text{р}}(s_1-c_s)\gamma_1 + l_{2\text{р}}s_2\gamma_2 + l_{3\text{р}}(s_3-c_s-c_{s1})\gamma_3}{l_{\text{р}}(s-c)}}{1+0{,}5\dfrac{d_{\text{р}}-d_{\text{ор}}}{l_{\text{р}}} + K_1\dfrac{d+2c_s}{D_{\text{р}}}\dfrac{\varphi}{\varphi_1}\dfrac{l_{1\text{р}}}{l_{\text{р}}}}\right\} =$$ 1

Допускаемое давление в пределах пластичности

$$[p]_{\text{м}} = \frac{2K_1(s-c)[\sigma]}{D_{\text{р}}+(s-c)V}V =$$ 7.421 МПа

Допускаемое давление для узла врезки штуцера

$$[p] = \frac{[p]_{\text{п}}}{\sqrt{1+\left(\dfrac{[p]_{\text{п}}}{[p]_{\text{Е}}}\right)^2}} =$$ 5.251 МПа

где

$$K_1 =$$ 1

Приведенное суммарное напряжение в зоне обечайки

$$\sigma_{p_o} =$$ 16.82 МПа

Приведенное мембранное напряжение в зоне обечайки

$$\sigma_{pm_o} =$$ 14.27 МПа

Приведенное суммарное напряжение в зоне штуцера

$$\sigma_{p_шт} =$$ 27.73 МПа

Приведенное мембранное напряжение в зоне штуцера

$$\sigma_{pm_шт} =$$ 24.76 МПа

Приведенное суммарное напряжение на внутренней поверхности

$$\sigma_{p_вн_o} =$$ 17.34 МПа

Приведенное суммарное напряжение на внутренней поверхности

$$\sigma_{p_вн_шт} =$$ 37.85 МПа

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

2.6. 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
Наружное давление
Отверстие в цилиндрической обечайке
Расчёт укрепления одиночного отверстия
Укрепление непропущенным (непроходящим) штуцером
Штуцер с осью нормальной к корпусу сосуда
Расчёт с учетом внешних нагрузок методом конечных элементов
Внешние нагрузки определялись без учета стесненности температурных деформаций
Внешние нагрузки приложены в месте пересечения оси штуцера с образующей обечайки или днища
Режим: Рабочий

Исходные данные

Материал корпуса		09Г2С, Лист	
Материал штуцера		09Г2С КП 245, Поковка	
Расчётная температура корпуса	T	289	°C
Расчётное давление	p	0.1	МПа
Внутренний диаметр обечайки, днища или конического перехода, в месте расположения отверстия	D	2000	мм
Исполнительная толщина стенки обечайки, конического перехода или днища	s	60	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	$[p]_E$	7.429	МПа
Внутренний диаметр штуцера	d	60	мм
Исполнительная толщина усиленной части штуцера	s_1	35	мм
Исполнительная длина усиленной части штуцера	l_1	180	мм
Исполнительная толщина стенки штуцера	$s_{1ш}$	12	мм
Исполнительная длина штуцера	$\ell_{1ш}$	230	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	0	мм
Размер сварного шва приварки штуцера (по образующей обечайки)	a	0	мм
Размер сварного шва приварки штуцера (по образующей штуцера)	b	0	мм
Вылет штуцера	L_f	400	мм

Осевая нагрузка на штуцер	F_z	1227	Н
Изгибающий момент вокруг оси X действующий на штуцер	M_x	3.766e+05	Н*мм
Изгибающий момент вокруг оси Y действующий на штуцер	M_y	2.794e+05	Н*мм
Изгибающий момент вокруг оси Z действующий на штуцер	M_z	4.617e+05	Н*мм
Перерезывающая сила вдоль оси X действующая на штуцер	F_x	1859	Н
Перерезывающая сила вдоль оси Y действующая на штуцер	F_y	1859	Н
Модуль продольной упругости материала обечайки	E	1.72e+05	МПа
Коэффициент Пуассона обечайки	μ	0.3	
Модуль продольной упругости материала штуцера	E_1	1.72e+05	МПа
Коэффициент Пуассона штуцера	μ_1	0.3	
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

$$D_р = D =$$ 2000 мм

Расчётная толщина стенки корпуса

$$s_р = \frac{pD}{2[\sigma]\varphi_р - p} =$$ 0.7356 мм

Расчётный диаметр отверстия

$$d_р = d + 2c_s =$$ 65.2 мм

Расчётная толщина стенки штуцера

$$s_{1р} = \frac{p(d + 2c_s)}{2[\sigma]_1\varphi_1 - p} =$$ 0.02741 мм

Расчётная длина штуцера

$$l_{1р} = \min\left\{l_1; 1{,}25\sqrt{(d + 2c_s)(s_1 - c_s)}\right\} =$$ 57.45 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

$$L_o = \sqrt{D_р(s - c)} =$$ 335 мм

Расчётная ширина зоны укрепления, прилегающей к штуцеру

335 мм

$$l_р =$$

Расчётный диаметр неукрепляемого отверстия

$$d_{ор} = 0,4\sqrt{D_р(s-c)} =$$ 134 мм

Коэффициент понижения прочности узла врезки штуцера

$$V = \min\left\{1; \frac{1 + \dfrac{l_{1р}(s_1 - c_s)\chi_1 + l_{2р}s_2\chi_2 + l_{3р}(s_3 - c_s - c_{s1})\chi_3}{l_р(s-c)}}{1 + 0,5\dfrac{d_р - d_{ор}}{l_р} + K_1\dfrac{d + 2c_s}{D_р}\dfrac{\varphi}{\varphi_1}\dfrac{l_{1р}}{l_р}}\right\} =$$ 1

Допускаемое давление в пределах пластичности

$$[p]_п = \frac{2K_1(s-c)[\sigma]}{D_р + (s-c)V}V =$$ 7.421 МПа

Допускаемое давление для узла врезки штуцера

$$[p] = \frac{[p]_п}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{[p]_п}{[p]_Е}\right)^2}} =$$ 5.251 МПа

где

$$K_1 =$$ 1

Приведенное суммарное напряжение в зоне обечайки

$$\sigma_{p_o} =$$ 4.64 МПа

Приведенное мембранное напряжение в зоне обечайки

$$\sigma_{pm_o} =$$ 4.47 МПа

Приведенное суммарное напряжение в зоне штуцера

$$\sigma_{p_шт} =$$ 35.4 МПа

Приведенное мембранное напряжение в зоне штуцера

$$\sigma_{pm_шт} =$$ 32.04 МПа

Приведенное суммарное напряжение на внутренней поверхности

$$\sigma_{p_вн_o} =$$ 6.02 МПа

Приведенное суммарное напряжение на внутренней поверхности

$$\sigma_{p_вн_шт} =$$ 34.78 МПа

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

2.7. 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 09Г2С, Труба

Расчётная температура	T	289	ºC
Расчётное давление	P	0.1	МПа
Внутренний диаметр обечайки	D	45	мм
Фактическая длина обечайки	Lact	500	мм
Расчётная длина обечайки	L	500	мм
Толщина стенки обечайки	S	6	мм
Прибавка на коррозию	c_1	3.18	мм
Прибавка – минусовый допуск	c_2	0.9	мм
Прибавка технологическая	c_3	0	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки	c	4.08	мм
Допускаемое напряжение	[σ]	136	МПа
Модуль продольной упругости	E	1.72e+05	МПа

Результаты расчёта

Допускаемое наружное давление

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

8.239 МПа

Допускаемое наружное давление из условий прочности

$$[p]_п = \frac{2[\sigma](s-c)}{D+(s-c)} =$$

11.13 МПа

Допускаемое наружное давление из условий устойчивости в пределах упругости

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

12.25

Коэффициент

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

0.4117

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

2.8. Цилиндрическая 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: Гладкая цилиндрическая обечайка, работающая под действием наружного давления - изгибающего момента
Режим: Рабочий

Исходные данные

Материал обечайки 09Г2С, Лист

Расчётная температура	T	450	ºC
Расчётное давление	P	0.1	МПа
Расчётный изгибающий момент	M	9.174e+07	Н·мм
Расчётное поперечное усилие	Q	6.698e+04	Н
Внутренний диаметр обечайки	D	2092	мм
Фактическая длина обечайки	Lact	1420	мм
Расчётная длина обечайки	L	1945	мм
Толщина стенки обечайки	S	14	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

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

0.2067 МПа

Допускаемое наружное давление из условий прочности

$$[p]_п = \frac{2[\sigma](s-c)}{D+(s-c)} =$$

0.689 МПа

Допускаемое наружное давление из условий устойчивости в пределах упругости

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

0.2166

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 упругости 7.852e+09

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

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности

$$[M]_п = \frac{\pi D(D+S-C)(S-C)[\sigma]}{4} =$$ 2.501e+09 Н·мм

Допускаемый изгибающий момент

$$[M] = \frac{[M]_п}{\sqrt{1+\left(\frac{[M]_п}{[M]_E}\right)^2}} =$$ 2.383e+09 Н·мм

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости в пределах упругости

$$[Q]_E = \frac{2.4E(S-C)^2}{n_y}\left[0.18+3.3\frac{D(S-C)}{L^2}\right] =$$ 2.622e+06 Н

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности

$$[Q]_п = \frac{\pi D(S-C)[\sigma]}{4} =$$ 1.19e+06 Н

Допускаемое перерезывающее усилие

$$[Q] = \frac{[Q]_п}{\sqrt{1+\left(\frac{[Q]_п}{[Q]_E}\right)^2}} =$$ 1.084e+06 Н

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 =$$ 0.5262< 1

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

2.9. Укрепление отверстия люка М1

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
Только расчёт укрепления отверстия
Режим:Рабочий

Исходные данные

Материал корпуса		09Г2С, Лист	
Материал штуцера		09Г2С, Лист	
Расчётная температура корпуса	T	450	°С
Расчётное давление	p	0.1	МПа
Внутренний диаметр обечайки, днища или конического перехода, в месте расположения отверстия	D	2092	мм
Исполнительная толщина стенки обечайки, конического перехода или днища	s	14	мм
Коэффициент прочности сварных соединений обечаек и днищ	φ	1	
Допускаемое напряжение для материала обечайки, перехода или днища при расчётной температуре	$[\sigma]$	71	МПа
Допускаемое наружное давление в пределах упругости	$[p]_E$	0.2166	МПа
Внутренний диаметр штуцера	d	800	мм
Исполнительная толщина стенки штуцера	s_1	14	мм
Исполнительная длина штуцера (для заведомо длинных штуцеров l1=0)	l_1	0	мм
Допускаемое напряжение для материала штуцера	$[\sigma]_1$	71	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	0	мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии стенки корпуса	c_1	2	мм
Прибавка для компенсации минусового допуска стенки корпуса	c_2	0.8	мм
Прибавка технологическая стенки корпуса	c_3	1	мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии стенки штуцера	c_{s1}	2	мм
Прибавка для компенсации минусового допуска стенки штуцера	c_{s2}	0.8	мм
Прибавка технологическая стенки штуцера	c_{s3}	1	мм

Результаты расчёта

Расчётный внутренний диаметр цилиндрической обечайки

$$D_р = D =$$ 2092 мм

Расчётная толщина стенки корпуса

$$s_р = \frac{pD}{2[\sigma]\varphi_р - p} =$$ 1.474 мм

Расчётный диаметр отверстия

$$d_р = d + 2c_s =$$ 807.6 мм

Расчётная толщина стенки штуцера

$$s_{1р} = \frac{p(d + 2c_s)}{2[\sigma]_1\varphi_1 - p} =$$ 0.5691 мм

Расчётная длина штуцера

$$l_{1р} = \min\left\{l_1; 1{,}25\sqrt{(d + 2c_s)(s_1 - c_s)}\right\} =$$ 113.5 мм

Отношение допускаемых напряжений штуцера и корпуса

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

Ширина зоны укрепления, прилегающей к штуцеру

$$L_o = \sqrt{D_р(s - c)} =$$ 146.1 мм

Расчётная ширина зоны укрепления, прилегающей к штуцеру

$$l_р =$$ 146.1 мм

Расчётный диаметр неукрепляемого отверстия

$$d_{ор} = 0{,}4\sqrt{D_р(s - c)} =$$ 58.43 мм

Коэффициент понижения прочности узла врезки штуцера

$$V = \min\left\{1; \frac{1 + \dfrac{l_{1р}(s_1 - c_s)\chi_1 + l_{2р}s_2\chi_2 + l_{3р}(s_3 - c_s - c_{s1})\chi_3}{l_р(s - c)}}{1 + 0{,}5\dfrac{d_р - d_{ор}}{l_р} + K_1\dfrac{d + 2c_s}{D_р}\dfrac{\varphi}{\varphi_1}\dfrac{l_{1р}}{l_р}}\right\} =$$ 0.4598

Допускаемое давление в пределах пластичности

$$[p]_н = \frac{2K_1(s - c)[\sigma]}{D_р + (s - c)V}V =$$ 0.3176 МПа

Допускаемое давление для узла врезки штуцера

$$[p] = \frac{[p]_п}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{[p]_п}{[p]_н}\right)^2}} =$$ 0.179 МПа

где

$$K_1 =$$ 1

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

2.10. Конический переход 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	09Г2С, Лист
Материал большего цилиндрического перехода	09Г2С, Лист
Материал меньшего цилиндрического перехода	09Г2С, Лист

Расчётная температура	T	450	ºС
Расчётное давление	P	0.1	МПа
Расчётная осевая сила	F	0	Н
Расчётный изгибающий момент	M	2.452e+07	Н·мм
Внутренний диаметр большей обечайки, перехода или днища	D	2092	мм
Внутренний диаметр меньшей цилиндрической обечайки	D_1	1000	мм
Угол наклона кососимметричной обечайки	α_1	45②	град
Исполнительная толщина стенки конической обечайки (днища)	$S_к$	10	мм
Исполнительная толщина стенки большей цилиндрической обечайки	$S_б$	14	мм
Исполнительная толщина стенки меньшей цилиндрической обечайки	$S_м$	8	мм
Прибавка к расчётной толщине конической обечайки (днища) для компенсации коррозии и эрозии	$C_{к_1}$	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 цилиндрической обечайки (перехода)	$C_{2м_3}$	1	мм
Сумма прибавок к расчётной толщине меньшей цилиндриче-	$C_{2м}$	3.8	мм

ской обечайки (перехода)			
Коэффициент прочности продольного сварного шва	φ_p	1	
Коэффициент прочности кольцевого сварного шва	$\varphi_т$	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:

$$a_1 = 0{,}7\sqrt{\frac{D}{\cos\alpha_1}(s_1 - c)} =$$ 94.81 мм

Расчётная длина переходной части конической обечайки у меньшего конца:

$$a_1 = \sqrt{\frac{D}{\cos\alpha_1}(s_1 - c)} =$$ 65.55 мм

Расчётная длина переходной части цилиндрической обечайки:

$$a_2 = 0{,}7\sqrt{D(s_2 - c)} =$$ 102.3 мм

Расчётная длина цилиндрической обечайки или штуцера у меньшего конца:

$$a_2 = 1{,}25\sqrt{D(s_2 - c)} =$$ 81.01 мм

Расчётный диаметр гладкой конической обечайки без тороидального перехода:

$$D_к = D - 1.4a_1 \sin\alpha_1 =$$ 1998 мм

Эффективные толщины переходных участков:

- конической части соединения без тороидального перехода:

$$s_{1E} = \max\left\{\frac{a_{1D}}{a_1}s_1; s_к\right\} =$$ 10 мм

- цилиндрической части соединения без тороидального перехода:

$$s_{2E} = \max\left\{\frac{a_{2D}}{a_2}s_2; s\right\} =$$ 14 мм

Допускаемая растягивающая сила:

$$[F] = \pi D_1(s_к - c)\varphi_T[\sigma]\cos\alpha_1 =$$ 2.744e+06 Н

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

где:

$$[p] = \frac{[p]_к}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_к}{[p]_E}\right)^2}} =$$ 0.1337 МПа

- допускаемое давление из условия прочности:

$$[p]_н = \frac{2[\sigma](s_н - c)}{\frac{D_н}{\cos\alpha_1} + (s_н - c)} =$$ 0.3109 МПа

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

$$[p]_E = \frac{20{,}8\cdot 10^{-6} E}{n_y \cdot B_1}\frac{D_E}{l_E}\left[\frac{100(s_н - c)}{D_E}\right]^{2,5} =$$ 0.1482 МПа

- эффективный диаметр конической обечайки при действии наружного давления:

$$D_E = \max\left\{\begin{array}{l}\frac{D + D_1}{2\cos\alpha_1};\\ \frac{D}{\cos\alpha_1} - 0{,}31(D + D_1)\sqrt{\frac{D + D_1}{s_н - c}}\cdot tg\alpha_1\end{array}\right\} =$$ 2198

- эффективная длина конической обечайки при действии наружного давления:

$$l_E = \frac{D - D_1}{2\sin\alpha_1} =$$ 760.8 мм

- коэффициент B_1:

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

Допускаемая осевая сжимающая сила:
где:

$$[F] = \min\left\{\begin{array}{l}\frac{[F]_п}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_п}{[F]_E}\right)^2}};\ \frac{D_1}{D_F}[F]_п\end{array}\right\} =$$ 9.935e+05 Н

- допускаемая осевая сила из условия прочности:

$$[F]_н = \pi D_F(s_н - c)[\sigma]\cos\alpha_1 =$$ 9.935e+05 Н

- допускаемая осевая сила из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[F]_E = \frac{310\cdot 10^{-6} E}{n_y}(D_F\cos\alpha_1)^2\cdot\left[\frac{100(s_н - c)}{D_F}\right]^{2,5} =$$ 1.634e+06 Н

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности:

$$[M] = \frac{D_1}{4}\pi D_1(s_н - c)\varphi_T[\sigma]\cos\alpha_1 =$$ 2.524e+08 Н·мм

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости:
где:

$$[M] = \frac{[M]_п}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_п}{[M]_E}\right)^2}} =$$ 1.083e+09 Н·мм

- допускаемый изгибающий момент из условия прочности:

$$[M]_{н} = \frac{D_F}{4}\pi D_F(s_к - c)[\sigma]\cos\alpha_1 =$$ 1.925e+09 Н·мм

- допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_E = \frac{D_F}{3.5}\cdot\frac{310\cdot 10^{-6}E}{n_y}(D_F\cos\alpha_1)^2\cdot\left[\frac{100(s_к - c)}{D_F}\right]^{2,5} =$$ 1.31e+09 Н·мм

- эффективный диаметр конической обечайки при осевом сжатии и изгибе:

$$D_F = \frac{0,9D + 0,1D_1}{\cos\alpha_1} =$$ 2806 мм

- коэффициент запаса устойчивости:

$$n_y =$$ 2.4

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

$$[p] = \frac{2[\sigma]_2\varphi_р(s_2 - c)}{D\beta_1 + (s_2 - c)} =$$ 0.2919 МПа

- коэффициент формы:

$$\beta_1 = \max\{0.5;\beta\} =$$ 2.367

- коэффициент β:

$$\beta = 0,4\sqrt{\frac{D}{s_2 - c}}\,\frac{\operatorname{tg}\alpha_1}{1 + \sqrt{\dfrac{1 + \chi\left(\dfrac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)^2}{2\cos\alpha_1}}\,\chi\left(\dfrac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)} - 0,25 =$$ 2.367

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

$$[F] = \pi D\frac{(s_2 - c)[\sigma]_2\varphi_т}{\beta_5} =$$ 8.022e+05 Н

- коэффициент β_5:

$$\beta_5 = \max\{1.0;(2\beta + 1.2)\} =$$ 5.933

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности переходной части:

$$[M] = \frac{D}{4}[F] =$$ 2.524e+08 Н·мм

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

$$[p]_{нн} = \frac{2[\sigma]_2\varphi_р(s_2 - c)}{D\beta_4 + (s_2 - c)} =$$ 0.2216 МПа

- общий коэффициент формы для переходной части:

$$\beta_4 = \max\left(1.0;\ \beta_н\right) =$$ 2.687

- коэффициент $\beta_н$:

$$\beta_н = \left\{ \begin{array}{ll} \beta + 0.75 & -\ при \quad x\left(\dfrac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)^2 \geq 1 \\ 0{,}4\sqrt{\dfrac{D}{s_2 - c}} \times & \\ \times \dfrac{tg\,\alpha_1}{x\left(\dfrac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)\sqrt{\dfrac{s_1 - c}{(s_2 - c)\cos\alpha_1}} + \sqrt{\dfrac{1 + x\left(\dfrac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)^2}{2}}} + & \\ +\ 0{,}5 & -\ при \quad x\left(\dfrac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)^2 < 1 \end{array} \right\} =$$ 2.687

- коэффициент β:

$$\beta = 0{,}4\sqrt{\frac{D}{s_2 - c}} \cdot \frac{tg\,\alpha_1}{1 + \sqrt{\dfrac{1 + x\left(\dfrac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)^2}{2\cos\alpha_1}}\, x\left(\dfrac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)} - 0{,}25 =$$ 1.937

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

$$[F] = \pi D \frac{(s_2 - c)[\sigma]_2 \cdot \varphi_р}{\beta_8} =$$ 2.141e+05 Н

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности переходной части:

$$[M] = \frac{D}{4}[F] =$$ 5.353e+07 Н·мм

Условие устойчивости

$$-\frac{p}{[p]} - \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} =$$ 0.7703< 1

Условие прочности большей переходной части

$$\left|\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]}\right| + \frac{M}{[M]} =$$ 0.401< 1

Условие прочности меньшей переходной части

$$\left|\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]}\right| + \frac{M}{[M]} =$$ 0.9094< 1

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

2.11. 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 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	ºC
Расчётное давление	P	0.1	МПа
Опорное усилие, действующее на опору	F	1.389e+05	Н
Максимальный момент над опорой	M	3.975e+07	Н*мм
Расчётное поперечное усилие	Q	8.683e+04	Н
Внутренний диаметр обечайки	D	2000	мм
Исполнительная толщина стенки обечайки	s	60	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	620	мм
Длина цилиндрической выступающей части, включая отбортовку	a	1860	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]	5.426	МПа
Допускаемое осевое усилие из условий устойчивости по ГОСТ Р 52857.2-2007	[F]	4.924e+07	Н
Допускаемый изгибающий момент из условий устойчивости по ГОСТ Р 52857.2-2007	[M]	2.462e+10	Н·мм
Допускаемая перерезывающая сила по ГОСТ Р 52857.2-2007	[Q]	1.189e+07	Н

Результаты расчёта

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

$$\beta_1 = 0{,}91\frac{b}{\sqrt{D(s-c)}} =$$ 0.815

Общее осевое мембранное напряжение, действующее в области опорного узла:

$$\overline{\sigma}_{mx} = \frac{4M_i}{\pi D^2(s-c)} =$$ 0.2256 МПа

Коэффициенты, учитывающие влияние ширины пояса опоры:

$$K_{10} =$$ 0.3952

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:

$$\vartheta_1 = -\frac{0.23\cdot K_{13}\cdot K_{15}}{K_{12}\cdot K_{10}} =$$ -0.2054

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями

$$\vartheta_{2,1} = \frac{-\overline{\sigma}_{mx}}{K_2[\sigma]} =$$ -0.001327

$$\vartheta_{2,2} = \left(\frac{pD}{4(s-c)} - \overline{\sigma}_{mx}\right)\frac{1}{K_2[\sigma]} =$$ -0.00657

Коэффициент K_1 (принимается меньшее значение из двух):

$$K_1(\vartheta_1;\vartheta_{2,1}) =$$ 1.379

$$K_1(\vartheta_1;\vartheta_{2,2}) =$$ 1.375

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_i = K_1K_2[\sigma] =$$ 233.7 МПа

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0.7[\sigma_i]_2\sqrt{D(s-c)}(s-c)}{K_{10}K_{12}} =$$ 7.924e+06 Н

Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в окружном направлении:

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

$$\vartheta_1 = -\frac{0.53\cdot K_{11}}{K_{14}\cdot K_{16}\cdot K_{17}\cdot\sin(0.5\delta_1)} =$$ -1.417

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мем-

бранными напряжениями 0

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

$$\vartheta_{2,2} = \frac{pD}{2(s-c)}\frac{1}{K_2[\sigma]} =$$ -0.01049

Коэффициент K_1 (принимается меньшее значение из двух):

$$K_1(\vartheta_1;\vartheta_{2,1}) =$$ 0.5589

$$K_1(\vartheta_1;\vartheta_{2,2}) =$$ 0.5532

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_i = K_1K_2[\sigma] =$$ 94.05 МПа

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0.9[\sigma_i]_3\sqrt{D(s-c)}(s-c)}{K_{14}K_{16}K_{17}} =$$ 4.31e+06 Н

Проверка прочности обечайки в области опорного узла:

Допускаемое усилие на опору:

$$[F_i] = \min\{[F]_2;[F]_3\} =$$ 4.31e+06 Н

Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в осевом направлении:

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

$$\vartheta_1 = -\frac{0.23\cdot K_{13}\cdot K_{15}}{K_{12}\cdot K_{10}} =$$ -0.2054

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями

$$\vartheta_{2,1} = \frac{-\overline{\sigma}_{mx}}{K_2[\sigma]} =$$ -0.001327

$$\vartheta_{2,2} = \left(\frac{pD}{4(s_{ef}-c)} - \overline{\sigma}_{mx}\right)\frac{1}{K_2[\sigma]} =$$ -0.00657

Коэффициент K_1 (принимается меньшее значение из двух):

$$K_1(\vartheta_1;\vartheta_{2,1}) =$$ 1.379

$$K_1(\vartheta_1;\vartheta_{2,2}) =$$ 1.375

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_i = K_1K_2[\sigma] =$$ 233.7 МПа

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0.7[\sigma_i]_2\sqrt{D(s_{ef}-c)}(s_{ef}-c)}{K_{10}K_{12}} =$$ 7.924e+06 Н

Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в окружном направлении:

Коэффициент, представляющий отношение местных мембранных напряжений к местным напряжениям изгиба: -1.417

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

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями

$$\vartheta_{2,1} = \qquad 0$$

$$\vartheta_{2,2} = \frac{pD}{2(s_{ef} - c)} \frac{1}{K_2[\sigma]} = \qquad -0.01049$$

Коэффициент K_1 (принимается меньшее значение из двух):

$$K_1(\vartheta_1; \vartheta_{2,1}) = \qquad 0.5589$$

$$K_1(\vartheta_1; \vartheta_{2,2}) = \qquad 0.5532$$

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_i = K_1 K_2 [\sigma] = \qquad 94.05 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0.9[\sigma_i]_3 \sqrt{D(s_{ef} - c)}(s_{ef} - c)}{K_{14} K_{16} K_{17}} = \qquad 4.31e+06 \text{ Н}$$

Проверка прочности обечайки в области опорного узла:

Допускаемое усилие на опору:

$$[F_i] = \min\{[F]_2; [F]_3\} = \qquad 4.31e+06 \text{ Н}$$

Проверка устойчивости обечайки в области опорного узла:

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

$$F_e = F_i \cdot \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{D}{(s - c)}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} = \qquad 2.255e+05 \text{ Н}$$

Условие устойчивости обечайки, работающей под наружным давлением:

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{|M_i|}{[M]} + \frac{|F_e|}{[F]} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 = \qquad 0.02468 < 1$$

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

2.12. 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 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	ºC
Расчётное давление	P	0.1	МПа
Опорное усилие, действующее на опору	F	3.224e+05	Н
Максимальный момент над опорой	M	1.643e+08	Н*мм
Расчётное поперечное усилие	Q	1.765e+05	Н
Внутренний диаметр обечайки	D	2000	мм
Исполнительная толщина стенки обечайки	s	60	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	2620	мм
Длина цилиндрической выступающей части, включая отбортовку	a	3830	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]	5.426	МПа
Допускаемое осевое усилие из условий устойчивости по ГОСТ Р 52857.2-2007	[F]	4.924e+07	Н
Допускаемый изгибающий момент из условий устойчивости по ГОСТ Р 52857.2-2007	[M]	2.462e+10	Н·мм
Допускаемая перерезывающая сила по ГОСТ Р 52857.2-2007	[Q]	1.189e+07	Н

Результаты расчёта

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

$$\beta_1 = 0{,}91\frac{b}{\sqrt{D(s-c)}} =$$ 0.815

Общее осевое мембранное напряжение, действующее в области опорного узла:

$$\overline{\sigma}_{mx} = \frac{4M_i}{\pi D^2(s-c)} =$$ 0.9323 МПа

Коэффициенты, учитывающие влияние ширины пояса опоры:

$$K_{10} =$$ 0.3952

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:

$$\vartheta_1 = -\frac{0.23\cdot K_{13}\cdot K_{15}}{K_{12}\cdot K_{10}} =$$ -0.2054

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями

$$\vartheta_{2,1} = \frac{-\overline{\sigma}_{mx}}{K_2[\sigma]} =$$ -0.005484

$$\vartheta_{2,2} = \left(\frac{pD}{4(s-c)} - \overline{\sigma}_{mx}\right)\frac{1}{K_2[\sigma]} =$$ -0.01073

Коэффициент K_1 (принимается меньшее значение из двух):

$$K_1(\vartheta_1;\vartheta_{2,1}) =$$ 1.376

$$K_1(\vartheta_1;\vartheta_{2,2}) =$$ 1.372

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_i = K_1K_2[\sigma] =$$ 233.2 МПа

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0.7[\sigma_i]_2\sqrt{D(s-c)}(s-c)}{K_{10}K_{12}} =$$ 7.907e+06 Н

Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в окружном направлении:

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

$$\vartheta_1 = -\frac{0.53\cdot K_{11}}{K_{14}\cdot K_{16}\cdot K_{17}\cdot\sin(0.5\delta_1)} =$$ -1.356

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мем-

бранными напряжениями 0

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

$$\vartheta_{2,2} = \frac{pD}{2(s-c)}\frac{1}{K_2[\sigma]} =$$ -0.01049

Коэффициент K_1 (принимается меньшее значение из двух):

$$K_1(\vartheta_1;\vartheta_{2,1}) =$$ 0.5781

$$K_1(\vartheta_1;\vartheta_{2,2}) =$$ 0.5722

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_i = K_1K_2[\sigma] =$$ 97.28 МПа

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[\mathrm{F}]_3 = \frac{0.9[\sigma_i]_3\sqrt{D(s-c)}(s-c)}{K_{14}K_{16}K_{17}} =$$ 4.266e+06 Н

Проверка прочности обечайки в области опорного узла:

Допускаемое усилие на опору:

$$[F_i] = \min\{[F]_2;[F]_3\} =$$ 4.266e+06 Н

Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в осевом направлении:

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

$$\vartheta_1 = -\frac{0.23\cdot K_{13}\cdot K_{15}}{K_{12}\cdot K_{10}} =$$ -0.2054

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями

$$\vartheta_{2,1} = \frac{-\bar{\sigma}_{mx}}{K_2[\sigma]} =$$ -0.005484

$$\vartheta_{2,2} = \left(\frac{pD}{4(s_{ef}-c)} - \bar{\sigma}_{mx}\right)\frac{1}{K_2[\sigma]} =$$ -0.01073

Коэффициент K_1 (принимается меньшее значение из двух):

$$K_1(\vartheta_1;\vartheta_{2,1}) =$$ 1.376

$$K_1(\vartheta_1;\vartheta_{2,2}) =$$ 1.372

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_i = K_1K_2[\sigma] =$$ 233.2 МПа

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[\mathrm{F}]_2 = \frac{0.7[\sigma_i]_2\sqrt{D(s_{ef}-c)}(s_{ef}-c)}{K_{10}K_{12}} =$$ 7.907e+06 Н

Определение допускаемого опорного усилия от нагружения в окружном направлении:

Коэффициент, представляющий отношение местных мембранных напряжений к местным напряжениям изгиба: -1.356

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

Коэффициенты, учитывающие степень нагрузки общими мембранными напряжениями

$$\vartheta_{2,1} = \qquad 0$$

$$\vartheta_{2,2} = \frac{pD}{2(s_{ef} - c)} \frac{1}{K_2[\sigma]} = \qquad -0.01049$$

Коэффициент K_1 (принимается меньшее значение из двух):

$$K_1(\vartheta_1; \vartheta_{2,1}) = \qquad 0.5781$$

$$K_1(\vartheta_1; \vartheta_{2,2}) = \qquad 0.5722$$

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_i = K_1 K_2 [\sigma] = \qquad 97.28 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0.9[\sigma_i]_3 \sqrt{D(s_{ef} - c)}(s_{ef} - c)}{K_{14} K_{16} K_{17}} = \qquad 4.266e+06 \text{ Н}$$

Проверка прочности обечайки в области опорного узла:

Допускаемое усилие на опору:

$$[F_i] = \min\{[F]_2; [F]_3\} = \qquad 4.266e+06 \text{ Н}$$

Проверка устойчивости обечайки в области опорного узла:

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

$$F_e = F_i \cdot \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{D}{(s - c)}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} = \qquad 5.235e+05 \text{ Н}$$

Условие устойчивости обечайки, работающей под наружным давлением:

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{|M_i|}{[M]} + \frac{|F_e|}{[F]} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 = \qquad 0.03595 < 1$$

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

3. Расчет температурного удлинения②

3.1. При максимальной температуре②

Исходные данные

ΔL_1

Материал	входной камеры		08Х18Н10Т	
	корпуса		09Г2С	
Температурный коэффициент линейного расширения	стали 08Х18Н10Т входной камеры	α	$1{,}8\cdot10^{-5}$	1/°С
	стали 09Г2С корпуса	α	$1{,}3\cdot10^{-5}$	1/°С
Расчетная длина	входной камеры	Lвх	1260	мм
	корпуса	Lк	715	мм
Расчетная температура	входной камеры	Tвх	485	°С
	корпуса	Tк	275	°С
Температура монтажа		T_0	20	°С

ΔL_2

Материал	корпуса		09Г2С	
	выходной камеры		09Г2С	
Температурный коэффициент линейного расширения	стали 09Г2С корпуса	α	$1{,}3\cdot10^{-5}$	1/°С
	стали 09Г2С выходной камеры	α	$1{,}41\cdot10^{-5}$	1/°С
Расчетная длина	корпуса	Lк	2365	мм
	выходной камеры	Lвых	2602	мм
Расчетная температура	корпуса	Tк	275	°С
	выходной камеры	Tвых	485	°С
Температура монтажа		T_0	20	°С

Результаты расчёта

Удлинение аппарата от неподвижной опоры: $\Delta L=L\cdot\alpha\cdot(T-T_0)$

$\Delta L_1= \Delta L_{1вх}+ \Delta L_{1к}=$ $1260\cdot1{,}8\cdot10^{-5}\cdot(485-20)+715\cdot1{,}3\cdot10^{-5}\cdot(275-20)=10{,}5+2{,}4=$ **12,9 мм**

$\Delta L_2= \Delta L_{2к}+ \Delta L_{2вых}=$ $2365\cdot1{,}3\cdot10^{-5}\cdot(275-20)+2602\cdot1{,}41\cdot10^{-5}\cdot(485-20)=8+17=$ **25,0 мм**

3.2. При минимальной температуре②

Исходные данные

ΔL_1

Материал	входной камеры		08Х18Н10Т	
	корпуса		09Г2С	
Температурный коэффициент линейного расширения	стали 08Х18Н10Т входной камеры	α	$1{,}66\cdot10^{-5}$	1/°С
	стали 09Г2С корпуса	α	$1{,}16\cdot10^{-5}$	1/°С
Расчетная длина	входной камеры	Lвх	1260	мм
	корпуса	Lк	715	мм
Расчетная температура	входной камеры	Твх	минус 46	°С
	корпуса	Тк	минус 46	°С
Температура монтажа		T_0	20	°С

ΔL_2

Материал	корпуса		09Г2С	
	выходной камеры		09Г2С	
Температурный коэффициент линейного расширения	стали 09Г2С корпуса	α	$1{,}16\cdot10^{-5}$	1/°С
	стали 09Г2С выходной камеры	α	$1{,}16\cdot10^{-5}$	1/°С
Расчетная длина	корпуса	Lк	2365	мм
	выходной камеры	Lвых	2602	мм
Расчетная температура	корпуса	Тк	минус 46	°С
	выходной камеры	Твых	минус 46	°С
Температура монтажа		T_0	20	°С

Результаты расчёта

Удлинение аппарата от неподвижной опоры: $\Delta L=L\cdot\alpha\cdot(T-T_0)$

$\Delta L_1= \Delta L_{1вх}+ \Delta L_{1к}=$ $1260\cdot1{,}66\cdot10^{-5}\cdot(-46-20)+715\cdot1{,}16\cdot10^{-5}\cdot(-46-20)=$ $=-1{,}4-0{,}55=$ **-1,95 мм**

$\Delta L_2= \Delta L_{2к}+ \Delta L_{2вых}=$ $2365\cdot1{,}16\cdot10^{-5}\cdot(-46-20)+2602\cdot1{,}16\cdot10^{-5}\cdot(-46-20)=$ $=-1{,}8-2{,}0=$ **-3,8 мм**

Лист регистрации изменений

Изм	Номера листов (страниц)				Всего листов (страниц) в документе	№ документа	Входящий № сопроводительного документа и дата	Подпись	Дата
	Измененных	Замененных	Новых	Аннулированных					