

АО «ВНИИНЕФТЕМАШ»



ОАО "Славнефть-ЯНОС"
КМ-2. Установка С-100
БАРАБАН КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА Е-802

Расчеты

Е-802.00.00.000 РР

Зав. отделом №16

С. В. Салов

« ____ » _____ 2016 г.

Главный конструктор проекта

Е. Н. Логунова




« ____ » _____ 2016 г.

Москва, 2016 г.

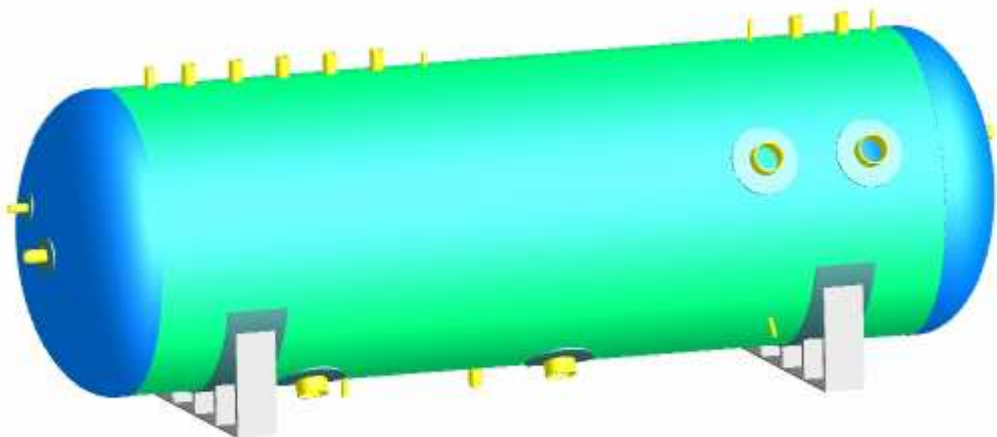
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
19810.4				

Оглавление

Расчёт на прочность сосуда.....	4
Определение давления испытания	5
Расчет давления испытания в соответствии с ГОСТ Р 52630-2012.....	5
Проверка необходимости проведения расчетов на прочность в условиях испытания.....	7
Сводные таблицы	8
Основные элементы	8
Результаты расчета	8
Штуцера	8
Результаты расчета	9
Эпюры сил и моментов.....	10
Днище эллиптическое.....	15
Расчёт в рабочих условиях	15
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	16
Обечайка цилиндрическая.....	18
Расчёт в рабочих условиях	18
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	21
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания).....	24
Опора седловая (подвижная)	26
Расчёт в рабочих условиях	26
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	29
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания).....	32
Опора седловая (неподвижная).....	35
Расчёт в рабочих условиях	35
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	38
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания).....	41
Штуцер П DN600	44
Расчёт в рабочих условиях	45
Штуцер А1-А2, Б1-Б2 DN200	48
Расчёт в рабочих условиях	49
Штуцер В DN80	55
Расчёт в рабочих условиях	56
Расчет на прочность по МКЭ в рабочих условиях.....	57
Штуцер Г DN80.....	61
Расчёт в рабочих условиях	62
Штуцер Е DN80.....	66
Расчёт в рабочих условиях	67
Расчет на прочность по МКЭ в рабочих условиях.....	69
Штуцер Р1-Р5 DN80	74
Расчёт в рабочих условиях	75
Штуцер С1-С2 DN80.....	80
Расчёт в рабочих условиях	81
Штуцер Ж DN50.....	86
Расчёт в рабочих условиях	87
Расчет на прочность по МКЭ в рабочих условиях.....	89
Штуцер И DN50	94
Расчёт в рабочих условиях	95
Штуцер К DN50	100
Расчёт в рабочих условиях	101
Штуцер У1-У4 DN50	104
Расчёт в рабочих условиях	105
Штуцер Ш DN32	108
Расчёт в рабочих условиях	109
Штуцер Х1-Х4 DN32	113
Расчёт в рабочих условиях	114

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Расчёт в рабочих условиях.....	49						
					Штуцер В DN80	55						
19810.4					Расчёт в рабочих условиях	56						
					Расчет на прочность по МКЭ в рабочих условиях.....	57						
					Штуцер Г DN80.....	61						
					Расчёт в рабочих условиях	62						
					Штуцер Е DN80.....	66						
					Расчёт в рабочих условиях	67						
					Расчет на прочность по МКЭ в рабочих условиях.....	69						
					Штуцер Р1-Р5 DN80	74						
					Расчёт в рабочих условиях	75						
					Штуцер С1-С2 DN80.....	80						
					Расчёт в рабочих условиях	81						
					Штуцер Ж DN50.....	86						
					Расчёт в рабочих условиях	87						
					Расчет на прочность по МКЭ в рабочих условиях.....	89						
					Штуцер И DN50	94						
					Расчёт в рабочих условиях	95						
					Штуцер К DN50	100						
					Расчёт в рабочих условиях	101						
					Штуцер У1-У4 DN50	104						
					Расчёт в рабочих условиях	105						
					Штуцер Ш DN32	108						
					Расчёт в рабочих условиях	109						
					Штуцер Х1-Х4 DN32	113						
					Расчёт в рабочих условиях	114						
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	E-802.00.00.000 PP							
					Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
					Разраб.	Иванов		12.2016	Барaban котла-утилизатора поз. Е-802	Лит.	Лист	Листов
					Пров.	Тачёнов		12.2016		Т	2	137
					Рук.					АО «ВНИИНЕФТЕМАШ»		
					Н.контр.	Копчикова		12.2016				
Утв.				Расчеты								

Расчёт на прочность сосуда



Наименование аппарата	Барaban котла-утилизатора поз. E-802
Название установки:	КМ-2 Установка C-100
Наименование объекта:	ОАО "Славнефть-ЯНОС"
Сосуд, содержащий рабочую жидкость:	Да
Вид испытаний:	Гидроиспытания
Учёт сейсмических нагрузок:	Нет

Изнв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изнв. № дубл.	Подпись и дата
19810.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-802.00.00.000 PP				
Лист				
4				

Определение давления испытания

Расчет давления испытания в соответствии с ГОСТ Р 52630-2012

Расчетные условия

Расчетное давление $P_p =$ 2,3 МПа

Материал элемента сосуда, работающий под давлением 09Г2С ГОСТ 5520

Допускаемые напряжения для материала корпуса при температуре 20 °С $[\sigma]^{20} =$ 196 МПа

Допускаемые напряжения для материала корпуса при расчетной температуре $[\sigma]^t =$ 164 МПа

Расчетное условное давление $P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t} =$ 2,75 МПа

Материал элемента сосуда, работающий под давлением 09Г2С ГОСТ 19281

Допускаемые напряжения для материала корпуса при температуре 20 °С $[\sigma]^{20} =$ 183 МПа

Допускаемые напряжения для материала корпуса при расчетной температуре $[\sigma]^t =$ 147 МПа

Расчетное условное давление $P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t} =$ 2,86 МПа

Материал элемента сосуда, работающий под давлением 09Г2С КП245 ГОСТ 8479

Допускаемые напряжения для материала корпуса при температуре 20 °С $[\sigma]^{20} =$ 163,3 МПа

Допускаемые напряжения для материала корпуса при расчетной температуре $[\sigma]^t =$ 128,9 МПа

Расчетное условное давление $P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t} =$ 2,91 МПа

Пробное давление испытания сосуда определяют с учетом минимальных значений расчетного давления и отношения допускаемых напряжений материалов (условное давление) сборочных единиц (элементов сосуда), работающих под давлением, за исключением болтов (шпилек).

Расчетное пробное давление при гидравлическом испытании, вычисленное по ГОСТ Р 52630-2012 п.8.11.3 $P_H = 1,25 \cdot P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t} =$ 3,4 МПа

Изнв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изнв. № дубл.	Подпись и дата	
19810.4					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-802.00.00.000 PP
					Лист
					5

Расчетные условия (наружное давление)

Расчетное давление $P_p =$ 0,1 МПа

Материал элемента сосуда, работающий под давлением 09Г2С ГОСТ 5520

Допускаемые напряжения для материала корпуса при температуре 20 °С $[\sigma]^{20} =$ 196 МПа

Допускаемые напряжения для материала корпуса при расчетной температуре $[\sigma]^t =$ 164 МПа

Расчетное условное давление $P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t} =$ 0,120 МПа

Материал элемента сосуда, работающий под давлением 09Г2С ГОСТ 19281

Допускаемые напряжения для материала корпуса при температуре 20 °С $[\sigma]^{20} =$ 183 МПа

Допускаемые напряжения для материала корпуса при расчетной температуре $[\sigma]^t =$ 147 МПа

Расчетное условное давление $P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t} =$ 0,124 МПа

Материал элемента сосуда, работающий под давлением 09Г2С КП245 ГОСТ 8479

Допускаемые напряжения для материала корпуса при температуре 20 °С $[\sigma]^{20} =$ 163,3 МПа

Допускаемые напряжения для материала корпуса при расчетной температуре $[\sigma]^t =$ 128,9 МПа

Расчетное условное давление $P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t} =$ 0,126 МПа

Пробное давление испытания сосуда определяют с учетом минимальных значений расчетного давления и отношения допускаемых напряжений материалов (условное давление) сборочных единиц (элементов сосуда), работающих под давлением, за исключением болтов (шпилек).

Расчетное пробное давление при гидравлическом испытании, вычисленное по ГОСТ Р 52630-2012 п.8.11.3 $P_{II} = 1,25 \cdot P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t} =$ 0,15 МПа

Пробное давление для испытания сосуда, предназначенного для работы в условиях нескольких режимов с различными расчетными параметрами (давлениями и температурами), принимается равным максимальному из определенных значений пробных давлений для каждого режима.

Изнв. № подл.	19810.4	Подпись и дата		Изнв. № дубл.		Взам. инв. №		Подпись и дата		Изнв. № дубл.		Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-802.00.00.000 PP								Лист
													6

Проверка необходимости проведения расчетов на прочность в условиях испытания

Проверка необходимости проведения расчетов на прочность цилиндрических обечаек и конических элементов, выпуклых и плоских днищ в условиях испытания по ГОСТ Р 52857.1-2007 п.8.4

Расчетное пробное давление испытания $P_{II} = 3,4$ МПа

Гидростатическое давление при полном заполнении аппарата испытательной жидкостью $P_{cm} = 0,02$ МПа

$$P_{II} + P_{cm} < 1,35 \cdot P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t}$$

$P_{II} + P_{cm} = 3,42$ МПа – давление испытания с учетом гидростатического давления жидкости

$$1,35 \cdot P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t} = 3,71$$
 МПа

3,42 МПа < 3,71 МПа

Закключение: **Проведение расчета на прочность в условиях испытания не требуется**

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19810.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-802.00.00.000 PP				
				Лист
				7

Сводные таблицы

Основные элементы

Исходные данные

Элемент	Материал	Диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Длина (высота), мм	Суммарная прибавка, мм	Коэфф. прочности сварного шва
Днище эллиптическое	09Г2С	2200	25	635	7,55	1
Обечайка цилиндрическая	09Г2С	2200	22	6000	3	1

Результаты расчета

Рабочие условия

Элемент	Расчетная температура, °С	Расчетное давление, МПа	Допускаемые напряжения, МПа	Расчетная толщина с уч. прибавок, мм	Допускаемое давление, МПа	Условие прочности
Днище эллиптическое	210	2,31	164	23,1	2,591	выполнено
Обечайка цилиндрическая	210	2,31	164	18,6	2,808	выполнено

Расчётные условия (наружное давление)

Элемент	Расчетная температура, °С	Расчетное давление, МПа	Допускаемые напряжения, МПа	Расчетная толщина с уч. прибавок, мм	Условие прочности
Днище эллиптическое	210	(-0,1000)	164	12,21	выполнено
Обечайка цилиндрическая	210	(-0,1000)	164	14,31	выполнено

Штуцера

Исходные данные

Элемент	Метка	Тип	Материал	Диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Суммарная прибавка, мм
Штуцер В DN80	Штуцер В	Проходящий с накладным кольцом	09Г2С (КП245)	78	11	3
Штуцер П DN600	Штуцер П	Проходящий с накладным кольцом	09Г2С	600	22	3
Штуцер А1-А2, Б1-Б2 DN200	Штуцер А1	Проходящий с накладным кольцом	09Г2С (КП245)	202	14	3

Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Расчётные условия (наружное давление)						
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-802.00.00.000 PP	Лист					

Элемент	Расчетная температура, °С	Расчетное давление, МПа	Допускаемые напряжения, МПа	Расчетная толщина с уч. прибавок, мм	Условие прочности
Днище эллиптическое	210	(-0,1000)	164	12,21	выполнено
Обечайка цилиндрическая	210	(-0,1000)	164	14,31	выполнено

Штуцера

Исходные данные

Элемент	Метка	Тип	Материал	Диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Суммарная прибавка, мм
Штуцер В DN80	Штуцер В	Проходящий с накладным кольцом	09Г2С (КП245)	78	11	3
Штуцер П DN600	Штуцер П	Проходящий с накладным кольцом	09Г2С	600	22	3
Штуцер А1-А2, Б1-Б2 DN200	Штуцер А1	Проходящий с накладным кольцом	09Г2С (КП245)	202	14	3

Штуцер P1-P5 DN80	Штуцер P1	Проходящий без укрепления	09Г2С (КП245)	78	11	3
Штуцер И DN50	Штуцер И	Проходящий без укрепления	09Г2С Gr.ГОСТ 19281	48	10	4,25
Штуцер К DN50	Штуцер К	Проходящий без укрепления	09Г2С Gr.ГОСТ 19281	48	10	4,25
Штуцер Л DN20	Штуцер Л	Проходящий без укрепления	09Г2С (КП245)	18	10	3
Штуцер М, Т DN20	Штуцер М	Проходящий без укрепления	09Г2С (КП245)	18	10	3
Штуцер У1-У4 DN50	Штуцер У2	Проходящий без укрепления	09Г2С Gr.ГОСТ 19281	48	10	4,25
Штуцер Х1-Х4 DN32	Штуцер Х2	Проходящий без укрепления	09Г2С (КП245)	31	10	3
Штуцер Ш DN32	Штуцер Ш	Проходящий без укрепления	09Г2С (КП245)	31	10	3
Штуцер Г DN80	Штуцер Г	Проходящий без укрепления	09Г2С (КП245)	78	10	3
Штуцер Ж DN50	Штуцер Ж	Проходящий с накладным кольцом	09Г2С Gr.ГОСТ 19281	48	10	4,25
Штуцер Е DN80	Штуцер Е	Проходящий с накладным кольцом	09Г2С (КП245)	78	11	3

Результаты расчета

Рабочие условия

Элемент	Расчетная температура, °С	Расчетное давление, МПа	Условие прочности
Штуцер В DN80	210	2,3	выполнено
Штуцер П DN600	210	2,302	выполнено
Штуцер А1-А2, Б1-Б2 DN200	210	2,31	выполнено
Штуцер P1-P5 DN80	210	2,3	выполнено
Штуцер И DN50	210	2,3	выполнено
Штуцер К DN50	210	2,3	выполнено
Штуцер Л DN20	210	2,308	выполнено
Штуцер М, Т DN20	210	2,3	выполнено
Штуцер С1-С2 DN80	210	2,3	выполнено
Штуцер У1-У4 DN50	210	2,302	выполнено
Штуцер Х1-Х4 DN32	210	2,302	выполнено
Штуцер Ш DN32	210	2,311	выполнено
Штуцер Г DN80	210	2,311	выполнено
Штуцер Ж DN50	210	2,3	выполнено
Штуцер Е DN80	210	2,3	выполнено

Подпись и дата

Инов. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инов. № подл.

19810.4

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

Е-802.00.00.000 РР

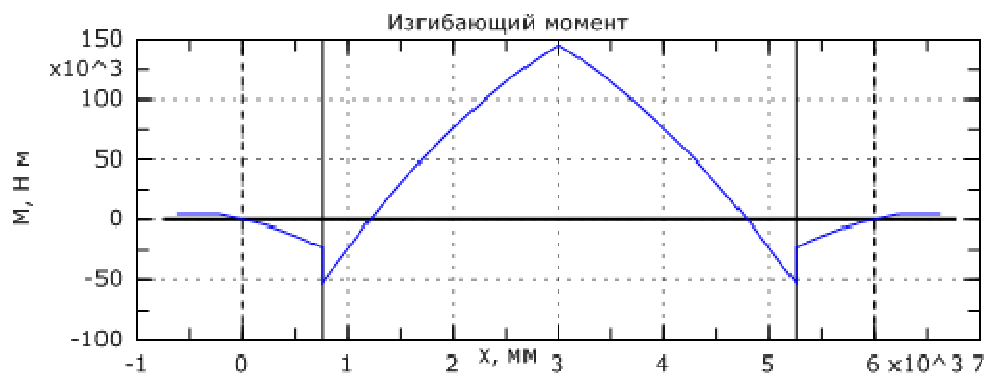
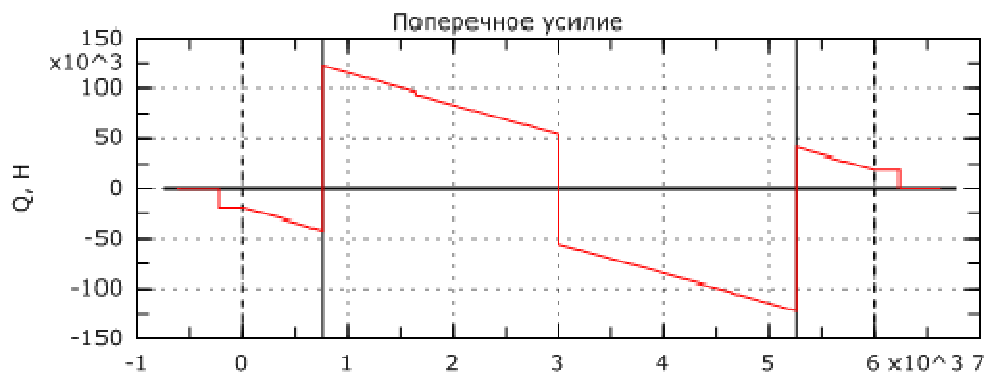
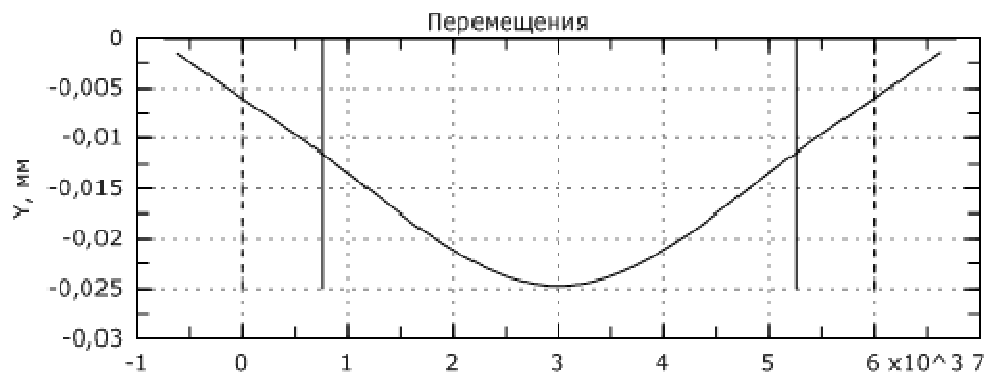
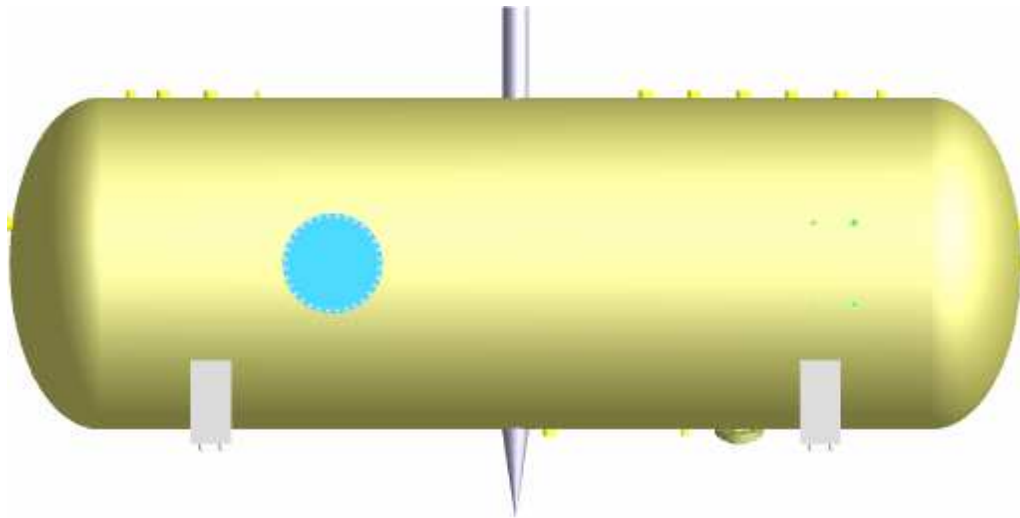
Лист

9

Эпюры сил и моментов

Расчёт в рабочих условиях

Результаты расчёта:

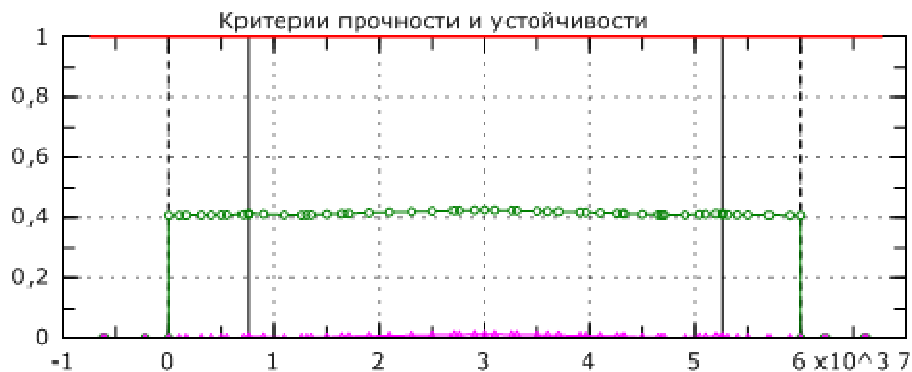


Инов. № подл.	Подпись и дата
19810.4	
Изм.	Лист
№ докум.	Подп.
Дата	

E-802.00.00.000 PP

Лист

10



--o--o-- Критерий прочности

--Δ--Δ-- Критерий устойчивости

----- Предельное значение

Условие работоспособности выполнено

Общий вес:

$$\sum G_i = 3,26 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Дополнительные вертикальные нагрузки:

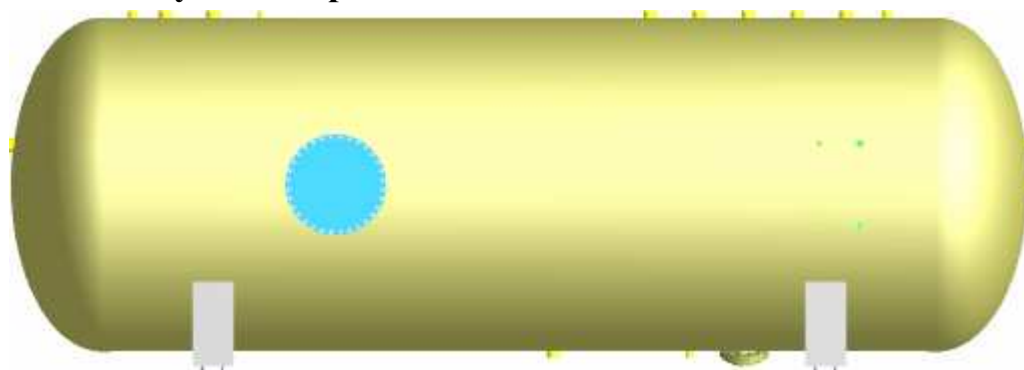
$$\sum F_{yi} = 0 \text{ Н}$$

Опорные нагрузки:

№ опоры	Название опоры	Опорное усилие, F, Н	Поперечное усилие в сечении оболочки над опорой, Q, Н	Изгибающий момент в сечении оболочки над опорой, M, Н м
1	Опора седловая (неподвижная)	$1,625 \cdot 10^5$	$1,213 \cdot 10^5$	$5,282 \cdot 10^4$
2	Опора седловая (подвижная)	$1,639 \cdot 10^5$	$1,226 \cdot 10^5$	$5,277 \cdot 10^4$

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Результаты расчёта:



Инов. № подл. 19810.4

Подпись и дата

Взам. инв. №

Инов. № дубл.

Подпись и дата

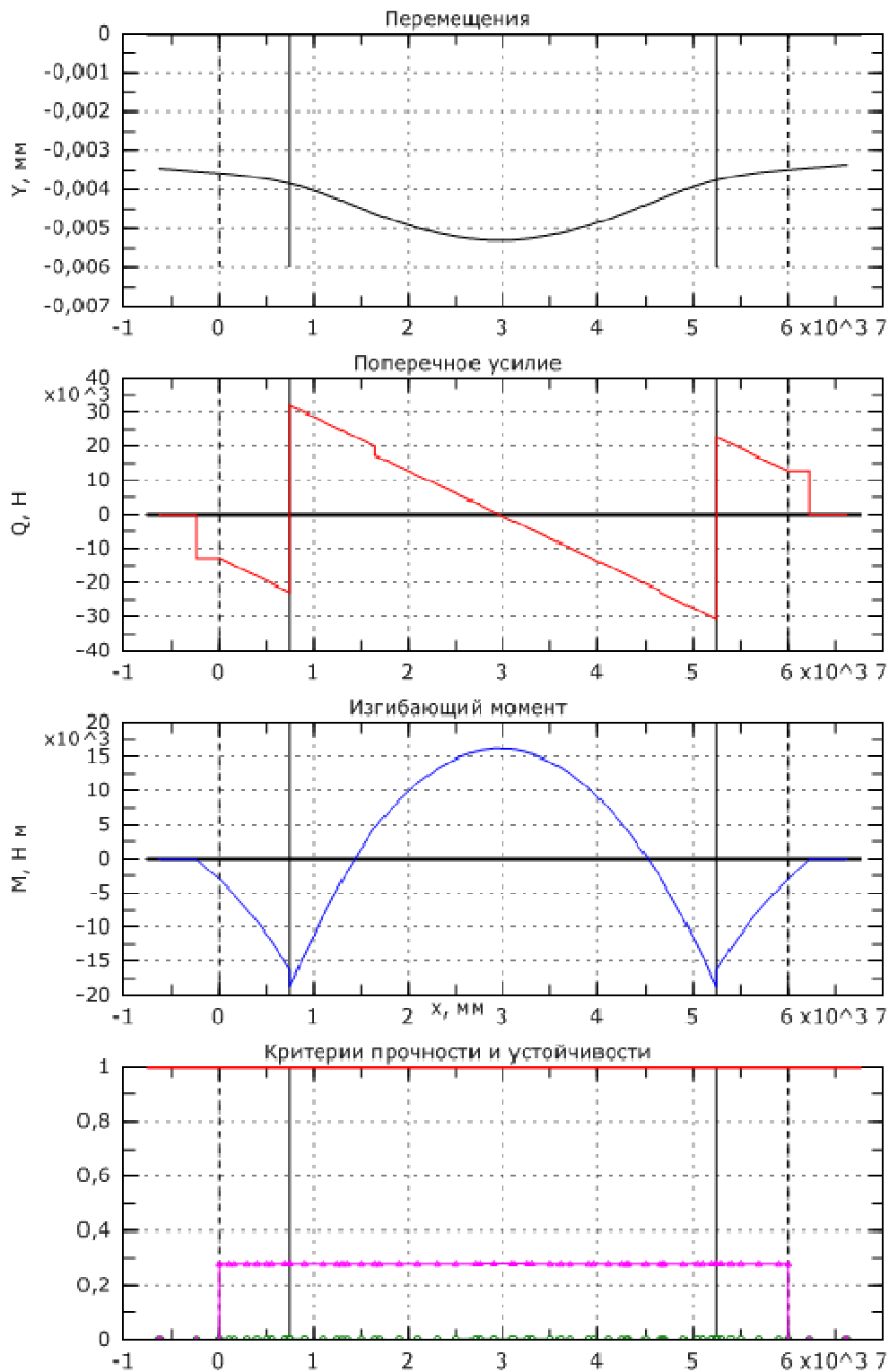
Подпись и дата

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

E-802.00.00.000 PP

Лист

11



--o--o-- Критерий прочности

--Δ--Δ-- Критерий устойчивости

----- Предельное значение

Условие работоспособности выполнено

Общий вес:

$$\sum G_i = 1,08 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Дополнительные вертикальные нагрузки:

$$\sum F_{y_i} = 0 \text{ Н}$$

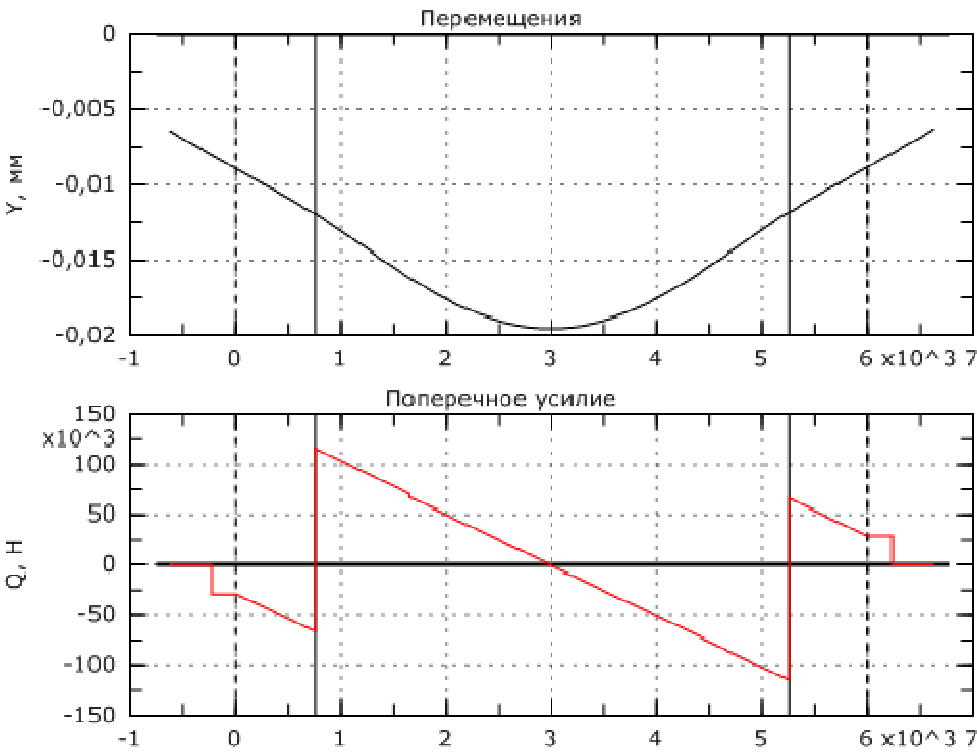
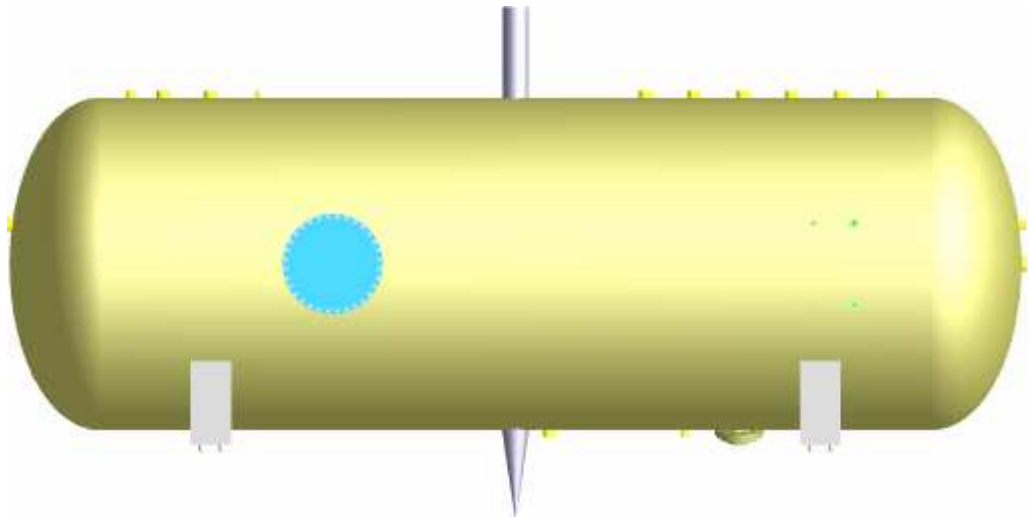
Опорные нагрузки:

Инов. № подл.	Подпись и дата
19810.4	
Изм.	Лист
№ докум.	Подп.
Дата	

E-802.00.00.000 PP

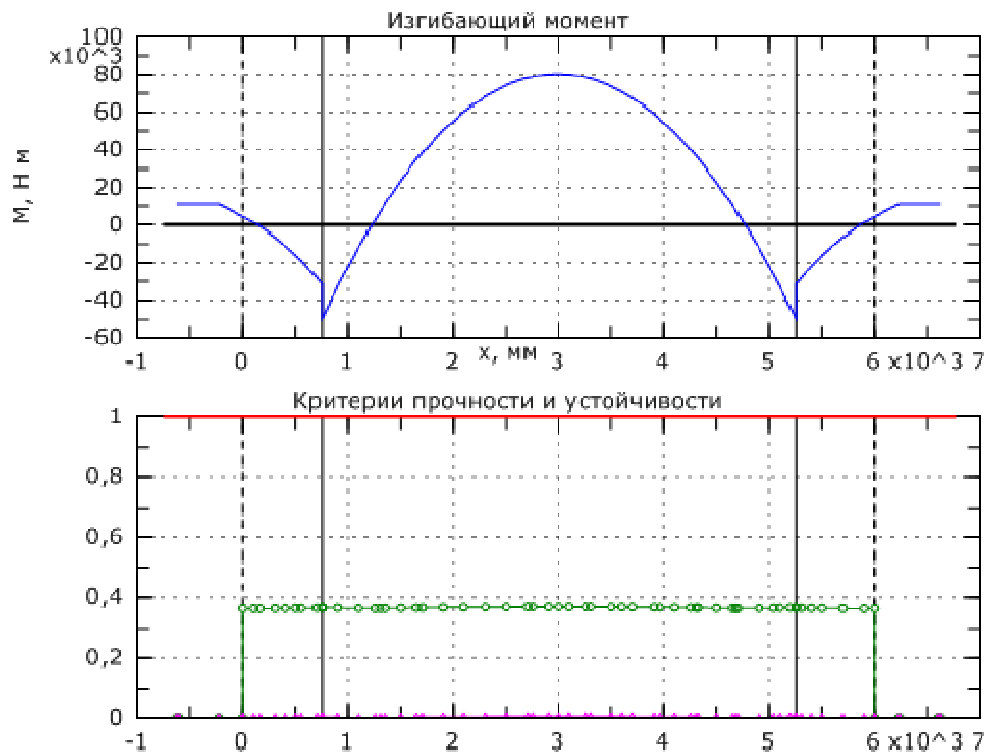
№ опоры	Название опоры	Опорное усилие, F, Н	Поперечное усилие в сечении оболочки над опорой, Q, Н	Изгибающий момент в сечении оболочки над опорой, M, Н м
1	Опора седловая (неподвижная)	$5,351 \cdot 10^4$	$3,078 \cdot 10^4$	$1,873 \cdot 10^4$
2	Опора седловая (подвижная)	$5,484 \cdot 10^4$	$3,197 \cdot 10^4$	$1,87 \cdot 10^4$

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)



Инов. № подл.	Подпись и дата
19810.4	
Изм.	Лист
№ докум.	Подп.
Дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата



Условие работоспособности выполнено

Общий вес:

$$\sum G_i = 3,65 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Дополнительные вертикальные нагрузки:

$$\sum F_{yi} = 0 \text{ Н}$$

Опорные нагрузки:

№ опоры	Название опоры	Опорное усилие, F, Н	Поперечное усилие в сечении оболочки над опорой, Q, Н	Изгибающий момент в сечении оболочки над опорой, M, Н м
1	Опора седловая (неподвижная)	$1,815 \cdot 10^5$	$1,149 \cdot 10^5$	$4,923 \cdot 10^4$
2	Опора седловая (подвижная)	$1,832 \cdot 10^5$	$1,164 \cdot 10^5$	$4,915 \cdot 10^4$

Подпись и дата

Инва. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инва. № подл.

19810.4

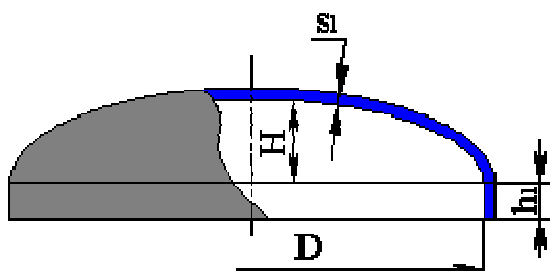
E-802.00.00.000 PP

Лист

14

Изм. Лист № докум. Подп. Дата

Днище эллиптическое



Исходные данные

Материал:	09Г2С
Внутр. диаметр, D:	2200 мм
Толщина стенки днища, s ₁ :	25 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c ₁ :	3 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, c ₂ :	0,8 мм
Прибавка технологическая, c ₃ :	3,75 мм
Суммарная прибавка к толщине стенки, c:	7,55 мм
Высота днища, H:	550 мм
Длина отбортовки, h ₁ :	60 мм
Радиус кривизны в вершине днища:	

$$R = \frac{D^2}{4 \cdot H} = 2200^2 / (4 * 550) = 2200 \text{ мм}$$

Коэффициент прочности сварного шва:

$$\varphi = 1$$

Изоляция:

Название: Теплоизоляция

Толщина, s_{из}: 100 мм

Плотность, ρ_{из}: 200 кг/м³

Расчёт в рабочих условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 210 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 2,31 МПа

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 210 °С (рабочие условия):

[σ] = 164 МПа

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре T = 210 °С:

E = 1,8 · 10⁵ МПа

Подпись и дата

Изнв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Изнв. № подл.

19810.4

Лист

E-802.00.00.000 PP

15

Изм. Лист № докум. Подп. Дата

Днища, нагруженные внутренним избыточным давлением.

Радиус кривизны в вершине днища:

$$R = \frac{D^2}{4 \cdot H} = 2200^2 / (4 \cdot 550) = 2200 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_p + c = \frac{p \cdot R}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi - 0.5 \cdot p} + c = (2,31 \cdot 2200) / (2 \cdot 164 \cdot 1 - 0.5 \cdot 2,31) + 7,55 = 23,1 \text{ мм}$$

23,1 мм ≤ 25 мм

Заключение: **Условие работоспособности выполнено**

Допускаемое давление:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi \cdot (s_1 - c)}{R + 0.5 \cdot (s_1 - c)} = 2 \cdot 164 \cdot 1 \cdot (25 - 7,55) / (2200 + 0.5 \cdot (25 - 7,55)) = 2,591 \text{ МПа}$$

2,591 МПа ≥ 2,31 МПа

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 210 °C

Расчётное наружное избыточное давление, p: 0,1000 МПа

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 210 °C (расчётные условия (наружное давление)):

[σ] = 164 МПа

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре T = 210 °C:

E = 1,8 · 10⁵ МПа

Днища, нагруженные наружным давлением.

Радиус кривизны в вершине днища:

$$R = \frac{D^2}{4 \cdot H} = 2200^2 / (4 \cdot 550) = 2200 \text{ мм}$$

$$x = 10 \cdot \frac{s_1 - c}{D} \cdot \left[\frac{D}{2 \cdot H} - \frac{2 \cdot H}{D} \right] = 10 \cdot (25 - 7,55) / 2200 \cdot (2200 / (2 \cdot 550) - 2 \cdot 550 / 2200) = 0,119$$

$$K_x = \frac{1 + (2,4 + 8 \cdot x) \cdot x}{1 + (3,0 + 10 \cdot x) \cdot x} = (1 + (2,4 + 8 \cdot 0,119) \cdot 0,119) / (1 + (3,0 + 10 \cdot 0,119) \cdot 0,119) = 0,9335$$

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок (при давлении p = 0,1000 МПа):

$$s_p + c = \max \left\{ \frac{K_x \cdot R}{161} \cdot \sqrt{\frac{n_y \cdot p}{10^{-5} \cdot E}}; \frac{1,2 \cdot p \cdot R}{2 \cdot [\sigma]} \right\} + c = \max \{ 0,9335 \cdot 2200 / 161 \cdot (2,4 \cdot 0,1000 / (10^{-5} \cdot 1,8 \cdot 10^5))^{1/2}; 1,2 \cdot 0,1000 \cdot 2200 / (2 \cdot 164) \} + 7,55 = 12,21 \text{ мм}$$

12,21 мм ≤ 25 мм

Заключение: **Условие работоспособности выполнено**

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

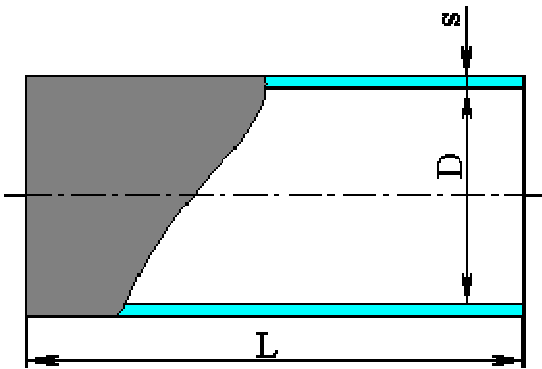
$$[p]_n = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s_1 - c)}{R + 0.5 \cdot (s_1 - c)} = 2 \cdot 164 \cdot (25 - 7,55) / (2200 + 0.5 \cdot (25 - 7,55)) = 2,591 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости:

Изн. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
E-802.00.00.000 PP					Лист
					16

$$[\sigma]_{\text{E}} = \frac{26 \cdot 10^{-6} \text{ E}}{n_y} \cdot \left[\frac{100(s_1 - c)}{K_p \cdot R} \right]^2 = 26 \cdot 10^{-6} \cdot 1,8 \cdot 10^5 / 2,4 \cdot (100 \cdot (25 - 7,55) / (0,9335 \cdot 2200))^2 = 1,408 \text{ МПа}$$

Обечайка цилиндрическая



Исходные данные

Материал:	09Г2С
Внутр. диаметр, D:	2200 мм
Толщина стенки, s:	22 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, с ₁ :	3 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, с ₂ :	0 мм
Прибавка технологическая, с ₃ :	0 мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, с:	3 мм
Длина обечайки, L:	6000 мм
Коэффициенты прочности сварных швов:	
Продольный шов:	
$\varphi_p = 1$	
Окружной шов:	
$\varphi_t = 1$	
Изоляция:	
Название:	Теплоизоляция
Толщина, s _{из} :	100 мм
Плотность, ρ _{из} :	200 кг/м ³

Расчёт в рабочих условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T:	210 °С
Расчётное внутреннее избыточное давление, p:	2,31 МПа
Расчётный изгибающий момент, M:	1,458·10 ⁵ Н м
Расчётное поперечное усилие, Q:	1,206·10 ⁵ Н
Расчётное осевое растягивающее усилие, F:	0 Н

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 210 °С (рабочие условия):

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19810.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-802.00.00.000 PP				Лист
				18

$[\sigma] = 164 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре $T = 210 \text{ }^{\circ}\text{C}$:

$E = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Гладкая обечайка, нагруженная внутренним избыточным давлением (п. 5.3.1)

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_p + c = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} + c = (2,31 \cdot 2200) / (2 \cdot 164 \cdot 1 - 2,31) + 3 = 18,6 \text{ мм}$$

$18,6 \text{ мм} \leq 22 \text{ мм}$

Заключение: **Условие работоспособности выполнено**

Допускаемое давление:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 164 \cdot 1 \cdot (22 - 3) / (2200 + 22 - 3) = 2,808 \text{ МПа}$$

$2,808 \text{ МПа} \geq 2,31 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Минимальное расстояние между "одиночными" штуцерами:

$$b_0 = 2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} = 2 \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 408,9 \text{ мм}$$

Обечайка, нагруженная изгибающим моментом (п. 5.3.5)

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$[F]_{\text{II}} = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3,142 \cdot (2200 + 22 - 3) \cdot (22 - 3) \cdot 164 = 2,172 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны сжатия:

$$[M]_{\text{II}} = \frac{D}{4} \cdot [F]_{\text{II}} = 2200 / 4 \cdot 2,172 \cdot 10^7 = 1,195 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:

$$[F]_{\text{EI}} = \frac{31 \cdot 0 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2,5} = 310 \cdot 10^{-6} \cdot 1,8 \cdot 10^5 \cdot 2200^2 / (2,4) \cdot (100 \cdot (22 - 3) / 2200)^{2,5} = 7,8 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_{\text{E}} = \frac{D}{3,5} \cdot [F]_{\text{EI}} = 2200 / 3,5 \cdot 7,8 \cdot 10^7 = 4,903 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \frac{[M]_{\text{II}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\text{II}}}{[M]_{\text{E}}} \right)^2}} = 1,195 \cdot 10^7 / (1 + (1,195 \cdot 10^7 / 4,903 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 1,161 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

$1,161 \cdot 10^7 \text{ Н м} \geq 1,458 \cdot 10^5 \text{ Н м}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Обечайка, нагруженная поперечным усилием (п. 5.3.6)

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности:

$$[Q]_{\text{II}} = 0,25 \cdot \pi \cdot D \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 0,25 \cdot 3,142 \cdot 2200 \cdot (22 - 3) \cdot 164 = 5,384 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$l_p = 6487 \text{ мм}$

Расчётная длина для расчёта от действия поперечной силы:

$l_Q = 6487 \text{ мм}$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

Инв. № подл. 19810.4	Подпись и дата		Подпись и дата		Подпись и дата	
	Взам. инв. №		Инв. № дубл.			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-802.00.00.000 PP	
						Лист 19

$$[Q]_{\text{E}} = \frac{2,4 \cdot E \cdot (s - c)^2}{n_y} \cdot \left[0,18 + 3,3 \cdot \frac{D(s - c)}{l^2} \right] = 2,4 \cdot 1,8 \cdot 10^5 \cdot (22 - 3)^2 / 2,4 \cdot (0,18 + 3,3 \cdot 2200 \cdot (22 - 3) / 6487^2) = 1,191 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_{\text{н}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\text{н}}}{[Q]_{\text{E}}} \right)^2}} = 5,384 \cdot 10^6 / (1 + (5,384 \cdot 10^6 / 1,191 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 4,906 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$4,906 \cdot 10^6 \text{ Н} \geq 1,206 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Обечайка, работающая под совместным действием нагрузок (п. 5.3.7)

Обечайка, работающая под совместным действием наружного давления, осевого сжимающего усилия, изгибающего момента и поперечного усилия.

Проверка условия устойчивости:
$$\left(\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 \right) \leq 1$$

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0/0 + 0/0 + 1,458 \cdot 10^5 / 1,161 \cdot 10^7 + (1,206 \cdot 10^5 / 4,906 \cdot 10^6)^2 = 0,01317 \leq 1$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием (п. 5.3.3)

Допускаемое осевое растягивающее усилие:

$$[F] = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = 3,142 \cdot (2200 + 22 - 3) \cdot (22 - 3) \cdot 164 \cdot 1 = 2,172 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны растяжения:

$$[M]_{\text{нп}} = \frac{D}{4} \cdot [F] = 2200 / 4 \cdot 2,172 \cdot 10^7 = 1,195 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

Обечайка, работающая под совместным действием внутреннего давления, осевого растягивающего усилия и изгибающего момента.

Проверка условия прочности:
$$\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{нп}}} \leq 1,0$$

$$\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{нп}}} = (0 + 2,31 \cdot 3,142 \cdot 2200^2 / 4) / 2,172 \cdot 10^7 + 1,458 \cdot 10^5 / 1,195 \cdot 10^7 = 0,4164 \leq 1$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Для расчёта обечайки от действия седловых опор:

$$B_1 = \min \left\{ 1,0; 9,45 \cdot \frac{D}{l} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (s - c)}} \right\} = \min \{ 1,0, 9,45 \cdot 2200 / 6487 \cdot (2200 / (100 \cdot (22 - 3)))^{1/2} \} = 1$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости:

$$[p]_{\text{E}} = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D}{l} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2,5} = 20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,8 \cdot 10^5 \cdot 2200 / (2,4 \cdot 1 \cdot 6487) \cdot (100 \cdot (22 - 3) / 2200)^{2,5} = 0,3667 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

Инв. № подл.	19810.4	Подпись и дата				
		Инв. № дубл.				
		Взам. инв. №				
		Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-802.00.00.000 PP	
						Лист
						20

$$[p]_{\pi} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 164 \cdot (22 - 3) / (2200 + 22 - 3) = 2,808 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\pi}}{[p]_{\pi}} \right)^2}} = 2,808 / (1 + (2,808 / 0,3667)^2)^{1/2} = 0,3636 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление: $[p] = 0,3636 \text{ МПа}$

Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием (п. 2.3.4)

Допускаемое осевое сжимающее усилие:

$$[F] = \frac{[F]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\pi}}{[F]_{\pi}} \right)^2}} = 2,172 \cdot 10^7 / (1 + (2,172 \cdot 10^7 / 7,8 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 2,093 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости:

$$[M]_{уст} = \frac{[M]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\pi}}{[M]_{\pi}} \right)^2}} = 1,195 \cdot 10^7 / (1 + (1,195 \cdot 10^7 / 4,903 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 1,161 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \min \{ M_{\pi}, M_{уст} \} = \min \{ 1,195 \cdot 10^7, 1,161 \cdot 10^7 \} = 1,161 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

Расчётная длина для расчёта седловых опор:

$$l_s = 4500 \text{ мм}$$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

$$[Q]_{\pi} = \frac{2,4 \cdot E \cdot (s - c)^2}{n_y} \cdot \left[0,18 + 3,3 \frac{D(s - c)}{l_s^2} \right] = 2,4 \cdot 1,8 \cdot 10^5 \cdot (22 - 3)^2 / 2,4 \cdot (0,18 + 3,3 \cdot 2200 \cdot (22 - 3) / 4500^2) = 1,214 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\pi}}{[Q]_{\pi}} \right)^2}} = 5,384 \cdot 10^6 / (1 + (5,384 \cdot 10^6 / 1,214 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 4,922 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 210 °C
 Расчётное наружное избыточное давление, p: 0,1000 МПа
 Расчётный изгибающий момент, M: $1,873 \cdot 10^4 \text{ Н м}$
 Расчётное поперечное усилие, Q: $3,099 \cdot 10^4 \text{ Н}$
 Расчётное осевое растягивающее усилие, F: 0 Н

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 210 °C (расчётные условия (наружное давление)):

$$[\sigma] = 164 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре T = 210 °C:

$$E = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Изнв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изнв. № дубл.	Подпись и дата
19810.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-802.00.00.000 PP				Лист
				21

Гладкая обечайка, нагруженная наружным давлением (п. 5.3.2)

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$$l_p = 6487 \text{ мм}$$

$$B = \max \left\{ 1; 0.47 \cdot \left(\frac{p}{10^{-5} \cdot E} \right)^{0.067} \cdot \left(\frac{1}{D} \right)^{0.4} \right\} = \max \{ 1; 0.47 \cdot (0.1000 / (10^{-5} \cdot 1.8 \cdot 10^5))^{0.067} \cdot (6487 / 2200)^{0.4} \} = 1$$

Расчётная толщина стенки с учетом прибавок:

$$s_p + c = \max \left\{ 1.06 \cdot \frac{10^{-2} \cdot D}{B} \cdot \left(\frac{p}{10^{-5} \cdot E} \cdot \frac{1}{D} \right)^{0.4}, \frac{1.2 \cdot p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] - p} \right\} = \max \{ 1.06 \cdot 10^{-2} \cdot 2200 / 1 \cdot (0.1000 / (10^{-5} \cdot 1.8 \cdot 10^5)) \cdot 6487 / 2200^{0.4}; 1.2 \cdot 0.1000 \cdot 2200 / (2 \cdot 164 - 0.1000) \} + 3 = 14.31 \text{ мм}$$

$$14.31 \text{ мм} \leq 22 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие работоспособности выполнено**

$$B_1 = \min \left\{ 1.0; 9.45 \cdot \frac{D}{l} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (s - c)}} \right\} = \min \{ 1.0; 9.45 \cdot 2200 / 6487 \cdot (2200 / (100 \cdot (22 - 3)))^{1/2} \} = 1$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости:

$$[p]_e = \frac{2.08 \cdot 10^{-5} E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D}{l} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2.5} = 2.08 \cdot 10^{-5} \cdot 1.8 \cdot 10^5 \cdot 2200 / (2.4 \cdot 1 \cdot 6487) \cdot (100 \cdot (22 - 3) / 2200)^{2.5} = 0.3667 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$[p]_{\pi} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 164 \cdot (22 - 3) / (2200 + 22 - 3) = 2.808 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\pi}}{[p]_e} \right)^2}} = 2.808 / (1 + (2.808 / 0.3667)^2)^{1/2} = 0.3636 \text{ МПа}$$

$$0.3636 \text{ МПа} \geq 0.1000 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Минимальное расстояние между “одиночными” штуцерами:

$$b_0 = 2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} = 2 \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 408.9 \text{ мм}$$

Обечайка, нагруженная изгибающим моментом (п. 5.3.5)

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$[F]_{\pi} = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3.142 \cdot (2200 + 22 - 3) \cdot (22 - 3) \cdot 164 = 2.172 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны сжатия:

$$[M]_{\pi} = \frac{D}{4} \cdot [F]_{\pi} = 2200 / 4 \cdot 2.172 \cdot 10^7 = 1.195 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:

$$[F]_{\text{EI}} = \frac{31.0 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2.5} = 31.0 \cdot 10^{-5} \cdot 1.8 \cdot 10^5 \cdot 2200^2 / (2.4) \cdot (100 \cdot (22 - 3) / 2200)^{2.5} = 7.8 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_{\text{E}} = \frac{D}{3.5} \cdot [F]_{\text{EI}} = 2200 / 3.5 \cdot 7.8 \cdot 10^7 = 4.903 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \frac{[M]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\pi}}{[M]_{\text{E}}} \right)^2}} = 1.195 \cdot 10^7 / (1 + (1.195 \cdot 10^7 / 4.903 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 1.161 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

$$1.161 \cdot 10^7 \text{ Н м} \geq 1.873 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

Инов. № подл. 19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	0,3636 МПа ≥ 0,1000 МПа
					Закключение: Условие прочности и устойчивости выполнено
					Минимальное расстояние между “одиночными” штуцерами:
					$b_0 = 2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} = 2 \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 408,9 \text{ мм}$
					Обечайка, нагруженная изгибающим моментом (п. 5.3.5)
Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:					
$[F]_{\Pi} = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3,142 \cdot (2200 + 22 - 3) \cdot (22 - 3) \cdot 164 = 2,172 \cdot 10^7 \text{ Н}$					
Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны сжатия:					
$[M]_{\Pi} = \frac{D}{4} \cdot [F]_{\Pi} = 2200 / 4 \cdot 2,172 \cdot 10^7 = 1,195 \cdot 10^7 \text{ Н м}$					
Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:					
$[F]_{\text{EI}} = \frac{31.0 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2.5} = 310 \cdot 10^{-6} \cdot 1,8 \cdot 10^5 \cdot 2200^2 / (2,4) \cdot (100 \cdot (22 - 3) / 2200)^{2.5} = 7,8 \cdot 10^7 \text{ Н}$					
Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:					
$[M]_{\text{E}} = \frac{D}{3.5} \cdot [F]_{\text{EI}} = 2200 / 3.5 \cdot 7,8 \cdot 10^7 = 4,903 \cdot 10^7 \text{ Н м}$					
Допускаемый изгибающий момент:					
$[M] = \frac{[M]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\Pi}}{[M]_{\text{E}}} \right)^2}} = 1,195 \cdot 10^7 / (1 + (1,195 \cdot 10^7 / 4,903 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 1,161 \cdot 10^7 \text{ Н м}$					
$1,161 \cdot 10^7 \text{ Н м} \geq 1,873 \cdot 10^4 \text{ Н м}$					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-802.00.00.000 PP
					Лист
					22

Закключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Обечайка, нагруженная поперечным усилием (п. 5.3.6)

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности:

$$[Q]_{\pi} = 0.25 \cdot \pi \cdot D \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 0.25 \cdot 3.142 \cdot 2200 \cdot (22 - 3) \cdot 164 = 5,384 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Расчётная длина для расчёта от действия поперечной силы:

$$l_0 = 6487 \text{ мм}$$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

$$[Q]_{\Sigma} = \frac{2.4 \cdot E \cdot (s - c)^2}{n_y} \cdot \left[0.18 + 3.3 \cdot \frac{D(s - c)}{l^2} \right] = 2.4 \cdot 1.8 \cdot 10^5 \cdot (22 - 3)^2 / 2.4 \cdot (0.18 + 3.3 \cdot 2200 \cdot (22 - 3) / 6487^2) = 1,191 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\pi}}{[Q]_{\Sigma}} \right)^2}} = 5,384 \cdot 10^6 / (1 + (5,384 \cdot 10^6 / 1,191 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 4,906 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$4,906 \cdot 10^6 \text{ Н} \geq 3,099 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Закключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Обечайка, работающая под совместным действием нагрузок (п. 5.3.7)

Обечайка, работающая под совместным действием наружного давления, осевого сжимающего усилия, изгибающего момента и поперечного усилия.

$$\text{Проверка условия устойчивости: } \left(\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 \right) \leq 1$$

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0,1000 / 0,3636 + 0 / 0 + 1,873 \cdot 10^4 / 1,161 \cdot 10^7 + (3,099 \cdot 10^4 / 4,906 \cdot 10^6)^2 = 0,2766 \leq 1$$

Закключение: **Условие устойчивости выполнено**

Для расчёта обечайки от действия седловых опор:

$$B_1 = \min \left\{ 1.0; 9.45 \cdot \frac{D}{l} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (s - c)}} \right\} = \min \{ 1.0, 9.45 \cdot 2200 / 6487 \cdot (2200 / (100 \cdot (22 - 3)))^{1/2} \} = 1$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости:

$$[p]_{\Sigma} = \frac{2.08 \cdot 10^{-5} E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D}{l} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2.5} = 20.8 \cdot 10^{-6} \cdot 1.8 \cdot 10^5 \cdot 2200 / (2.4 \cdot 1 \cdot 6487) \cdot (100 \cdot (22 - 3) / 2200)^{2.5} = 0,3667 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\pi}}{[p]_{\Sigma}} \right)^2}} = 2,808 / (1 + (2,808 / 0,3667)^2)^{1/2} = 0,3636 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление: $[p] = 0,3636 \text{ МПа}$

Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием (п. 2.3.4)

Допускаемое осевое сжимающее усилие:

$$[F] = \frac{[F]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\pi}}{[F]_{\Sigma 1}} \right)^2}} = 2,172 \cdot 10^7 / (1 + (2,172 \cdot 10^7 / 7,8 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 2,093 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19810.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Е-802.00.00.000 РР				Лист
				23

$$[p] = \frac{[p]_{\text{н}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\text{н}}}{[p]_{\text{н}}}\right)^2}} = 4,67 / (1 + (4,67 / 0,5406)^2)^{1/2} = 0,537 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление: $[p] = 0,537 \text{ МПа}$

Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием (п. 2.3.4)

Допускаемое осевое сжимающее усилие:

$$[F] = \frac{[F]_{\text{н}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\text{н}}}{[F]_{\text{н}}}\right)^2}} = 3,612 \cdot 10^7 / (1 + (3,612 \cdot 10^7 / 1,15 \cdot 10^8)^2)^{1/2} = 3,446 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости:

$$[M]_{\text{уст}} = \frac{[M]_{\text{н}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\text{н}}}{[M]_{\text{н}}}\right)^2}} = 1,987 \cdot 10^7 / (1 + (1,987 \cdot 10^7 / 7,227 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 1,916 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \min\{M_{\text{тп}}, M_{\text{уст}}\} = \min\{1,987 \cdot 10^7, 1,916 \cdot 10^7\} = 1,916 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

Расчётная длина для расчёта седловых опор:

$l_s = 4500 \text{ мм}$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

$$[Q]_{\text{н}} = \frac{2,4 \cdot E \cdot (s - c)^2}{n_y} \cdot \left[0,18 + 3,3 \frac{D(s - c)}{l_s^2} \right] = 2,4 \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot (22 - 3)^2 / 1,8 \cdot (0,18 + 3,3 \cdot 2200 \cdot (22 - 3) / 4500^2) = 1,789 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие:

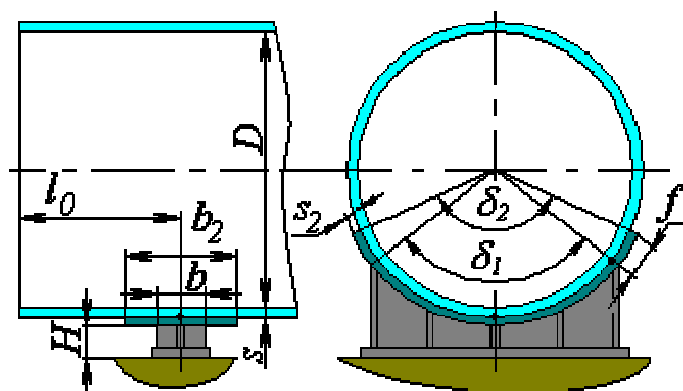
$$[Q] = \frac{[Q]_{\text{н}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\text{н}}}{[Q]_{\text{н}}}\right)^2}} = 8,954 \cdot 10^6 / (1 + (8,954 \cdot 10^6 / 1,789 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 8,007 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата				Инов. № дубл.	Подпись и дата									
19810.4	Взам. инв. №					Взам. инв. №									
	Подпись и дата					Подпись и дата									
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-802.00.00.000 PP										Лист
															25

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_{\text{н}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\text{н}}}{[Q]_{\text{в}}}\right)^2}} = 8,954 \cdot 10^6 / (1 + (8,954 \cdot 10^6 / 1,789 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 8,007 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Опора седловая (подвижная)



Исходные данные

Элемент, связанный с опорой:	Обечайка цилиндрическая
Внутренний диаметр обечайки, D:	2200 мм
Толщина стенки обечайки, s:	22 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c ₁ :	3 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, c ₂ :	0 мм
Прибавка технологическая, c ₃ :	0 мм
Сумма прибавок к стенке обечайки, c:	3 мм
Ширина опоры, b:	300 мм
Угол охвата опоры, δ_1 :	120 °
Расстояние от края элемента, l ₀ :	750 мм
Расстояние до днища, a:	810 мм
Высота опоры, H:	194 мм
Толщина листа, s ₂ :	14 мм
Ширина листа, b ₂ :	450 мм
Угол охвата листа, δ_2 :	140 °
Длина выступающей части листа, f:	198,3 мм

Расчёт в рабочих условиях

Условия нагружения (см. Эпюры сил и моментов):

Расчётная температура, T:	210 °C
Коэффициент заполнения жидкостью, ξ :	0,422
Плотность жидкости, $\rho_{ж}$:	1·10 ³ кг/м ³
Расчётное внутреннее избыточное давление, действующее в элементе над опорой, p:	2,31 МПа

Изн. № подл.	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19810.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
			Дата
E-802.00.00.000 PP			
Лист			
26			

Изгибающий момент в сечении оболочки над опорой, М: $5,277 \cdot 10^4$ Н м

Опорное усилие, F: $1,639 \cdot 10^5$ Н

Поперечное усилие в сечении оболочки над опорой, Q: $1,226 \cdot 10^5$ Н

Допускаемые нагрузки для элемента, связанного с обечайкой (см. расчёт “Обечайка цилиндрическая”):

Допускаемое наружное давление, [p]: $0,3636$ МПа

Допускаемый изгибающий момент, [M]_{уст}: $1,161 \cdot 10^7$ Н м

Допускаемая осевое сжимающее усилие, [F]: $2,093 \cdot 10^7$ Н

Допускаемая поперечное усилие, [Q]: $4,922 \cdot 10^6$ Н

Расчёт обечайки на прочность и устойчивость от опорных нагрузок по ГОСТ Р 52857.5-2007

Опора без подкладного листа

$$K_{13} = \frac{\max \left\{ 1.7 - \frac{2.1 \cdot \delta_1}{\pi}; 0 \right\}}{\sin(0.5 \cdot \delta_1)} = \max \{ 1.7 - 2.1 * 2,094 / 3,142; 0 \} / \sin(0.5 * 2,094) = 0,3464$$

Параметр, определяемый расстоянием до днища:

$$\gamma = 2.83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s-c}{D}} = 2.83 * 810 / 2200 * ((22-3) / 2200)^{1/2} = 0,09683$$

Коэффициенты, учитывающие влияние расстояния до днища (δ_1 подставляют в радианах):

$$K_{15} = \min \left\{ 1.0; \frac{0.8 \cdot \sqrt{\gamma + 6 \cdot \gamma}}{\delta_1} \right\} = \min \{ 1.0; (0.8 * 0,09683^{1/2} + 6 * 0,09683) / 2,094 \} = 0,3963$$

Коэффициенты, учитывающие влияние угла охвата опоры (δ_1 подставляют в радианах):

$$K_{12} = \frac{1.15 - 0.1432 \cdot \delta_1}{\sin(0.5 \cdot \delta_1)} = (1.15 - 0.1432 * 2,094) / \sin(0.5 * 2,094) = 0,9816$$

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta_1 = 0.91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s-c)}} = 0.91 * 300 / (2200 * (22-3))^{1/2} = 1,335$$

Коэффициенты, учитывающие влияние ширины пояса опоры (δ_1 подставляют в радианах):

$$K_{10} = \max \left\{ \frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0.25 \right\} = \max \{ e^{-1,335} * \sin(1,335) / 1,335; 0.25 \} = 0,25$$

$$\Phi_1 = - \frac{0.23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0.23 * 0,3464 * 0,3963 / (0,9816 * 0,25) = (-0,1287)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{\text{мк}} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s-c)} = 4 * 5,277 \cdot 10^4 / (3,142 * 2200^2 * (22-3)) = 0,7306 \text{ МПа}$$

$$\Phi_{21} = - \bar{\sigma}_{\text{мк}} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = -0,7306 / (1,25 * 164) = (-0,003564)$$

Изн. № подл.	19810.4	Подпись и дата			
		Изн. № дубл.			
		Взам. инв. №			
		Подпись и дата			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-802.00.00.000 PP
					Лист
					27

$$\sigma_{22} = \left(\frac{p \cdot D}{4 \cdot (s - c)} - \bar{\sigma}_{\max} \right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = [2,31 \cdot 2200 / (4 \cdot (22 - 3)) - 0,7306] / (1,2 \cdot 164) = 0,336$$

Примечание: при $\sigma_{2i} < 0$ в расчёте K_1 знаки σ_1 и σ_2 меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \sigma_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \sigma_1 \cdot \sigma_2 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \sigma_1 \cdot \sigma_2 \right)^2 + (1 - \sigma_2^2) \cdot \sigma_1}} = 1,446 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \sigma_2 = \sigma_{21} \\ \text{при } \sigma_2 = \sigma_{2,2} \end{array} \right|$$

$$= 1,468$$

$$K_1 = \min\{1,446, 1,468\} = 1,446$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1,446 \cdot 1,25 \cdot 164 = 296,4 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0,7 \cdot [\sigma]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} \cdot (s - c)}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0,7 \cdot 296,4 \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} \cdot (22 - 3) / (0,25 \cdot 0,9816) = 3,285 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-1,335} \cdot \cos(1,335)) / 1,335 = 0,7029$$

$$K_{14} = \frac{1,45 - 0,43 \cdot \delta_1}{\sin(0,5 \cdot \delta_1)} = (1,45 - 0,43 \cdot 2,094) / \sin(0,5 \cdot 2,094) = 0,6344$$

$$K_{16} = 1 - \frac{0,65}{1 + (6 \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0,65 / (1 + (6 \cdot 0,09683)^2) \cdot [3,142 / (3 \cdot 2,094)]^{1/2} = 0,6564$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0,6 \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{s - c}} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1} = 1 / [1 + 0,6 \cdot (2200 / (22 - 3))^{1/3} \cdot 300 / 2200 \cdot 2,094] = 0,5449$$

$$\sigma_1 = - \frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 \cdot 0,7029 / [0,6344 \cdot 0,6564 \cdot 0,5449 \cdot \sin(0,5 \cdot 2,094)] = (-1,896)$$

$$\sigma_{21} = 0$$

$$\sigma_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s - c)} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = 2,31 \cdot 2200 / (2 \cdot (22 - 3)) \cdot 1 / (1,25 \cdot 164) = 0,6522$$

Примечание: при $\sigma_{2i} < 0$ в расчёте K_1 знаки σ_1 и σ_2 меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \sigma_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \sigma_1 \cdot \sigma_2 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \sigma_1 \cdot \sigma_2 \right)^2 + (1 - \sigma_2^2) \cdot \sigma_1}} = 0,4428 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \sigma_2 = \sigma_{21} \\ \text{при } \sigma_2 = \sigma_{2,2} \end{array} \right|$$

$$= 0,7235$$

$$K_1 = \min\{0,4428, 0,7235\} = 0,4428$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_3 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,4428 \cdot 1,25 \cdot 164 = 90,77 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0,9 \cdot [\sigma]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} \cdot (s - c)}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0,9 \cdot 90,77 \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} \cdot (22 - 3) / (0,6344 \cdot 0,6564 \cdot 0,5449) = 1,399 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	$K_{17} = \frac{1}{1 + 0.6 \cdot 3 \sqrt{\frac{D}{s-c}} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1} = 1 / [1 + 0.6 \cdot (2200 / (22 - 3))^{1/3} \cdot 300 / 2200 \cdot 2,094] = 0,5449$						
						$\vartheta_{21} = -\frac{0.53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0.5 \cdot \delta_1)} = -0.53 \cdot 0,7029 / [0,6344 \cdot 0,6564 \cdot 0,5449 \cdot \sin(0.5 \cdot 2,094)] = (-1,896)$						
						$\vartheta_{21} = 0$						
						$\vartheta_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s-c)} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = 2,31 \cdot 2200 / (2 \cdot (22 - 3)) \cdot 1 / (1,25 \cdot 164) = 0,6522$						
						Примечание: при $\vartheta_{2i} < 0$ в расчёте K_i знаки ϑ_1 и ϑ_2 меняют на противоположные						
						$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 0,4428 \quad \left \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{22} \end{array} \right.$						
						$= 0,7235$						
						$K_1 = \min\{0,4428, 0,7235\} = 0,4428$						
						Расчёт в точке 3:						
						Предельное напряжение изгиба:						
						$[\sigma]_3 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,4428 \cdot 1,25 \cdot 164 = 90,77 \text{ МПа}$						
						Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:						
						$[F]_3 = \frac{0.9 \cdot [\sigma]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s-c)} \cdot (s-c)}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0.9 \cdot 90,77 \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} \cdot (22 - 3) / (0,6344 \cdot 0,6564 \cdot 0,5449) = 1,399 \cdot 10^6 \text{ Н}$						
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-802.00.00.000 PP	Лист
												28

$$K_{13} = \frac{\max\left\{1,7 - \frac{2,1 \cdot \delta_1}{\pi}; 0\right\}}{\sin(0,5 \cdot \delta_1)} = \max\{1,7 - 2,1 * 2,094 / 3,142; 0\} / \sin(0,5 * 2,094) = 0,3464$$

Параметр, определяемый расстоянием до днища:

$$\gamma = 2,83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s-c}{D}} = 2,83 * 810 / 2200 * ((22-3) / 2200)^{1/2} = 0,09683$$

Коэффициенты, учитывающие влияние расстояния до днища (δ_1 подставляют в радианах):

$$K_{15} = \min\left\{1,0; \frac{0,8 \cdot \sqrt{\gamma + \delta \cdot \gamma}}{\delta_1}\right\} = \min\{1,0; (0,8 * 0,09683^{1/2} + 6 * 0,09683) / 2,094\} = 0,3963$$

Коэффициенты, учитывающие влияние угла охвата опоры (δ_1 подставляют в радианах):

$$K_{12} = \frac{1,15 - 0,1432 \cdot \delta_1}{\sin(0,5 \cdot \delta_1)} = (1,15 - 0,1432 * 2,094) / \sin(0,5 * 2,094) = 0,9816$$

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta_1 = 0,91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s-c)}} = 0,91 * 300 / (2200 * (22-3))^{1/2} = 1,335$$

Коэффициенты, учитывающие влияние ширины пояса опоры (δ_1 подставляют в радианах):

$$K_{10} = \max\left\{\frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0,25\right\} = \max\{e^{-1,335} * \sin(1,335) / 1,335; 0,25\} = 0,25$$

$$\varphi_1 = -\frac{0,23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0,23 * 0,3464 * 0,3963 / (0,9816 * 0,25) = (-0,1287)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{\text{мк}} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s-c)} = 4 * 1,87 \cdot 10^4 / (3,142 * 2200^2 * (22-3)) = 0,2589 \text{ МПа}$$

$$\varphi_{21} = -\bar{\sigma}_{\text{мк}} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = -0,2589 / (1,25 * 164) = (-0,001263)$$

$$\varphi_{22} = \left(\frac{p \cdot D}{4 \cdot (s-c)} - \bar{\sigma}_{\text{мк}}\right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = [(-0,1000) * 2200 / (4 * (22-3)) - 0,2589] / (1,2 * 164) = (-0,01602)$$

Примечание: при $\varphi_{2i} < 0$ в расчёте K_1 знаки φ_1 и φ_2 меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \varphi_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \varphi_1 \cdot \varphi_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \varphi_1 \cdot \varphi_2\right)^2 + (1 - \varphi_2^2) \cdot \varphi_1}} = 1,447 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \varphi_2 = \varphi_{21} \\ \text{при } \varphi_2 = \varphi_{22} \end{array} \right|$$

$$= 1,439$$

$$K_1 = \min\{1,447, 1,439\} = 1,439$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma_1]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1,439 * 1,25 * 164 = 295,1 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0,7 \cdot [\sigma_1]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s-c) \cdot (s-c)}}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0,7 * 295,1 * (2200 * (22-3))^{1/2} * (22-3) / (0,25 * 0,9816) = 3,269 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
E-802.00.00.000 PP					Лист
					30

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-1,335} \cdot \cos(1,335)) / 1,335 = 0,7029$$

$$K_{14} = \frac{1,45 - 0,43 \cdot \delta_1}{\sin(0,5 \cdot \delta_1)} = (1,45 - 0,43 \cdot 2,094) / \sin(0,5 \cdot 2,094) = 0,6344$$

$$K_{16} = 1 - \frac{0,65}{1 + (6 \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0,65 / (1 + (6 \cdot 0,09683)^2) \cdot [3,142 / (3 \cdot 2,094)]^{1/2} = 0,6564$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0,6 \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{s-c}} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1} = 1 / [1 + 0,6 \cdot (2200 / (22 - 3))^{1/3} \cdot 300 / 2200 \cdot 2,094] = 0,5449$$

$$\vartheta_1 = -\frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 \cdot 0,7029 / [0,6344 \cdot 0,6564 \cdot 0,5449 \cdot \sin(0,5 \cdot 2,094)] = (-1,896)$$

$$\vartheta_{21} = 0$$

$$\vartheta_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s-c)} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = (-0,1000) \cdot 2200 / (2 \cdot (22 - 3)) \cdot 1 / (1,25 \cdot 164) = (-0,02824)$$

Примечание: при $\vartheta_{21} < 0$ в расчёте K_1 знаки ϑ_1 и ϑ_2 меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 0,4428 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{22} \end{array} \right|$$

$$= 0,4305$$

$$K_1 = \min\{0,4428, 0,4305\} = 0,4305$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_B = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,4305 \cdot 1,25 \cdot 164 = 88,25 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_B = \frac{0,9 \cdot [\sigma]_B \cdot \sqrt{D \cdot (s-c)} \cdot (s-c)}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0,9 \cdot 88,25 \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} \cdot (22 - 3) / (0,6344 \cdot 0,6564 \cdot 0,5449) = 1,36 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Условие прочности:

$$F \leq [F] = \min\{[F]_2, [F]_3\}$$

$$[F] = \min\{[F]_2, [F]_3\} = 1,36 \cdot 10^6$$

$$5,484 \cdot 10^4 \text{ Н} \leq 1,36 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Проверка условия устойчивости

Эффективное осевое усилие от местных мембранных напряжений:

$$F_e = F \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{D}{(s-c)}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} = 5,484 \cdot 10^4 \cdot 3,142 / 4 \cdot (2200 / (22 - 3))^{1/2} \cdot 0,3464 \cdot 0,3963 = 6,361 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

$$\text{Условие устойчивости: } \frac{|F|}{[F]} + \frac{F_e}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{уст}}} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 \leq 1$$

Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата		Подпись и дата	
Взам. инв. №		Инов. № дубл.		Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата		Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
E-802.00.00.000 PP					Лист
					31

$$K_{12} = \frac{1.15 - 0.1432 \cdot \delta_1}{\sin(0.5 \cdot \delta_1)} = (1.15 - 0.1432 \cdot 2.094) / \sin(0.5 \cdot 2.094) = 0,9816$$

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta_1 = 0.91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s - c)}} = 0.91 \cdot 300 / (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 1,335$$

Коэффициенты, учитывающие влияние ширины пояса опоры (δ_1 подставляют в радианах):

$$K_{10} = \max \left\{ \frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}, 0.25 \right\} = \max \{ e^{-1,335} \cdot \sin(1,335) / 1,335; 0.25 \} = 0,25$$

$$\Phi_1 = - \frac{0.23 \cdot K_{12} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0.23 \cdot 0,3464 \cdot 0,3963 / (0,9816 \cdot 0,25) = (-0,1287)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{\text{мк}} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = 4 \cdot 4,915 \cdot 10^4 / (3,142 \cdot 2200^2 \cdot (22 - 3)) = 0,6805 \text{ МПа}$$

$$\Phi_{21} = - \frac{\bar{\sigma}_{\text{мк}}}{K_2 \cdot [\sigma]} = -0,6805 / (1,05 \cdot 272,7) = (-0,002376)$$

$$\Phi_{22} = \left(\frac{p \cdot D}{4 \cdot (s - c)} - \bar{\sigma}_{\text{мк}} \right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = [3,423 \cdot 2200 / (4 \cdot (22 - 3)) - 0,6805] / (1 \cdot 272,7) = 0,3609$$

Примечание: при $\Phi_{2i} < 0$ в расчёте K_1 знаки Φ_1 и Φ_2 меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \Phi_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \Phi_1 \cdot \Phi_2 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \Phi_1 \cdot \Phi_2 \right)^2 + \left(1 - \Phi_2^2 \right) \cdot \Phi_1}} = 1,447 \quad \text{при } \Phi_2 = \Phi_{21}$$

$$= 1,455 \quad \text{при } \Phi_2 = \Phi_{22}$$

$$K_1 = \min \{ 1,447, 1,455 \} = 1,447$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1,447 \cdot 1,05 \cdot 272,7 = 414,3 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0.7 \cdot [\sigma]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} \cdot (s - c)}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0.7 \cdot 414,3 \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} \cdot (22 - 3) / (0,25 \cdot 0,9816) = 4,591 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-1,335} \cdot \cos(1,335)) / 1,335 = 0,7029$$

$$K_{14} = \frac{1.45 - 0.43 \cdot \delta_1}{\sin(0.5 \cdot \delta_1)} = (1.45 - 0.43 \cdot 2.094) / \sin(0.5 \cdot 2.094) = 0,6344$$

$$K_{16} = 1 - \frac{0.65}{1 + (6 \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0.65 / (1 + (6 \cdot 0,09683)^2) \cdot [3,142 / (3 \cdot 2,094)]^{1/2} = 0,6564$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0.6 \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{s - c}} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1} = 1 / [1 + 0.6 \cdot (2200 / (22 - 3))^{1/3} \cdot 300 / 2200 \cdot 2,094] = 0,5449$$

Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата		Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-802.00.00.000 PP	
						Лист
						33

$$\Phi_1 = -\frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 \cdot 0,7029 / [0,6344 \cdot 0,6564 \cdot 0,5449 \cdot \sin(0,5 \cdot 2,094)] = (-1,896)$$

$$\Phi_{21} = 0$$

$$\Phi_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s - c)} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = 3,423 \cdot 2200 / (2 \cdot (22 - 3)) \cdot 1 / (1,05 \cdot 272,7) = 0,6921$$

Примечание: при $\Phi_{2i} < 0$ в расчёте K_1 знаки Φ_1 и Φ_2 меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \Phi_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \Phi_1 \cdot \Phi_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \Phi_1 \cdot \Phi_2\right)^2 + (1 - \Phi_2^2) \cdot \Phi_1}} = 0,4428 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \Phi_2 = \Phi_{21} \\ \text{при } \Phi_2 = \Phi_{2,2} \end{array} \right|$$

$$= 0,7404$$

$$K_1 = \min\{0,4428, 0,7404\} = 0,4428$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_b = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,4428 \cdot 1,05 \cdot 272,7 = 126,8 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0,9 \cdot [\sigma]_b \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} \cdot (s - c)}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0,9 \cdot 126,8 \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} \cdot (22 - 3) / (0,6344 \cdot 0,6564 \cdot 0,5449) = 1,954 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Условие прочности:

$$F \leq [F] = \min\{[F]_2, [F]_3\}$$

$$[F] = \min\{[F]_2, [F]_3\} = 1,954 \cdot 10^6$$

$$1,832 \cdot 10^5 \text{ Н} \leq 1,954 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Проверка условия устойчивости

Эффективное осевое усилие от местных мембранных напряжений:

$$F_e = F \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{D}{\sqrt{(s - c)}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} = 1,832 \cdot 10^5 \cdot 3,142 / 4 \cdot (2200 / (22 - 3))^{1/2} \cdot 0,3464 \cdot 0,3963 = 2,126 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Сосуд работает под внутренним давлением, при проверке устойчивости принимают $p=0$.

$$\text{Условие устойчивости: } \frac{|p|}{[p]} + \frac{F_e}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{уст}}} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 \leq 1$$

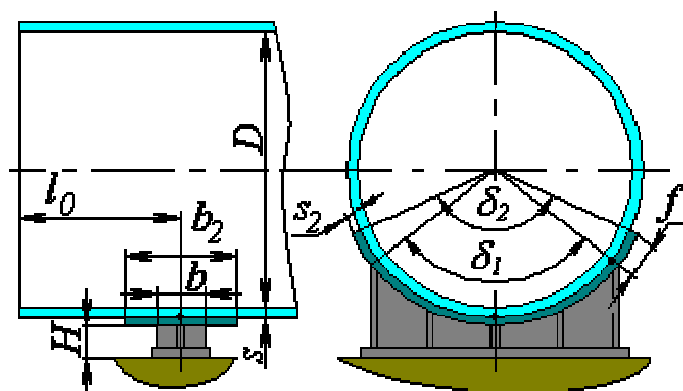
$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{F_e}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{уст}}} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 = 0 / 0,537 + 2,126 \cdot 10^5 / 3,446 \cdot 10^7 + 4,915 \cdot 10^4 / 1,916 \cdot 10^7 + (1,164 \cdot 10^5 / 8,007 \cdot 10^6)^2 = 0,008945$$

$$0,008945 \leq 1,0$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Инв. № подл.	19810.4	Подпись и дата			
		Инв. № дубл.			
		Взам. инв. №			
		Подпись и дата			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-802.00.00.000 PP

Опора седловая (неподвижная)



Исходные данные

Элемент, связанный с опорой:	Обечайка цилиндрическая
Внутренний диаметр обечайки, D:	2200 мм
Толщина стенки обечайки, s:	22 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c ₁ :	3 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, c ₂ :	0 мм
Прибавка технологическая, c ₃ :	0 мм
Сумма прибавок к стенке обечайки, c:	3 мм
Ширина опоры, b:	300 мм
Угол охвата опоры, δ_1 :	120 °
Расстояние от края элемента, l ₀ :	5250 мм
Расстояние до днища, a:	810 мм
Высота опоры, H:	194 мм
Толщина листа, s ₂ :	14 мм
Ширина листа, b ₂ :	450 мм
Угол охвата листа, δ_2 :	140 °
Длина выступающей части листа, f:	198,3 мм

Расчёт в рабочих условиях

Условия нагружения (см. Эпюры сил и моментов):

Расчётная температура, T:	210 °C
Коэффициент заполнения жидкостью, ξ :	0,422
Плотность жидкости, $\rho_{ж}$:	1·10 ³ кг/м ³
Расчётное внутреннее избыточное давление, действующее в элементе над опорой, p:	2,31 МПа

Изн. № подл.	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19810.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
E-802.00.00.000 PP			
Лист			
35			

Изгибающий момент в сечении оболочки над опорой, М: $5,282 \cdot 10^4$ Н м

Опорное усилие, F: $1,625 \cdot 10^5$ Н

Поперечное усилие в сечении оболочки над опорой, Q: $1,213 \cdot 10^5$ Н

Допускаемые нагрузки для элемента, связанного с обечайкой (см. расчёт “Обечайка цилиндрическая”):

Допускаемое наружное давление, [p]: $0,3636$ МПа

Допускаемый изгибающий момент, [M]_{уст}: $1,161 \cdot 10^7$ Н м

Допускаемая осевое сжимающее усилие, [F]: $2,093 \cdot 10^7$ Н

Допускаемая поперечное усилие, [Q]: $4,922 \cdot 10^6$ Н

Расчёт обечайки на прочность и устойчивость от опорных нагрузок по ГОСТ Р 52857.5-2007

Опора без подкладного листа

$$K_{13} = \frac{\max \left\{ 1,7 - \frac{2,1 \cdot \delta_1}{\pi}; 0 \right\}}{\sin(0,5 \cdot \delta_1)} = \max \{ 1,7 - 2,1 * 2,094 / 3,142; 0 \} / \sin(0,5 * 2,094) = 0,3464$$

Параметр, определяемый расстоянием до днища:

$$\gamma = 2,83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s-c}{D}} = 2,83 * 810 / 2200 * ((22-3) / 2200)^{1/2} = 0,09683$$

Коэффициенты, учитывающие влияние расстояния до днища (δ_1 подставляют в радианах):

$$K_{15} = \min \left\{ 1,0; \frac{0,8 \cdot \sqrt{\gamma + 6 \cdot \gamma}}{\delta_1} \right\} = \min \{ 1,0; (0,8 * 0,09683^{1/2} + 6 * 0,09683) / 2,094 \} = 0,3963$$

Коэффициенты, учитывающие влияние угла охвата опоры (δ_1 подставляют в радианах):

$$K_{12} = \frac{1,15 - 0,1432 \cdot \delta_1}{\sin(0,5 \cdot \delta_1)} = (1,15 - 0,1432 * 2,094) / \sin(0,5 * 2,094) = 0,9816$$

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta_1 = 0,91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s-c)}} = 0,91 * 300 / (2200 * (22-3))^{1/2} = 1,335$$

Коэффициенты, учитывающие влияние ширины пояса опоры (δ_1 подставляют в радианах):

$$K_{10} = \max \left\{ \frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0,25 \right\} = \max \{ e^{-1,335} * \sin(1,335) / 1,335; 0,25 \} = 0,25$$

$$\Phi_1 = - \frac{0,23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0,23 * 0,3464 * 0,3963 / (0,9816 * 0,25) = (-0,1287)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{\text{мк}} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s-c)} = 4 * 5,282 \cdot 10^4 / (3,142 * 2200^2 * (22-3)) = 0,7313 \text{ МПа}$$

$$\Phi_{21} = - \bar{\sigma}_{\text{мк}} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = -0,7313 / (1,25 * 164) = (-0,003567)$$

Изн. № подл.	19810.4	Подпись и дата					Лист
		Изн. № дубл.					
		Взам. инв. №					
		Подпись и дата					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-802.00.00.000 PP		36

$\gamma - 2.83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s-c}{D}} - 2.83 * 810 / 2200 * ((22 - 3) / 2200)^{1/2} = 0,09683$

Коэффициенты, учитывающие влияние расстояния до днища (δ_1 подставляют в радианах):

$$K_{15} = \min \left\{ 1,0; \frac{0,8 \cdot \sqrt{\gamma + 6 \cdot \gamma}}{\delta_1} \right\} = \min \{ 1,0; (0,8 * 0,09683^{1/2} + 6 * 0,09683) / 2,094 \} = 0,3963$$

Коэффициенты, учитывающие влияние угла охвата опоры (δ_1 подставляют в радианах):

$$K_{12} = \frac{1,15 - 0,1432 \cdot \delta_1}{\sin(0,5 \cdot \delta_1)} = (1,15 - 0,1432 * 2,094) / \sin(0,5 * 2,094) = 0,9816$$

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta_1 = 0,91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s - c)}} = 0,91 * 300 / (2200 * (22 - 3))^{1/2} = 1,335$$

Коэффициенты, учитывающие влияние ширины пояса опоры (β_1 подставляют в радианах):

$$K_{10} = \max \left\{ \frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0,25 \right\} = \max \{ e^{-1,335} * \sin(1,335) / 1,335; 0,25 \} = 0,25$$
$$\Phi_1 = - \frac{0,23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0,23 * 0,3464 * 0,3963 / (0,9816 * 0,25) = (-0,1287)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{\text{изг}} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = 4 * 5,282 \cdot 10^4 / (3,142 * 2200^2 * (22 - 3)) = 0,7313 \text{ МПа}$$
$$\Phi_{21} = - \bar{\sigma}_{\text{изг}} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = -0,7313 / (1,25 * 164) = (-0,003567)$$

$$\sigma_{22} = \left(\frac{p \cdot D}{4 \cdot (s - c)} - \bar{\sigma}_{\max} \right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = [2,31 \cdot 2200 / (4 \cdot (22 - 3)) - 0,7313] / (1,2 \cdot 164) = 0,336$$

Примечание: при $\sigma_{2i} < 0$ в расчёте K_1 знаки σ_1 и σ_2 меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \sigma_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \sigma_1 \cdot \sigma_2 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \sigma_1 \cdot \sigma_2 \right)^2 + (1 - \sigma_2^2) \cdot \sigma_1}} = 1,446 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \sigma_2 = \sigma_{21} \\ \text{при } \sigma_2 = \sigma_{22} \end{array} \right|$$

$= 1,468$

$$K_1 = \min\{1,446, 1,468\} = 1,446$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1,446 \cdot 1,25 \cdot 164 = 296,4 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0,7 \cdot [\sigma]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} \cdot (s - c)}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0,7 \cdot 296,4 \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} \cdot (22 - 3) / (0,25 \cdot 0,9816) = 3,285 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-1,335} \cdot \cos(1,335)) / 1,335 = 0,7029$$

$$K_{14} = \frac{1,45 - 0,43 \cdot \delta_1}{\sin(0,5 \cdot \delta_1)} = (1,45 - 0,43 \cdot 2,094) / \sin(0,5 \cdot 2,094) = 0,6344$$

$$K_{16} = 1 - \frac{0,65}{1 + (6 \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0,65 / (1 + (6 \cdot 0,09683)^2) \cdot [3,142 / (3 \cdot 2,094)]^{1/2} = 0,6564$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0,6 \cdot \sqrt{\frac{D}{s - c}} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1} = 1 / [1 + 0,6 \cdot (2200 / (22 - 3))^{1/3} \cdot 300 / 2200 \cdot 2,094] = 0,5449$$

$$\sigma_1 = - \frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 \cdot 0,7029 / [0,6344 \cdot 0,6564 \cdot 0,5449 \cdot \sin(0,5 \cdot 2,094)] = (-1,896)$$

$$\sigma_{21} = 0$$

$$\sigma_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s - c)} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = 2,31 \cdot 2200 / (2 \cdot (22 - 3)) \cdot 1 / (1,25 \cdot 164) = 0,6522$$

Примечание: при $\sigma_{2i} < 0$ в расчёте K_1 знаки σ_1 и σ_2 меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \sigma_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \sigma_1 \cdot \sigma_2 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \sigma_1 \cdot \sigma_2 \right)^2 + (1 - \sigma_2^2) \cdot \sigma_1}} = 0,4428 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \sigma_2 = \sigma_{21} \\ \text{при } \sigma_2 = \sigma_{22} \end{array} \right|$$

$= 0,7235$

$$K_1 = \min\{0,4428, 0,7235\} = 0,4428$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_3 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,4428 \cdot 1,25 \cdot 164 = 90,77 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0,9 \cdot [\sigma]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} \cdot (s - c)}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0,9 \cdot 90,77 \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} \cdot (22 - 3) / (0,6344 \cdot 0,6564 \cdot 0,5449) = 1,399 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Инв. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$K_{17} = \frac{1}{1 + 0.6 \cdot 3 \sqrt{\frac{D}{s-c}} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1} = 1 / [1 + 0.6 \cdot (2200 / (22 - 3))^{1/3} \cdot 300 / 2200 \cdot 2,094] = 0,5449$
						$\vartheta_{21} = -\frac{0.53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0.5 \cdot \delta_1)} = -0.53 \cdot 0,7029 / [0,6344 \cdot 0,6564 \cdot 0,5449 \cdot \sin(0.5 \cdot 2,094)] = (-1,896)$
						$\vartheta_{21} = 0$
						$\vartheta_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s-c)} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = 2,31 \cdot 2200 / (2 \cdot (22 - 3)) \cdot 1 / (1,25 \cdot 164) = 0,6522$
						Примечание: при $\vartheta_{2i} < 0$ в расчёте K_i знаки ϑ_1 и ϑ_2 меняют на противоположные
Подпись и дата	19810.4	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Подпись и дата	$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 0,4428$
						$= 0,7235$
						$K_1 = \min\{0,4428, 0,7235\} = 0,4428$
						Расчёт в точке 3:
						Предельное напряжение изгиба:
Инв. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$[\sigma]_3 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,4428 \cdot 1,25 \cdot 164 = 90,77 \text{ МПа}$
						Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:
						$[F]_3 = \frac{0.9 \cdot [\sigma]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s-c)} \cdot (s-c)}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0.9 \cdot 90,77 \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} \cdot (22 - 3) / (0,6344 \cdot 0,6564 \cdot 0,5449) = 1,399 \cdot 10^6 \text{ Н}$
E-802.00.00.000 PP						
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист	
					37	

$$K_{13} = \frac{\max\left\{1.7 - \frac{2.1 \cdot \delta_1}{\pi}; 0\right\}}{\sin(0.5 \cdot \delta_1)} = \max\{1.7 - 2.1 * 2,094 / 3,142; 0\} / \sin(0.5 * 2,094) = 0,3464$$

Параметр, определяемый расстоянием до днища:

$$\gamma = 2.83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s-c}{D}} = 2.83 * 810 / 2200 * ((22-3) / 2200)^{1/2} = 0,09683$$

Коэффициенты, учитывающие влияние расстояния до днища (δ_1 подставляют в радианах):

$$K_{15} = \min\left\{1.0; \frac{0.8 \cdot \sqrt{\gamma + \delta \cdot \gamma}}{\delta_1}\right\} = \min\{1.0; (0.8 * 0,09683^{1/2} + 6 * 0,09683) / 2,094\} = 0,3963$$

Коэффициенты, учитывающие влияние угла охвата опоры (δ_1 подставляют в радианах):

$$K_{12} = \frac{1.15 - 0.1432 \cdot \delta_1}{\sin(0.5 \cdot \delta_1)} = (1.15 - 0.1432 * 2,094) / \sin(0.5 * 2,094) = 0,9816$$

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta_1 = 0.91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s-c)}} = 0.91 * 300 / (2200 * (22-3))^{1/2} = 1,335$$

Коэффициенты, учитывающие влияние ширины пояса опоры (δ_1 подставляют в радианах):

$$K_{10} = \max\left\{\frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0.25\right\} = \max\{e^{-1,335} * \sin(1,335) / 1,335; 0.25\} = 0,25$$

$$\varphi_1 = -\frac{0.23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0.23 * 0,3464 * 0,3963 / (0,9816 * 0,25) = (-0,1287)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{\text{мк}} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s-c)} = 4 * 1,873 \cdot 10^4 / (3,142 * 2200^2 * (22-3)) = 0,2594 \text{ МПа}$$

$$\varphi_{21} = -\bar{\sigma}_{\text{мк}} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = -0,2594 / (1,25 * 164) = (-0,001265)$$

$$\varphi_{22} = \left(\frac{p \cdot D}{4 \cdot (s-c)} - \bar{\sigma}_{\text{мк}}\right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = [(-0,1000) * 2200 / (4 * (22-3)) - 0,2594] / (1,2 * 164) = (-0,01603)$$

Примечание: при $\varphi_{2i} < 0$ в расчёте K_1 знаки φ_1 и φ_2 меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \varphi_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \varphi_1 \cdot \varphi_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \varphi_1 \cdot \varphi_2\right)^2 + (1 - \varphi_2^2) \cdot \varphi_1}} = 1,447 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \varphi_2 = \varphi_{21} \\ \text{при } \varphi_2 = \varphi_{22} \end{array} \right|$$

$$= 1,439$$

$$K_1 = \min\{1,447, 1,439\} = 1,439$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1,439 * 1,25 * 164 = 295,1 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0.7 \cdot [\sigma]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s-c) \cdot (s-c)}}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0.7 * 295,1 * (2200 * (22-3))^{1/2} * (22-3) / (0,25 * 0,9816) = 3,269 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
E-802.00.00.000 PP					Лист
					39

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-1,335} \cdot \cos(1,335)) / 1,335 = 0,7029$$

$$K_{14} = \frac{1.45 - 0.43 \cdot \delta_1}{\sin(0.5 \cdot \delta_1)} = (1.45 - 0.43 \cdot 2.094) / \sin(0.5 \cdot 2.094) = 0,6344$$

$$K_{16} = 1 - \frac{0.65}{1 + (6 \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot 6}} = 1 - 0.65 / (1 + (6 * 0,09683)^2) * [3,142 / (3 * 2,094)]^{1/2} = 0,6564$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0.6 \cdot 3 \cdot \sqrt{\frac{D}{s - c}} - \frac{b}{D} \cdot 5_1} = 1 / [1 + 0.6 \cdot (2200 / (22 - 3))^{1/3} \cdot 300 / 2200 \cdot 2,094] = 0,5449$$

$$g_1 = -\frac{0.53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0.5 \cdot \delta_1)} = -0.53 \cdot 0.7029 / [0.6344 \cdot 0.6564 \cdot 0.5449 \cdot \sin(0.5 \cdot 2.094)] = (-1.896)$$

$$g_{2,2} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s - c)} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot \sigma} = (-0,1000) * 2200 / (2 * (22 - 3)) * 1 / (1,25 * 164) = (-0,02824)$$

Примечание: при $s_{2i} < 0$ в расчёте K_i знаки s_1 и s_2 меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - g_2^2}{\left(\frac{1}{3} + g_1 \cdot g_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + g_1 \cdot g_2\right)^2 + (1 - g_2^2) \cdot g_1}} = 0,4428 \quad \text{при } g_2 = g_{2,1}$$

$$= 0,4305 \quad \text{при } g_2 = g_{2,2}$$

$$K_1 = \min\{ 0,4428, 0,4305 \} = 0,4305$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma_i]_3 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,4305 * 1,25 * 164 = 88,25 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0.9 \cdot [\sigma_i]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s-c) \cdot (s-c)}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0.9 \cdot 88,25 \cdot (2200 \cdot (22-3))^{1/2} \cdot (22-3) / (0,6344 \cdot 0,6564 \cdot 0,5449) = 1,36 \cdot 10^6 \text{ H}$$

Условие прочности:

$$F \leq [F] = \min \{[F]_2, [F]_3\}$$

$$[F] = \min \{ [F]_2, [F]_3 \} = 1.36 \cdot 10^6$$

$$5,351 \cdot 10^4 \text{ H} \leq 1,36 \cdot 10^6 \text{ H}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Проверка условия устойчивости

Эффективное осевое усилие от местных мембранных напряжений:

$$F_t = F \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\sqrt{D}}{\sqrt{(s-c)}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} = 5,351 \cdot 10^4 \cdot 3,142 / 4 \cdot (2200 / (22-3))^{1/2} \cdot 0,3464 \cdot 0,3963 = 6,208 \cdot 10^4 \text{ H}$$

$$\text{Условие устойчивости: } \frac{[p]}{[p]} + \frac{F_e}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{норм}}} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 \leq 1$$

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$= 0,4305$
					при $\sigma_2 = \sigma_{2,2}$
19810.4					$K_1 = \min\{ 0,4428 , 0,4305 \} = 0,4305$
					Расчёт в точке 3:
					Предельное напряжение изгиба:
					$[\sigma]_3 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,4305 * 1,25 * 164 = 88,25 \text{ МПа}$
					Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:
					$[F]_3 = \frac{0.9 \cdot [\sigma]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} \cdot (s - c)}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0.9 * 88,25 * (2200 * (22 - 3))^{1/2} * (22 - 3) / (0,6344 * 0,6564 * 0,5449) = 1,36 \cdot 10^6 \text{ Н}$
					Условие прочности:
					$F \leq [F] = \min \{ [F]_2, [F]_3 \}$
					$[F] = \min \{ [F]_2, [F]_3 \} = 1,36 \cdot 10^6$
					$5,351 \cdot 10^4 \text{ Н} \leq 1,36 \cdot 10^6 \text{ Н}$
					Заключение: Условие прочности и устойчивости выполнено
					Проверка условия устойчивости
					Эффективное осевое усилие от местных мембранных напряжений:
					$F_e = F \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\sqrt{D}}{\sqrt{(s - c)}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} = 5,351 \cdot 10^4 * 3,142 / 4 * (2200 / (22 - 3))^{1/2} * 0,3464 * 0,3963 = 6,208 \cdot 10^4 \text{ Н}$
					Условие устойчивости: $\frac{ p }{[p]} + \frac{F_e}{[F]} + \frac{M}{[M]_{уст}} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 \leq 1$

$$K_{12} = \frac{1.15 - 0.1432 \cdot \delta_1}{\sin(0.5 \cdot \delta_1)} = (1.15 - 0.1432 \cdot 2.094) / \sin(0.5 \cdot 2.094) = 0,9816$$

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta_1 = 0.91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s - c)}} = 0.91 \cdot 300 / (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 1,335$$

Коэффициенты, учитывающие влияние ширины пояса опоры (δ_1 подставляют в радианах):

$$K_{10} = \max \left\{ \frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0.25 \right\} = \max \{ e^{-1,335} \cdot \sin(1,335) / 1,335; 0.25 \} = 0,25$$

$$\vartheta_1 = - \frac{0.23 \cdot K_{12} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0.23 \cdot 0,3464 \cdot 0,3963 / (0,9816 \cdot 0,25) = (-0,1287)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{\text{мк}} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = 4 \cdot 4,923 \cdot 10^4 / (3,142 \cdot 2200^2 \cdot (22 - 3)) = 0,6816 \text{ МПа}$$

$$\vartheta_{21} = - \frac{\bar{\sigma}_{\text{мк}}}{K_2 \cdot [\sigma]} = -0,6816 / (1,05 \cdot 272,7) = (-0,002380)$$

$$\vartheta_{22} = \left(\frac{p \cdot D}{4 \cdot (s - c)} - \bar{\sigma}_{\text{мк}} \right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = [3,423 \cdot 2200 / (4 \cdot (22 - 3)) - 0,6816] / (1 \cdot 272,7) = 0,3608$$

Примечание: при $\vartheta_{2i} < 0$ в расчёте K_1 знаки ϑ_1 и ϑ_2 меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right)^2 + \left(1 - \vartheta_2^2 \right) \cdot \vartheta_1}} = 1,447 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{22} \end{array} \right|$$

$= 1,455$

$$K_1 = \min \{ 1,447, 1,455 \} = 1,447$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1,447 \cdot 1,05 \cdot 272,7 = 414,3 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0.7 \cdot [\sigma]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} \cdot (s - c)}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0.7 \cdot 414,3 \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} \cdot (22 - 3) / (0,25 \cdot 0,9816) = 4,591 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-1,335} \cdot \cos(1,335)) / 1,335 = 0,7029$$

$$K_{14} = \frac{1.45 - 0.43 \cdot \delta_1}{\sin(0.5 \cdot \delta_1)} = (1.45 - 0.43 \cdot 2.094) / \sin(0.5 \cdot 2.094) = 0,6344$$

$$K_{16} = 1 - \frac{0.65}{1 + (6 \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0.65 / (1 + (6 \cdot 0,09683)^2) \cdot [3,142 / (3 \cdot 2,094)]^{1/2} = 0,6564$$

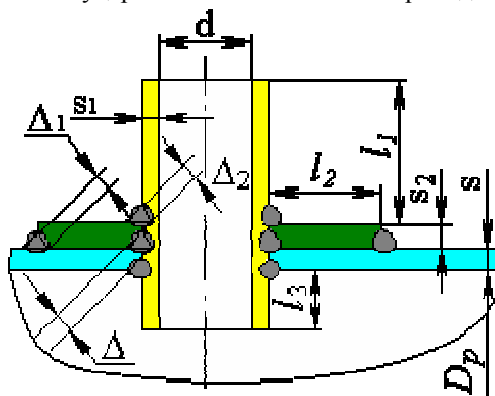
$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0.6 \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{s - c}} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1} = 1 / [1 + 0.6 \cdot (2200 / (22 - 3))^{1/3} \cdot 300 / 2200 \cdot 2,094] = 0,5449$$

Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-802.00.00.000 PP

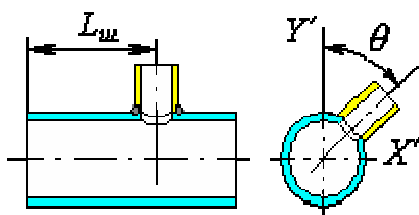
Штуцер П DN600

Исходные данные

Элемент: Штуцер П DN600
Условное обозначение (метка) Штуцер П
Элемент, несущий штуцер: Обечайка цилиндрическая
Тип элемента, несущего штуцер: Обечайка цилиндрическая
Тип штуцера: Проходящий с накладным кольцом



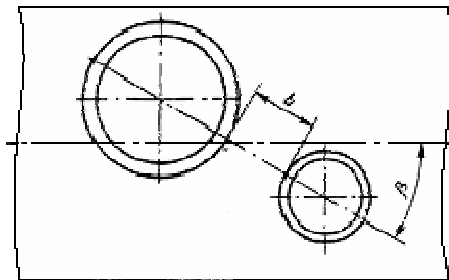
Материал несущего элемента: 09Г2С
Толщина стенки несущего элемента, s : 22 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, c : 3 мм
Материал штуцера: 09Г2С
Внутренний диаметр штуцера, d : 600 мм
Толщина стенки штуцера, s_1 : 22 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c_s : 3 мм
Длина штуцера, l_1 : 139 мм



Смещение штуцера, $L_{ш}$: 1650 мм
Угол поворота штуцера, ϑ : 270 °
Длина внутр. части штуцера, l_3 : 0 мм
Прибавка на коррозию, c_{s1} : 0 мм
Материал кольца: 09Г2С
Ширина кольца, l_2 : 200 мм

Изнв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изнв. № дубл.	Подпись и дата
19810.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-802.00.00.000 PP				Лист
				44

Толщина кольца, s_2 : 14 мм
 Расчётные параметры размещения штуцера:
 Ближайший штуцер



Название штуцера: Штуцер М, Т DN20

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b : 1504 мм

Угол β : 116,1 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$\phi_1 = 1$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$\phi = 1$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 2200$ мм

Расчёт в рабочих условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T : 210 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p : 2,302 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 210$ °C (рабочие условия):

$[\sigma] = 164$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 210 °C:

$E = 1,8 \cdot 10^5$ МПа

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 210$ °C (рабочие условия):

$[\sigma]_1 = 164$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 210 °C:

$E_1 = 1,8 \cdot 10^5$ МПа

Свойства материала кольца

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 210$ °C (рабочие условия):

$[\sigma]_2 = 164$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 210 °C:

$E_2 = 1,8 \cdot 10^5$ МПа

Расчётная толщина стенки штуцера:

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19810.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-802.00.00.000 PP				Лист
				45

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 2,302 \cdot (600 + 2 \cdot 3) / (2 \cdot 164 \cdot 1 - 2,302) = 4,283 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 164 \cdot 1 \cdot (22 - 3) / (600 + 22 + 3) = 9,971 \text{ МПа}$$

9,971 МПа \geq 2,302 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 2200 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 15,55 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия (ось штуцера совпадает с нормалью к поверхности в центре отверстия):

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 600 + 2 \cdot 3 = 606 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((22 - 3) / 15,55 - 0,8) \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 172,6 \text{ мм}$$

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 139; 1,25 \cdot ((600 + 2 \cdot 3) \cdot (22 - 3))^{1/2} \} = 134,1 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений:

- для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 164 / 164 \} = 1$$

Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (Днище эллиптическое (правое)):

$$L_k = 1388 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 204,5 \text{ мм}$$

Расчётная ширина кольца:

$$l_{2p} = \min \{ l_2; \sqrt{D_p \cdot (s_2 + s - c)} \} = \min \{ 200; (2200 \cdot (14 + 22 - 3))^{1/2} \} = 200 \text{ мм}$$

- для накладного кольца:

$$\chi_2 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 164 / 164 \} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((600 + 2 \cdot 3) \cdot (22 - 3 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 204,5 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 81,78 \text{ мм}$$

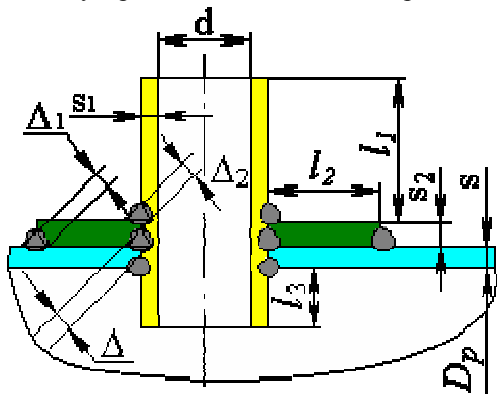
$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0,5 \cdot \frac{d_p - d_{0p}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}}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

Инв. № подл.	19810.4	Подпись и дата			
		Инв. № дубл.			
		Взам. инв. №			
		Подпись и дата			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<div>E-802.00.00.000 PP</div> <div>Лист</div> <div>46</div>

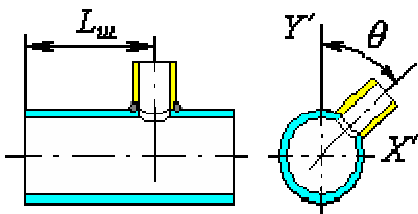
Штуцер А1-А2, Б1-Б2 DN200

Исходные данные

Элемент: Штуцер А1-А2, Б1-Б2 DN200
Условное обозначение (метка) Штуцер А1
Элемент, несущий штуцер: Обечайка цилиндрическая
Тип элемента, несущего штуцер: Обечайка цилиндрическая
Тип штуцера: Проходящий с накладным кольцом



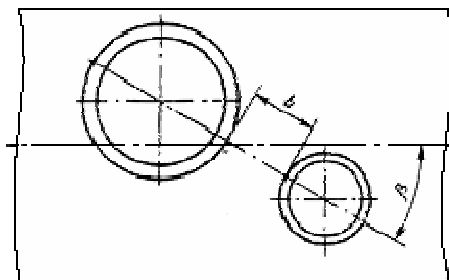
Материал несущего элемента: 09Г2С
Толщина стенки несущего элемента, s: 22 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, с: 3 мм
Материал штуцера: 09Г2С (КП245)
Внутренний диаметр штуцера, d: 202 мм
Толщина стенки штуцера, s₁: 14 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), с_s: 3 мм
Длина штуцера, l₁: 121 мм



Смещение штуцера, L_ш: 4650 мм
Угол поворота штуцера, ϑ: 157,5 °
Длина внутр. части штуцера, l₃: 0 мм
Прибавка на коррозию, с_{s1}: 0 мм
Материал кольца: 09Г2С
Ширина кольца, l₂: 150 мм

Изнв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изнв. № дубл.	Подпись и дата					
19810.4									
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-802.00.00.000 PP				
									Лист
									48

Толщина кольца, s_2 : 14 мм
 Расчётные параметры размещения штуцера:
 Ближайший штуцер



Название штуцера: Штуцер Ш DN32

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b : 454,5 мм

Угол β : 133 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$\phi_1 = 1$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$\phi = 1$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 2200$ мм

Расчёт в рабочих условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T : 210 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, p : 2,31 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 210$ °С (рабочие условия):

$[\sigma] = 164$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 210 °С:

$E = 1,8 \cdot 10^5$ МПа

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре $T = 210$ °С (рабочие условия):

$[\sigma]_1 = \eta \cdot \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B; R_{m/10n/t} / n_D; R_{p1,0/10n/t} / n_n) = 1 \cdot \min(193,4 / 1,5; 440 / 2,4; - / -; - / -) = 128,9$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 210 °С:

$E_1 = 1,8 \cdot 10^5$ МПа

Свойства материала кольца

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 210$ °С (рабочие условия):

$[\sigma]_2 = 164$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 210 °С:

$E_2 = 1,8 \cdot 10^5$ МПа

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19810.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-802.00.00.000 PP				Лист
				49

$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_p \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_p}{l_p}} \right\}$$

$$= \min \{ 1; [1 + (59,79 \cdot (14 - 3) \cdot 0,786 + 150 \cdot 14 \cdot 1 + 0 \cdot (14 - 3 - 0) \cdot 0,786) / (204,5 \cdot (22 - 3))] / [1 + 0.5 \cdot (208 - 81,78) / 204,5 + 1 \cdot (202 + 2 \cdot 3) / 2200 \cdot 1 / 1 \cdot 59,79 / 204,5] = 1,252 \}$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 3) \cdot 1 \cdot 164 \cdot 1 / [2200 + (22 - 3) \cdot 1] = 2,808 \text{ МПа}$$

Условие взаимного влияния штуцеров

Если расстояние между наружными поверхностями ближайших штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} + (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 408,9 \text{ мм}$$

Условие выполнено - Отверстие считается одиночным

Допускаемое давление $[p] = 2,808 \text{ МПа}$

$$2,808 \text{ МПа} \geq 2,31 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0.5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0.5 \cdot (208 - 81,78) \cdot 15,61 = 0,9849 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

$$A_a = l_p \cdot (s_1 - s_{1p} - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + l_p \cdot (s - s_p - c)$$

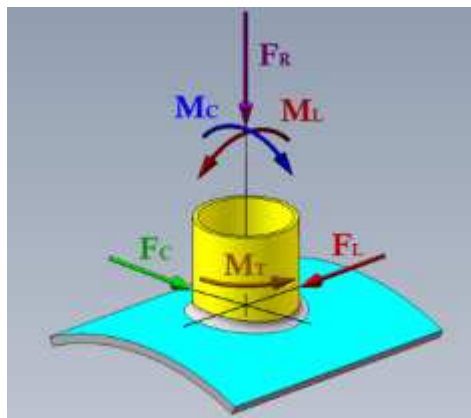
$$= 59,79 \cdot (14 - 1,881 - 3) \cdot 0,786 + 150 \cdot 14 \cdot 1 + 0 \cdot (14 - 3 - 0) \cdot 0,786 + 204,5 \cdot (22 - 15,61 - 3)$$

$$= 0,003222 \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,9849 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \leq 0,003222 \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Расчёт на прочность от воздействия внешних нагрузок по ГОСТ Р 52857.3-2007



Радиальная нагрузка, F_R : (-7900) Н

Окружной момент, M_C : 5000 Н м

Продольный момент, M_L : 5000 Н м

Крутящий момент, M_T : 7100 Н м

Сдвиговая нагрузка, F_C : 5600 Н

Сдвиговая нагрузка, F_L : 5600 Н

Средний диаметр обечайки у отверстия:

Изн. № подл.	19810.4	Подпись и дата	
Взам. инв. №		Изн. № дубл.	
Подпись и дата		Подпись и дата	
Изн. № подл.	19810.4	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
		Дата	
E-802.00.00.000 PP			
Лист			
51			

$$D_c = D_p + s + c + s_2 = 2200 + 22 + 3 + 14 = 2239 \text{ мм}$$

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D_c}{2} = 2239 / 2 = 1119 \text{ мм}$$

Эквивалентная толщина обечайки около штуцера при $l_2 < \sqrt{R_c \cdot (s + s_2)}$:

$$s_2 = s + \min \left\{ s_2 \cdot \frac{l_2}{\sqrt{D_c \cdot (s + s_2)}}; s_2 \right\} \cdot \chi_2 - c = 22 + \min \{ 14 \cdot 150 / (2239 \cdot (22 + 14))^{1/2}; 14 \} \cdot 1 - 3 = 26,4 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_s = 202 + 14 + 3 = 219 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_2}} = 219 / (2239 \cdot 26,4)^{1/2} = 0,9008$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 304,5 \text{ мм}$$

Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |2,31 / 2,808| = 0,8226$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

0,8226 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_x = -F_R = -(-7900) = 7900 \text{ Н}$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 0,9008 + 0,005196 \cdot 0,9008^2 + (-0,001406) \cdot 0,9008^3 + 0 \cdot 0,9008^4 = 1,461$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ($\lambda_c = 0,9008$):

$$[F_{x1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \max \{ C_1; 1,81 \} = 164 \cdot (22 + 1 \cdot 14 - 3)^2 \cdot \max \{ 1,461; 1,81 \} = 3,233 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Наружный диаметр накладного кольца:

$$D_2 = d + 2 \cdot s_1 + 2 \cdot l_2 = 202 + 2 \cdot 14 + 2 \cdot 150 = 530 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{D_2}{\sqrt{D_c \cdot (s - c)}} = 530 / (2239 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 2,57$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 2,57 + 0,005196 \cdot 2,57^2 + (-0,001406) \cdot 2,57^3 + 0 \cdot 2,57^4 = 3,057$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_c = 2,57$):

$$[F_{x2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max \{ C_1; 1,81 \} = 164 \cdot (22 - 3)^2 \cdot \max \{ 3,057; 1,81 \} = 1,81 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при наличии накладного кольца:

$$[F_x] = \min \{ [F_{x1}]; [F_{x2}] \} = \min \{ 3,233 \cdot 10^5; 1,81 \cdot 10^5 \} = 1,81 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_x = \left| \frac{F_x}{[F_x]} \right| = |7900 / 1,81 \cdot 10^5| = 0,04364$$

Условие прочности: $\Phi_x \leq 1$

0,04364 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_x = M_c = 5000 \text{ Н м}$$

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:

Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
<div>$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 2,57 + 0,005196 \cdot 2,57^2 + (-0,001406) \cdot 2,57^3 + 0 \cdot 2,57^4 = 3,057$</div> <div>Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой($\lambda_c = 0,9008$):</div> <div>$[F_{x1}] = [\sigma] \cdot (s - \lambda_c \cdot s_2 - c)^2 \cdot \max \{C_1; 1.81\} = 164 \cdot (22 + 1 \cdot 14 - 3)^2 \cdot \max\{1,461; 1.81\} = 3,233 \cdot 10^5 \text{ Н}$</div> <div>Наружный диаметр накладного кольца:</div> <div>$D_2 = d + 2 \cdot s_1 + 2 \cdot l_2 = 202 + 2 \cdot 14 + 2 \cdot 150 = 530 \text{ мм}$</div> <div>$\lambda_c = \frac{D_2}{\sqrt{D_c \cdot (s - c)}} = 530 / (2239 \cdot (22 - 3)^{1/2}) = 2,57$</div> <div>$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 2,57 + 0,005196 \cdot 2,57^2 + (-0,001406) \cdot 2,57^3 + 0 \cdot 2,57^4 = 3,057$</div> <div>Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_c = 2,57$):</div> <div>$[F_{x2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max \{C_1; 1.81\} = 164 \cdot (22 - 3)^2 \cdot \max\{3,057; 1.81\} = 1,81 \cdot 10^5 \text{ Н}$</div> <div>Допускаемое осевое усилие на штуцер при наличии накладного кольца:</div> <div>$[F_x] = \min \{[F_{x1}; F_{x2}]\} = \min\{3,233 \cdot 10^5; 1,81 \cdot 10^5\} = 1,81 \cdot 10^5 \text{ Н}$</div> <div>Прочность от действия осевой нагрузки:</div> <div>$\Phi_x = \left \frac{F_x}{[F_x]} \right = 7900 / 1,81 \cdot 10^5 = 0,04364$</div> <div>Условие прочности: $\Phi_x \leq 1$</div> <div>$0,04364 \leq 1.0$. Условие прочности выполнено</div> <div>Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:</div> <div>$M_x = M_c = 5000 \text{ Н м}$</div> <div>Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:</div>					
					Лист
					52
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

$$M_y = M_1 = 5000 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 0,9008 + 0,1589 \cdot 0,9008^2 + (-0,02142) \cdot 0,9008^3 + 0,001035 \cdot 0,9008^4 = 4,698$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ($\lambda_c = 0,9008$):

$$[M_{x1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4,9\} = 164 \cdot (22 + 1 \cdot 14 - 3)^2 \cdot 219 / 4 \cdot \max\{4,698; 4,9\} = 4,791 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 2,57 + 0,1589 \cdot 2,57^2 + (-0,02142) \cdot 2,57^3 + 0,001035 \cdot 2,57^4 = 5,422$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_c = 2,57$):

$$[M_{x2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{D_2}{4} \cdot \max\{C_2; 4,9\} = 164 \cdot (22 - 3)^2 \cdot 530 / 4 \cdot \max\{5,422; 4,9\} = 4,253 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при наличии накладного кольца:

$$[M_x] = \min\{[M_{x1}; M_{x2}\} = \min\{4,791 \cdot 10^4; 4,253 \cdot 10^4\} = 4,253 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)}} = 219 / (2239 \cdot (22 + 1 \cdot 14 - 3))^{1/2} = 0,8057$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 5,885$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ($\lambda_c = 0,8057$):

$$[M_{y1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4,9\} = 164 \cdot (22 + 1 \cdot 14 - 3)^2 \cdot 219 / 4 \cdot \max\{5,885; 4,9\} = 5,754 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 14,83$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_c = 2,57$):

$$[M_{y2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{D_2}{4} \cdot \max\{C_3; 4,9\} = 164 \cdot (22 - 3)^2 \cdot 530 / 4 \cdot \max\{14,83; 4,9\} = 1,163 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при наличии накладного кольца:

$$[M_y] = \min\{[M_{y1}; M_{y2}\} = \min\{5,754 \cdot 10^4; 1,163 \cdot 10^5\} = 5,754 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((5000 / 4,253 \cdot 10^4)^2 + (5000 / 5,754 \cdot 10^4)^2)^{1/2} = 0,1462$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

0,1462 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_x\right|; \left|\Phi_x\right|; \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0,2 \cdot \Phi_x\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} = (\{ \max(|0,8226 / 1 + 0,04364|; |0,04364|; |0,8226 / 1 - 0,2 \cdot 0,04364|)^2 + 0,1462^2 \}^{1/2} = 0,8785$$

Если $F_z < 0$, то знак Φ_z меняется на противоположный.

$$\text{Условие прочности: } \sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_x\right|; \left|\Phi_x\right|; \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0,2 \cdot \Phi_x\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} \leq 1$$

0,8785 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = 2,31 \cdot (202 + 14) / (4 \cdot (14 - 3)) + 4 \cdot (5000^2 + 5000^2)^{1/2} / (3,142 \cdot (202 + 14)^2 \cdot (14 - 3)) + 7900 / (3,142 \cdot (202 + 14) \cdot (14 - 3)) = 29,94 \text{ МПа}$$

Если F_z создает сжимающее напряжение, ее следует принять равной нулю.

Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата									
		Взам. инв. №									
		Инов. № дубл.									
		Подпись и дата									
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата	E-802.00.00.000 PP					Лист
											53

$[M_{y2}] = [\sigma] \cdot (s - c) \cdot \frac{s}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 164 \cdot (22 - 3)^2 \cdot 530 / 4 \cdot \max\{14,83; 4.9\} = 1,163 \cdot 10^5 \text{ Н м}$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при наличии накладного кольца:

$[M_y] = \min\{[M_{y1}; M_{y2}]\} = \min\{5,754 \cdot 10^4; 1,163 \cdot 10^5\} = 5,754 \cdot 10^4 \text{ Н м}$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((5000 / 4,253 \cdot 10^4)^2 + (5000 / 5,754 \cdot 10^4)^2)^{1/2} = 0,1462$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

$0,1462 \leq 1.0$. Условие прочности выполнено

Прочность от совместного действия нагрузок:

$\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_x\right|; \left|\Phi_x\right|; \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_x\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} = (\left[\max(|0,8226 / 1 + 0,04364|; |0,04364|; |0,8226 / 1 - 0.2 \cdot 0,04364|)\right]^2 + 0,1462^2)^{1/2} = 0,8785$

Если $F_z < 0$, то знак Φ_z меняется на противоположный.

Условие прочности: $\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_x\right|; \left|\Phi_x\right|; \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_x\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} \leq 1$

$0,8785 \leq 1.0$. Условие прочности выполнено

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_x}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = \frac{2,31 \cdot (202 + 14) / (4 \cdot (14 - 3)) + 4 \cdot (5000^2 + 5000^2)^{1/2} / (3,142 \cdot (202 + 14)^2 \cdot (14 - 3)) + 7900 / (3,142 \cdot (202 + 14) \cdot (14 - 3))}{29,94 \text{ МПа}}$

Если F_z создает сжимающее напряжение, ее следует принять равной нулю.

Условие прочности: $\sigma_1 \leq [\sigma]_1$

29,94 МПа ≤ 128,9 МПа. **Условие прочности выполнено**

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0 / 12,95 + (5000^2 + 5000^2)^{1/2} / 4,791 \cdot 10^4 + |0| / 9,488 \cdot 10^5 = 0,1476$$

Если F_z растягивающая продольная сила, а р – внутреннее избыточное давление, то F_z и р следует принять равными нулю.

Условие устойчивости штуцера: $\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} \leq 1.0$

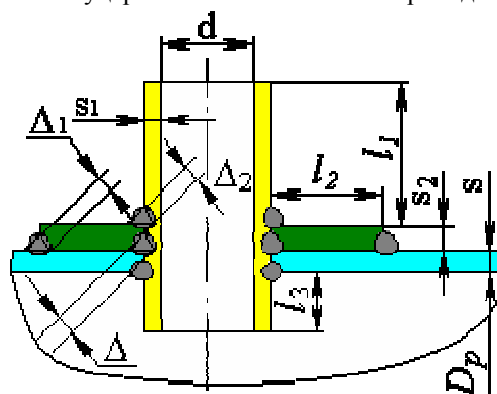
0,1476 ≤ 1.0. **Условие устойчивости выполнено**

Инов. № подл.	Подпись и дата		Инов. № дубл.		Подпись и дата	
19810.4						
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-802.00.00.000 PP	
						Лист
						54

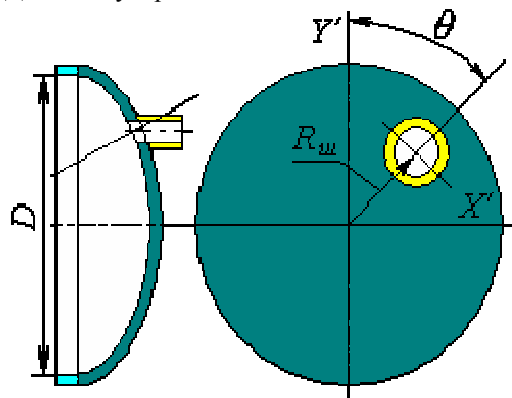
Штуцер В DN80

Исходные данные

Элемент: Штуцер В DN80
 Условное обозначение (метка) Штуцер В
 Элемент, несущий штуцер: Днище эллиптическое (правое)
 Тип элемента, несущего штуцер: Днище эллиптическое
 Тип штуцера: Проходящий с накладным кольцом



Материал несущего элемента: 09Г2С
 Толщина стенки несущего элемента, s : 25 мм
 Сумма прибавок к стенке несущего элемента, c : 7,55 мм
 Материал штуцера: 09Г2С (КП245)
 Внутренний диаметр штуцера, d : 78 мм
 Толщина стенки штуцера, s_1 : 11 мм
 Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c_{s1} : 3 мм
 Длина штуцера, l_1 : 136 мм



Смещение штуцера, $R_{ш}$: 300 мм
 Угол поворота штуцера, ϑ : 15 °
 Полученный угол наклона штуцера, γ : (-8,049) °
 Длина внутр. части штуцера, l_3 : 0 мм
 Прибавка на коррозию, c_{s1} : 0 мм
 Материал кольца: 09Г2С

Изн. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
E-802.00.00.000 PP					Лист
					55

Ширина кольца, l_2 : 100 мм

Толщина кольца, s_2 : 14 мм

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$$\varphi_1 = 1$$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$$\varphi = 1$$

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища:

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{ш}^2} = 2200^2 / (2 \cdot 550) \cdot (1 - 4 \cdot (2200^2 - 4 \cdot 550^2) \cdot 300^2 / 2200^4)^{1/2} = 4276 \text{ мм}$$

Расчёт в рабочих условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T : 210 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p : 2,3 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 210$ °C (рабочие условия):

$$[\sigma] = 164 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 210 °C:

$$E = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре $T = 210$ °C (рабочие условия):

$$[\sigma]_1 = \eta \cdot \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B; R_{m/10n/t} / n_D; R_{p1,0/10n/t} / n_P) = 1 \cdot \min(193,4 / 1,5; 440 / 2,4; - / -; - / -) = 128,9 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 210 °C:

$$E_1 = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала кольца

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 210$ °C (рабочие условия):

$$[\sigma]_2 = 164 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 210 °C:

$$E_2 = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_{ш} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 2,3 \cdot (78 + 2 \cdot 3) / (2 \cdot 128,9 \cdot 1 - 2,3) = 0,7561 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 128,9 \cdot 1 \cdot (11 - 3) / (78 + 11 + 3) = 22,42 \text{ МПа}$$

$$22,42 \text{ МПа} \geq 2,3 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища:

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{ш}^2} = 2200^2 / (2 \cdot 550) \cdot (1 - 4 \cdot (2200^2 - 4 \cdot 550^2) \cdot 300^2 / 2200^4)^{1/2} = 4276 \text{ мм}$$

Подпись и дата

Инов. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инов. № подл.

19810.4

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

E-802.00.00.000 PP

Лист

56

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 15,04 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия (смещённый штуцер на эллиптическом днище):

$$d_p = \frac{d + 2 \cdot c_s}{\sqrt{1 - \left(\frac{2 \cdot R_{III}}{D_p} \right)^2}} = (78 + 2 \cdot 3) / [1 - (2 \cdot 300 / 4276)^2]^{1/2} = 84,84 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((25 - 7,55) / 15,04 - 0,8) \cdot (4276 \cdot (25 - 7,55))^{1/2} = 196,7 \text{ мм}$$

Т.к. $d_p < d_0$ - **Расчет укрепления одиночного отверстия от действия внутреннего избыточного давления проводить не требуется**

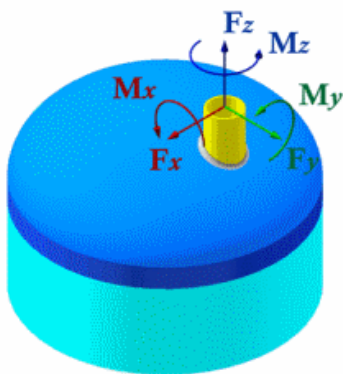
Расчет на прочность по МКЭ в рабочих условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, Т: 210 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 2,3 МПа

Нагрузки на штуцер (в системе координат аппарата):



F_x , Н	F_y , Н	F_z , Н	M_x , Н м	M_y , Н м	M_z , Н м
2000	2000	2900	700	700	1000

Допускаемые напряжения в соответствии с ГОСТ Р 52857.1-2007

Уровень разбивки - 2

Коэффициент запаса, учитывающий уровень разбивки: $K_m = 1,2$

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Номинальные допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре 210 °С:

$$[s] = \frac{[\sigma]_s}{K_m} = 164 / 1,2 = 136,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 210 °С:

$$E = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Подпись и дата

Инов. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инов. № подл.

19810.4

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

E-802.00.00.000 PP

Лист

57

Свойства материала штуцера

Номинальные допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре 210 °С:

$$[s]_1 = \frac{1}{K_m} \cdot \min \left\{ \frac{R_t}{1.5}; \frac{R_m}{2.4} \right\} = 1 / 1,2 * \min\{193,4 / 1.5; 440 / 2.4\} = 107,4 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 210 °С:

$$E_1 = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала кольца

Номинальные допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре 210 °С:

$$[s]_2 = \frac{[\sigma]_s}{K_m} = 164 / 1,2 = 136,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 210 °С:

$$E_2 = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

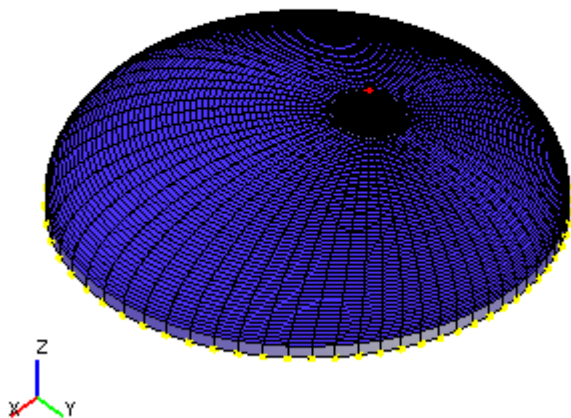


Рис. 1. Конечно-элементная модель узла врезки

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19810.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
E-802.00.00.000 PP			
Лист			
58			

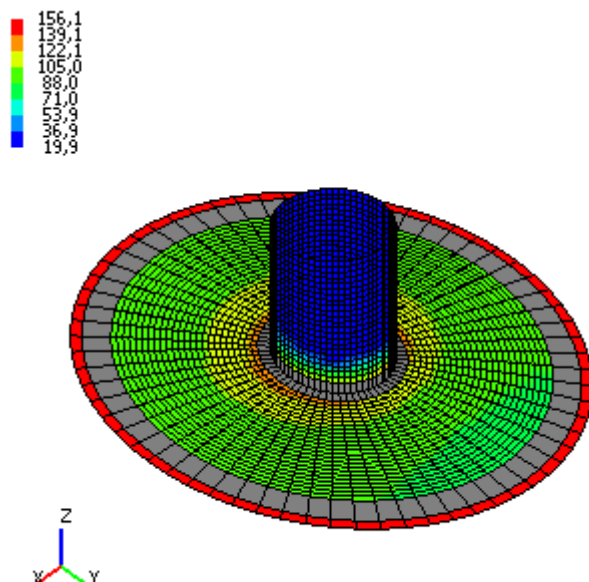


Рис. 2. Эквивалентные мембранные напряжения от совместного действия сил и давления, МПа.
Заключение:

Для несущего элемента $\sigma_{\text{нмж}} = 167,2 \text{ МПа} \leq 1,5[s] = 205,5 \text{ МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Для штуцера $\sigma_{\text{шт}} = 130,9 \text{ МПа} \leq 1,5[s]_1 = 161,1 \text{ МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

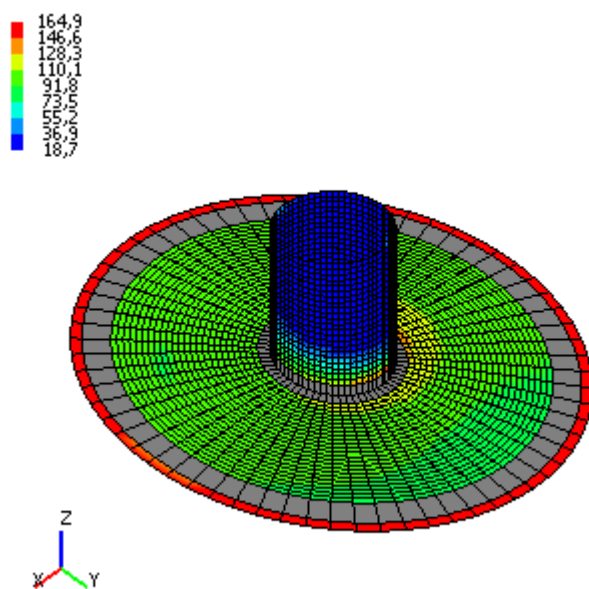


Рис. 3. Общие (мембранные и изгибные) напряжения на внешней поверхности, МПа.

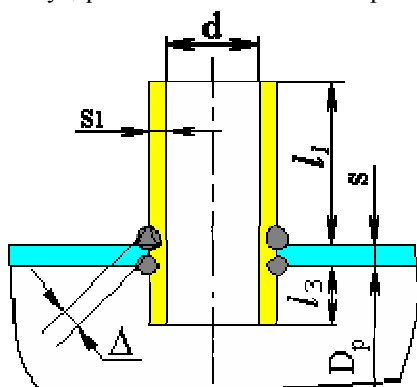
Заключение:

Для несущего элемента $\sigma_{mb \max} = 162,4 \text{ МПа} \leq 3[s] = 411 \text{ МПа}$.

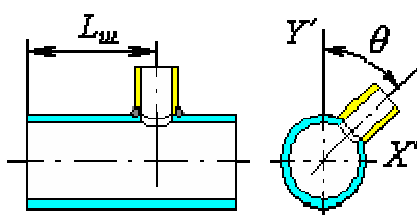
Штуцер Г DN80

Исходные данные

Элемент: Штуцер Г DN80
 Условное обозначение (метка) Штуцер Г
 Элемент, несущий штуцер: Обечайка цилиндрическая
 Тип элемента, несущего штуцер: Обечайка цилиндрическая
 Тип штуцера: Проходящий без укрепления

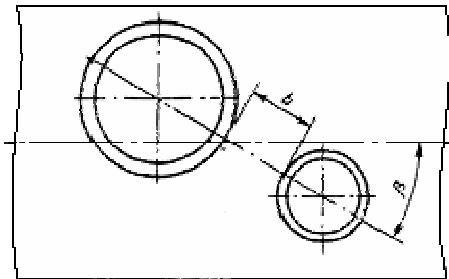


Материал несущего элемента: 09Г2С
 Толщина стенки несущего элемента, s : 22 мм
 Сумма прибавок к стенке несущего элемента, c : 3 мм
 Материал штуцера: 09Г2С (КП245)
 Внутренний диаметр штуцера, d : 78 мм
 Толщина стенки штуцера, s_1 : 10 мм
 Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c_s : 3 мм
 Длина штуцера, l_1 : 150 мм



Смещение штуцера, $L_{ш}$: 3250 мм
 Угол поворота штуцера, ϑ : 180 °
 Длина внутр. части штуцера, l_3 : 0 мм
 Прибавка на коррозию, c_{s1} : 0 мм
 Расчётные параметры размещения штуцера:
 Ближайший штуцер

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19810.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-802.00.00.000 PP				Лист
				61



Название штуцера: -Штуцер А2 DN200

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 502,4 мм

Угол β : 139,3 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$\phi_1 = 1$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$\phi = 1$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 2200 \text{ мм}$

Расчёт в рабочих условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 210 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 2,311 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 210 °C (рабочие условия):

$[\sigma] = 164 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 210 °C:

$E = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 210 °C (рабочие условия):

$[\sigma]_1 = \eta \cdot \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B; R_{m/10n/t} / n_D; R_{p1,0/10n/t} / n_P) = 1 \cdot \min\{193,4 / 1,5; 440 / 2,4; - / -; - / -\} = 128,9 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 210 °C:

$E_1 = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \phi_1 - p} = 2,311 \cdot (78 + 2 \cdot 3) / (2 \cdot 128,9 \cdot 1 - 2,311) = 0,7598 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \phi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 128,9 \cdot 1 \cdot (10 - 3) / (78 + 10 + 3) = 19,83 \text{ МПа}$$

19,83 МПа \geq 2,311 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19810.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-802.00.00.000 PP				Лист
				62

$$R_c = \frac{D_c}{2} = 2225 / 2 = 1112 \text{ мм}$$

Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \frac{p}{[p]} = |2,311 / 2,808| = 0,8229$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

0,8229 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_z = -F_R = -(-2900) = 2900 \text{ Н}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s - c)}} = 91 / (2225 \cdot (22 - 3)^{1/2}) = 0,4426$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 0,4426 + 0,005196 \cdot 0,4426^2 + (-0,001406) \cdot 0,4426^3 + 0 \cdot 0,4426^4 = 1,023$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4426$):

$$[F_z] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1,81\} = 164 \cdot (22 - 3)^2 \cdot \max\{1,023; 1,81\} = 1,072 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \frac{F_z}{[F_z]} = |2900 / 1,072 \cdot 10^5| = 0,02706$$

Условие прочности: $\Phi_z \leq 1$

0,02706 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_x = M_c = 700 \text{ Н м}$$

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_y = M_L = 700 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 0,4426 + 0,1589 \cdot 0,4426^2 + (-0,02142) \cdot 0,4426^3 + 0,001035 \cdot 0,4426^4 = 4,584$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4426$):

$$[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4,9\} = 164 \cdot (22 - 3)^2 \cdot 91 / 4 \cdot \max\{4,584; 4,9\} = 6600 \text{ Н м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 5,511$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4426$):

$$[M_y] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4,9\} = 164 \cdot (22 - 3)^2 \cdot 91 / 4 \cdot \max\{5,511; 4,9\} = 7423 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((700 / 6600)^2 + (700 / 7423)^2)^{1/2} = 0,1419$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

0,1419 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max\left(\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z; \Phi_z; \frac{\Phi_p}{C_4} - 0,2 \cdot \Phi_z\right)\right]^2 + \Phi_b^2} = (\max(|0,8229 / 1 + 0,02706|; |0,02706|; |0,8229 / 1 - 0,2 \cdot 0,02706|)^2 + 0,1419^2)^{1/2} = 0,8618$$

Изн. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:	
						$M_y = M_L$	$= 700 \text{ Н м}$
						$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 0,4426 + 0,1589 \cdot 0,4426^2 + (-0,02142) \cdot 0,4426^3 + 0,001035 \cdot 0,4426^4 = 4,584$	
						Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4426$):	
$[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 164 \cdot (22 - 3)^2 \cdot 91 / 4 \cdot \max\{4,584; 4.9\} = 6600 \text{ Н м}$							
$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 5,511$							
Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4426$):							
$[M_y] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 164 \cdot (22 - 3)^2 \cdot 91 / 4 \cdot \max\{5,511; 4.9\} = 7423 \text{ Н м}$							
Прочность от действия изгибающих моментов:							
$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((700 / 6600)^2 + (700 / 7423)^2)^{1/2} = 0,1419$							
Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$							
0,1419 \leq 1.0. Условие прочности выполнено							
Прочность от совместного действия нагрузок:							
$\sqrt{\left[\max\left(\left \frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right ; \left \Phi_z\right \right) \cdot \left \frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z\right \right]^2 + \Phi_b^2} = ([\max(0,8229 / 1 + 0,02706 ; 0,02706 ; 0,8229 / 1 - 0.2 \cdot 0,02706)]^2 + 0,1419^2)^{1/2} = 0,8618$							
Изн. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	E-802.00.00.000 PP	Лист
							64
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			

$$\text{Условие прочности: } \sqrt{\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_x\right|, \left|\Phi_x\right|, \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_x\right|\right)^2} + \Phi_b^2 \leq 1$$

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = 2,311 \cdot (78 + 10) / (4 \cdot (10 - 3)) + 4 \cdot (700^2 + 700^2)^{1/2} / (3,142 \cdot (78 + 10)^2 \cdot (10 - 3)) + 2900 / (3,142 \cdot (78 + 10) \cdot (10 - 3)) = 32,01 \text{ МПа}$$

Условие прочности: $\sigma_1 \leq [\sigma]_1$

$$\frac{|p|}{|p|} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{|M|} + \frac{|F_z|}{|F|} = 0,19,83 + (700^2 + 700^2)^{1/2} / 4699 + |0| / 2,41 \cdot 10^5 = 0,2107$$

Условие устойчивости штуцера: $\frac{|P|}{|P|} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{|M|} + \frac{|F_z|}{|F|} \leq 1.0$

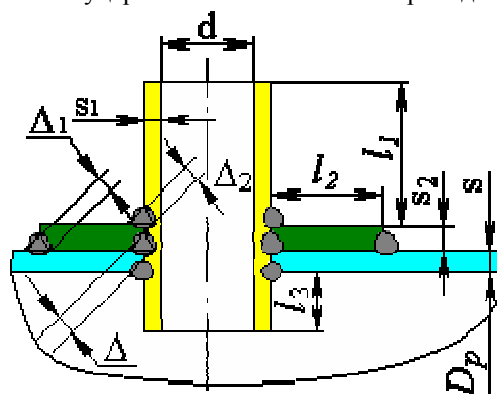
$0,2107 \leq 1.0$. Условие устойчивости выполнено

Ивв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
19810.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-802.00.00.000 PP				Лист
				65

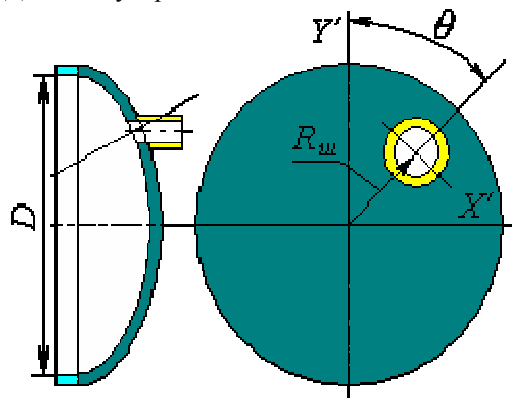
Штуцер Е DN80

Исходные данные

Элемент: Штуцер Е DN80
 Условное обозначение (метка) Штуцер Е
 Элемент, несущий штуцер: Днище эллиптическое (левое)
 Тип элемента, несущего штуцер: Днище эллиптическое
 Тип штуцера: Проходящий с накладным кольцом



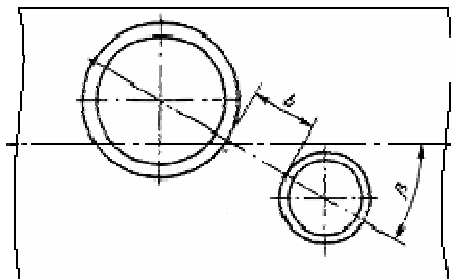
Материал несущего элемента: 09Г2С
 Толщина стенки несущего элемента, s : 25 мм
 Сумма прибавок к стенке несущего элемента, c : 7,55 мм
 Материал штуцера: 09Г2С (КП245)
 Внутренний диаметр штуцера, d : 78 мм
 Толщина стенки штуцера, s_1 : 11 мм
 Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c_s : 3 мм
 Длина штуцера, l_1 : 150 мм



Смещение штуцера, $R_{ш}$: 300 мм
 Угол поворота штуцера, ϑ : 90 °
 Полученный угол наклона штуцера, γ : (-8,049) °
 Длина внутр. части штуцера, l_3 : 0 мм
 Прибавка на коррозию, c_{s1} : 0 мм
 Материал кольца: 09Г2С

Изн. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
E-802.00.00.000 PP					Лист 66

Ширина кольца, l_2 : 100 мм
 Толщина кольца, s_2 : 14 мм
 Расчётные параметры размещения штуцера:
 Ближайший штуцер



Название штуцера: Штуцер Ж DN50

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b : 392,6 мм

Угол β : 90 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$\phi_1 = 1$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$\phi = 1$

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища:

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{ш}^2} = 2200^2 / (2 \cdot 550) \cdot (1 - 4 \cdot (2200^2 - 4 \cdot 550^2) \cdot 300^2 / 2200^4)^{1/2} = 4276 \text{ мм}$$

Расчёт в рабочих условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T : 210 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p : 2,3 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 210$ °C (рабочие условия):

$[\sigma] = 164$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 210 °C:

$E = 1,8 \cdot 10^5$ МПа

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре $T = 210$ °C (рабочие условия):

$[\sigma]_1 = \eta \cdot \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B; R_{m/10n/t} / n_d; R_{p1,0/10n/t} / n_n) = 1 \cdot \min\{193,4 / 1,5; 440 / 2,4; - / -; - / -\} = 128,9$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 210 °C:

$E_1 = 1,8 \cdot 10^5$ МПа

Свойства материала кольца

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 210$ °C (рабочие условия):

$[\sigma]_2 = 164$ МПа

Подпись и дата

Инов. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инов. № подл.

19810.4

Лист

E-802.00.00.000 PP

67

Изм. Лист № докум. Подп. Дата

Инва. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
19810.4				
<p>Подпись не требуется</p> <p>Расчётная длина внешней части штуцера:</p> $l_{1p} = \min\{l_1; 1.25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)}\} = \min\{150; 1.25 \cdot ((78 + 2 \cdot 3) \cdot (11 - 3))^{1/2}\} = 32,4 \text{ мм}$ <p>Отношения допускаемых напряжений:</p> <p>- для внешней части штуцера:</p> $\chi_1 = \min\left\{1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]}\right\} = \min\{1,0, 128,9 / 164\} = 0,786$ <p>Ширина зоны укрепления:</p> $L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (4276 \cdot (25 - 7,55))^{1/2} = 273,1 \text{ мм}$ <p>Расчётная ширина кольца:</p> $l_{2p} = \min\left\{l_2; \sqrt{D_p \cdot (s_2 + s - c)}\right\} = \min\{100; (4276 \cdot (14 + 25 - 7,55))^{1/2}\} = 100 \text{ мм}$ <p>- для накладного кольца:</p> $\chi_2 = \min\left\{1,0; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]}\right\} = \min\{1,0, 164 / 164\} = 1$ <p>Расчётная длина внутренней части штуцера:</p> $l_{3p} = \min\{l_3; 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})}\} = \min\{0; 0.5 \cdot ((78 + 2 \cdot 3) \cdot (11 - 3 - 0))^{1/2}\} = 0 \text{ мм}$ <p>Расчётная ширина зоны укрепления:</p> $l_p = L_0 = 273,1 \text{ мм}$ <p>Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:</p>				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-802.00.00.000 PP				Лист
				68

$$d_{0p} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (4276 \cdot (25 - 7,55))^{1/2} = 109,3 \text{ мм}$$

$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_p \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{0p}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_p}{l_p}} \right\}$$

$$= \min \{ 1; [1 + (32,4 \cdot (11 - 3) \cdot 0,786 + 100 \cdot 14 \cdot 1 + 0 \cdot (11 - 3 - 0) \cdot 0,786) / (273,1 \cdot (25 - 7,55))] / [1 + 0.5 \cdot (84,84 - 109,3) / 273,1 + 2 \cdot (78 + 2 \cdot 3) / 4276 \cdot 1 / 1 \cdot 32,4 / 273,1] = 1,392 \}$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 2 \cdot (25 - 7,55) \cdot 1 \cdot 164 \cdot 1 / [4276 + (25 - 7,55) \cdot 1] = 2,667 \text{ МПа}$$

Условие взаимного влияния штуцеров

Если расстояние между наружными поверхностями ближайших штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (4276 \cdot (25 - 7,55))^{1/2} + (4276 \cdot (25 - 7,55))^{1/2} = 546,3 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, требуется расчёт укреплений с учетом взаимного влияния отверстий.

$$K_3 = 1$$

$$V_1 = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_p \cdot (s_1' - c_s') \cdot \chi_1' + l_{2p} \cdot s_2' \cdot \chi_2' + l_{3p} \cdot (s_3' - c_s' - c_{s1}') \cdot \chi_3' + l_{1p}' \cdot (s_1'' - c_s'') \cdot \chi_1'' + l_{2p}' \cdot s_2'' \cdot \chi_2'' + l_{3p}' \cdot (s_3'' - c_s'' - c_{s1}'') \cdot \chi_3''}{b \cdot (s - c)}}{K_3 \left(C_8 + \frac{d_p' + d_p''}{2 \cdot b} \right) - K_1 \left(\frac{d' + 2 \cdot c_s'}{D_p'} \cdot \frac{\varphi'}{\varphi_1'} \cdot \frac{l_p'}{b} + \frac{d'' + 2 \cdot c_s''}{D_p''} \cdot \frac{\varphi''}{\varphi_1''} \cdot \frac{l_p''}{b} \right)} \right\}$$

$$= \min \{ 1; (1 + [(32,4 \cdot (11 - 3) \cdot 0,786 + 100 \cdot 14 \cdot 1 + 0 \cdot (11 - 3 - 0) \cdot 0,786 + 22,53 \cdot (10 - 4,25) \cdot 0,8963 + 80 \cdot 14 \cdot 1 + 0 \cdot (10 - 4,25 - 0) \cdot 0,8963) / (392,6 \cdot (25 - 7,55))]) / (1 \cdot (0.8 + (84,84 + 57,06) / (2 \cdot 392,6) + 2 \cdot [(78 + 2 \cdot 3) / 4276 \cdot 1 / 1 \cdot 32,4 / 392,6 + [(48 + 2 \cdot 4,25) / 4276 \cdot 1 / 1 \cdot 22,53 / 392,6]])) = 1,435 \}$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{0.5 \cdot (D_p' + D_p'') + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2 \cdot 2 \cdot (25 - 7,55) \cdot 1 \cdot 164 / [0.5 \cdot (4276 + 4276) + (25 - 7,55) \cdot 1] \cdot 1 = 2,667 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление $[p] = \min \{ 2,667; 2,667 \}$ МПа

2,667 МПа $\geq 2,3$ МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0.5 \cdot (d_p - d_{0p}) \cdot s_p = 0.5 \cdot (84,84 - 109,3) \cdot 15,04 = (-0,1837 \cdot 10^{-3}) \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

$$A_a = l_p \cdot (s_1 - s_{1p} - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + l_p \cdot (s - s_p - c)$$

$$= 32,4 \cdot (11 - 0,7561 - 3) \cdot 0,786 + 100 \cdot 14 \cdot 1 + 0 \cdot (11 - 3 - 0) \cdot 0,786 + 273,1 \cdot (25 - 15,04 - 7,55)$$

$$= 0,002242 \text{ м}^2$$

$$A_r = (-0,1837 \cdot 10^{-3}) \text{ м}^2 \leq 0,002242 \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Расчет на прочность по МКЭ в рабочих условиях

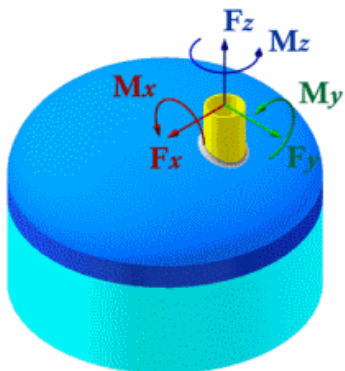
Изн. № подл.	19810.4	Подпись и дата		Изн. № дубл.		Подпись и дата	
Взам. инв. №				Изн. № инв.			
Изн. № подл.	19810.4	Подпись и дата		Изн. № дубл.		Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-802.00.00.000 PP		
					Лист		
					69		

Условия нагружения:

Расчётная температура, Т: 210 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 2,3 МПа

Нагрузки на штуцер (в системе координат аппарата):



F_x , Н	F_y , Н	F_z , Н	M_x , Н м	M_y , Н м	M_z , Н м
2000	2000	2900	700	700	1000

Допускаемые напряжения в соответствии с ГОСТ Р 52857.1-2007

Уровень разбивки - 2

Коэффициент запаса, учитывающий уровень разбивки: $K_m = 1,2$

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Номинальные допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре 210 °С:

$$[s] = \frac{[\sigma]_s}{K_m} = 164 / 1,2 = 136,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 210 °С:

$$E = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Номинальные допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре 210 °С:

$$[s]_1 = \frac{1}{K_m} \cdot \min \left\{ \frac{R_e}{1,5}; \frac{R_m}{2,4} \right\} = 1 / 1,2 * \min \{ 193,4 / 1,5; 440 / 2,4 \} = 107,4 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 210 °С:

$$E_1 = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала кольца

Номинальные допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре 210 °С:

$$[s]_2 = \frac{[\sigma]_s}{K_m} = 164 / 1,2 = 136,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 210 °С:

$$E_2 = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Подпись и дата

Инов. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инов. № подл.

19810.4

Лист

E-802.00.00.000 PP

70

Изм. Лист № докум. Подп. Дата

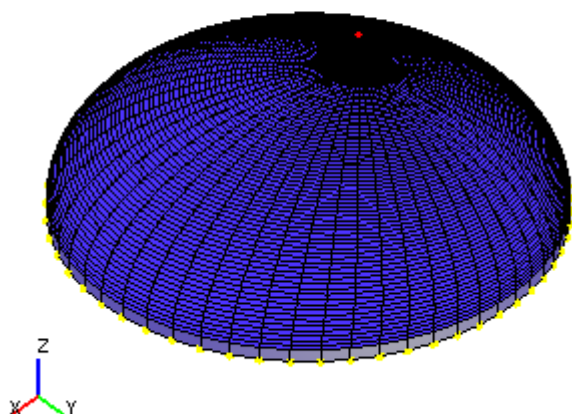


Рис. 1. Конечно-элементная модель узла врезки

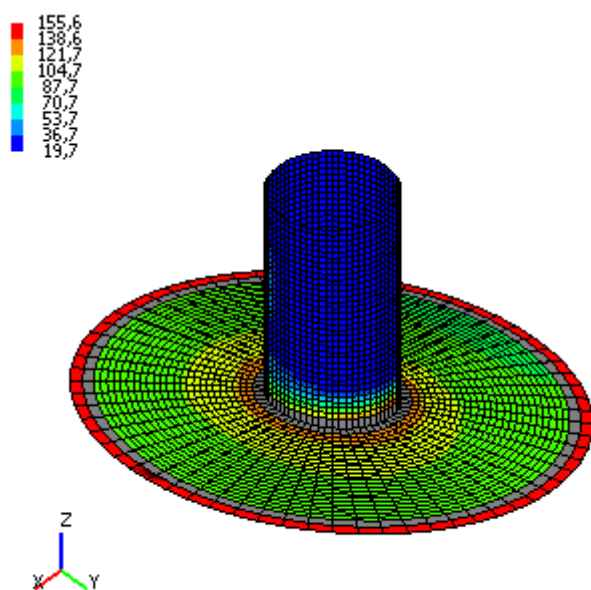


Рис. 2. Эквивалентные мембранные напряжения от совместного действия сил и давления, МПа.
Заключение:

Для несущего элемента $\sigma_{\text{max}} = 167,3 \text{ МПа} \leq 1,5[s] = 205,5 \text{ МПа}$.
Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Для штуцера $\sigma_{\text{max}} = 143,7 \text{ МПа} \leq 1,5[s]_1 = 161,1 \text{ МПа}$.
Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	E-802.00.00.000 PP					Лист
										71
19810.4					Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

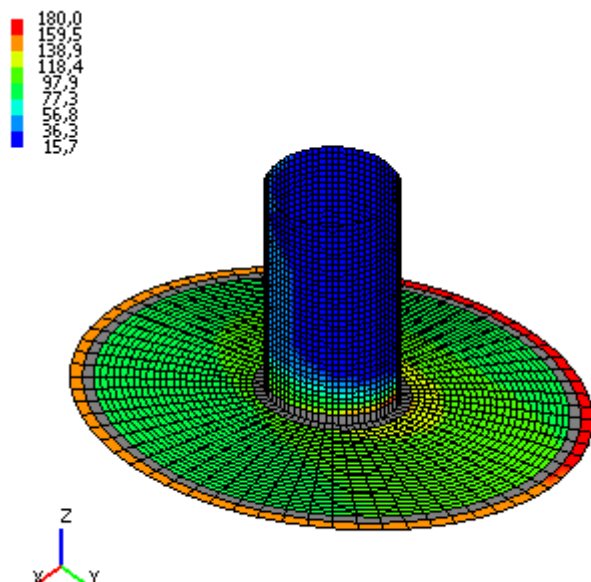


Рис. 3. Общие (мембранные и изгибные) напряжения на внешней поверхности, МПа.

Заключение:

Для несущего элемента $\sigma_{\text{mb max}} = 166,2 \text{ МПа} \leq 3[s] = 411 \text{ МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Для штуцера $\sigma_{\text{mb max}} = 180 \text{ МПа} \leq 3[s]_1 = 322,3 \text{ МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

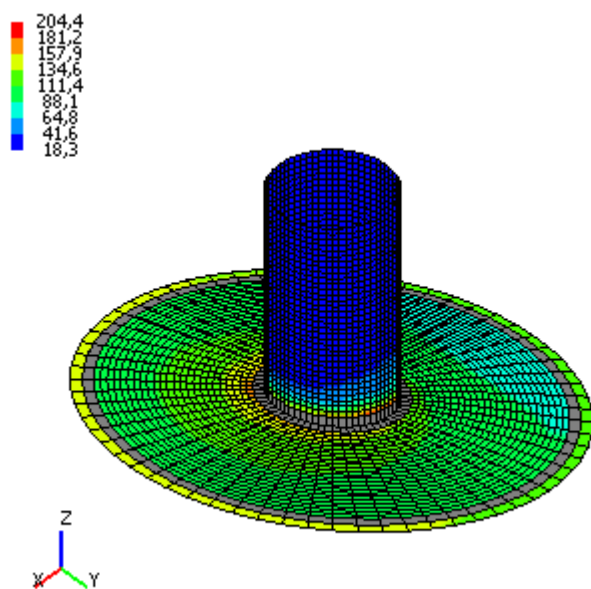


Рис. 4. Общие (мембранные и изгибные) напряжения на внутренней поверхности, МПа.

Заключение:

Для несущего элемента $\sigma_{\text{mb max}} = 219,9 \text{ МПа} \leq 3[s] = 411 \text{ МПа}$.

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	E-802.00.00.000 PP					Лист
										72
19810.4					Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Для штуцера $\sigma_{\text{max}} = 204,4 \text{ МПа} \leq 3[s]_I = 322,3 \text{ МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

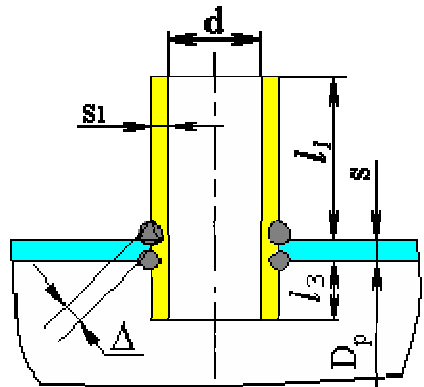
Общее заключение: **Условия прочности выполнены.**

Инв. № подл.	Подпись и дата				Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
19810.4							
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-802.00.00.000 PP		
					Лист		
					73		

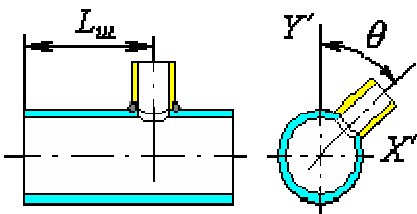
Штуцер P1-P5 DN80

Исходные данные

Элемент: Штуцер P1-P5 DN80
Условное обозначение (метка) Штуцер P1
Элемент, несущий штуцер: Обечайка цилиндрическая
Тип элемента, несущего штуцер: Обечайка цилиндрическая
Тип штуцера: Проходящий без укрепления

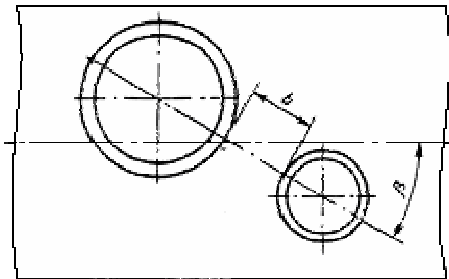


Материал несущего элемента: 09Г2С
Толщина стенки несущего элемента, s: 22 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, с: 3 мм
Материал штуцера: 09Г2С (КП245)
Внутренний диаметр штуцера, d: 78 мм
Толщина стенки штуцера, s₁: 11 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), с_s: 3 мм
Длина штуцера, l₁: 150 мм



Смещение штуцера, L_ш: 5400 мм
Угол поворота штуцера, θ: 0 °
Длина внутр. части штуцера, l₃: 0 мм
Прибавка на коррозию, с_{s1}: 0 мм
Расчётные параметры размещения штуцера:
Ближайший штуцер

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19810.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-802.00.00.000 PP				Лист
				74



Название штуцера: Штуцер К DN50

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 216 мм

Угол β : 0°

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$$\varphi_1 = 1$$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$$\varphi = 1$$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 2200 \text{ мм}$$

Расчёт в рабочих условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 210°C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 2,3 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 210°C (рабочие условия):

$$[\sigma] = 164 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 210°C :

$$E = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 210°C (рабочие условия):

$$[\sigma]_1 = \eta \cdot \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B; R_{m/10n/t} / n_D; R_{p1,0/10n/t} / n_P) = 1 \cdot \min\{193,4 / 1,5; 440 / 2,4; - / -; - / -\} = 128,9 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 210°C :

$$E_1 = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 2,3 \cdot (78 + 2 \cdot 3) / (2 \cdot 128,9 \cdot 1 - 2,3) = 0,7561 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 128,9 \cdot 1 \cdot (11 - 3) / (78 + 11 + 3) = 22,42 \text{ МПа}$$

$$22,42 \text{ МПа} \geq 2,3 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19810.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-802.00.00.000 PP				Лист
				75

$$D_p = D = 2200 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 15,54 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия (ось штуцера совпадает с нормалью к поверхности в центре отверстия):

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 78 + 2 \cdot 3 = 84 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((22 - 3) / 15,54 - 0,8) \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 173 \text{ мм}$$

Т.к. $d_p < d_0$ - **Расчет укрепления одиночного отверстия от действия внутреннего избыточного давления проводить не требуется**

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 150; 1,25 \cdot ((78 + 2 \cdot 3) \cdot (11 - 3))^{1/2} \} = 32,4 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений:

- для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 128,9 / 164 \} = 0,786$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((78 + 2 \cdot 3) \cdot (11 - 3 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 204,5 \text{ мм}$$

Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (Днище эллиптическое (левое)):

$$L_k = 610 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 204,5 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{op} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 81,78 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (32,4 \cdot (11 - 3) \cdot 0,786 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (11 - 3 - 0) \cdot 0,786) / (204,5 \cdot (22 - 3))] / [1 + 0,5 \cdot (84 - 81,78) / 204,5 + 1 \cdot (78 + 2 \cdot 3) / 2200 \cdot 1 / 1 \cdot 32,4 / 204,5] \} = 1,041$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 3) \cdot 1 \cdot 164 \cdot 1 / [2200 + (22 - 3) \cdot 1] = 2,808 \text{ МПа}$$

Условие взаимного влияния штуцеров

Если расстояние между наружными поверхностями ближайших штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} + (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 408,9 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, требуется расчёт укреплений с учетом взаимного влияния отверстий.

Инв. № подл. 19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	тическое (левое)):						
					$L_k = 610 \text{ мм}$						
					Расчётная ширина зоны укрепления:						
					$l_p = L_0 = 204,5 \text{ мм}$						
					Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:						
					$d_{op} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 81,78 \text{ мм}$						
					$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_p \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_p}{l_p}} \right\}$						
					$= \min \{ 1; [1 + (32,4 \cdot (11 - 3) \cdot 0,786 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (11 - 3 - 0) \cdot 0,786) / (204,5 \cdot (22 - 3))] / [1 + 0.5 \cdot (84 - 81,78) / 204,5 + 1 \cdot (78 + 2 \cdot 3) / 2200 \cdot 1 / 1 \cdot 32,4 / 204,5] = 1,041 \}$						
					$= 1$						
					$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 3) \cdot 1 \cdot 164 \cdot 1 / [2200 + (22 - 3) \cdot 1] = 2,808 \text{ МПа}$						
					Условие взаимного влияния штуцеров						
					Если расстояние между наружными поверхностями ближайших штуцеров удовлетворяет условию:						
					$b > \sqrt{D'_p \cdot (s - c)} + \sqrt{D''_p \cdot (s - c)} = (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} + (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 408,9 \text{ мм}$						
					Условие не выполнено, требуется расчёт укреплений с учетом взаимного влияния отверстий.						
Инв. № подл. 19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-802.00.00.000 PP	Лист
											76

$$K_3 = \frac{1 + \cos^2 \beta}{2} = [1 + \cos^2(0)] / 2 = 1$$

$$\bar{V}_1 = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l'_p \cdot (s'_1 - c'_s) \cdot \chi'_1 + l'_{2p} \cdot s'_2 \cdot \chi'_2 - l'_{3p} \cdot (s'_3 - c'_s - c'_{s1}) \cdot \chi'_3 + l''_p \cdot (s''_1 - c_s) \cdot \chi''_1 + l''_{2p} \cdot s''_2 \cdot \chi''_2 + l''_{3p} \cdot (s''_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi''_3}{b \cdot (s - c)}}{K_3 \left(0,8 + \frac{l'_p + d''_p}{2 \cdot b} \right) + K_1 \left(\frac{d' + 2 \cdot c'_s}{D'_p} \cdot \frac{\varphi'}{\varphi'_1} \cdot \frac{l'_p}{b} + \frac{d'' + 2 \cdot c''_s}{D''_p} \cdot \frac{\varphi''}{\varphi''_1} \cdot \frac{l''_p}{b} \right)} \right\}$$

$$= \min \{ 1; (1 + [(32,4 \cdot (11 - 3) \cdot 0,786 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (11 - 3 - 0) \cdot 0,786 + 22,53 \cdot (10 - 4,25) \cdot 0,8963 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 4,25 - 0) \cdot 0,8963) / (216 \cdot (22 - 3))] / (1 \cdot (0,8 + (84 + 56,5) / (2 \cdot 216)) + 1 \cdot [(78 + 2 \cdot 3) / 2200 \cdot 1 / 1 \cdot 32,4 / 216 + [(48 + 2 \cdot 4,25) / 2200 \cdot 1 / 1 \cdot 22,53 / 216])]) = 0,9509 \}$$

$$= 0,9509$$

$$[p] = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{0,5 \cdot (D'_p + D''_p) + (s - c) \cdot \bar{V}_1} \cdot V_1 = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 3) \cdot 1 \cdot 164 / [0,5 \cdot (2200 + 2200) + (22 - 3) \cdot 0,9509] \cdot 0,9509 = 2,672 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление $[p] = \min \{ 2,808; 2,672 \}$ МПа

2,672 МПа \geq 2,3 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (84 - 81,78) \cdot 15,54 = 0,1724 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

$$A_a = l_p \cdot (s_1 - s_{1p} - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + l_p \cdot (s - s_p - c)$$

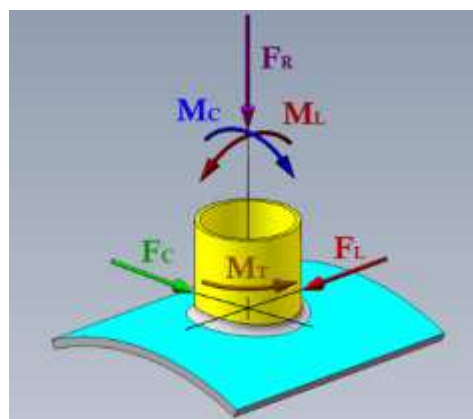
$$= 32,4 \cdot (11 - 0,7561 - 3) \cdot 0,786 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (11 - 3 - 0) \cdot 0,786 + 204,5 \cdot (22 - 15,54 - 3)$$

$$= 0,8928 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,1724 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \leq 0,8928 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Расчёт на прочность от воздействия внешних нагрузок по ГОСТ Р 52857.3-2007



Радиальная нагрузка, F_R : (-2900) Н

Окружной момент, M_C : 700 Н м

Продольный момент, M_L : 700 Н м

Крутящий момент, M_T : 1000 Н м

Сдвиговая нагрузка, F_C : 2000 Н

Сдвиговая нагрузка, F_L : 2000 Н

Эквивалентная толщина обечайки около штуцера:

$$s_3 = s - c = 22 - 3 = 19 \text{ мм}$$

Изн. № подл.	19810.4	Подпись и дата	
Взам. инв. №		Изн. № дубл.	
Подпись и дата		Подпись и дата	
Изн. № подл.		Изн. № дубл.	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
		Дата	
E-802.00.00.000 PP			Лист
			77

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((700/6672)^2 + (700/7504)^2)^{1/2} = 0,1404$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

0,1404 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_x\right|; \left|\Phi_x\right|; \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0,2 \cdot \Phi_x\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} = (\max(|0,819/1 + 0,02706|; |0,02706|; |0,819/1 - 0,2 \cdot 0,02706|)^2 + 0,1404^2)^{1/2} = 0,8576$$

Если $F_z < 0$, то знак Φ_z меняется на противоположный.

$$\text{Условие прочности: } \sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_x\right|; \left|\Phi_x\right|; \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0,2 \cdot \Phi_x\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} \leq 1$$

0,8576 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_f)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_f)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_f)} = 2,3 \cdot (78 + 11) / (4 \cdot (11 - 3)) + 4 \cdot (700^2 + 700^2)^{1/2} / (3,142 \cdot (78 + 11)^2 \cdot (11 - 3)) + 2900 / (3,142 \cdot (78 + 11) \cdot (11 - 3)) = 27,58 \text{ МПа}$$

Если F_z создает сжимающее напряжение, ее следует принять равной нулю.

Условие прочности: $\sigma_1 \leq [\sigma]_1$

27,58 МПа ≤ 128,9 МПа. **Условие прочности выполнено**

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0 / 22,42 + (700^2 + 700^2)^{1/2} / 5433 + |0| / 2,786 \cdot 10^5 = 0,1822$$

Если F_z растягивающая продольная сила, а p – внутреннее избыточное давление, то F_z и p следует принять равными нулю.

$$\text{Условие устойчивости штуцера: } \frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} \leq 1,0$$

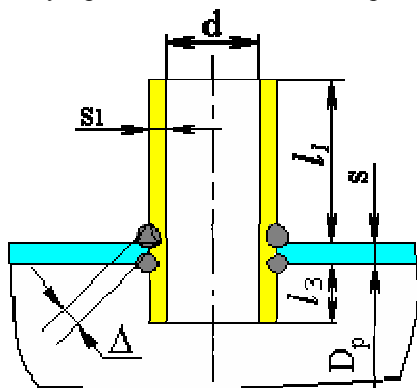
0,1822 ≤ 1.0. **Условие устойчивости выполнено**

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19810.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-802.00.00.000 PP				Лист
				79

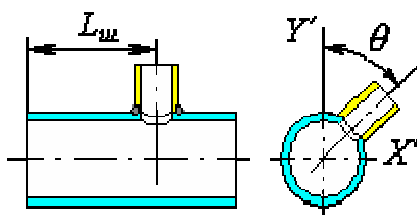
Штуцер C1-C2 DN80

Исходные данные

Элемент: Штуцер C1-C2 DN80
Условное обозначение (метка) Штуцер C2
Элемент, несущий штуцер: Обечайка цилиндрическая
Тип элемента, несущего штуцер: Обечайка цилиндрическая
Тип штуцера: Проходящий без укрепления



Материал несущего элемента: 09Г2С
Толщина стенки несущего элемента, s : 22 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, c : 3 мм
Материал штуцера: 09Г2С (КП245)
Внутренний диаметр штуцера, d : 78 мм
Толщина стенки штуцера, s_1 : 11 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c_s : 3 мм
Длина штуцера, l_1 : 150 мм



Смещение штуцера, $L_{ш}$: 400 мм
Угол поворота штуцера, ϑ : 0 °
Длина внутр. части штуцера, l_3 : 0 мм
Прибавка на коррозию, c_{s1} : 0 мм
Расчётные параметры размещения штуцера:
Ближайший штуцер

Подпись и дата

Инов. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инов. № подл.

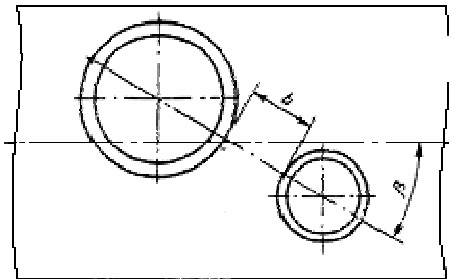
19810.4

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

E-802.00.00.000 PP

Лист

80



Название штуцера: Штуцер И DN50

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 156 мм

Угол β : 180 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$\phi_1 = 1$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$\phi = 1$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 2200 \text{ мм}$

Расчёт в рабочих условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 210 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 2,3 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 210 °C (рабочие условия):

$[\sigma] = 164 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 210 °C:

$E = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 210 °C (рабочие условия):

$[\sigma]_1 = \eta \cdot \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B; R_{m/10n/t} / n_D; R_{p1,0/10n/t} / n_P) = 1 \cdot \min\{193,4 / 1,5; 440 / 2,4; - / -; - / -\} = 128,9 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 210 °C:

$E_1 = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \phi_1 - p} = 2,3 \cdot (78 + 2 \cdot 3) / (2 \cdot 128,9 \cdot 1 - 2,3) = 0,7561 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \phi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 128,9 \cdot 1 \cdot (11 - 3) / (78 + 11 + 3) = 22,42 \text{ МПа}$$

22,42 МПа \geq 2,3 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19810.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-802.00.00.000 PP				Лист
				81

$$D_p = D = 2200 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 15,54 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия (ось штуцера совпадает с нормалью к поверхности в центре отверстия):

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 78 + 2 \cdot 3 = 84 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((22 - 3) / 15,54 - 0,8) \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 173 \text{ мм}$$

Т.к. $d_p < d_0$ - **Расчет укрепления одиночного отверстия от действия внутреннего избыточного давления проводить не требуется**

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 150; 1,25 \cdot ((78 + 2 \cdot 3) \cdot (11 - 3))^{1/2} \} = 32,4 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений:

- для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 128,9 / 164 \} = 0,786$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((78 + 2 \cdot 3) \cdot (11 - 3 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 204,5 \text{ мм}$$

Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (Днище эллиптическое (правое)):

$$L_k = 410 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 204,5 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 81,78 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (32,4 \cdot (11 - 3) \cdot 0,786 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (11 - 3 - 0) \cdot 0,786) / (204,5 \cdot (22 - 3))] / [1 + 0,5 \cdot (84 - 81,78) / 204,5 + 1 \cdot (78 + 2 \cdot 3) / 2200 \cdot 1 / 1 \cdot 32,4 / 204,5] \} = 1,041$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 3) \cdot 1 \cdot 164 \cdot 1 / [2200 + (22 - 3) \cdot 1] = 2,808 \text{ МПа}$$

Условие взаимного влияния штуцеров

Если расстояние между наружными поверхностями ближайших штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} + (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 408,9 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, требуется расчёт укреплений с учетом взаимного влияния отверстий.

Инв. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	тическое (правое)):
						$L_k = 410 \text{ мм}$
						Расчётная ширина зоны укрепления:
						$l_p = L_0 = 204,5 \text{ мм}$
Инв. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:
						$d_{op} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 81,78 \text{ мм}$
						$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_p \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_p}{l_p}} \right\}$
						$= \min \{ 1; [1 + (32,4 \cdot (11 - 3) \cdot 0,786 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (11 - 3 - 0) \cdot 0,786) / (204,5 \cdot (22 - 3))] / [1 + 0.5 \cdot (84 - 81,78) / 204,5 + 1 \cdot (78 + 2 \cdot 3) / 2200 \cdot 1 / 1 \cdot 32,4 / 204,5] = 1,041 \}$
Инв. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$= 1$
						$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 3) \cdot 1 \cdot 164 \cdot 1 / [2200 + (22 - 3) \cdot 1] = 2,808 \text{ МПа}$
						Условие взаимного влияния штуцеров
						Если расстояние между наружными поверхностями ближайших штуцеров удовлетворяет условию:
Инв. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} + (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 408,9 \text{ мм}$
						Условие не выполнено, требуется расчёт укреплений с учетом взаимного влияния отверстий.
						E-802.00.00.000 PP
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		82

$$K_3 = \frac{1 + \cos^2 \beta}{2} = [1 + \cos^2(180)] / 2 = 1$$

$$V_1 = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_p' \cdot (s_1' - c_s') \cdot \chi_1' + l_{2p}' \cdot s_2' \cdot \chi_2' + l_{3p}' \cdot (s_3' - c_s' - c_{s1}') \cdot \chi_3' + l_p'' \cdot (s_1'' - c_s'') \cdot \chi_1'' + l_{2p}'' \cdot s_2'' \cdot \chi_2'' + l_{3p}'' \cdot (s_3'' - c_s'' - c_{s1}'') \cdot \chi_3''}{b \cdot (s - c)}}{K_3 \left(0,8 + \frac{d_p' + d_p''}{2 \cdot b} \right) + K_1 \left(\frac{d' + 2 \cdot c_s'}{D_p'} \cdot \frac{\varphi'}{\varphi_1'} \cdot \frac{l_p'}{b} + \frac{d'' + 2 \cdot c_s''}{D_p''} \cdot \frac{\varphi''}{\varphi_1''} \cdot \frac{l_p''}{b} \right)} \right\}$$

$$= \min \{ 1; (1 + [(32,4 \cdot (11 - 3) \cdot 0,786 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (11 - 3 - 0) \cdot 0,786 + 22,53 \cdot (10 - 4,25) \cdot 0,8963 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 4,25 - 0) \cdot 0,8963) / (156 \cdot (22 - 3))] / (1 \cdot (0,8 + (84 + 56,5) / (2 \cdot 156) + 1 \cdot [(78 + 2 \cdot 3) / 2200 \cdot 1 / 1 \cdot 32,4 / 156 + [(48 + 2 \cdot 4,25) / 2200 \cdot 1 / 1 \cdot 22,53 / 156]])) = 0,8779 \}$$

$$= 0,8779$$

$$[p] = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{0,5 \cdot (D_p' + D_p'') + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 3) \cdot 1 \cdot 164 / [0,5 \cdot (2200 + 2200) + (22 - 3) \cdot 0,8779] \cdot 0,8779 = 2,468 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление $[p] = \min \{ 2,808; 2,468 \}$ МПа

2,468 МПа \geq 2,3 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (84 - 81,78) \cdot 15,54 = 0,1724 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

$$A_a = l_p \cdot (s_1 - s_p - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + l_p \cdot (s - s_p - c)$$

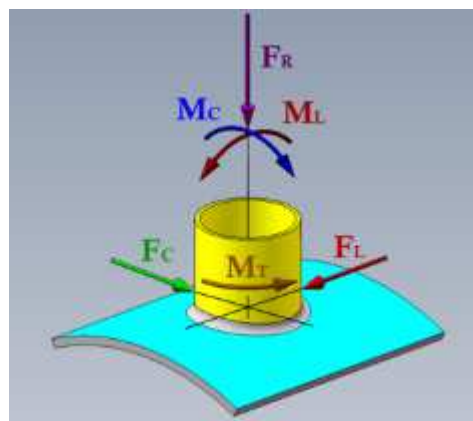
$$= 32,4 \cdot (11 - 0,7561 - 3) \cdot 0,786 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (11 - 3 - 0) \cdot 0,786 + 204,5 \cdot (22 - 15,54 - 3)$$

$$= 0,8928 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,1724 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \leq 0,8928 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Расчёт на прочность от воздействия внешних нагрузок по ГОСТ Р 52857.3-2007



Радиальная нагрузка, F_R : (-2900) Н

Окружной момент, M_C : 700 Н м

Продольный момент, M_L : 700 Н м

Крутящий момент, M_T : 1000 Н м

Сдвиговая нагрузка, F_C : 2000 Н

Сдвиговая нагрузка, F_L : 2000 Н

Эквивалентная толщина обечайки около штуцера:

Изн. № подл.	19810.4	Подпись и дата	
Взам. инв. №		Изн. № дубл.	
Подпись и дата			
Изн. № подл.	19810.4	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
Е-802.00.00.000 РР			
Лист			
83			

$$s_3 = s - c = 22 - 3 = 19 \text{ мм}$$

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c = 2200 + 22 + 3 = 2225 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_s = 78 + 11 + 3 = 92 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} = 92 / (2225 \cdot 19)^{1/2} = 0,4475$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 156 \text{ мм}$$

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D_c}{2} = 2225 / 2 = 1112 \text{ мм}$$

Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |2,3 / 2,808| = 0,819$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

0,819 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_z = -F_R = -(-2900) = 2900 \text{ Н}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s - c)}} = 92 / (2225 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 0,4475$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 0,4475 + 0,005196 \cdot 0,4475^2 + (-0,001406) \cdot 0,4475^3 + 0 \cdot 0,4475^4 = 1,028$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4475$):

$$[F_z] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1,81\} = 164 \cdot (22 - 3)^2 \cdot \max\{1,028; 1,81\} = 1,072 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{[F_z]} \right| = |2900 / 1,072 \cdot 10^5| = 0,02706$$

Условие прочности: $\Phi_z \leq 1$

0,02706 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_x = M_c = 700 \text{ Н м}$$

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_y = M_L = 700 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 0,4475 + 0,1589 \cdot 0,4475^2 + (-0,02142) \cdot 0,4475^3 + 0,001035 \cdot 0,4475^4 = 4,585$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4475$):

$$[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4,9\} = 164 \cdot (22 - 3)^2 \cdot 92 / 4 \cdot \max\{4,585; 4,9\} = 6672 \text{ Н м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 5,511$$

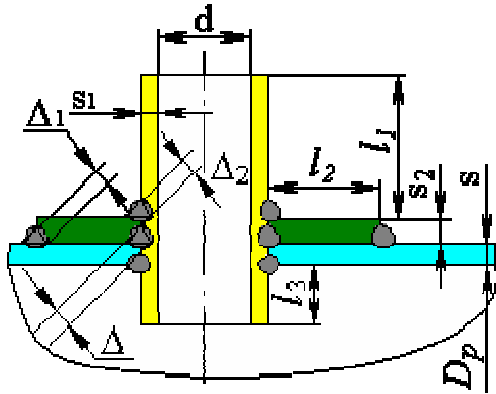
Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4475$):

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19810.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-802.00.00.000 PP				Лист
				84

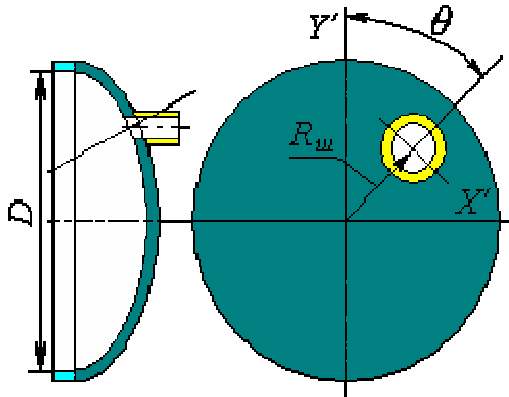
Штуцер Ж DN50

Исходные данные

Элемент:	Штуцер Ж DN50
Условное обозначение (метка)	Штуцер Ж
Элемент, несущий штуцер:	Днище эллиптическое (левое)
Тип элемента, несущего штуцер:	Днище эллиптическое
Тип штуцера:	Проходящий с накладным кольцом



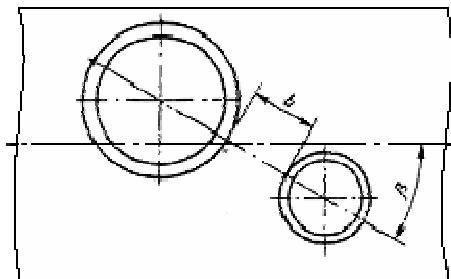
Материал несущего элемента:	09Г2С
Толщина стенки несущего элемента, s:	25 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, с:	7,55 мм
Материал штуцера:	09Г2С Gr.ГОСТ 19281
Внутренний диаметр штуцера, d:	48 мм
Толщина стенки штуцера, s1:	10 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), сs:	4,25 мм
Длина штуцера, l1:	150 мм



Смещение штуцера, Rш:	300 мм
Угол поворота штуцера, ϑ :	345 °
Полученный угол наклона штуцера, γ :	(-8,049) °
Длина внутр. части штуцера, l3:	0 мм
Прибавка на коррозию, сs1:	0 мм
Материал кольца:	09Г2С

Изн. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
E-802.00.00.000 PP					Лист
					86

Ширина кольца, l_2 : 80 мм
 Толщина кольца, s_2 : 14 мм
 Расчётные параметры размещения штуцера:
 Ближайший штуцер



Название штуцера: Штуцер Е DN80

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b : 392,6 мм

Угол β : 90 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$$\phi_1 = 1$$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$$\phi = 1$$

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища:

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{ш}^2} = 2200^2 / (2 \cdot 550) \cdot (1 - 4 \cdot (2200^2 - 4 \cdot 550^2) \cdot 300^2 / 2200^4)^{1/2} = 4276 \text{ мм}$$

Расчёт в рабочих условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T : 210 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p : 2,3 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 210$ °C (рабочие условия):

$$[\sigma] = 164 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 210 °C:

$$E = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 210$ °C (рабочие условия):

$$[\sigma]_1 = 147 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 210 °C:

$$E_1 = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала кольца

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 210$ °C (рабочие условия):

$$[\sigma]_2 = 164 \text{ МПа}$$

Подпись и дата

Инов. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инов. № подл.

19810.4

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

E-802.00.00.000 PP

Лист

87

Модуль продольной упругости при температуре 210 °С:

$$E_2 = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \phi_1 - p} = 2,3 \cdot (48 + 2 \cdot 4,25) / (2 \cdot 147 \cdot 1 - 2,3) = 0,4455 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \phi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 147 \cdot 1 \cdot (10 - 4,25) / (48 + 10 + 4,25) = 27,16 \text{ МПа}$$

$$27,16 \text{ МПа} \geq 2,3 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища:

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{\text{ш}}^2} = 2200^2 / (2 \cdot 550) \cdot (1 - 4 \cdot (2200^2 - 4 \cdot 550^2) \cdot 300^2 / 2200^4)^{1/2} = 4276 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 15,04 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия (смещённый штуцер на эллиптическом днище):

$$d_p = \frac{d + 2 \cdot c_s}{\sqrt{1 - \left(\frac{2 \cdot R_{\text{ш}}}{D_p} \right)^2}} = (48 + 2 \cdot 4,25) / [1 - (2 \cdot 300 / 4276)^2]^{1/2} = 57,06 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((25 - 7,55) / 15,04 - 0,8) \cdot (4276 \cdot (25 - 7,55))^{1/2} = 196,7 \text{ мм}$$

Т.к. $d_p < d_0$ - **Расчет укрепления одиночного отверстия от действия внутреннего избыточного давления проводить не требуется**

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 150; 1,25 \cdot ((48 + 2 \cdot 4,25) \cdot (10 - 4,25))^{1/2} \} = 22,53 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений:

- для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 147 / 164 \} = 0,8963$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (4276 \cdot (25 - 7,55))^{1/2} = 273,1 \text{ мм}$$

Расчётная ширина кольца:

$$l_{2p} = \min \{ l_2; \sqrt{D_p \cdot (s_2 + s - c)} \} = \min \{ 80; (4276 \cdot (14 + 25 - 7,55))^{1/2} \} = 80 \text{ мм}$$

- для накладного кольца:

$$\chi_2 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 164 / 164 \} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((48 + 2 \cdot 4,25) \cdot (10 - 4,25 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 273,1 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

Изн. № подл.	19810.4	Подпись и дата			
		Изн. № дубл.			
		Взам. инв. №			
		Подпись и дата			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист
E-802.00.00.000 PP					88

$$d_{0p} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (4276 \cdot (25 - 7,55))^{1/2} = 109,3 \text{ мм}$$

$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_p \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{0p}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_p}{l_p}} \right\}$$

$$= \min \{ 1; [1 + (22,53 \cdot (10 - 4,25) \cdot 0,8963 + 80 \cdot 14 \cdot 1 + 0 \cdot (10 - 4,25 - 0) \cdot 0,8963) / (273,1 \cdot (25 - 7,55))] / [1 + 0.5 \cdot (57,06 - 109,3) / 273,1 + 2 \cdot (48 + 2 \cdot 4,25) / 4276 \cdot 1 / 1 \cdot 22,53 / 273,1] = 1,389 \}$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 2 \cdot (25 - 7,55) \cdot 1 \cdot 164 \cdot 1 / [4276 + (25 - 7,55) \cdot 1] = 2,667 \text{ МПа}$$

Условие взаимного влияния штуцеров

Если расстояние между наружными поверхностями ближайших штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (4276 \cdot (25 - 7,55))^{1/2} + (4276 \cdot (25 - 7,55))^{1/2} = 546,3 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, требуется расчёт укреплений с учетом взаимного влияния отверстий.

$$K_3 = 1$$

$$V_1 = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_p' \cdot (s_1' - c_s') \cdot \chi_1' + l_{2p}' \cdot s_2' \cdot \chi_2' - l_{3p}' \cdot (s_3' - c_s' - c_{s1}') \cdot \chi_3' + l_p'' \cdot (s_1'' - c_s'') \cdot \chi_1'' + l_{2p}'' \cdot s_2'' \cdot \chi_2'' + l_{3p}'' \cdot (s_3'' - c_s'' - c_{s1}'') \cdot \chi_3''}{b \cdot (s - c)}}{K_3 \left(0.8 + \frac{d_p' + d_p''}{2 \cdot b} \right) + K_1 \left(\frac{d' + 2 \cdot c_s'}{D_p'} \cdot \frac{\varphi'}{\varphi_1'} \cdot \frac{l_p'}{b} + \frac{d'' + 2 \cdot c_s''}{D_p''} \cdot \frac{\varphi''}{\varphi_1''} \cdot \frac{l_p''}{b} \right)} \right\}$$

$$= \min \{ 1; (1 + [(22,53 \cdot (10 - 4,25) \cdot 0,8963 + 80 \cdot 14 \cdot 1 + 0 \cdot (10 - 4,25 - 0) \cdot 0,8963 + 32,4 \cdot (11 - 3) \cdot 0,786 + 100 \cdot 14 \cdot 1 + 0 \cdot (11 - 3 - 0) \cdot 0,786) / (392,6 \cdot (25 - 7,55))] / (1 \cdot (0.8 + (57,06 + 84,84) / (2 \cdot 392,6)) + 2 \cdot [(48 + 2 \cdot 4,25) / 4276 \cdot 1 / 1 \cdot 22,53 / 392,6 + [(78 + 2 \cdot 3) / 4276 \cdot 1 / 1 \cdot 32,4 / 392,6]]) = 1,435 \}$$

$$= 1$$

$$[p]_1 = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{0.5 \cdot (D_p' + D_p'') + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2 \cdot 2 \cdot (25 - 7,55) \cdot 1 \cdot 164 / [0.5 \cdot (4276 + 4276) + (25 - 7,55) \cdot 1] \cdot 1 = 2,667 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление $[p] = \min \{ 2,667; 2,667 \} \text{ МПа}$

$2,667 \text{ МПа} \geq 2,3 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0.5 (d_p - d_{0p}) \cdot s_p = 0.5 \cdot (57,06 - 109,3) \cdot 15,04 = (-0,3926 \cdot 10^{-3}) \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

$$A_a = l_p \cdot (s_1 - s_p - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + l_p \cdot (s - s_p - c)$$

$$= 22,53 \cdot (10 - 0,4455 - 4,25) \cdot 0,8963 + 80 \cdot 14 \cdot 1 + 0 \cdot (10 - 4,25 - 0) \cdot 0,8963 + 273,1 \cdot (25 - 15,04 - 7,55)$$

$$= 0,001885 \text{ м}^2$$

$$A_r = (-0,3926 \cdot 10^{-3}) \text{ м}^2 \leq 0,001885 \text{ м}^2$$

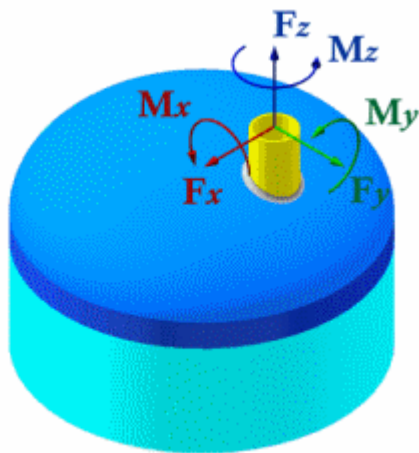
Заключение: **Условие прочности выполнено**

Расчет на прочность по МКЭ в рабочих условиях

Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
E-802.00.00.000 PP					Лист
					89

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 210 °C
Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 2,3 МПа



$F_x, \text{ Н}$	$F_y, \text{ Н}$	$F_z, \text{ Н}$	$M_x, \text{ Н м}$	$M_y, \text{ Н м}$	$M_z, \text{ Н м}$
1100	1100	1500	200	200	300

Допускаемые напряжения в соответствии с ГОСТ Р 52857.1-2007

Уровень разбивки - 2
Коэффициент запаса, учитывающий уровень разбивки: $K_m = 1,2$

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Номинальные допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре 210 °C:

$$[s] = \frac{[\sigma]_s}{K_m} = 164 / 1,2 = 136,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 210 °C:

$$E = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Номинальные допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре 210 °C:

$$[s]_1 = \frac{[\sigma]_s}{K_m} = 147 / 1,2 = 122,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 210 °C:

$$E_1 = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала кольца

Номинальные допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре 210 °C:

$$[s]_2 = \frac{[\sigma]_s}{K_m} = 164 / 1,2 = 136,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 210 °C:

Изнв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изнв. № дубл.	Подпись и дата
19810.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-802.00.00.000 PP				Лист
				90

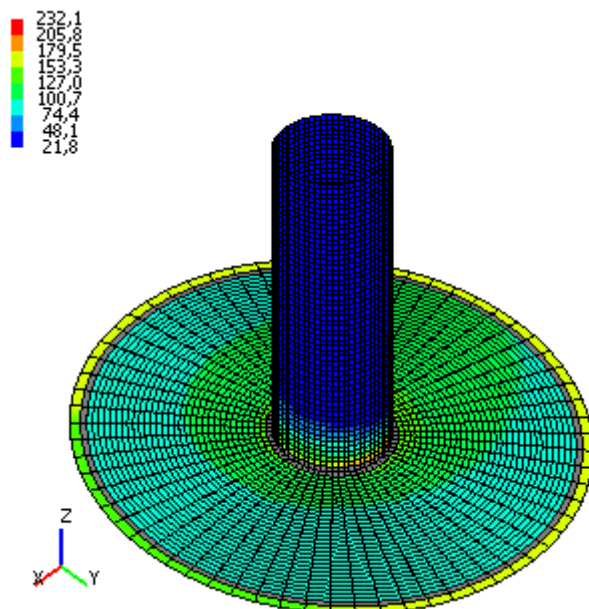


Рис. 3. Общие (мембранные и изгибные) напряжения на внешней поверхности, МПа.

Заключение:

Для несущего элемента $\sigma_{\text{mb max}} = 167,3 \text{ МПа} \leq 3[s] = 411 \text{ МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Для штуцера $\sigma_{\text{mb max}} = 232,1 \text{ МПа} \leq 3[s]_I = 368,7 \text{ МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

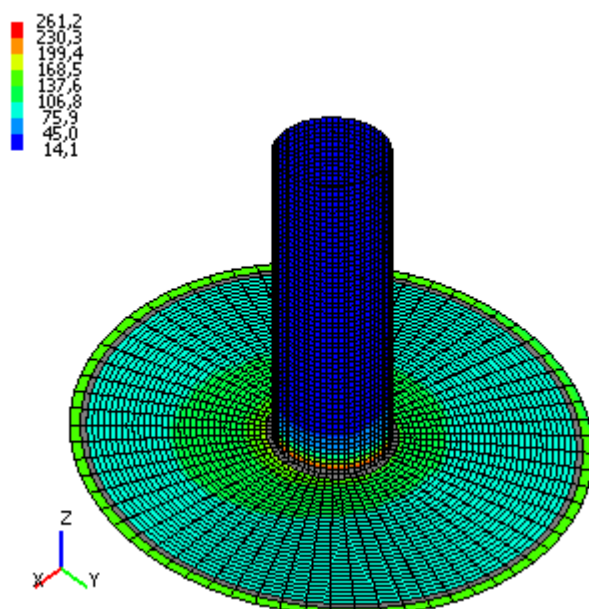


Рис. 4. Общие (мембранные и изгибные) напряжения на внутренней поверхности, МПа.

Заключение:

Для несущего элемента $\sigma_{\text{mb max}} = 219,5 \text{ МПа} \leq 3[s] = 411 \text{ МПа}$.

Инов. № подл.	Подпись и дата			
	Взам. инв. №			
	Инов. № дубл.			
	Подпись и дата			
19810.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-802.00.00.000 PP				
				Лист
				92

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Для штуцера $\sigma_{\text{max}} = 261,2 \text{ МПа} \leq 3[s]_1 = 368,7 \text{ МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

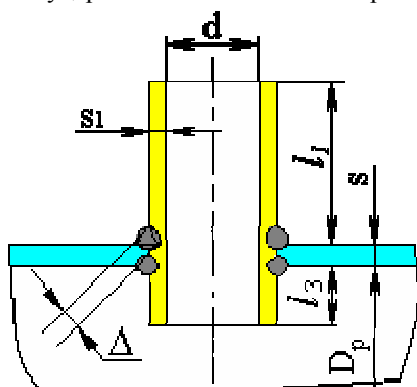
Общее заключение: **Условия прочности выполнены.**

Инв. № подл.	Подпись и дата				Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
19810.4							
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-802.00.00.000 PP		
					Лист		
					93		

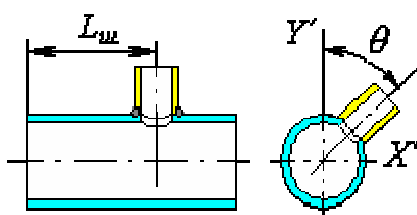
Штуцер И DN50

Исходные данные

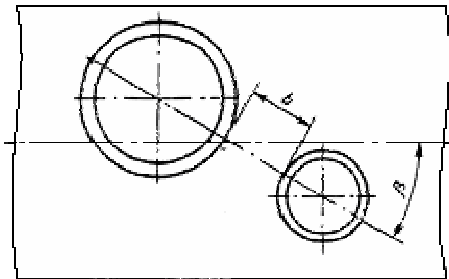
Элемент:	Штуцер И DN50
Условное обозначение (метка)	Штуцер И
Элемент, несущий штуцер:	Обечайка цилиндрическая
Тип элемента, несущего штуцер:	Обечайка цилиндрическая
Тип штуцера:	Проходящий без укрепления



Материал несущего элемента:	09Г2С
Толщина стенки несущего элемента, s:	22 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, с:	3 мм
Материал штуцера:	09Г2С Gr.ГОСТ 19281
Внутренний диаметр штуцера, d:	48 мм
Толщина стенки штуцера, s ₁ :	10 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), с _s :	4,25 мм
Длина штуцера, l ₁ :	150 мм



Смещение штуцера, $L_{шт}$: 160 мм
 Угол поворота штуцера, ϑ : 0 °
 Длина внутр. части штуцера, l_3 : 0 мм
 Прибавка на коррозию, c_{s1} : 0 мм
 Расчётные параметры размещения штуцера:
 Ближайший штуцер



Название штуцера: Штуцер С1-С2 DN80

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 156 мм

Угол β : 0°

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$$\varphi_1 = 1$$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$$\varphi = 1$$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 2200 \text{ мм}$$

Расчёт в рабочих условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 210°C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 2,3 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 210°C (рабочие условия):

$$[\sigma] = 164 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 210°C :

$$E = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 210°C (рабочие условия):

$$[\sigma]_1 = 147 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 210°C :

$$E_1 = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 2,3 \cdot (48 + 2 \cdot 4,25) / (2 \cdot 147 \cdot 1 - 2,3) = 0,4455 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 147 \cdot 1 \cdot (10 - 4,25) / (48 + 10 + 4,25) = 27,16 \text{ МПа}$$

$$27,16 \text{ МПа} \geq 2,3 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
19810.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-802.00.00.000 PP				Лист
				95

$$D_p = D = 2200 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 15,54 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия (ось штуцера совпадает с нормалью к поверхности в центре отверстия):

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 48 + 2 \cdot 4,25 = 56,5 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((22 - 3) / 15,54 - 0,8) \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 173 \text{ мм}$$

Т.к. $d_p < d_0$ - **Расчет укрепления одиночного отверстия от действия внутреннего избыточного давления проводить не требуется**

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 150; 1,25 \cdot ((48 + 2 \cdot 4,25) \cdot (10 - 4,25))^{1/2} \} = 22,53 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений:

- для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 147 / 164 \} = 0,8963$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((48 + 2 \cdot 4,25) \cdot (10 - 4,25 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 204,5 \text{ мм}$$

Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (Днище эллиптическое (правое)):

$$L_k = 186 \text{ мм}$$

Расчетная ширина зоны укрепления для отверстий, удаленных от других конструктивных элементов (Днище эллиптическое (правое)) на расстояние $L_k < L_0$:

$$l_p = L_k = 186 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 81,78 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (22,53 \cdot (10 - 4,25) \cdot 0,8963 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 4,25 - 0) \cdot 0,8963) / (186 \cdot (22 - 3))] / [1 + 0,5 \cdot (56,5 - 81,78) / 186 + 1 \cdot (48 + 2 \cdot 4,25) / 2200 \cdot 1 / 1 \cdot 22,53 / 186] \} = 1,104$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 3) \cdot 1 \cdot 164 \cdot 1 / [2200 + (22 - 3) \cdot 1] = 2,808 \text{ МПа}$$

Условие взаимного влияния штуцеров

Если расстояние между наружными поверхностями ближайших штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} + (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 408,9 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, требуется расчёт укреплений с учетом взаимного влияния отверстий.

Инва. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инва. № дубл.	Подпись и дата
<p>тическое (правое)):</p> <p>$L_k = 186 \text{ мм}$</p> <p>Расчетная ширина зоны укрепления для отверстий, удаленных от других конструктивных элементов (Днище эллиптическое (правое)) на расстояние $L_k < L_0$:</p> <p>$l_p = L_k = 186 \text{ мм}$</p> <p>Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:</p> <p>$d_{op} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 81,78 \text{ мм}$</p> <p>$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_p \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_p}{l_p}} \right\}$</p> <p>$= \min \{ 1; [1 + (22,53 \cdot (10 - 4,25) \cdot 0,8963 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 4,25 - 0) \cdot 0,8963) / (186 \cdot (22 - 3))] / [1 + 0.5 \cdot (56,5 - 81,78) / 186 + 1 \cdot (48 + 2 \cdot 4,25) / 2200 \cdot 1 / 1 \cdot 22,53 / 186] = 1,104 \}$</p> <p>$= 1$</p> <p>$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 3) \cdot 1 \cdot 164 \cdot 1 / [2200 + (22 - 3) \cdot 1] = 2,808 \text{ МПа}$</p> <p>Условие взаимного влияния штуцеров</p> <p>Если расстояние между наружными поверхностями ближайших штуцеров удовлетворяет условию:</p> <p>$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} + (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 408,9 \text{ мм}$</p> <p>Условие не выполнено, требуется расчёт укреплений с учетом взаимного влияния отверстий.</p>					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
Е-802.00.00.000 PP					Лист
					96

$$K_3 = \frac{1 + \cos^2 \beta}{2} = [1 + \cos^2(0)] / 2 = 1$$

$$V_1 = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l'_{1p} \cdot (s'_1 - c'_s) \cdot \chi'_1 + l'_{2p} \cdot s'_2 \cdot \chi'_2 + l'_{3p} \cdot (s'_3 - c'_s - c'_{s1}) \cdot \chi'_3 + l'_{1p} \cdot (s''_1 - c_s) \cdot \chi''_1 + l'_{2p} \cdot s''_2 \cdot \chi''_2 + l'_{3p} \cdot (s''_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi''_3}{b \cdot (s - c)}}{K_3 \left(0,8 + \frac{d'_p + d''_p}{2 \cdot b} \right) + K_1 \left(\frac{d' + 2 \cdot c'_s}{D'_p} \cdot \frac{\varphi'}{\varphi'_1} \cdot \frac{l'_{1p}}{b} + \frac{d' + 2 \cdot c''_s}{D''_p} \cdot \frac{\varphi'}{\varphi''_1} \cdot \frac{l'_{1p}}{b} \right)} \right\}$$

$$= \min \{ 1; (1 + [(22,53 * (10 - 4,25) * 0,8963 + 0 * 0 * 0 + 0 * (10 - 4,25 - 0) * 0,8963 + 32,4 * (11 - 3) * 0,786 + 0 * 0 * 0 + 0 * (11 - 3 - 0) * 0,786) / (156 * (22 - 3))]) / (1 * (0,8 + (56,5 + 84) / (2 * 156) + 1 * [(48 + 2 * 4,25) / 2200 * 1 / 1 * 22,53 / 156 + [(78 + 2 * 3) / 2200 * 1 / 1 * 32,4 / 156]])) \} = 0,8779$$

$$= 0,8779$$

$$[p] = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{0,5 \cdot (D'_p + D''_p) + (s - c) \cdot \varphi_1} \cdot V_1 = 2 * 1 * (22 - 3) * 1 * 164 / [0,5 * (2200 + 2200) + (22 - 3) * 0,8779] * 0,8779 = 2,468 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление $[p] = \min \{ 2,808; 2,468 \}$ МПа

2,468 МПа \geq 2,3 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5 (d_p - d_{0p}) \cdot s_p = 0,5 * (56,5 - 81,78) * 15,54 = (-0,1964 \cdot 10^{-3}) \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

$$A_k = l_p \cdot (s_1 - s_p - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + l_p \cdot (s - s_p - c)$$

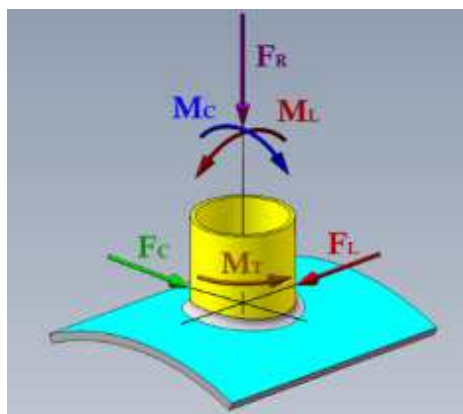
$$= 22,53 * (10 - 0,4455 - 4,25) * 0,8963 + 0 * 0 * 0 + 0 * (10 - 4,25 - 0) * 0,8963 + 186 * (22 - 15,54 - 3)$$

$$= 0,7515 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

$$A_r = (-0,1964 \cdot 10^{-3}) \text{ м}^2 \leq 0,7515 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Расчёт на прочность от воздействия внешних нагрузок по ГОСТ Р 52857.3-2007



Радиальная нагрузка, F_R : (-1500) Н

Окружной момент, M_C : 200 Н м

Продольный момент, M_L : 200 Н м

Крутящий момент, M_T : 300 Н м

Сдвиговая нагрузка, F_C : 1100 Н

Сдвиговая нагрузка, F_L : 1100 Н

Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	
Взам. инв. №		Инов. № дубл.	
Подпись и дата			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
Дата			
Е-802.00.00.000 РР			
Лист			
97			

Эквивалентная толщина обечайки около штуцера:

$$s_3 = s - c = 22 - 3 = 19 \text{ мм}$$

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c = 2200 + 22 + 3 = 2225 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_1 = 48 + 10 + 4,25 = 62,25 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} = 62,25 / (2225 \cdot 19)^{1/2} = 0,3028$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 156 \text{ мм}$$

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D_c}{2} = 2225 / 2 = 1112 \text{ мм}$$

Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |2,311 / 2,808| = 0,8229$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

0,8229 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_z = -F_R = -(-1500) = 1500 \text{ Н}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s - c)}} = 62,25 / (2225 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 0,3028$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 0,3028 + 0,005196 \cdot 0,3028^2 + (-0,001406) \cdot 0,3028^3 + 0 \cdot 0,3028^4 = 0,8894$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,3028$):

$$[F_z] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1,81\} = 164 \cdot (22 - 3)^2 \cdot \max\{0,8894; 1,81\} = 1,072 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{[F_z]} \right| = |1500 / 1,072 \cdot 10^5| = 0,01400$$

Условие прочности: $\Phi_z \leq 1$

0,01400 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_x = M_c = 200 \text{ Н м}$$

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_y = M_l = 200 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 0,3028 + 0,1589 \cdot 0,3028^2 + (-0,02142) \cdot 0,3028^3 + 0,001035 \cdot 0,3028^4 = 4,56$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,3028$):

$$[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4,9\} = 164 \cdot (22 - 3)^2 \cdot 62,25 / 4 \cdot \max\{4,56; 4,9\} = 4515 \text{ Н м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 5,6$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,3028$):

Изнв. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изнв. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-802.00.00.000 РР
					Лист 98

$$[M_y] - [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 164 * (22 - 3)^2 * 62,25 / 4 * \max\{5,6; 4.9\} = 5160 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((200 / 4515)^2 + (200 / 5160)^2)^{1/2} = 0,05886$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

0,05886 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right|; \left|\Phi_z\right|; \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} = (\max(|0,8229 / 1 + 0,01400|; |0,01400|; |0,8229 / 1 - 0.2 * 0,01400|)^2 + 0,05886^2)^{1/2} = 0,839$$

Если $F_z < 0$, то знак Φ_z меняется на противоположный.

$$\text{Условие прочности: } \sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right|; \left|\Phi_z\right|; \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} \leq 1$$

0,839 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = 2,311 * (48 + 10) / (4 * (10 - 4,25)) + 4 * (200^2 + 200^2)^{1/2} / (3,142 * (48 + 10)^2 * (10 - 4,25)) + 1500 / (3,142 * (48 + 10) * (10 - 4,25)) = 25,88 \text{ МПа}$$

Если F_z создает сжимающее напряжение, ее следует принять равной нулю.

Условие прочности: $\sigma_1 \leq [\sigma]_1$

25,88 МПа ≤ 147 МПа. **Условие прочности выполнено**

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0 / 27,16 + (200^2 + 200^2)^{1/2} / 1713 + |0| / 1,427 \cdot 10^5 = 0,1651$$

Если F_z растягивающая продольная сила, а p – внутреннее избыточное давление, то F_z и p следует принять равными нулю.

$$\text{Условие устойчивости штуцера: } \frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} \leq 1.0$$

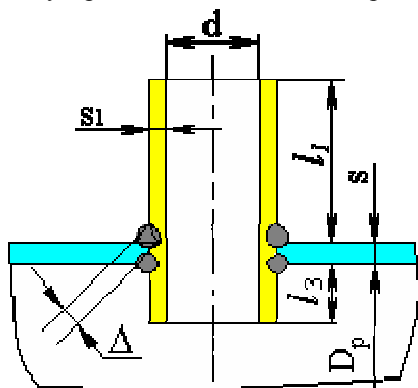
0,1651 ≤ 1.0. **Условие устойчивости выполнено**

Изн. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$\frac{[p]}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{ F_z }{[F]} = 0 / 27,16 + (200^2 + 200^2)^{1/2} / 1713 + 0 / 1,427 \cdot 10^5 = 0,1651$
						<p>Если F_z растягивающая продольная сила, а р – внутреннее избыточное давление, то F_z и р следует принять равными нулю.</p> <p>Условие устойчивости штуцера: $\frac{[p]}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{ F_z }{[F]} \leq 1.0$</p> <p>0,1651 ≤ 1.0. Условие устойчивости выполнено</p>
Изн. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	E-802.00.00.000 PP
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист	
						99

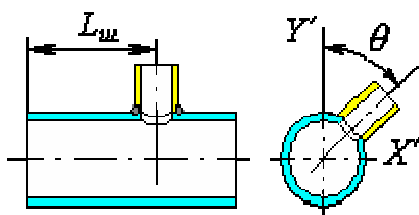
Штуцер К DN50

Исходные данные

Элемент: Штуцер К DN50
Условное обозначение (метка) Штуцер К
Элемент, несущий штуцер: Обечайка цилиндрическая
Тип элемента, несущего штуцер: Обечайка цилиндрическая
Тип штуцера: Проходящий без укрепления



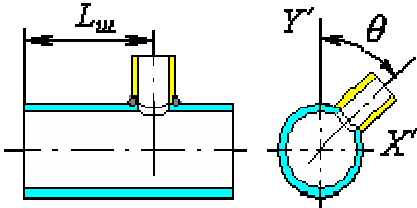
Материал несущего элемента: 09Г2С
Толщина стенки несущего элемента, s: 22 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, с: 3 мм
Материал штуцера: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281
Внутренний диаметр штуцера, d: 48 мм
Толщина стенки штуцера, s₁: 10 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), с_s: 4,25 мм
Длина штуцера, l₁: 150 мм



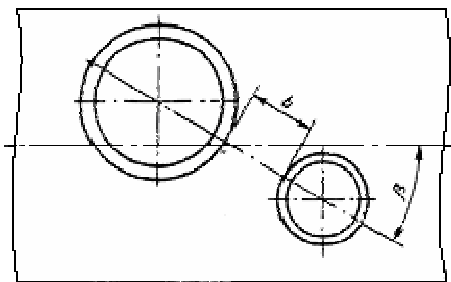
Смещение штуцера, L_ш: 5700 мм
Угол поворота штуцера, ϑ : 0 °
Длина внутр. части штуцера, l₃: 0 мм
Прибавка на коррозию, с_{s1}: 0 мм
Расчётные параметры размещения штуцера:
Ближайший штуцер

Исх. № подл.	Исх. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата	
19810.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-802.00.00.000 PP				Лист
				100

Материал штуцера:	09Г2С Gr.ГОСТ 19281
Внутренний диаметр штуцера, d:	48 мм
Толщина стенки штуцера, s ₁ :	10 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c _s :	4,25 мм
Длина штуцера, l ₁ :	150 мм



Смещение штуцера, L _{шт} :	5700 мм
Угол поворота штуцера, ϑ:	0 °
Длина внутр. части штуцера, l ₃ :	0 мм
Прибавка на коррозию, c _{s1} :	0 мм
Расчётные параметры размещения штуцера:	
Ближайший штуцер	



Название штуцера: Штуцер P1-P5 DN80

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 216 мм

$$U_{\text{ГОЛ } \beta}: \quad 180^\circ$$

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$$\phi_1 = 1$$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$$\wp = 1$$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

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

Расчёт в рабочих условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, Т: 210 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 2,3 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 210\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рабочие условия):

$$[\sigma] = 164 \text{ MPa}$$

Модуль продольной упругости при температуре 210 °С:

$$E = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 210\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рабочие условия):

$$[\sigma]_1 = 147 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 210 °С:

$$E_1 = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma_1 \cdot \varphi_1 - p]} = 2,3 \cdot (48 + 2 \cdot 4,25) / (2 \cdot 147 \cdot 1 - 2,3) = 0,4455 \text{ mm}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 147 \cdot 1 \cdot (10 - 4,25) / (48 + 10 + 4,25) = 27,16 \text{ МПа}$$

$$27,16 \text{ МПа} \geq 2,3 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p>Расчётная температура, T: 210 °С</p> <p>Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 2,3 МПа</p> <p style="text-align: center;">Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007</p> <p style="text-align: center;"><i>Свойства материала элемента, несущего штуцер</i></p> <p>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 210 °С (рабочие условия):</p> <p>[σ] = 164 МПа</p> <p>Модуль продольной упругости при температуре 210 °С:</p> <p>E = 1,8·10⁵ МПа</p> <p style="text-align: center;"><i>Свойства материала штуцера</i></p> <p>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 210 °С (рабочие условия):</p> <p>[σ]₁ = 147 МПа</p> <p>Модуль продольной упругости при температуре 210 °С:</p> <p>E₁ = 1,8·10⁵ МПа</p> <p>Расчётная толщина стенки штуцера:</p> $s_{ш} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \phi_1 - p} = 2,3 \cdot (48 + 2 \cdot 4,25) / (2 \cdot 147 \cdot 1 - 2,3) = 0,4455 \text{ мм}$ <p>Допускаемое давление для патрубка штуцера:</p> $[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \phi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 147 \cdot 1 \cdot (10 - 4,25) / (48 + 10 + 4,25) = 27,16 \text{ МПа}$ <p>27,16 МПа ≥ 2,3 МПа</p> <p>Заключение: Условие прочности и устойчивости выполнено</p> <p>Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:</p>	
19810.4					E-802.00.00.000 PP	Лист 101
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Изм.	Лист
19810.4					№ докум.	Подп.
					Дата	

$$D_p = D = 2200 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 15,54 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия (ось штуцера совпадает с нормалью к поверхности в центре отверстия):

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 48 + 2 \cdot 4,25 = 56,5 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((22 - 3) / 15,54 - 0,8) \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 173 \text{ мм}$$

Т.к. $d_p < d_0$ - **Расчет укрепления одиночного отверстия от действия внутреннего избыточного давления проводить не требуется**

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 150; 1,25 \cdot ((48 + 2 \cdot 4,25) \cdot (10 - 4,25))^{1/2} \} = 22,53 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений:

- для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0; 147 / 164 \} = 0,8963$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((48 + 2 \cdot 4,25) \cdot (10 - 4,25 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 204,5 \text{ мм}$$

Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (Днище эллиптическое (левое)):

$$L_k = 326 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 204,5 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 81,78 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (22,53 \cdot (10 - 4,25) \cdot 0,8963 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 4,25 - 0) \cdot 0,8963) / (204,5 \cdot (22 - 3))] / [1 + 0,5 \cdot (56,5 - 81,78) / 204,5 + 1 \cdot (48 + 2 \cdot 4,25) / 2200 \cdot 1 / 1 \cdot 22,53 / 204,5] \} = 1,094$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 3) \cdot 1 \cdot 164 \cdot 1 / [2200 + (22 - 3) \cdot 1] = 2,808 \text{ МПа}$$

Условие взаимного влияния штуцеров

Если расстояние между наружными поверхностями ближайших штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} + (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 408,9 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, требуется расчёт укреплений с учетом взаимного влияния отверстий.

Инв. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	тическое (левое)):	
						$L_k = 326 \text{ мм}$	
						Расчётная ширина зоны укрепления:	
						$l_p = L_0 = 204,5 \text{ мм}$	
						Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:	
$d_{op} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 81,78 \text{ мм}$							
$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_p \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_p}{l_p}} \right\}$							
$= \min\{1; [1 + (22,53 \cdot (10 - 4,25) \cdot 0,8963 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 4,25 - 0) \cdot 0,8963) / (204,5 \cdot (22 - 3))] / [1 + 0.5 \cdot (56,5 - 81,78) / 204,5 + 1 \cdot (48 + 2 \cdot 4,25) / 2200 \cdot 1 / 1 \cdot 22,53 / 204,5] = 1,094\}$							
$= 1$							
$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 3) \cdot 1 \cdot 164 \cdot 1 / [2200 + (22 - 3) \cdot 1] = 2,808 \text{ МПа}$							
Условие взаимного влияния штуцеров							
Если расстояние между наружными поверхностями ближайших штуцеров удовлетворяет условию:							
$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} + (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 408,9 \text{ мм}$							
Условие не выполнено, требуется расчёт укреплений с учетом взаимного влияния отверстий.							
Инв. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Изм.	
							Лист
							№ докум.
Подп.						Дата	
E-802.00.00.000 PP						Лист	
						102	

$$K_3 = \frac{1 + \cos^2 \beta}{2} = [1 + \cos^2(180)] / 2 = 1$$

$$V_1 = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l'_{1p} \cdot (s'_1 - c'_s) \cdot \chi'_1 + l'_{2p} \cdot s'_2 \cdot \chi'_2 + l'_{3p} \cdot (s'_3 - c'_s - c'_{s1}) \cdot \chi'_3 + l'_{1p} \cdot (s''_1 - c_s) \cdot \chi''_1 + l'_{2p} \cdot s''_2 \cdot \chi''_2 + l'_{3p} \cdot (s''_3 - c''_s - c''_{s1}) \cdot \chi''_3}{b \cdot (s - c)}}{K_3 \left(0.8 + \frac{d'_p + d''_p}{2 \cdot b} \right) + K_1 \left(\frac{d' + 2 \cdot c'_s}{D'_p} \cdot \frac{\varphi'}{\varphi'_1} \cdot \frac{l'_{1p}}{b} + \frac{d' + 2 \cdot c''_s}{D''_p} \cdot \frac{\varphi'}{\varphi''_1} \cdot \frac{l'_{1p}}{b} \right)} \right\}$$

$$= \min \{ 1; (1 + [(22,53 \cdot (10 - 4,25) \cdot 0,8963 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 4,25 - 0) \cdot 0,8963 + 32,4 \cdot (11 - 3) \cdot 0,786 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (11 - 3 - 0) \cdot 0,786) / (216 \cdot (22 - 3))]) / (1 \cdot (0.8 + (56,5 + 84) / (2 \cdot 216) + 1 \cdot [(48 + 2 \cdot 4,25) / 2200 \cdot 1 / 1 \cdot 22,53 / 216 + [(78 + 2 \cdot 3) / 2200 \cdot 1 / 1 \cdot 32,4 / 216]])) = 0,9509 \}$$

$$= 0,9509$$

$$[p] = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{0.5 \cdot (D'_p + D''_p) + (s - c) \cdot \varphi_1} \cdot V_1 = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 3) \cdot 1 \cdot 164 / [0.5 \cdot (2200 + 2200) + (22 - 3) \cdot 0,9509] \cdot 0,9509 = 2,672 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление $[p] = \min \{ 2,808; 2,672 \}$ МПа

2,672 МПа \geq 2,3 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0.5 \cdot (d_p - d_{0p}) \cdot s_p = 0.5 \cdot (56,5 - 81,78) \cdot 15,54 = (-0,1964 \cdot 10^{-3}) \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

$$A_a = l_p \cdot (s_1 - s_p - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + l_p \cdot (s - s_p - c)$$

$$= 22,53 \cdot (10 - 0,4455 - 4,25) \cdot 0,8963 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 4,25 - 0) \cdot 0,8963 + 204,5 \cdot (22 - 15,54 - 3)$$

$$= 0,8154 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

$$A_r = (-0,1964 \cdot 10^{-3}) \text{ м}^2 \leq 0,8154 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

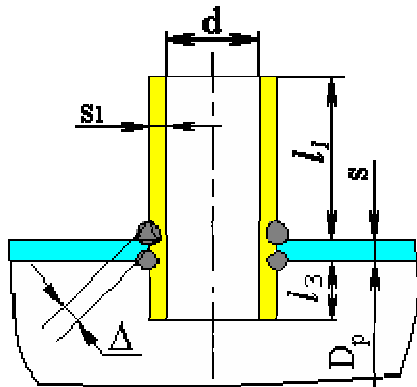
Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19810.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
E-802.00.00.000 PP			
Лист			
103			

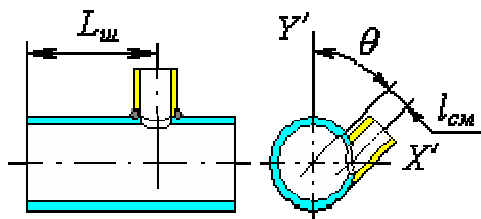
Штуцер У1-У4 DN50

Исходные данные

Элемент: Штуцер У1-У4 DN50
Условное обозначение (метка) Штуцер У2
Элемент, несущий штуцер: Обечайка цилиндрическая
Тип элемента, несущего штуцер: Обечайка цилиндрическая
Тип штуцера: Проходящий без укрепления



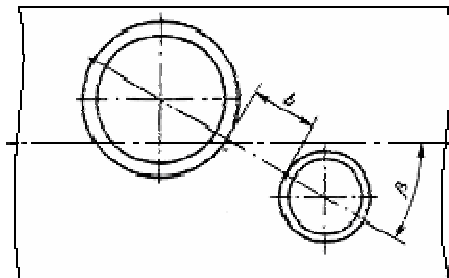
Материал несущего элемента: 09Г2С
Толщина стенки несущего элемента, s: 22 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, с: 3 мм
Материал штуцера: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281
Внутренний диаметр штуцера, d: 48 мм
Толщина стенки штуцера, s₁: 10 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), с_s: 4,25 мм
Длина штуцера, l₁: 150 мм



Смещение штуцера, L_ш: 5500 мм
Смещение штуцера, l_{см}: (-300) мм
Полученный угол поворота штуцера, ϑ : 254,5 °
Полученный угол наклона штуцера, γ : (-15,51) °
Полученный угол наклона штуцера, ω : (-90) °
Длина внутр. части штуцера, l₃: 0 мм

Изнв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изнв. № дубл.	Подпись и дата	E-802.00.00.000 PP	Лист
19810.4						104
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Прибавка на коррозию, c_{s1} : 0 мм
 Расчётные параметры размещения штуцера:
 Ближайший штуцер



Название штуцера: Штуцер X1-X4 DN32

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b : 240,5 мм

Угол β : 180 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$\phi_1 = 1$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$\phi = 1$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 2200$ мм

Расчёт в рабочих условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T : 210 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, p : 2,302 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 210$ °С (рабочие условия):

$[\sigma] = 164$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 210 °С:

$E = 1,8 \cdot 10^5$ МПа

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 210$ °С (рабочие условия):

$[\sigma]_1 = 147$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 210 °С:

$E_1 = 1,8 \cdot 10^5$ МПа

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_{\phi} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \phi_1 - p} = \frac{2,302 \cdot (48 + 2 \cdot 4,25)}{(2 \cdot 147 \cdot 1 - 2,302)} = 0,4459 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \phi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = \frac{2 \cdot 147 \cdot 1 \cdot (10 - 4,25)}{(48 + 10 + 4,25)} = 27,16 \text{ МПа}$$

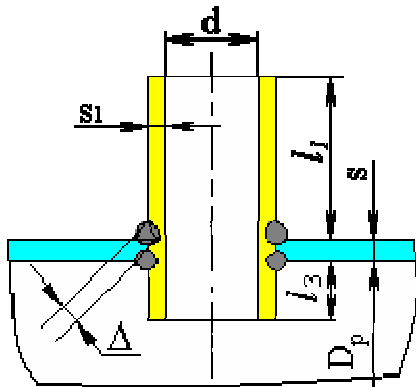
27,16 МПа \geq 2,302 МПа

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19810.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-802.00.00.000 PP				Лист
				105

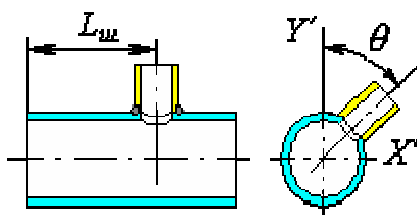
Штуцер III DN32

Исходные данные

Элемент: Штуцер III DN32
Условное обозначение (метка) Штуцер III
Элемент, несущий штуцер: Обечайка цилиндрическая
Тип элемента, несущего штуцер: Обечайка цилиндрическая
Тип штуцера: Проходящий без укрепления

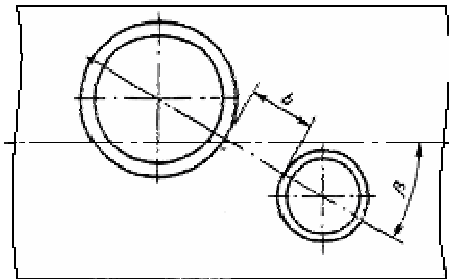


Материал несущего элемента: 09Г2С
Толщина стенки несущего элемента, s : 22 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, c : 3 мм
Материал штуцера: 09Г2С (КП245)
Внутренний диаметр штуцера, d : 31 мм
Толщина стенки штуцера, s_1 : 10 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c_s : 3 мм
Длина штуцера, l_1 : 150 мм



Смещение штуцера, $L_{ш}$: 4250 мм
Угол поворота штуцера, ϑ : 180 °
Длина внутр. части штуцера, l_3 : 0 мм
Прибавка на коррозию, c_{s1} : 0 мм
Расчётные параметры размещения штуцера:
Ближайший штуцер

Изнв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изнв. № дубл.	Подпись и дата
19810.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-802.00.00.000 PP				Лист
				108



Название штуцера: Штуцер А1-А2, Б1-Б2 DN200

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 454,5 мм

Угол β : 47,03 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$$\varphi_1 = 1$$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$$\varphi = 1$$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 2200 \text{ мм}$$

Расчёт в рабочих условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 210 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 2,311 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 210 °C (рабочие условия):

$$[\sigma] = 164 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 210 °C:

$$E = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 210 °C (рабочие условия):

$$[\sigma]_1 = \eta \cdot \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B; R_{m/10n/t} / n_D; R_{p1,0/10n/t} / n_n) = 1 \cdot \min\{193,4 / 1,5; 440 / 2,4; - / -; - / -\} = 128,9 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 210 °C:

$$E_1 = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 2,311 \cdot (31 + 2 \cdot 3) / (2 \cdot 128,9 \cdot 1 - 2,311) = 0,3347 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 128,9 \cdot 1 \cdot (10 - 3) / (31 + 10 + 3) = 41,02 \text{ МПа}$$

$$41,02 \text{ МПа} \geq 2,311 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19810.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-802.00.00.000 PP				Лист
				109

$$R_c = \frac{D_c}{2} = 2225 / 2 = 1112 \text{ мм}$$

Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |2,311 / 2,808| = 0,8229$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

0,8229 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_z = -F_R = -(-1500) = 1500 \text{ Н}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s - c)}} = 44 / (2225 \cdot (22 - 3)^{1/2}) = 0,214$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 0,214 + 0,005196 \cdot 0,214^2 + (-0,001406) \cdot 0,214^3 + 0 \cdot 0,214^4 = 0,8047$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,214$):

$$[F_z] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1,81\} = 164 \cdot (22 - 3)^2 \cdot \max\{0,8047; 1,81\} = 1,072 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{[F_z]} \right| = |1500 / 1,072 \cdot 10^5| = 0,01400$$

Условие прочности: $\Phi_z \leq 1$

0,01400 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_x = M_c = 200 \text{ Н м}$$

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_y = M_L = 200 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 0,214 + 0,1589 \cdot 0,214^2 + (-0,02142) \cdot 0,214^3 + 0,001035 \cdot 0,214^4 = 4,547$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,214$):

$$[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4,9\} = 164 \cdot (22 - 3)^2 \cdot 44 / 4 \cdot \max\{4,547; 4,9\} = 3191 \text{ Н м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 5,733$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,214$):

$$[M_y] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4,9\} = 164 \cdot (22 - 3)^2 \cdot 44 / 4 \cdot \max\{5,733; 4,9\} = 3734 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]} \right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]} \right)^2} = ((200 / 3191)^2 + (200 / 3734)^2)^{1/2} = 0,08245$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

0,08245 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max \left(\left| \frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z \right|; \left| \Phi_z \right|; \left| \frac{\Phi_p}{C_4} - 0,2 \cdot \Phi_z \right| \right) \right]^2 + \Phi_b^2} = \left(\{ \max(|0,8229 / 1 + 0,01400|; |0,01400|; |0,8229 / 1 - 0,2 \cdot 0,01400|) \}^2 + 0,08245^2 \right)^{1/2} = 0,841$$

Изн. № подл. 19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:	
					$M_y = M_L$	$= 200 \text{ Н м}$
					$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 0,214 + 0,1589 \cdot 0,214^2 + (-0,02142) \cdot 0,214^3 + 0,001035 \cdot 0,214^4 = 4,547$	
					Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,214$):	
$[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 164 \cdot (22 - 3)^2 \cdot 44 / 4 \cdot \max\{4,547; 4.9\} = 3191 \text{ Н м}$						
$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 5,733$						
Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,214$):						
$[M_y] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 164 \cdot (22 - 3)^2 \cdot 44 / 4 \cdot \max\{5,733; 4.9\} = 3734 \text{ Н м}$						
Прочность от действия изгибающих моментов:						
$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((200 / 3191)^2 + (200 / 3734)^2)^{1/2} = 0,08245$						
Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$						
$0,08245 \leq 1.0$. Условие прочности выполнено						
Прочность от совместного действия нагрузок:						
$\sqrt{\left[\max\left(\left \frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_x\right ; \left \Phi_x\right ; \left \frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_x\right \right)\right]^2 + \Phi_b^2} = ((\max(0,8229 / 1 + 0,01400 ; 0,01400 ; 0,8229 / 1 - 0.2 \cdot 0,01400)^2 + 0,08245^2)^{1/2} = 0,841$						
E-802.00.00.000 PP						
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист	
					111	

Если $F_z < 0$, то знак Φ_z меняется на противоположный.

Условие прочности:
$$\sqrt{\left[\max \left(\left| \frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z \right|, \left| \Phi_z \right|, \left| \frac{\Phi_p}{C_4} - 0,2 \cdot \Phi_z \right| \right) \right]^2 + \Phi_b^2} \leq 1$$

$0,841 \leq 1,0$. **Условие прочности выполнено**

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = \frac{2,311 \cdot (31 + 10) / (4 \cdot (10 - 3)) + 4 \cdot (200^2 + 200^2)^{1/2}}{(3,142 \cdot (31 + 10)^2 \cdot (10 - 3)) + 1500 / (3,142 \cdot (31 + 10) \cdot (10 - 3))} = 35,65 \text{ МПа}$$

Если F_z создает сжимающее напряжение, ее следует принять равной нулю.

Условие прочности: $\sigma_1 \leq [\sigma]_1$

$35,65 \text{ МПа} \leq 128,9 \text{ МПа}$. **Условие прочности выполнено**

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0 / 41,02 + (200^2 + 200^2)^{1/2} / 834,8 + |0| / 1,077 \cdot 10^5 = 0,3388$$

Если F_z растягивающая продольная сила, а p – внутреннее избыточное давление, то F_z и p следует принять равными нулю.

Условие устойчивости штуцера:
$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} \leq 1,0$$

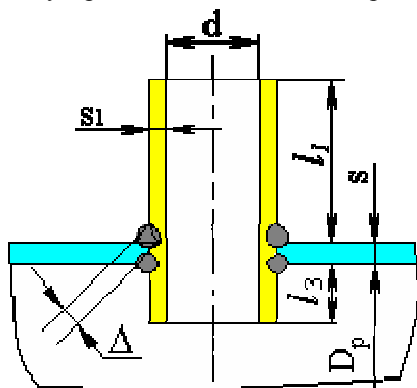
$0,3388 \leq 1,0$. **Условие устойчивости выполнено**

Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-802.00.00.000 PP					Лист
										112

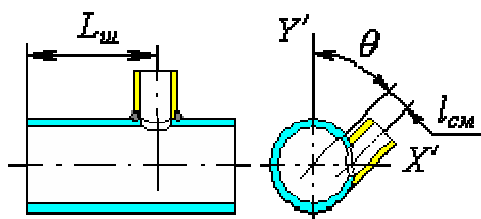
Штуцер X1-X4 DN32

Исходные данные

Элемент: Штуцер X1-X4 DN32
Условное обозначение (метка) Штуцер X2
Элемент, несущий штуцер: Обечайка цилиндрическая
Тип элемента, несущего штуцер: Обечайка цилиндрическая
Тип штуцера: Проходящий без укрепления



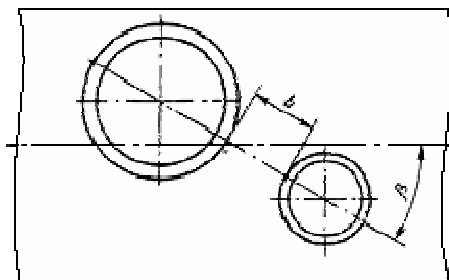
Материал несущего элемента: 09Г2С
Толщина стенки несущего элемента, s: 22 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, с: 3 мм
Материал штуцера: 09Г2С (КП245)
Внутренний диаметр штуцера, d: 31 мм
Толщина стенки штуцера, s₁: 10 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), с_s: 3 мм
Длина штуцера, l₁: 150 мм



Смещение штуцера, L_ш: 5200 мм
Смещение штуцера, l_{см}: (-300) мм
Полученный угол поворота штуцера, ϑ : 254,5 °
Полученный угол наклона штуцера, γ : (-15,51) °
Полученный угол наклона штуцера, ω : (-90) °
Длина внутр. части штуцера, l₃: 0 мм

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19810.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-802.00.00.000 PP				Лист
				113

Прибавка на коррозию, c_{s1} : 0 мм
 Расчётные параметры размещения штуцера:
 Ближайший штуцер



Название штуцера: Штуцер У1-У4 DN50

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b : 240,5 мм

Угол β : 0 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$\phi_1 = 1$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$\phi = 1$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 2200$ мм

Расчёт в рабочих условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T : 210 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, p : 2,302 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 210$ °С (рабочие условия):

$[\sigma] = 164$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 210 °С:

$E = 1,8 \cdot 10^5$ МПа

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре $T = 210$ °С (рабочие условия):

$[\sigma]_1 = \eta \cdot \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B; R_{m/10n/t} / n_D; R_{p1,0/10n/t} / n_P) = 1 \cdot \min(193,4 / 1,5; 440 / 2,4; - / -; - / -) = 128,9$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 210 °С:

$E_1 = 1,8 \cdot 10^5$ МПа

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma] \cdot \phi_1 - p} = 2,302 \cdot (31 + 2 \cdot 3) / (2 \cdot 128,9 \cdot 1 - 2,302) = 0,3333 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19810.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-802.00.00.000 PP				Лист
				114

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 128,9 \cdot 1 \cdot (10 - 3) / (31 + 10 + 3) = 41,02 \text{ МПа}$$

$$41,02 \text{ МПа} \geq 2,302 \text{ МПа}$$

Заключение: Условие прочности и устойчивости выполнено

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

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

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 15,55 \text{ mm}$$

Длина дуги отверстия, вырезаемого штуцером:

$$t = 52,93 \text{ MM}$$

Расчётный диаметр отверстия (ось штуцера лежит в плоскости поперечного сечения обечайки):

$$d_p = \max\{d; 0.5 \cdot t\} + 2 \cdot c_s = (\max\{31; 0.5 \cdot 52,93\} + 2 \cdot 3) = 37 \text{ mm}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((22 - 3) / 15,55 - 0,8) \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 172,6 \text{ mm}$$

Т.к. $d_p < d_0$ - **Расчет укрепления одиночного отверстия от действия внутреннего избыточного давления проводить не требуется**

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1.25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 150; 1.25 \cdot ((31 + 2 \cdot 3) \cdot (10 - 3))^{1/2} \} = 20,12 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений:

- для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 128,9 / 164 \} = 0,786$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left[l_3; \quad 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right] = \min \{ 0; 0.5 \cdot ((31 + 2 \cdot 3) \cdot (10 - 3 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ mm}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 204,5 \text{ mm}$$

Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (Днище эллиптическое (левое)):

$$L_k = 834,5 \text{ mm}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_{\text{p}} = L_{\text{p}} = 204,5 \text{ mm}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{op} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 81,78 \text{ mm}$$

$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}} \right\}$$

$$= \min\{1; [1 + (20,12 * (10 - 3) * 0,786 + 0 * 0 * 0 + 0 * (10 - 3 - 0) * 0,786) / (204,5 * (22 - 3))] / [1 + 0,5 * (37 - 81,78) / 204,5 + 1 * (31 + 2 * 3) / 2200 * 1 / 1 * 20,12 / 204,5]\} = \mathbf{1,153}$$

$$= 1$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
19810.4					E-802.00.00.000 PP	115

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
19810.4					E-802.00.00.000 PP	115

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
19810.4					E-802.00.00.000 PP	115

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
19810.4					E-802.00.00.000 PP	115

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
19810.4					E-802.00.00.000 PP	115

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
19810.4					E-802.00.00.000 PP	115

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
19810.4					E-802.00.00.000 PP	115

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
19810.4					E-802.00.00.000 PP	115

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
19810.4					E-802.00.00.000 PP	115

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
19810.4					E-802.00.00.000 PP	115

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
19810.4					E-802.00.00.000 PP	115

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
19810.4					E-802.00.00.000 PP	115

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
19810.4					E-802.00.00.000 PP	115

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
19810.4					E-802.00.00.000 PP	115

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
19810.4					E-802.00.00.000 PP	115

Изм.	Лист	№ доку
------	------	--------

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 3) \cdot 1 \cdot 164 \cdot 1 / [2200 + (22 - 3) \cdot 1] = 2,808 \text{ МПа}$$

Условие взаимного влияния штуцеров

Если расстояние между наружными поверхностями ближайших штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} + (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 408,9 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, требуется расчёт укреплений с учетом взаимного влияния отверстий.

$$K_3 = \frac{1 + \cos^2 \beta}{2} = [1 + \cos^2(0)] / 2 = 1$$

$$V_1 = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p}' \cdot (s_1' - c_1') \cdot \chi_1' + l_{2p}' \cdot s_2' \cdot \chi_2' + l_{3p}' \cdot (s_3' - c_{s1}') \cdot \chi_3' + l_{1p}'' \cdot (s_1'' - c_s) \cdot \chi_{11}'' + l_{2p}'' \cdot s_2'' \cdot \chi_2'' + l_{3p}'' \cdot (s_3'' - c_{s1}'') \cdot \chi_{11}''}{b \cdot (s - c)} \right. \\ \left. K_3 \left(0,8 + \frac{d_p' + d_p''}{2 \cdot b} \right) + K_1 \left(\frac{d' + 2 \cdot c_s'}{D_p'} \cdot \frac{\varphi'}{\varphi_1'} \cdot \frac{l_{1p}'}{b} + \frac{d'' + 2 \cdot c_s''}{D_p''} \cdot \frac{\varphi''}{\varphi_1''} \cdot \frac{l_{1p}''}{b} \right) \right\}$$

$$= \min \{ 1; (1 + [(20,12 \cdot (10 - 3) \cdot 0,786 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 3 - 0) \cdot 0,786 + 22,53 \cdot (10 - 4,25) \cdot 0,8963 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 4,25 - 0) \cdot 0,8963) / (240,5 \cdot (22 - 3))] / (1 \cdot (0,8 + (37 + 56,5) / (2 \cdot 240,5) + 1 \cdot [(31 + 2 \cdot 3) / 2200 \cdot 1 / 1 \cdot 20,12 / 240,5 + [(48 + 2 \cdot 4,25) / 2200 \cdot 1 / 1 \cdot 22,53 / 240,5])]) = 1,052 \}$$

$$= 1$$

$$[p]_k = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{0,5 \cdot (D_p' + D_p'') + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 3) \cdot 1 \cdot 164 / [0,5 \cdot (2200 + 2200) + (22 - 3) \cdot 1] \cdot 1 = 2,808 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление $[p] = \min\{ 2,808; 2,808 \}$ МПа

2,808 МПа \geq 2,302 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5 \cdot (d_p - d_{0p}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (37 - 81,78) \cdot 15,55 = (-0,3481 \cdot 10^{-3}) \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

$$A_a = l_{1p} \cdot (s_1 - s_{1p} - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + l_p \cdot (s - s_p - c)$$

$$= 20,12 \cdot (10 - 0,3333 - 3) \cdot 0,786 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 3 - 0) \cdot 0,786 + 204,5 \cdot (22 - 15,55 - 3)$$

$$= 0,8111 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

$$A_r = (-0,3481 \cdot 10^{-3}) \text{ м}^2 \leq 0,8111 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

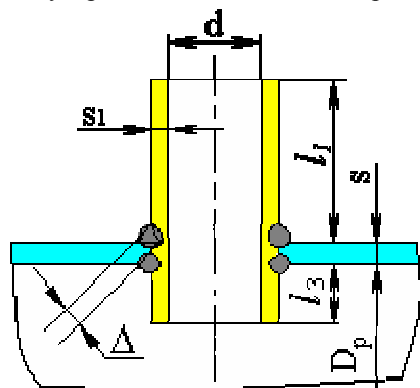
Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата			
		Взам. инв. №			
		Инов. № дубл.			
		Подпись и дата			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-802.00.00.000 PP
					Лист
					116

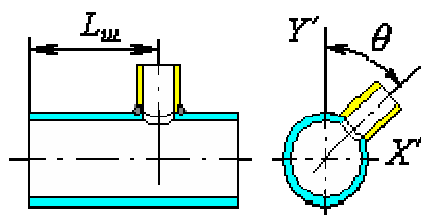
Штуцер Л DN20

Исходные данные

Элемент: Штуцер Л DN20
Условное обозначение (метка) Штуцер Л
Элемент, несущий штуцер: Обечайка цилиндрическая
Тип элемента, несущего штуцер: Обечайка цилиндрическая
Тип штуцера: Проходящий без укрепления

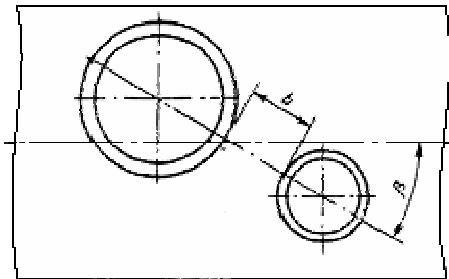


Материал несущего элемента: 09Г2С
Толщина стенки несущего элемента, s: 22 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, с: 3 мм
Материал штуцера: 09Г2С (КП245)
Внутренний диаметр штуцера, d: 18 мм
Толщина стенки штуцера, s₁: 10 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), с_s: 3 мм
Длина штуцера, l₁: 150 мм



Смещение штуцера, L_ш: 1250 мм
Угол поворота штуцера, ϑ: 135 °
Длина внутр. части штуцера, l₃: 0 мм
Прибавка на коррозию, с_{s1}: 0 мм
Расчётные параметры размещения штуцера:
Ближайший штуцер

Изнв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изнв. № дубл.	Подпись и дата					
19810.4									
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата					
					E-802.00.00.000 PP				Лист
									117



Название штуцера: -Штуцер Б1 DN200

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 1191 мм

Угол β : 84,49 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$\phi_1 = 1$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$\phi = 1$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 2200 \text{ мм}$

Расчёт в рабочих условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 210 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 2,308 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 210 °C (рабочие условия):

$[\sigma] = 164 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 210 °C:

$E = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 210 °C (рабочие условия):

$[\sigma]_1 = \eta \cdot \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B; R_{m/10^{n/t}} / n_D; R_{p1,0/10^{n/t}} / n_n) = 1 \cdot \min\{193,4 / 1,5; 440 / 2,4; - / -; - / -\} = 128,9 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 210 °C:

$E_1 = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \phi_1 - p} = 2,308 \cdot (18 + 2 \cdot 3) / (2 \cdot 128,9 \cdot 1 - 2,308) = 0,2168 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \phi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 128,9 \cdot 1 \cdot (10 - 3) / (18 + 10 + 3) = 58,22 \text{ МПа}$$

58,22 МПа \geq 2,308 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19810.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-802.00.00.000 PP				Лист
				118

$$D_p = D = 2200 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 15,59 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия (ось штуцера совпадает с нормалью к поверхности в центре отверстия):

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 18 + 2 \cdot 3 = 24 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((22 - 3) / 15,59 - 0,8) \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 171,3 \text{ мм}$$

Т.к. $d_p < d_0$ - **Расчет укрепления одиночного отверстия от действия внутреннего избыточного давления проводить не требуется**

Условие взаимного влияния штуцеров

Если расстояние между наружными поверхностями ближайших штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p^I \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p^{II} \cdot (s - c)} = (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} + (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 408,9 \text{ мм}$$

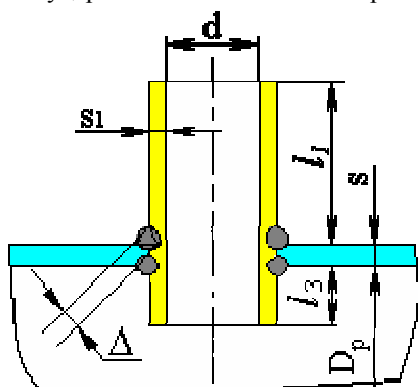
Условие выполнено - Отверстие считается одиночным

Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата		Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-802.00.00.000 PP		Лист
							119

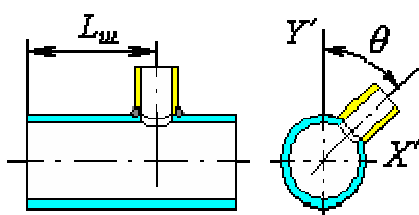
Штуцер М, Т DN20

Исходные данные

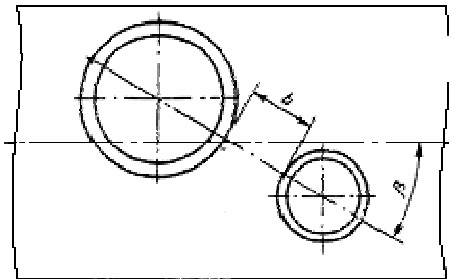
Элемент:	Штуцер М, Т DN20
Условное обозначение (метка)	Штуцер М
Элемент, несущий штуцер:	Обечайка цилиндрическая
Тип элемента, несущего штуцер:	Обечайка цилиндрическая
Тип штуцера:	Проходящий без укрепления



Материал несущего элемента:	09Г2С
Толщина стенки несущего элемента, s:	22 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, с:	3 мм
Материал штуцера:	09Г2С (КП245)
Внутренний диаметр штуцера, d:	18 мм
Толщина стенки штуцера, s ₁ :	10 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), с _s :	3 мм
Длина штуцера, l ₁ :	150 мм



Смещение штуцера, $L_{шт}$: 1100 мм
 Угол поворота штуцера, ϑ : 0 °
 Длина внутр. части штуцера, l_3 : 0 мм
 Прибавка на коррозию, c_{s1} : 0 мм
 Расчётные параметры размещения штуцера:
 Ближайший штуцер



Название штуцера: -Штуцер С1 DN80

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 281 мм

Угол β: 180 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$$\varphi_1 = 1$$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$$\varphi = 1$$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 2200 \text{ мм}$$

Расчёт в рабочих условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 210 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 2,3 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 210 °C (рабочие условия):

$$[\sigma] = 164 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 210 °C:

$$E = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 210 °C (рабочие условия):

$$[\sigma]_1 = \eta \cdot \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B; R_{m/10n/t} / n_D; R_{p1,0/10n/t} / n_n) = 1 \cdot \min\{193,4 / 1,5; 440 / 2,4; - / -; - / -\} = 128,9 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 210 °C:

$$E_1 = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 2,3 \cdot (18 + 2 \cdot 3) / (2 \cdot 128,9 \cdot 1 - 2,3) = 0,216 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 128,9 \cdot 1 \cdot (10 - 3) / (18 + 10 + 3) = 58,22 \text{ МПа}$$

$$58,22 \text{ МПа} \geq 2,3 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19810.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-802.00.00.000 PP				Лист
				121

$$D_p = D = 2200 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 15,54 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия (ось штуцера совпадает с нормалью к поверхности в центре отверстия):

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 18 + 2 \cdot 3 = 24 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((22 - 3) / 15,54 - 0,8) \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 173 \text{ мм}$$

Т.к. $d_p < d_0$ - **Расчет укрепления одиночного отверстия от действия внутреннего избыточного давления проводить не требуется**

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 150; 1,25 \cdot ((18 + 2 \cdot 3) \cdot (10 - 3))^{1/2} \} = 16,2 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений:

- для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 128,9 / 164 \} = 0,786$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((18 + 2 \cdot 3) \cdot (10 - 3 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 204,5 \text{ мм}$$

Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (Днище эллиптическое (правое)):

$$L_k = 1141 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 204,5 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{op} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 81,78 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (16,2 \cdot (10 - 3) \cdot 0,786 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 3 - 0) \cdot 0,786) / (204,5 \cdot (22 - 3))] / [1 + 0,5 \cdot (24 - 81,78) / 204,5 + 1 \cdot (18 + 2 \cdot 3) / 2200 \cdot 1 / 1 \cdot 16,2 / 204,5] \} = 1,19$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 3) \cdot 1 \cdot 164 \cdot 1 / [2200 + (22 - 3) \cdot 1] = 2,808 \text{ МПа}$$

Условие взаимного влияния штуцеров

Если расстояние между наружными поверхностями ближайших штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} + (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 408,9 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, требуется расчёт укреплений с учетом взаимного влияния отверстий.

Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	тическое (правое)):
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$L_k = 1141 \text{ мм}$
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Расчётная ширина зоны укрепления:
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$l_p = L_0 = 204,5 \text{ мм}$
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$d_{op} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 81,78 \text{ мм}$
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_p \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_p}{l_p}} \right\}$
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$= \min \{ 1; [1 + (16,2 \cdot (10 - 3) \cdot 0,786 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 3 - 0) \cdot 0,786) / (204,5 \cdot (22 - 3))] / [1 + 0.5 \cdot (24 - 81,78) / 204,5 + 1 \cdot (18 + 2 \cdot 3) / 2200 \cdot 1 / 1 \cdot 16,2 / 204,5] = 1,19 \}$
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$= 1$
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 3) \cdot 1 \cdot 164 \cdot 1 / [2200 + (22 - 3) \cdot 1] = 2,808 \text{ МПа}$
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Условие взаимного влияния штуцеров
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Если расстояние между наружными поверхностями ближайших штуцеров удовлетворяет условию:
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} + (2200 \cdot (22 - 3))^{1/2} = 408,9 \text{ мм}$
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Условие не выполнено, требуется расчёт укреплений с учетом взаимного влияния отверстий.
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19810.4					

$$K_3 = \frac{1 + \cos^2 \beta}{2} = [1 + \cos^2(180)] / 2 = 1$$

$$V_1 = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l'_1 \cdot (s'_1 - c'_s) \cdot \chi'_1 + l'_2 \cdot s'_2 \cdot \chi'_2 + l'_3 \cdot (s'_3 - c'_s - c'_{s1}) \cdot \chi'_3 + l'_4 \cdot (s''_1 - c_s) \cdot \chi''_1 + l''_2 \cdot s''_2 \cdot \chi''_2 + l''_3 \cdot (s''_3 - c'_s - c'_{s1}) \cdot \chi''_3}{b \cdot (s - c)}}{K_3 \left(0.8 + \frac{d'_F + d''_F}{2 \cdot b} \right) + K_1 \left(\frac{d'_F + 2 \cdot c'_s}{D'_p} \cdot \frac{\varphi'_r}{\varphi'_1} \cdot \frac{l'_p}{b} + \frac{d''_F + 2 \cdot c''_s}{D''_p} \cdot \frac{\varphi''_r}{\varphi''_1} \cdot \frac{l''_p}{b} \right)} \right\}$$

$$= \min \{ 1; (1 + [(16,2 * (10 - 3) * 0,786 + 0 * 0 * 0 + 0 * (10 - 3 - 0) * 0,786 + 32,4 * (11 - 3) * 0,786 + 0 * 0 * 0 + 0 * (11 - 3 - 0) * 0,786) / (281 * (22 - 3))]) / (1 * (0.8 + (24 + 84) / (2 * 281) + 1 * [(18 + 2 * 3) / 2200 * 1 / 1 * 16,2 / 281 + [(78 + 2 * 3) / 2200 * 1 / 1 * 32,4 / 281]])) \}$$

$$= 1,058 \}$$

$$= 1$$

$$[p]_b = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{0.5 \cdot (D'_p + D''_p) + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2 * 1 * (22 - 3) * 1 * 164 / [0.5 * (2200 + 2200) + (22 - 3) * 1] * 1 = 2,808 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление $[p] = \min \{ 2,808; 2,808 \}$ МПа

2,808 МПа \geq 2,3 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0.5 \cdot (d_p - d_{0p}) \cdot s_p = 0.5 * (24 - 81,78) * 15,54 = (-0,4488 \cdot 10^{-3}) \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

$$A_a = l_p \cdot (s_1 - s_p - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + l_p \cdot (s - s_p - c)$$

$$= 16,2 * (10 - 0,216 - 3) * 0,786 + 0 * 0 * 0 + 0 * (10 - 3 - 0) * 0,786 + 204,5 * (22 - 15,54 - 3)$$

$$= 0,7947 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

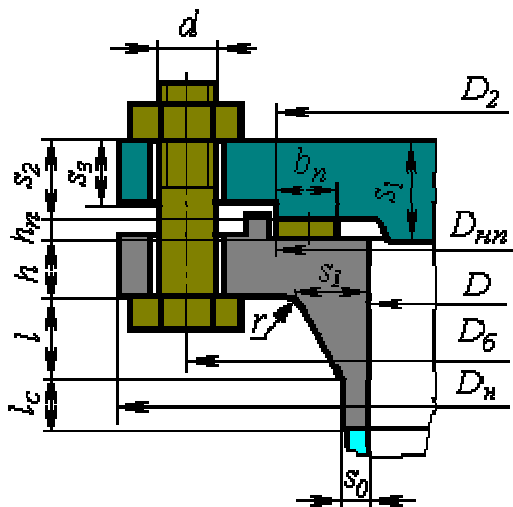
$$A_r = (-0,4488 \cdot 10^{-3}) \text{ м}^2 \leq 0,7947 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инв. № подл.	19810.4	Подпись и дата		Инв. № дубл.		Подпись и дата	
		Взам. инв. №					
		Подпись и дата					

Крышка DN600 с фланцем

Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.4-2007 и ГОСТ Р 52857.2-2007



Исходные данные

Параметры крышки:

Материал:	09Г2С
Толщина стенки, s_1 :	45 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c_1 :	3 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, c_2 :	0 мм
Прибавка технологическая, c_3 :	0 мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, c :	3 мм
Толщина в месте прокладки, s_2 :	41 мм
Толщина вне уплотнения, s_3 :	35 мм
Наименьший диаметр наружной утоненной части, D_2 :	663 мм
Наружный диаметр крышки, D_n :	740 мм

Параметры фланца:

Тип фланца:	Приварные встык
Исполнение фланца:	Выступ-впадина
Диаметр болтовой окружности, D_6 :	700 мм

Материал фланца:	09Г2С (КП245)
Смежный элемент:	Штуцер П DN600
Материал смежного элемента:	09Г2С
Толщина стенки смежного элемента:	22 мм
Внутренний диаметр фланца, D:	600 мм
Наружный диаметр фланца, D _н :	740 мм
Толщина фланца, h:	45 мм
Сумма прибавок, с:	3 мм
Длина конической части втулки, l:	36 мм

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c_1 :	0 мм
					Прибавка для компенсации минусового допуска, c_2 :	0 мм
19810.4					Прибавка технологическая, c_3 :	0 мм
					Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, c :	3 мм
					Толщина в месте прокладки, s_2 :	41 мм
					Толщина вне уплотнения, s_3 :	35 мм
					Наименьший диаметр наружной утоненной части, D_2 :	663 мм
					Наружный диаметр крышки, D_H :	740 мм
					Параметры фланца:	
					Тип фланца:	Приварные встык
					Исполнение фланца:	Выступ-впадина
					Диаметр болтовой окружности, D_6 : 700 мм	
					Материал фланца:	09Г2С (КП245)
					Смежный элемент:	Штуцер П DN600
					Материал смежного элемента:	09Г2С
					Толщина стенки смежного элемента:	22 мм
					Внутренний диаметр фланца, D :	600 мм
					Наружный диаметр фланца, D_H :	740 мм
					Толщина фланца, h :	45 мм
					Сумма прибавок, c :	3 мм
					Длина конической части втулки, l :	36 мм
					E-802.00.00.000 PP	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 210 °С:
 $E_{\phi} = 1,8 \cdot 10^5$ МПа
Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 210 °С:
 $\alpha_{\phi} = 0,127 \cdot 10^{-4}$ °С
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 20 °С (рабочие условия):
 $[\sigma]_{\phi}^{20} = \eta \cdot \min(R_{eL} / n_T; R_{mT} / n_B; R_{m/10nT} / n_d; R_{p1.0/10nT} / n_n) = 1 \cdot \min\{245 / 1,5; 440 / 2,4; - / -; - / -\} = 163,3$ МПа
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 20 °С:
 $E_{\phi}^{20} = 1,99 \cdot 10^5$ МПа

Характеристики прокладки:

Тип и материал прокладки	Коэффициент m	Удельное давление обжатия q _{обжс} , МПа	Допускаемое удельное давление [q], МПа	Коэффициент обжатия K	Условный модуль сжатия E _n , МПа
Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали	3	69	-	-	-

Эффективная ширина прокладки:
b₀ = 12 мм

Примечание:

$$\begin{cases} b_0 = b_{np} & \text{при } b_{np} \leq 15,0 \text{ мм} \\ b_0 = 3,8 \cdot \sqrt{b_{np}} & \text{при } b_{np} > 15,0 \text{ мм} \end{cases}$$

Рабочий наружный диаметр прокладки:

$D_{np} = 663$ мм

Средний эффективный диаметр прокладки:

$D_{\text{ср}} = D_{np} - b_0 = 663 - 12 = 651$ мм

Для металлических и асбометаллических прокладок $y_n = 0$.

Расчётные параметры болтов (шпилек):

Рабочая длина болта (шпильки):

$L_{\text{б0}} = h + s_2 + h_{\text{ш}} = 41 + 45 + 4,5 = 90,5$ мм

Площадь сечения шпильки (по внутреннему диаметру резьбы):

$f_6 = 0,3027 \cdot 10^{-3}$ м²

Эффективная длина шпильки:

$L_6 = L_{\text{б0}} + 0,56 \cdot d = 90,5 + 0,56 \cdot 23 = 103,4$ мм

Податливость шпилек:

$y_6 = \frac{L_6}{E_6^{20} \cdot f_6 \cdot n} = 103,4 / (2,18 \cdot 10^5 \cdot 0,3027 \cdot 10^{-3} \cdot 32) = 0,4895 \cdot 10^{-7}$ мм/Н

Расчётные параметры крышки:

$K_{np} = \frac{D_{\text{к}}}{D_{\text{ср}}} = 740 / 651 = 1,137$

Изн. № подл.	19810.4	Подпись и дата		Взам. инв. №		Изн. № дубл.		Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-802.00.00.000 PP				Лист
									126

$$\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (2 - 1) * 0,4243 / (0,4243 + (1 + 2) / 4) = 1,361$$

Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:

$$s_3 = \kappa \cdot (s_0 - c) = 1,361 * (12 - 0) = 16,34 \text{ мм}$$

$$e = 0,5 \cdot (D_{\text{вн}} - (D + 2 \cdot e) - s_3) = 0,5 * (651 - (600 + 2 * 0) - 16,34) = 17,33 \text{ мм}$$

Расчёт нагрузок:

Равнодействующая давления:

$$Q_d = 0,785 \cdot D_{\text{вн}}^2 \cdot p = 0,785 * 651^2 * 2,302 = 7,657 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Усилие на прокладке в рабочих условиях, необходимое для обеспечения герметичности:

$$R_n = \pi \cdot D_{\text{вн}} \cdot b_0 \cdot m \cdot |p| = 3,142 * 651 * 12 * 3 * |2,302| = 1,695 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке:

$$P_{\text{ожж}} = 0,5 \cdot \pi \cdot D_{\text{вн}} \cdot b_0 \cdot q_{\text{ожж}} = 0,5 * 3,142 * 651 * 12 * 69 = 8,467 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

$$\eta = y_n + y_e + y'_f \cdot b'^2 + y''_f \cdot b''^2 = 0 + 0,4895 \cdot 10^{-7} + 0,3879 \cdot 10^{-5} * 24,5^2 + 0,5514 \cdot 10^{-5} * 24,5^2 = 0,1474 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения с крышкой, нагруженного внутренним давлением:

$$\alpha = 1 - \frac{y_n - (y_f \cdot e + y_{fp} \cdot b) \cdot b}{\eta} = 1 - (0 - (0,5514 \cdot 10^{-5} * 17,33 + 0,3879 \cdot 10^{-5} * 24,5) * 24,5) / 0,1474 \cdot 10^{-6} = 1,553$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях:

$$P_{\text{б1}} = \alpha \cdot Q_d + R_n = 1,553 * 7,657 \cdot 10^5 + 1,695 \cdot 10^5 = 1,359 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или сечению наименьшего диаметра:

$$A_6 = n \cdot f_6 = 32 * 0,3027 \cdot 10^{-3} = 0,009688 \text{ м}^2$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов:

$$P_{\text{б2}} = \max \{ P_{\text{ожж}}; 0,4 \cdot A_6 \cdot [\sigma]_6^{20} \} = \max \{ 8,467 \cdot 10^5; 0,4 * 0,009688 * 230 = 8,913 \cdot 10^5 \} = 8,913 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Расчёт без учета стесненности температурных деформаций

Расчёт болтов(шпилек):

Коэффициент увеличения допускаемых напряжений при затяжке: $\xi = 1,2$

Коэффициент условий работы: $K_{yp} = 1$

Коэффициент условий затяжки: $K_{y3} = 1$

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при затяжке:

$$[\sigma]_6^m = \xi \cdot K_{yp} \cdot K_{y3} \cdot K_{yt} \cdot [\sigma]_6^{20} = 1,2 * 1 * 1 * 1 * 230 = 276 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в условиях затяжки:

$$P_6^m = \max \{ P_{\text{б1}}; P_{\text{б2}} \} = \max \{ 1,359 \cdot 10^6; 8,913 \cdot 10^5 \} = 1,359 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{\text{б1}} = \frac{P_6^m}{A_6} \leq [\sigma]_6^m$$

$$\sigma_{\text{б1}} = \frac{P_6^m}{A_6} = 1,359 \cdot 10^6 / 0,009688 = 140,2 \text{ МПа}$$

Инов. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-802.00.00.000 PP
					Лист
					128

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при $\sigma_{61} \geq 120$ МПа выбирается по рис. Л.1 ГОСТ 52857.4-2007:

$$M_{кр} = 216,5 \text{ Н м}$$

При наличии смазки величина $M_{кр}$ снижается на 25% и составляет $0.75 \cdot M_{кр} = 162,4 \text{ Н м}$

$140,2 \text{ МПа} \leq 276 \text{ МПа}$, **Условие прочности выполнено**

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при рабочих условиях:

$$[\sigma]_6^p = K_{yp} \cdot K_{ya} \cdot K_{yt} \cdot [\sigma]_6 = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 224,5 = 224,5 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в рабочих условиях:

$$P_6^p = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot Q_H = 1,359 \cdot 10^6 + (1 - 1,553) \cdot 7,657 \cdot 10^5 = 9,352 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности в рабочих условиях:

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^p}{A_6} \leq [\sigma]_6^p$$

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^p}{A_6} = 9,352 \cdot 10^5 / 0,009688 = 96,53 \text{ МПа}$$

$96,53 \text{ МПа} \leq 224,5 \text{ МПа}$, **Условие прочности выполнено**

Болтовая нагрузка в условиях затяжки:

$$P_6^M = \max\{P_{61}; P_{62}\} = \max\{1,359 \cdot 10^6; 8,913 \cdot 10^5\} = 1,359 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} \leq [\sigma]_6^M$$

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} = 1,359 \cdot 10^6 / 0,009688 = 140,2 \text{ МПа}$$

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при $\sigma_{61} \geq 120$ МПа выбирается по рис. Л.1 ГОСТ 52857.4-2007:

$$M_{кр} = 216,5 \text{ Н м}$$

При наличии смазки величина $M_{кр}$ снижается на 25% и составляет $0.75 \cdot M_{кр} = 162,4 \text{ Н м}$

Расчёт ответного фланца:

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:

$$C_F = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\pi \cdot D_6}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}}} \right\} = \max \{ 1; (3,142 \cdot 700 / 32 / (2 \cdot 23 + 6 \cdot 45 / (3 + 0.5)))^{1/2} \} = 1$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке:

$$M^M = C_F \cdot P_6^M \cdot b = 1 \cdot 1,359 \cdot 10^6 \cdot 24,5 = 3,329 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

$$D^* = (D + 2 \cdot c)_{\text{при } (D + 2 \cdot c) \geq 20 \cdot (s_1 - c)} = 600 + 2 \cdot 0 \text{ при } (600 + 2 \cdot 0) \geq 20 \cdot (24 - 0) = 600 \text{ мм}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении s_1 :

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 3,329 \cdot 10^4 / (0,9746 \cdot (24 - 3)^2 \cdot 600) = 129,1 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_R^M = \frac{1,33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M^M = (1,33 \cdot 0,8426 \cdot 45 + 84,85) / (0,9746 \cdot 45^2 \cdot 84,85 \cdot 600) \cdot 3,329 \cdot 10^4 = 44,82 \text{ МПа}$$

$$\beta_F = \frac{1}{K - 1} \cdot \left(0,69 + 5,72 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (1,233 - 1) \cdot (0,69 + 5,72 \cdot 1,233^2 \cdot \lg 1,233 / (1,233^2 - 1)) = 9,475$$

Инва. № подл.	19810.4	Подпись и дата			
		Инва. № дубл.			
		Взам. инв. №			
		Подпись и дата			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-802.00.00.000 PP

$$\beta_z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (1,233^2 + 1) / (1,233^2 - 1) = 4,838$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_z \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_z \cdot \sigma_R^M = 9,475 \cdot 3,329 \cdot 10^4 / (45^2 \cdot 600) - 4,838 \cdot 44,82 = 42,75 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении s_1 (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\text{н}}^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ |129,1 + 44,82|; |129,1 + 42,75| \} = 173,9 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1):

$$[\sigma]_{\text{н}}^{20} = 1,5 \cdot [\sigma]_{\text{б}}^{20} = 1,5 \cdot 163,3 = 245 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_{\text{н}}^{20} = 1 \cdot 245 = 245 \text{ МПа}$$

173,9 МПа \leq 245 МПа, **Условие прочности выполнено**

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \left\{ P_{\text{б}}^P \cdot b + Q_{\text{ж}} \cdot e; |Q_{\text{ж}}| \cdot e \right\} = 1 \cdot \max \{ 9,352 \cdot 10^5 \cdot 24,5 + 7,657 \cdot 10^5 \cdot 17,33; |7,657 \cdot 10^5| \cdot 17,33 \} = 3,618 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении s_1 :

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 3,618 \cdot 10^4 / (0,9746 \cdot (24 - 3)^2 \cdot 600) = 140,3 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях:

$$\sigma_R^P = \frac{1,33 \cdot \beta_z \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M^P = (1,33 \cdot 0,8426 \cdot 45 + 84,85) / (0,9746 \cdot 45^2 \cdot 84,85 \cdot 600) \cdot 3,618 \cdot 10^4 = 48,72 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях:

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_z \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_z \cdot \sigma_R^P = 9,475 \cdot 3,618 \cdot 10^4 / (45^2 \cdot 600) - 4,838 \cdot 48,72 = 46,47 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении s_1 :

$$\sigma_{\text{н}}^P = \frac{Q_{\text{ж}}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = 7,657 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot (600 + 24) \cdot (24 - 3)) = 18,6 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении s_1 :

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{н}}^P + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{н}}^P + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{н}}^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\text{н}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{н}}^P + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{н}}^P + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{н}}^P \right| \right\} = \max \{ |140,3 - 18,6 + 48,72|; |140,3 - 18,6 + 46,47|; |140,3 + 18,6| \} = 170,4 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1):

$$[\sigma]_{\text{н}} = 1,5 \cdot [\sigma]_{\text{б}} = 1,5 \cdot 128,9 = 193,4 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_{\text{н}} = 1 \cdot 193,4 = 193,4 \text{ МПа}$$

170,4 МПа \leq 193,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$f = \max \left\{ \frac{C_{36}}{1 + A}; 1,0 \right\} = \max \{ 3,018 / (1 + 1); 1,0 \} = 1,509$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении s_0 :

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1,509 \cdot 129,1 = 194,8 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении s_0 (п. 8.5.2):

Инв. № подл.	19810.4	Подпись и дата					Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p>Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях:</p> $\sigma_{\Gamma}^P = \frac{\beta_{\Gamma} \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_z \cdot \sigma_K^P = 9,475 \cdot 3,618 \cdot 10^4 / (45^2 \cdot 600) - 4,838 \cdot 48,72 = 46,47 \text{ МПа}$ <p>Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении s_1:</p> $\sigma_{\text{мем}}^P = \frac{Q_{\pi}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = 7,657 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot (600 + 24) \cdot (24 - 3)) = 18,6 \text{ МПа}$ <p>Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении s_1:</p> $\max \left\{ \left \sigma_{\Gamma}^P - \sigma_{\text{мем}}^P + \sigma_K^P \right ; \left \sigma_{\Gamma}^P - \sigma_{\text{мем}}^P + \sigma_{\Gamma}^P \right ; \left \sigma_{\Gamma}^P + \sigma_{\text{мем}}^P \right \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}$ $\max \left\{ \left \sigma_{\Gamma}^P - \sigma_{\text{мем}}^P + \sigma_K^P \right ; \left \sigma_{\Gamma}^P - \sigma_{\text{мем}}^P + \sigma_{\Gamma}^P \right ; \left \sigma_{\Gamma}^P + \sigma_{\text{мем}}^P \right \right\} = \frac{\max\{ 140,3 - 18,6 + 48,72 ; 140,3 - 18,6 + 46,47 ; 140,3 + 18,6 \}}{18,6} = 170,4 \text{ МПа}$ <p>Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1):</p> $[\sigma]_{\text{м}} = 1,5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 1,5 \cdot 128,9 = 193,4 \text{ МПа}$ $K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}} = 1 \cdot 193,4 = 193,4 \text{ МПа}$ <p>170,4 МПа ≤ 193,4 МПа, Условие прочности выполнено</p> $f = \max \left\{ \frac{C_{36}}{1 + A}; 1,0 \right\} = \max\{3,018 / (1 + 1); 1,0\} = 1,509$ <p>Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении s_0:</p> $\sigma_0^M = f \cdot \sigma_{\Gamma}^M = 1,509 \cdot 129,1 = 194,8 \text{ МПа}$ <p>Условие статической прочности при затяжке в сечении s_0 (п. 8.5.2):</p>
		Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				

Е-802.00.00.000 PP

Лист130

Жёсткость фланца:

Угол поворота фланца в рабочих условиях:

$$\Theta = M^P \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E^{20}}{E} = 3,618 \cdot 10^4 * 0,5514 \cdot 10^{-5} * 1,99 \cdot 10^5 / 1,8 \cdot 10^5 = 0,2206^\circ$$

Допускаемый угол поворота фланца:

$$[\Theta] = 0,3939^\circ$$

Коэффициент увеличения допускаемого угла поворота фланцев: $K_{\Theta} = 1$

Условие выполнения жесткости фланцев:

$$\Theta \leq K_{\Theta} \cdot [\Theta] = 1 * 0,3939 = 0,3939^\circ$$

Условие жёсткости выполнено

Расчёт с учетом стесненности температурных деформаций

Расчёт болтов(шпилек):

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при затяжке:

$$[\sigma]_6^M = \xi \cdot K_{yp} \cdot K_{yz} \cdot K_{yt} \cdot [\sigma]_6^{20} = 1,2 * 1 * 1 * 1,3 * 230 = 358,8 \text{ МПа}$$

$$\gamma = \frac{1}{y_{\pi} + y_6 \cdot \frac{E_6^{20}}{E_6} + \left(y_{\Phi} \cdot \frac{E_{\Phi}^{20}}{E_{\Phi}} + y_{xp} \cdot \frac{E_{xp}^{20}}{E_{xp}} \right) \cdot b^2} = \frac{1 / (0 + 0,4895 \cdot 10^{-7} * 2,18 \cdot 10^5 / 2,077 \cdot 10^5 + (0,5514 \cdot 10^{-5} * 1,99 \cdot 10^5 / 1,8 \cdot 10^5 + 0,3879 \cdot 10^{-5} * 1,99 \cdot 10^5 / 1,8 \cdot 10^5) * 24,5^2)}{1,8 \cdot 10^5} = 6,244 \cdot 10^6 \text{ Н/мм}$$

Нагрузка от температурных деформаций:

$$Q_t = \gamma \cdot \left(\alpha'_{\Phi} \cdot h' \cdot (t_{\Phi 1} - 20^\circ \text{C}) + \alpha'_{\Phi} \cdot h'' \cdot (t_{\Phi 2} - 20^\circ \text{C}) - \alpha_6 \cdot (h' + h'') \cdot (t_6 - 20^\circ \text{C}) \right) = \frac{6,244 \cdot 10^6 * (0,1265 \cdot 10^{-4} * 41 * (210 - 20^\circ \text{C}) + 0,127 \cdot 10^{-4} * (210 - 20^\circ \text{C}) - 0,1333 \cdot 10^{-4} * (41 + 45) * (203,7 - 20^\circ \text{C}))}{45 * (210 - 20^\circ \text{C}) - 0,1333 \cdot 10^{-4} * (41 + 45) * (203,7 - 20^\circ \text{C})} = (-2,139 \cdot 10^4) \text{ Н}$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях:

$$P_{61} = \max \left\{ \begin{array}{l} \alpha \cdot Q_{\pi} + R_{\pi} \\ \alpha \cdot Q_{\pi} + R_{\pi} - Q_t \end{array} \right\} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,553 * 7,657 \cdot 10^5 + 1,695 \cdot 10^5 = 1,359 \cdot 10^6 \\ 1,553 * 7,657 \cdot 10^5 + 1,695 \cdot 10^5 - (-2,139 \cdot 10^4) = 1,38 \cdot 10^6 \end{array} \right\} = 1,38 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{61} = \frac{P_{61}^M}{A_6} \leq [\sigma]_6^M$$

$$\sigma_{61} = \frac{P_{61}^M}{A_6} = 1,38 \cdot 10^6 / 0,009688 = 142,5 \text{ МПа}$$

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при $\sigma_{61} \geq 120 \text{ МПа}$ выбирается по рис. Л.1 ГОСТ 52857.4-2007:

$M_{кр} = 219,9 \text{ Н м}$

При наличии смазки величина $M_{кр}$ снижается на 25% и составляет $0,75 * M_{кр} = 164,9 \text{ Н м}$

$142,5 \text{ МПа} \leq 358,8 \text{ МПа}$, **Условие прочности выполнено**

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при рабочих условиях:

$$[\sigma]_6^P = K_{yp} \cdot K_{yz} \cdot K_{yt} \cdot [\sigma]_6 = 1 * 1 * 1,3 * 224,5 = 291,9 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в рабочих условиях:

$$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot Q_{\pi} + Q_t = 1,38 \cdot 10^6 + (1 - 1,553) * 7,657 \cdot 10^5 + (-2,139 \cdot 10^4) = 9,352 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности в рабочих условиях:

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} \leq [\sigma]_6^P$$

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} = 9,352 \cdot 10^5 / 0,009688 = 96,53 \text{ МПа}$$

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19810.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-802.00.00.000 PP				Лист
				132

96,53 МПа ≤ 291,9 МПа, **Условие прочности выполнено**

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях:

$$P_{61} = \max \left\{ \begin{array}{l} \alpha \cdot Q_d + R_{\pi} \\ \alpha \cdot Q_d + R_{\pi} - Q_t \end{array} \right\} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,553 \cdot 7,657 \cdot 10^5 + 1,695 \cdot 10^5 = 1,359 \cdot 10^6 \\ 1,553 \cdot 7,657 \cdot 10^5 + 1,695 \cdot 10^5 - (-2,139 \cdot 10^4) = 1,38 \cdot 10^6 \end{array} \right\} = 1,38 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{61} = \frac{P_{61}^M}{A_6} \leq [\sigma]_6^M$$

$$\sigma_{61} = \frac{P_{61}^M}{A_6} = 1,38 \cdot 10^6 / 0,009688 = 142,5 \text{ МПа}$$

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при $\sigma_{61} \geq 120$ МПа выбирается по рис. Л.1 ГОСТ 52857.4-2007:

$M_{кр} = 219,9 \text{ Н м}$

При наличии смазки величина $M_{кр}$ снижается на 25% и составляет $0,75 \cdot M_{кр} = 164,9 \text{ Н м}$

Расчёт ответного фланца:

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке:

$$M^M = C_F \cdot P_{61}^M \cdot b = 1 \cdot 1,38 \cdot 10^6 \cdot 24,5 = 3,381 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении s_1 :

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 3,381 \cdot 10^4 / (0,9746 \cdot (24 - 3)^2 \cdot 600) = 131,1 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_R^M = \frac{1,33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M^M = (1,33 \cdot 0,8426 \cdot 45 + 84,85) / (0,9746 \cdot 45^2 \cdot 84,85 \cdot 600) \cdot 3,381 \cdot 10^4 = 45,52 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_F \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_F \cdot \sigma_R^M = 9,475 \cdot 3,381 \cdot 10^4 / (45^2 \cdot 600) - 4,838 \cdot 45,52 = 43,43 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении s_1 (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\pi}^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ |131,1 + 45,52|; |131,1 + 43,43| \} = 176,6 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1):

$$[\sigma]_{\pi}^{20} = 1,5 \cdot [\sigma]_0^{20} = 1,5 \cdot 163,3 = 245 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_{\pi}^{20} = 1,3 \cdot 245 = 318,5 \text{ МПа}$$

176,6 МПа ≤ 318,5 МПа, **Условие прочности выполнено**

Болтовая нагрузка в рабочих условиях:

$$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot Q_d + Q_t = 1,38 \cdot 10^6 + (1 - 1,553) \cdot 7,657 \cdot 10^5 + (-2,139 \cdot 10^4) = 9,352 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \left\{ P_6^P \cdot b + Q_d \cdot e; |Q_d| \cdot e \right\} = 1 \cdot \max \{ 9,352 \cdot 10^5 \cdot 24,5 + 7,657 \cdot 10^5 \cdot 17,33; |7,657 \cdot 10^5| \cdot 17,33 \} = 3,618 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении s_1 :

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 3,618 \cdot 10^4 / (0,9746 \cdot (24 - 3)^2 \cdot 600) = 140,3 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях:

$$\sigma_R^P = \frac{1,33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M^P = (1,33 \cdot 0,8426 \cdot 45 + 84,85) / (0,9746 \cdot 45^2 \cdot 84,85 \cdot 600) \cdot 3,618 \cdot 10^4 = 48,72 \text{ МПа}$$

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19810.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-802.00.00.000 PP				Лист
				133

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях:

$$\sigma_{\tau}^P = \frac{\beta_{\tau} \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_z \cdot \sigma_R^P = 9,475 \cdot 3,618 \cdot 10^4 / (45^2 \cdot 600) - 4,838 \cdot 48,72 = 46,47 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении s_1 :

$$\sigma_{1mm}^P = \frac{Q_{\pi}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = 7,657 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot (600 + 24) \cdot (24 - 3)) = 18,6 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении s_1 :

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^P + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^P + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\text{мк}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^P + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^P + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^P \right| \right\} = \frac{\max\{|140,3 - 18,6 + 48,72|; |140,3 - 18,6 + 46,47|; |140,3 + 18,6|\}}{18,6} = 170,4 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1):

$$[\sigma]_{\text{мк}} = 1,5 \cdot [\sigma]_{\Phi} = 1,5 \cdot 128,9 = 193,4 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_{\text{мк}} = 1,3 \cdot 193,4 = 251,4 \text{ МПа}$$

170,4 МПа ≤ 251,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении s_0 :

$$\sigma_0^{\pi} = f \cdot \sigma_1^{\pi} = 1,509 \cdot 131,1 = 197,9 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении s_0 (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^{\pi} \leq 1,3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1):

$$[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 3 \cdot 163,3 = 490 \text{ МПа}$$

$$1,3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1,3 \cdot 490 = 637 \text{ МПа}$$

197,9 МПа ≤ 637 МПа, **Условие прочности выполнено**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении s_0 :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1,509 \cdot 140,3 = 211,7 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении s_0 :

$$\sigma_{0mm}^P = \frac{Q_{\pi}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = 7,657 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot (600 + 12) \cdot (12 - 3)) = 44,25 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении s_0 :

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 2,302 \cdot 600 / (2 \cdot (12 - 3)) = 76,72 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении s_0 :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^P \right|; \left| 0,3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0,7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^P - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1,3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^P \right|; \left| 0,3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0,7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^P - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \frac{\max\{|211,7 \pm 44,25|; |0,3 \cdot 211,7 \pm 76,72|; |0,7 \cdot 211,7 \pm (44,25 - 76,72)|\}}{18,6} = 256 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_{\Phi} = 3 \cdot 128,9 = 386,7 \text{ МПа}$$

$$1,3 \cdot [\sigma]_R = 1,3 \cdot 386,7 = 502,7 \text{ МПа}$$

256 МПа ≤ 502,7 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении s_0 :

Изн. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Подпись и дата		
			Изн. № дубл.	Взам. изн. №	Изн. № подл.
Подпись и дата					
1.3 · [σ] _Р ²⁰ = 1.3 · 490 = 637 МПа			197,9 МПа ≤ 637 МПа, Условие прочности выполнено		
Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении s ₀ :			σ ₀ ^P = f · σ ₁ ^P = 1,509 · 140,3 = 211,7 МПа		
Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении s ₀ :			σ _{0mm} ^P = $\frac{Q_K}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)}$ = 7,657 · 10 ⁵ / (3,142 · (600 + 12) · (12 – 3)) = 44,25 МПа		
Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении s ₀ :			σ _{0mo} ^P = $\frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)}$ = 2,302 · 600 / (2 · (12 – 3)) = 76,72 МПа		
Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении s ₀ :			max { σ ₀ ^P ± σ _{0mm} ^P ; 0.3 · σ ₀ ^P ± σ _{0mo} ^P ; 0.7 · σ ₀ ^P ± (σ _{0mm} ^P – σ _{0mo} ^P) } ≤ 1.3 · [σ] _Р		
Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1):			max { σ ₀ ^P ± σ _{0mm} ^P ; 0.3 · σ ₀ ^P ± σ _{0mo} ^P ; 0.7 · σ ₀ ^P ± (σ _{0mm} ^P – σ _{0mo} ^P) } = $\frac{\max\{ 211,7 \pm 44,25\}; 0,3 \cdot 211,7 \pm 76,72\}; 0,7 \cdot 211,7 \pm (44,25 - 76,72) \}}{1} = 256 \text{ МПа}$		
[σ] _Р = 3 · [σ] _Ф = 3 · 128,9 = 386,7 МПа			1.3 · [σ] _Р = 1.3 · 386,7 = 502,7 МПа		
256 МПа ≤ 502,7 МПа, Условие прочности выполнено			Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении s ₀ :		
Изн. № подл.	19810.4	Подпись и дата	Изн. № дубл.	Взам. изн. №	Изн. № подл.
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Изн. № подл.
E-802.00.00.000 PP					Лист
					134

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^p \right|; \left| \sigma_{0mm}^p \right| \right\} \leq [\sigma]_ф$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^p \right|; \left| \sigma_{0mm}^p \right| \right\} = \max\{|76,72|; |44,25|\} = 76,72 \text{ МПа}$$

76,72 МПа ≤ 128,9 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^m \right|; \left| \sigma_T^m \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_ф^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^m \right|; \left| \sigma_T^m \right| \right\} = \max\{|45,52|; |43,43|\} = 45,52 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_ф^{20} = 1,3 \cdot 163,3 = 212,3 \text{ МПа}$$

45,52 МПа ≤ 212,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^p \right|; \left| \sigma_T^p \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_ф$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^p \right|; \left| \sigma_T^p \right| \right\} = \max\{|48,72|; |46,47|\} = 48,72 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_ф = 1,3 \cdot 128,9 = 167,6 \text{ МПа}$$

48,72 МПа ≤ 167,6 МПа, **Условие прочности выполнено**

Жёсткость фланца:

Угол поворота фланца в рабочих условиях:

$$\Theta = M^p \cdot y_\phi \cdot \frac{E^{20}}{E} = 3,618 \cdot 10^4 \cdot 0,5514 \cdot 10^{-5} \cdot 1,99 \cdot 10^5 / 1,8 \cdot 10^5 = 0,2206^\circ$$

Условие выполнения жесткости фланцев:

$$\Theta \leq K_\Theta \cdot [\Theta] = 1 \cdot 0,3939 = 0,3939^\circ$$

Условие жёсткости выполнено

Расчёт крышки на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Коэффициент ослабления для днищ, не имеющих отверстий $K_0 = 1.0$

Температура фланца (кольца), t_ϕ : 210 °С

Свойства материала крышки

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 210^\circ\text{C}$ (рабочие условия):

$$[\sigma]_{кр} = 147 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре $T = 210^\circ\text{C}$:

$$E_{кр} = 1,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С при температуре $T = 210^\circ\text{C}$:

$$\alpha_{кр} = 0,1265 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 20^\circ\text{C}$ (рабочие условия):

$$[\sigma]_{кр}^{20} = 183 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре $T = 20^\circ\text{C}$:

$$E_{кр}^{20} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Днища и крышки с дополнительным краевым моментом, нагруженные избыточным давлением

Равнодействующая давления:

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19810.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-802.00.00.000 PP				Лист
				135

$$Q_{\pi} = p \cdot \frac{\pi \cdot D_{\pi}^2}{4} = 2,302 * 3,142 * 651^2 / 4 = 7,661 \cdot 10^5 \text{ H}$$

$$\psi = \frac{P_6^p}{Q_x} = 9,352 \cdot 10^5 / 7,661 \cdot 10^5 = 1,221$$

$$K_6 = 0.41 \cdot \sqrt{\frac{1 + 3 \cdot \psi \cdot \left(\frac{D_3}{D_{\text{сн}}} - 1 \right)}{\frac{D_3}{D_{\text{сн}}}}} = 0.41 \cdot [(1 + 3 \cdot 1.221 \cdot (700/651 - 1)) / (700/651)]^{1/2} = 0.4466$$

Поправочный коэффициент для допускаемого давления $K_p = 1.0$

Допускаемое давление:

$$[p] = \left(\frac{s_1 - c}{K_0 \cdot K_6 \cdot D_p} \right)^2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi \cdot K_p = ([45 - 3] / [1 \cdot 0,4466 \cdot 651])^2 \cdot 147 \cdot 1 \cdot 1 = 3,068 \text{ МПа}$$

$$3,068 \text{ МПа} \geq 2,302 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Днища и крышки, нагруженные избыточным давлением

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_p + c = K_0 \cdot K_0 \cdot D_p \cdot \sqrt{\frac{p}{\varphi \cdot [\sigma] \cdot K_p}} + c = 0,4466 \cdot 1 \cdot 651 \cdot (2,302 / [1 \cdot 147 \cdot 1])^{1/2} + 3 = 39,38 \text{ mm}$$

$$39,38 \text{ mm} \leq 45 \text{ mm}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

$$K_7 = 0.8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_{\text{сн.}}} - 1} = 0.8 \cdot [700/651 - 1]^{1/2} = 0,2195$$

$$\Phi = \max \left\{ \frac{P_6^P}{[\sigma]}; \frac{P_6^\pi}{[\sigma]^{20}} \right\} = \max \{ 9,352 \cdot 10^5 / 147; 1,38 \cdot 10^6 / 183 \} = 0,006362 \text{ m}^2$$

Расчётная толщина крышки в месте уплотнения с учётом прибавок:

$$s_{2p} + c = \max \left[K_7 \cdot \sqrt{\Phi}; \frac{0,6}{D_{\text{сп}}} \cdot \Phi \right] + c = \max \{ 0,2195 * 0,006362^{1/2}; 0,6 * 0,006362 / 651 \} + 3 = 20,51 \text{ мм}$$

$$20,51 \text{ mm} \leq 41 \text{ mm}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

$$K'_7 = 0,8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_2} - 1} = 0,8 \cdot [700/663 - 1]^{1/2} = 0,189$$

Расчётная толщина вне зоны уплотнения с учётом прибавок:

$$s_{3p} + c = \max \left[K_7' \cdot \sqrt{\Phi}; \frac{0.6}{D_2} \cdot \Phi \right] + c = \max \{ 0,189 * 0,006362^{1/2}; 0,6 * 0,006362 / 663 \} + 3 = 18,07 \text{ mm}$$

$$18,07 \text{ mm} \leq 35 \text{ mm}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$K_7 = 0.8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_{\text{сп}}} - 1} = 0.8 \cdot \sqrt{700 / 651 - 1} = 0,2195$ $\Phi = \max \left\{ \frac{P_6^P}{[\sigma]}; \frac{P_6^M}{[\sigma]^{20}} \right\} = \max \{ 9,352 \cdot 10^5 / 147; 1,38 \cdot 10^6 / 183 \} = 0,006362 \text{ м}^2$ <p>Расчётная толщина крышки в месте уплотнения с учётом прибавок:</p> $s_{2p} + c = \max \left\{ K_7 \cdot \sqrt{\Phi}; \frac{0.6}{D_{\text{сп}}} \cdot \Phi \right\} + c = \max \{ 0,2195 \cdot 0,006362^{1/2}; 0.6 \cdot 0,006362 / 651 \} + 3 = 20,51 \text{ мм}$ <p>20,51 мм ≤ 41 мм</p> <p>Заключение: Условие прочности выполнено</p> $K_7' = 0.8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_2} - 1} = 0.8 \cdot \sqrt{700 / 663 - 1}^{1/2} = 0,189$ <p>Расчётная толщина вне зоны уплотнения с учётом прибавок:</p> $s_{2p} + c = \max \left\{ K_7' \cdot \sqrt{\Phi}; \frac{0.6}{D_2} \cdot \Phi \right\} + c = \max \{ 0,189 \cdot 0,006362^{1/2}; 0.6 \cdot 0,006362 / 663 \} + 3 = 18,07 \text{ мм}$ <p>18,07 мм ≤ 35 мм</p> <p>Заключение: Условие прочности выполнено</p>
					<div> <div>Инв. № подл.</div> <div>19810.4</div> </div> <div> <div>Подпись и дата</div> <div></div> </div> <div> <div>Взам. инв. №</div> <div></div> </div> <div> <div>Инв. № дубл.</div> <div></div> </div> <div> <div>Подпись и дата</div> <div></div> </div>
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<div>E-802.00.00.000 PP</div> <div>Лист 136</div>

Список литературы

- 1) ГОСТ Р 52630-2012. Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия
- 2) ГОСТ Р 52857.1-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) ГОСТ Р 52857.4-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений.
- 6) ГОСТ Р 52857.5-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет обечаек и днищ от воздействия опорных нагрузок

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
19810.4									
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-802.00.00.000 PP				
					Лист				
					137				