

АО «ВНИИНЕФТЕМАШ»



ОАО "Славнефть-ЯНОС"
Установка ГФУ
РЕГЕНЕРАТОР РАСТВОРА МОНОЭТАНОЛАМИНА
К-5

Расчеты
К-5.00.00.000 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
19744.4				

Оглавление

Расчёт на прочность сосуда.....	4
Сводные таблицы	5
Основные элементы	5
Результаты расчета	5
Штуцера	6
Результаты расчета	6
Определение давления испытания	8
Расчет давления испытания в соответствии с ГОСТ Р 52630-2012.....	8
Проверка необходимости проведения расчетов на прочность в условиях испытания	8
Определение периода собственных колебаний по методу Рэлея	9
Расчёт ветровых нагрузок	18
Расчёт по ГОСТ Р 51273-99	18
Расчёт суммарных нагрузок	27
Опора колонного аппарата	35
Опорная обечайка	35
Расчёт в расчётных условиях	35
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	36
Расчёт в условиях испытаний	38
Цилиндрический участок опоры	39
Расчётные условия	39
Расчётные условия (наружное давление).....	40
Условия испытаний.....	41
Группа патрубков элемента 'Опора колонного аппарата'.....	43
Группа патрубков.....	43
Опорный узел элемента 'Опора колонного аппарата'	44
Расчёт опорного узла по ГОСТ Р 51274-99	44
Нагрузки на фундамент	53
Днище эллиптическое.....	54
Расчёт в расчётных условиях	54
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	55
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)	56
Обечайка цилиндрическая.....	57
Расчёт в расчётных условиях	57
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	61
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)	65
Штуцер А1-А5 DN500	69
Расчёт в расчётных условиях	70
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	72
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)	74
Штуцер Б DN300.....	77
Расчёт в расчётных условиях	78
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	84
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)	89
Штуцер В DN300	92
Расчёт в расчётных условиях	93
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	99
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)	105
Штуцер Г DN150.....	108
Расчёт в расчётных условиях	109
Расчет на прочность по МКЭ	112
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	117
Расчет на прочность по МКЭ	119
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)	124
Штуцер Д DN150	128
Расчёт в расчётных условиях	129
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	133

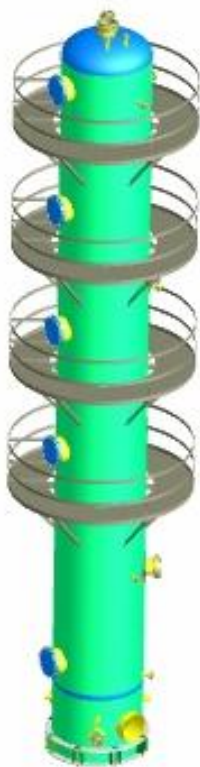
Этот документ является собственностью АО "ВНИИНЕФТЕМАШ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия.

Инв. № подл.	19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)	56			
						Обечайка цилиндрическая.....	57			
						Расчёт в расчётных условиях	57			
						Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	61			
						Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)	65			
						Штуцер А1-А5 DN500	69			
						Расчёт в расчётных условиях	70			
						Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	72			
						Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)	74			
						Штуцер Б DN300.....	77			
						Расчёт в расчётных условиях	78			
						Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	84			
						Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)	89			
						Штуцер В DN300	92			
						Расчёт в расчётных условиях	93			
						Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	99			
						Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)	105			
						Штуцер Г DN150.....	108			
						Расчёт в расчётных условиях	109			
						Расчет на прочность по МКЭ	112			
						Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	117			
						Расчет на прочность по МКЭ	119			
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)	124									
Штуцер Д DN150	128									
Расчёт в расчётных условиях	129									
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	133									
1	все	б/н		17.03.16	К-5.00.00.000 РР					
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						
Разраб.	Иванов		03.2016	Регенератор раствора моноэтаноламина К-5						
Пров.	Динаев		03.2016							
Рук.										
Н.контр.	Копчикова		03.2016							
Утв.										
				Расчеты		Лит.			Лист	Листов
						Т			2	308
						АО «ВНИИНЕФТЕМАШ»				

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания).....	138
Штуцер Е DN150.....	141
Расчёт в расчётных условиях	142
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	148
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)	153
Штуцер Ж DN50.....	157
Расчёт в расчётных условиях	158
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	162
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)	167
Штуцер И DN50	170
Расчёт в расчётных условиях	171
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	175
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)	180
Штуцер К DN50	182
Расчёт в расчётных условиях	184
Расчет на прочность по МКЭ	186
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	191
Расчет на прочность по МКЭ	194
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)	198
Штуцер Л DN50	202
Расчёт в расчётных условиях	203
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	205
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)	207
Штуцер М DN50.....	210
Расчёт в расчётных условиях	211
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	213
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)	216
Штуцер П DN50	219
Расчёт в расчётных условиях	220
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	222
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)	224
Отвод DN150	227
Расчёт прочности отвода по СА 03-003-07	227
Расчёт в расчётных условиях	227
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	228
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)	228
Патрубок DN150	230
Расчёт в расчётных условиях	230
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	232
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)	234
Фланец DN500 с крышкой	236
Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.4-2007 и ГОСТ Р 52857.2-2007.....	236
Расчёт в расчётных условиях	238
Фланцевое соединение DN300.....	248
Расчёт на прочность и герметичность по ASME VIII-2.....	248
Расчёт в расчётных условиях	249
Фланцевое соединение DN150.....	260
Расчёт на прочность и герметичность по ASME VIII-2.....	260
Расчёт в расчётных условиях	261
Фланцевое соединение DN50.....	272
Расчёт на прочность и герметичность по ASME VIII-2.....	272
Расчёт в расчётных условиях	273
Фланцевое соединение DN50-M33x2.....	284
Расчёт на прочность и герметичность по ASME VIII-2.....	284
Расчёт в расчётных условиях	285
Фланцевое соединение DN50-Rc1/2.....	296
Расчёт на прочность и герметичность по ASME VIII-2.....	296
Расчёт в расчётных условиях	297
Список литературы	308

Инв. № подл.	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата					
19744.4								
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				
					К-5.00.00.000 PP			Лист
								3

Расчёт на прочность сосуда



Наименование аппарата	Регенератор раствора моноэтаноламина К-5
Название установки:	Установка ГФУ
Наименование объекта:	ОАО "Славнефть-ЯНОС"
Сосуд, содержащий рабочую жидкость:	Да
Вид испытаний:	Гидроиспытания
Пробное давление:	0,56 МПа
Учёт сейсмических нагрузок:	Нет

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 РР				
Лист				
4				

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	1800	18	528	9,5	1
Обечайка цилиндрическая	09Г2С	1800	18	$1,388 \cdot 10^4$	6,8	1

Результаты расчета

Расчётные условия

Элемент	Расчетная температура, °C	Расчетное давление, МПа	Допускаемые напряжения, МПа	Расчетная толщина с уч. прибавок, мм	Условие прочности
Днище эллиптическое	150	0,4161	160,3	11,84	выполнено
Обечайка цилиндрическая	180	0,4121	156,9	9,167	выполнено

Расчётные условия (наружное давление)

Элемент	Расчетная температура, °C	Расчетное давление, МПа	Допускаемые напряжения, МПа	Расчетная толщина с уч. прибавок, мм	Условие прочности
Днище эллиптическое	180	(-0,1000)	156,9	13,38	выполнено
Обечайка цилиндрическая	180	(-0,1000)	156,9	13,6	выполнено

Условия испытаний

Элемент	Расчетное давление, МПа	Допускаемые напряжения, МПа	Расчетная толщина с уч. прибавок, мм	Допускаемое давление, МПа	Условие прочности
Днище эллиптическое	0,7095	272,7	11,84	2,57	выполнено
Обечайка цилиндрическая	0,7045	272,7	9,128	3,384	выполнено

Инв. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата						Лист 5
					Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

K-5.00.00.000 PP

Штуцера

Исходные данные

Элемент	Метка	Тип	Материал	Диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Суммарная прибавка, мм
Штуцер Д DN150	Штуцер Д	Проходящий с накладным кольцом	09Г2С(КП265) Gr.	146	16	6
Штуцер А1-А5 DN500	Штуцер А5	Проходящий без укрепления	09Г2С	500	12	6,8
Штуцер Б DN300	Штуцер Б	Проходящий с накладным кольцом	09Г2С (КП245) Gr.	301	17	6
Штуцер Е DN150	Штуцер Е	Проходящий с накладным кольцом	09Г2С Gr.ГОСТ 19281	146	11	7,65
Штуцер Ж DN50	Штуцер Ж	Проходящий без укрепления	09Г2С (КП245) Gr.	48	14	6
Штуцер И DN50	Штуцер И	Проходящий без укрепления	09Г2С (КП245) Gr.	48	14	6
Штуцер Л DN50	Штуцер Л	Проходящий без укрепления	09Г2С (КП245) Gr.	48	14	6
Штуцер П DN50	Штуцер П	Проходящий без укрепления	09Г2С (КП245) Gr.	48	14	6
Штуцер В DN300	Штуцер В	Проходящий с накладным кольцом	09Г2С (КП245) Gr.	301	16	6
Штуцер Г DN150	Штуцер Г	Проходящий с накладным кольцом	09Г2С Gr.ГОСТ 19281	146	11	7,65
Штуцер К DN50	Штуцер К	Проходящий без укрепления	09Г2С (КП245) Gr.	48	14	6
Штуцер М DN50	Штуцер М	Проходящий без укрепления	09Г2С (КП245) Gr.	48	14	6

Результаты расчета

Расчётные условия

Элемент	Расчетная температура, °С	Расчетное давление, МПа	Условие прочности
Штуцер Д DN150	150	0,4173	выполнено
Штуцер А1-А5 DN500	150	0,4099	выполнено
Штуцер Б DN300	150	0,4	выполнено
Штуцер Е DN150	150	0,4	выполнено
Штуцер Ж DN50	150	0,4	выполнено
Штуцер И DN50	150	0,4112	выполнено
Штуцер Л DN50	150	0,4	выполнено
Штуцер П DN50	150	0,4	выполнено
Штуцер В DN300	150	0,4	выполнено
Штуцер Г DN150	150	0,4	выполнено
Штуцер К DN50	150	0,4	выполнено

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 РР	Лист
						6

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				

					К-5.00.00.000 РР
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

Элемент	Расчетное давление, МПа	Условие прочности
Штуцер Д DN150	0,711	выполнено
Штуцер А1-А5 DN500	0,7017	выполнено
Штуцер Б DN300	0,6821	выполнено
Штуцер Е DN150	0,6205	выполнено
Штуцер Ж DN50	0,5754	выполнено
Штуцер И DN50	0,7034	выполнено
Штуцер Л DN50	0,5754	выполнено
Штуцер П DN50	0,6799	выполнено
Штуцер В DN300	0,5632	выполнено
Штуцер Г DN150	0,5642	выполнено
Штуцер К DN50	0,5642	выполнено
Штуцер М DN50	0,5642	выполнено

Определение давления испытания

Расчет давления испытания в соответствии с ГОСТ Р 52630-2012

Расчетные условия

Допускаемые напряжения для материала корпуса при температуре 20 °С	$[\sigma]^{20} =$	180,8	МПа
Допускаемые напряжения для материала корпуса при расчетной температуре	$[\sigma]^t =$	160,3	МПа
Расчетное давление	$P_p =$	0,4	МПа
Расчетное давление гидроиспытания, вычисленное по ГОСТ Р 52630-2012 п.8.11.3	$P_{гн} = 1,25 \cdot P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t} =$	0,56	МПа

Расчетные условия (наружное давление)

Допускаемые напряжения для материала корпуса при температуре 20 °С	$[\sigma]^{20} =$	180,8	МПа
Допускаемые напряжения для материала корпуса при расчетной температуре	$[\sigma]^t =$	156,9	МПа
Расчетное давление	$P_p =$	0,1	МПа
Расчетное давление гидроиспытания, вычисленное по ГОСТ Р 52630-2012 п.8.11.3	$P_{гн} = 1,25 \cdot P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t} =$	0,14	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.

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 давление испытания	$P_{II} =$	0,56	МПа
Гидростатическое давление при полном заполнении аппарата испытательной жидкостью	$P_{cm} =$	0,15	МПа

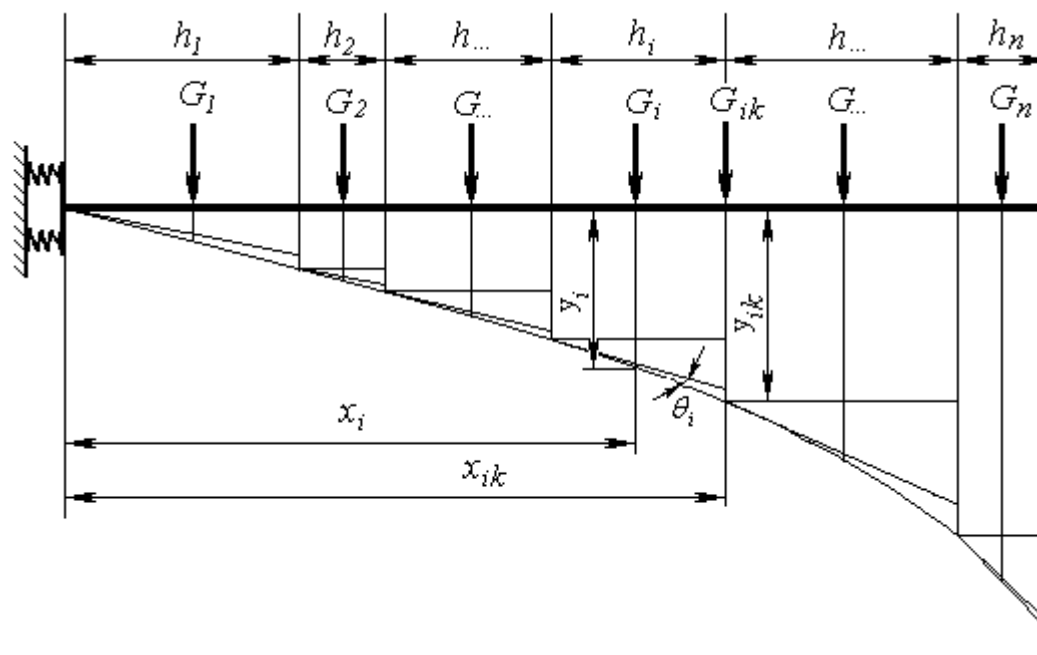
$$P_{II} + P_{cm} < 1,35 \cdot P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t}$$

$P_{II} + P_{cm} =$	0,71	МПа	– давление испытания в горизонтальном положении аппарата
$1,35 \cdot P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t} =$	0,60	МПа	
0,71 МПа	>	0,60 МПа	

Заключение: **Требуется проведение расчета на прочность в условиях испытания**

Изн. № подл.	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата					
19744.4								
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				
					К-5.00.00.000 РР			
					Лист			
					8			

Определение периода собственных колебаний по методу Рэлея



G_i – весовая нагрузка, приложенная в центре тяжести элемента (обечайки, переходы)

G_{ik} – нагрузка от сосредоточенной массы (обслуживающие площадки, насадки, тарелки, днища)

x_i – расстояние от фундамента до центра тяжести элемента

x_{ik} – расстояние от фундамента до точки приложения сосредоточенной массы

y_i – перемещения от весовых нагрузок в центре тяжести элемента

y_{ik} – перемещения от весовых нагрузок в точке приложения сосредоточенной массы

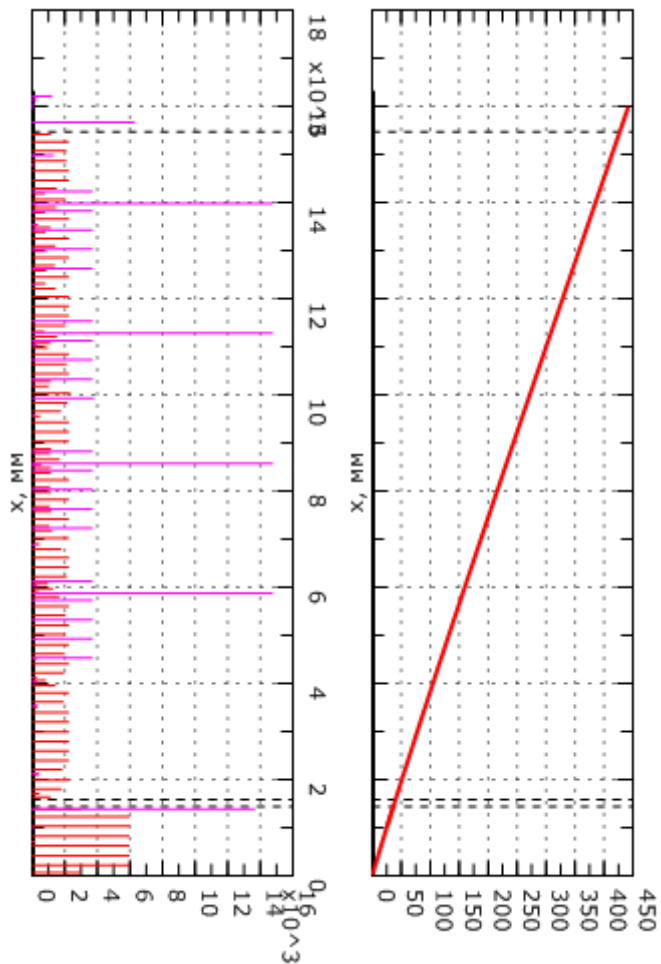
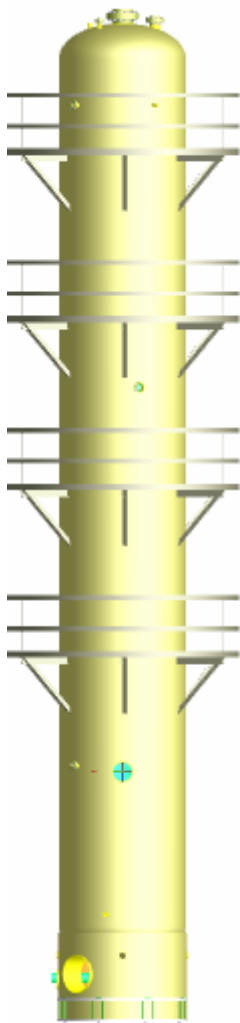
Расчёт в расчётных условиях (коррозия учтена)

Период собственных колебаний:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\sum (G_i \cdot y_i^2 + G_{ik} \cdot y_{ik}^2)}{g \cdot \sum (G_i \cdot y_i + G_{ik} \cdot y_{ik})}} = 1,083 \text{ с}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
			Дата
К-5.00.00.000 РР			
Лист			
9			

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата



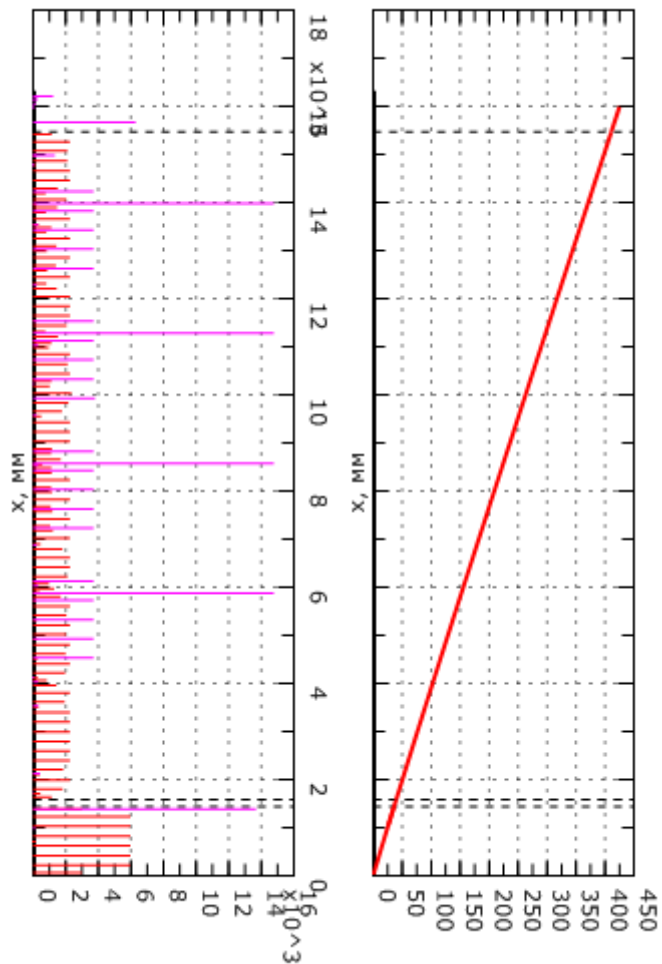
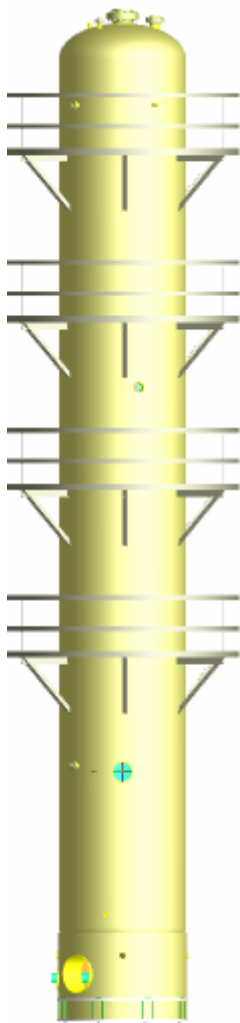
Весовые нагрузки, G, Н Перемещения от весовыхнагрузок, u, мм

Расчёт в расчётных условиях (коррозия не учтена)

Период собственных колебаний:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\sum (G_i \cdot y_i^2 + G_{\text{дк}} \cdot y_{\text{дк}}^2)}{g \cdot \sum (G_i \cdot y_i + G_{\text{дк}} \cdot y_{\text{дк}})}} = 1,063 \text{ с}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

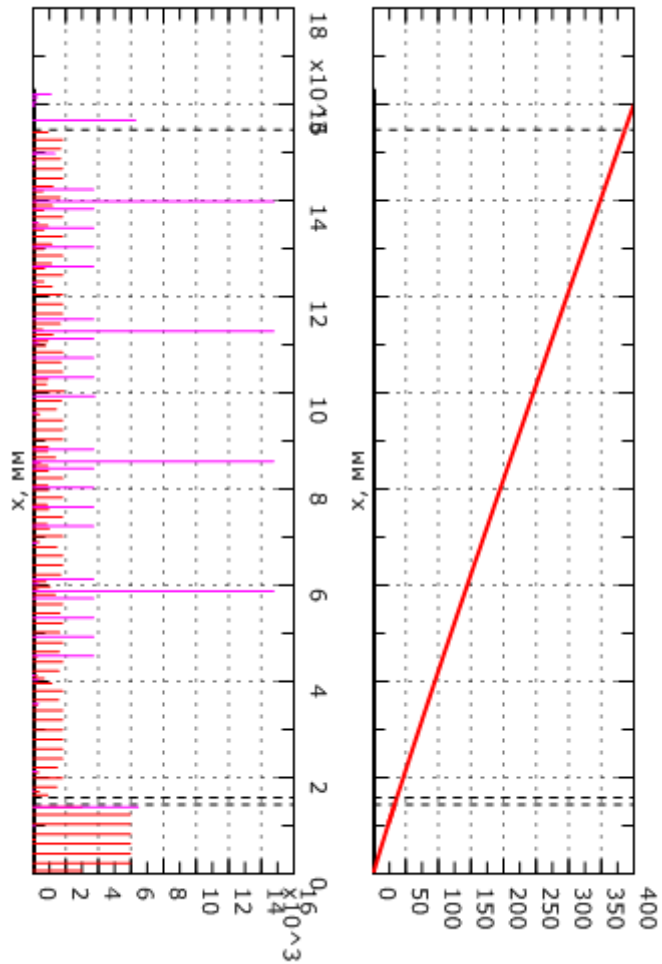
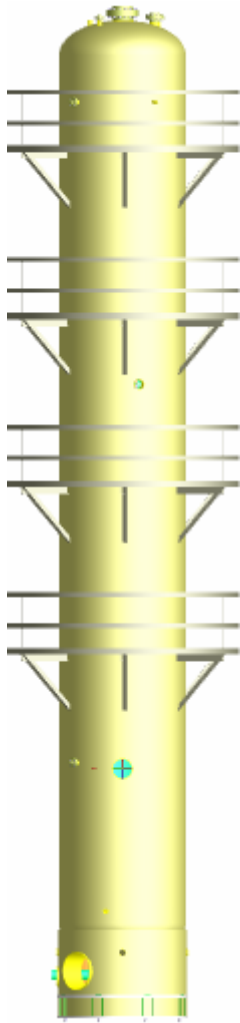


Весовые нагрузки, G, Н Перемещения от весовыхнагрузок, y, мм

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление) (коррозия учтена)

Период собственных колебаний:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\sum (G_i \cdot y_i^2 + G_{\text{дк}} \cdot y_{\text{дк}}^2)}{g \cdot \sum (G_i \cdot y_i + G_{\text{дк}} \cdot y_{\text{дк}})}} = 1,032 \text{ с}$$



Весовые нагрузки, G, Н Перемещения от весовыхнагрузок, у, мм

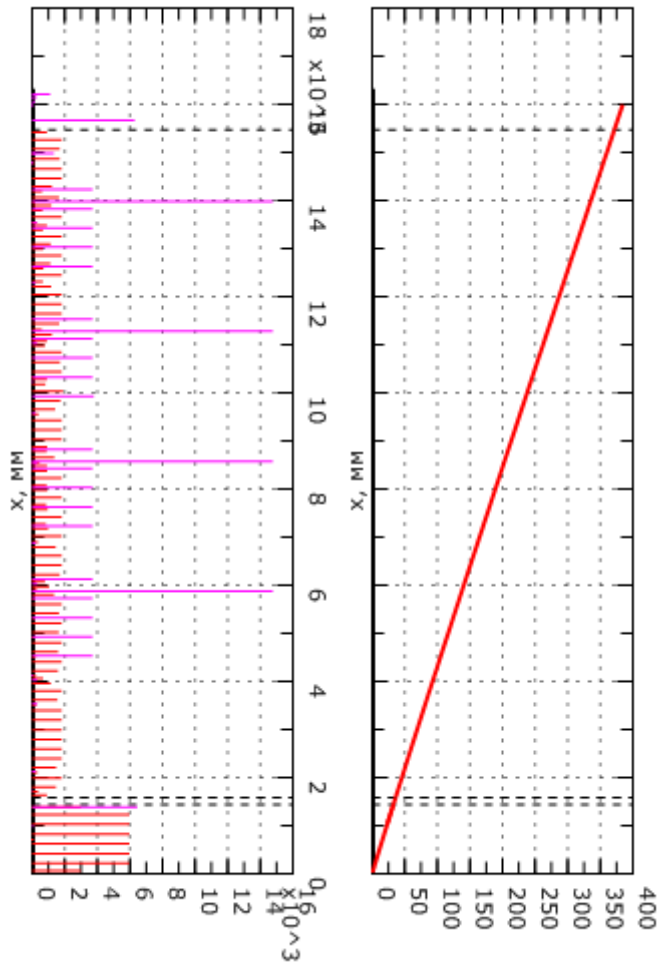
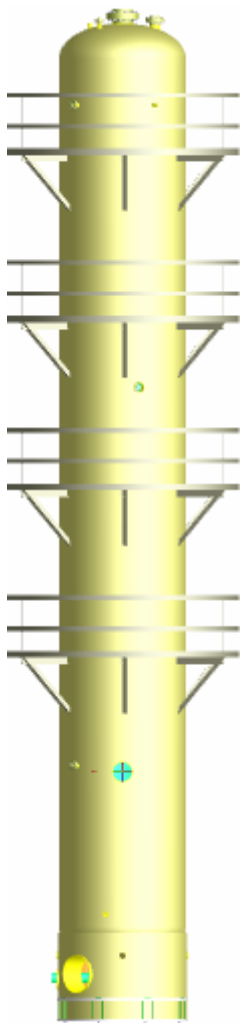
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление) (коррозия не учтена)

Период собственных колебаний:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\sum (G_i \cdot y_i^2 + G_{\text{ж}} \cdot y_{\text{ж}}^2)}{g \cdot \sum (G_i \cdot y_i + G_{\text{ж}} \cdot y_{\text{ж}})}} = 1,013 \text{ с}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
			Дата
К-5.00.00.000 РР			
Лист			
12			

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата



Весовые нагрузки, G, Н Перемещения от весовыхнагрузок, у, мм

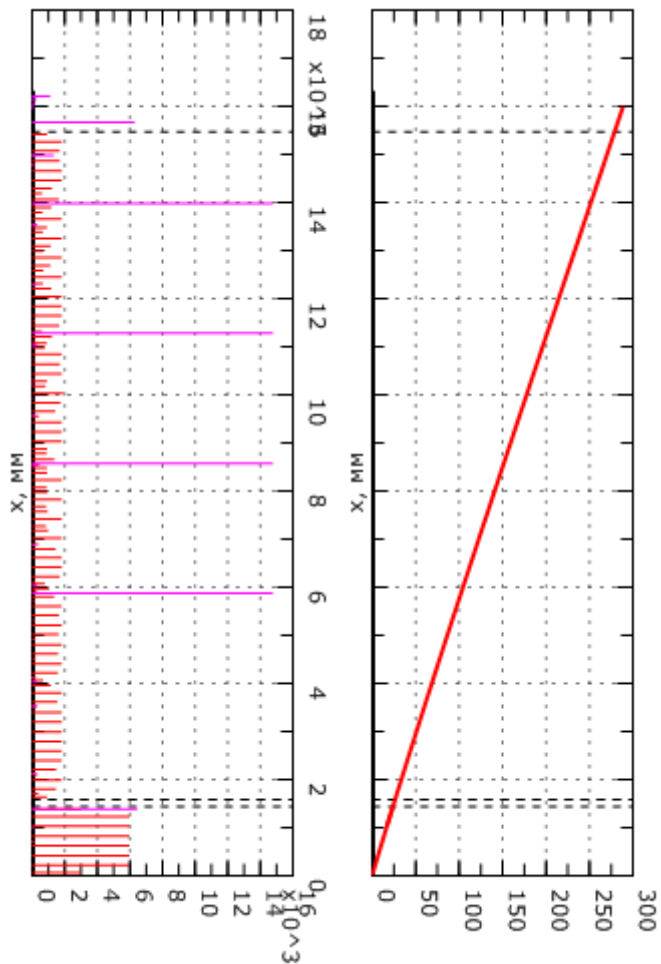
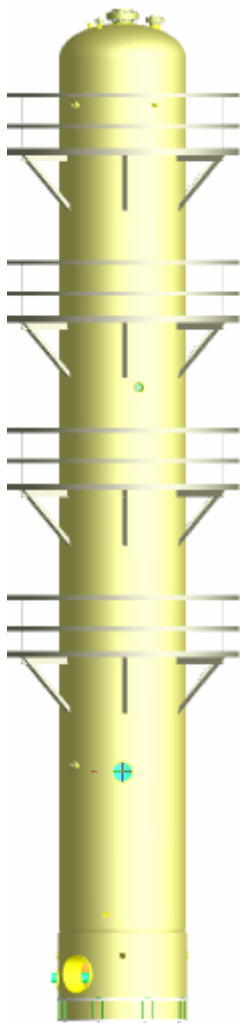
Расчёт в условиях монтажа (коррозия учтена)

Период собственных колебаний:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\sum (G_i \cdot y_i^2 + G_{\text{дк}} \cdot y_{\text{дк}}^2)}{g \cdot \sum (G_i \cdot y_i + G_{\text{дк}} \cdot y_{\text{дк}})}}$$

0,8819 c

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата



Весовые нагрузки, G, Н Перемещения от весовыхнагрузок, у, мм

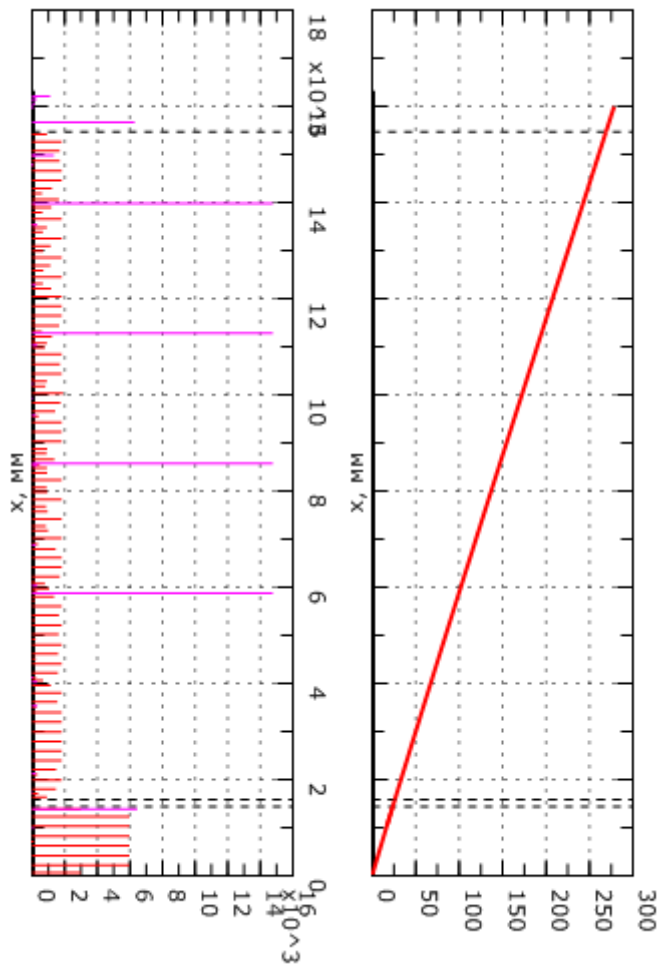
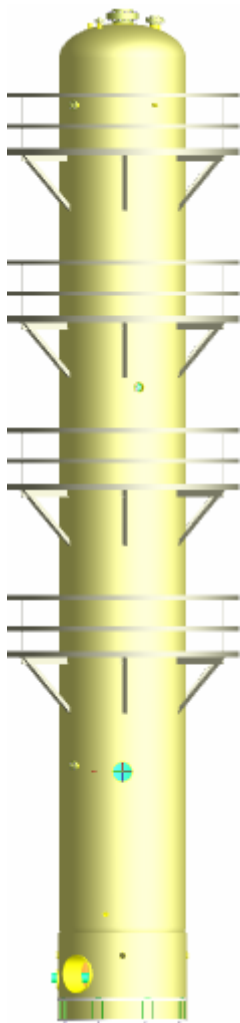
Расчёт в условиях монтажа (коррозия не учтена)

Период собственных колебаний:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\sum (G_i \cdot y_i^2 + G_{\text{дк}} \cdot y_{\text{дк}}^2)}{g \cdot \sum (G_i \cdot y_i + G_{\text{дк}} \cdot y_{\text{дк}})}}$$

0,8667 с

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата



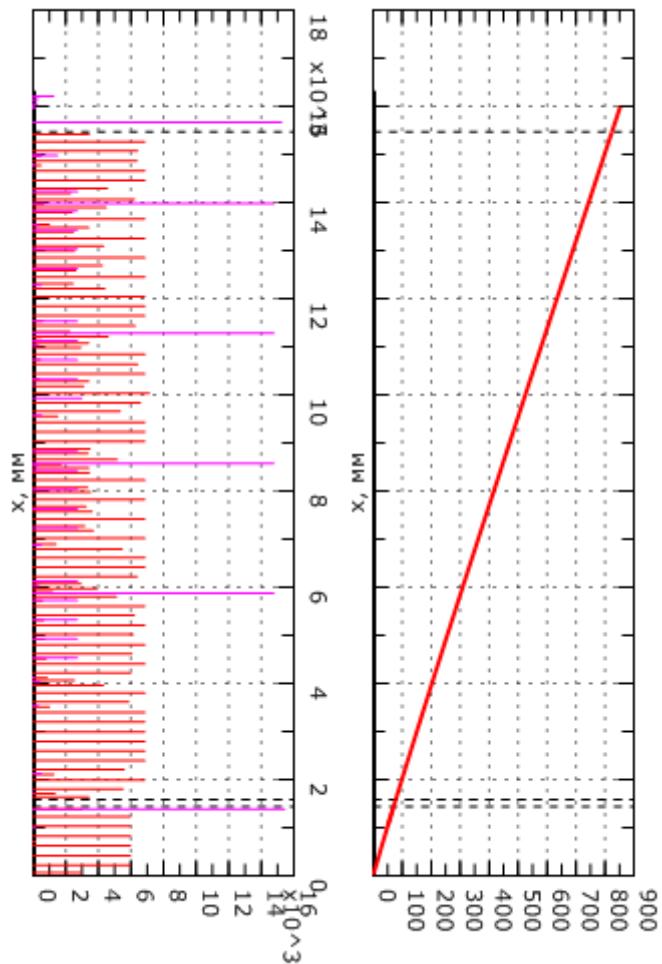
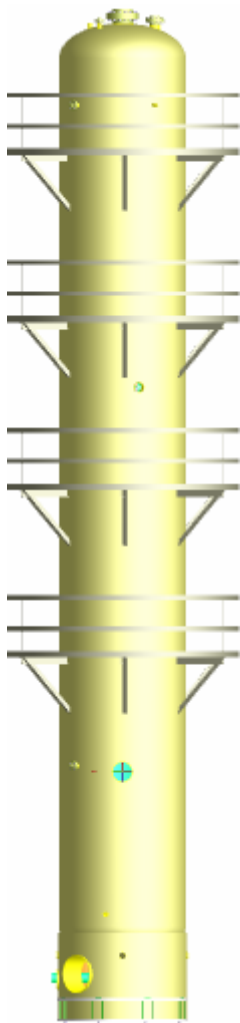
Весовые нагрузки, G, Н Перемещения от весовыхнагрузок, у, мм

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания, коррозия учтена)

Период собственных колебаний:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\sum (G_i \cdot y_i^2 + G_{\text{дк}} \cdot y_{\text{дк}}^2)}{g \cdot \sum (G_i \cdot y_i + G_{\text{дк}} \cdot y_{\text{дк}})}} = 1,507 \text{ с}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				



Весовые нагрузки, G, Н Перемещения от весовыхнагрузок, у, мм

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания, коррозия не учтена)

Период собственных колебаний:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\sum (G_i \cdot y_i^2 + G_{\text{дк}} \cdot y_{\text{дк}}^2)}{g \cdot \sum (G_i \cdot y_i + G_{\text{дк}} \cdot y_{\text{дк}})}} = 1,482 \text{ с}$$

К-5.00.00.000 РР

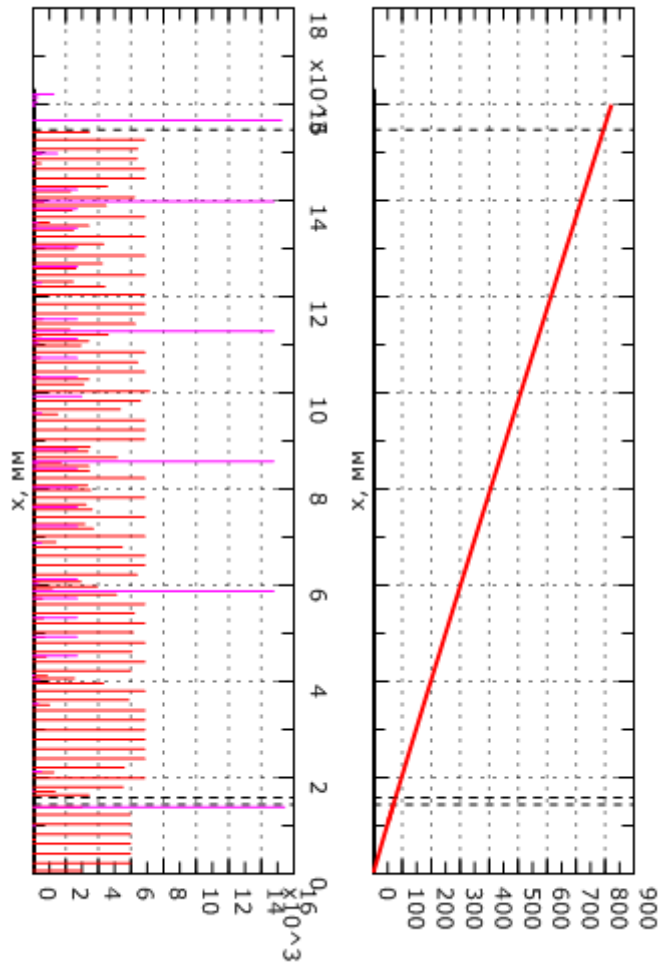
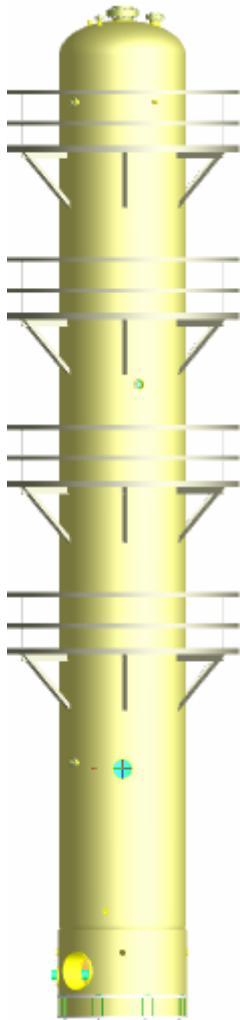
Лист

16

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата



Весовые нагрузки, G, Н Перемещения от весовыхнагрузок, у, мм

К-5.00.00.000 РР

Лист

17

Расчёт ветровых нагрузок

Расчёт по ГОСТ Р 51273-99

Нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки i-го участка:

$q_{ist} = q_0 \cdot \theta_i \cdot K,$

где θ_i – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте аппарата:

$\theta_i = \left(\frac{z_i}{10}\right)^{0.31},$

K – аэродинамический коэффициент.

Средняя составляющая ветровой нагрузки на i-м участке:

$P_{ist} = q_{ist} \cdot D_i \cdot h_i,$

где D_i – наружный диаметр i-го участка,

h_i – высота i-го участка.

Коэффициент пространственной корреляции пульсаций давления ветра:

$v = \begin{cases} 0.968 - 0.025 \cdot \sqrt{H}, & x_i > 5.0 \text{ m} \\ 0.912, & x_i \leq 5.0 \text{ m} \end{cases}$

Пульсационная составляющая ветровой нагрузки на i-м участке:

$P_{idyn} = v \cdot G_i \cdot \xi \cdot \eta_i,$

где G_i – вес i-го участка,

ξ – коэффициент динамичности,

η_i – приведенное относительное ускорение центра тяжести i-го участка.

Ветровая нагрузка на i-м участке:

$P_i = P_{ist} + P_{idyn}$

Изгибающий момент в сечении на высоте x_0 от действия ветровой нагрузки на обслуживаемую j-ю площадку:

$M_{vj} = K \cdot q_0 \cdot \theta_j \cdot (x_i - x_0) \cdot \{1 + 0.75 \cdot \xi \cdot \chi_j \cdot m_j\} \cdot \sum A_p.$

При отсутствии точных данных о форме площадки изгибающий момент определяют по формуле:

$M_{vj} = K \cdot q_0 \cdot \theta_j \cdot (x_i - x_0) \cdot \{1 + 0.75 \cdot \xi \cdot \chi_j \cdot m_j\} \cdot A_j,$

$\sum A_p$ – сумма площадей всех проекций профилей j-й площадки на плоскость, перпендикулярную направлению ветра;

A_j – площадь, ограниченная контуром j-й площадки;

$\chi = 1.56 \cdot \left(\frac{z_j}{H}\right)^{1.6},$

m_j – коэффициент пульсации давления ветра,

$H = 1,6 \cdot 10^4$ мм - общая высота аппарата от поверхности земли.

Расчетный изгибающий момент в сечении на высоте x_0 :

$M_v = \sum_{i=1}^n P_i \cdot (x_i - x_0) + \sum_{i=1}^m M_{vi}$

Расчёт в расчётных условиях (коррозия учтена)

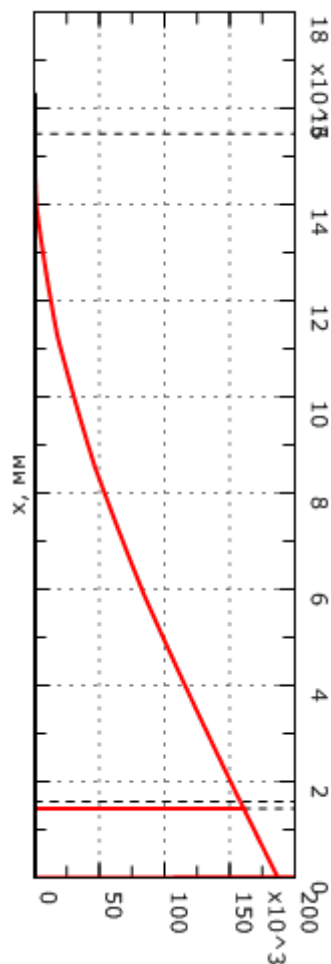
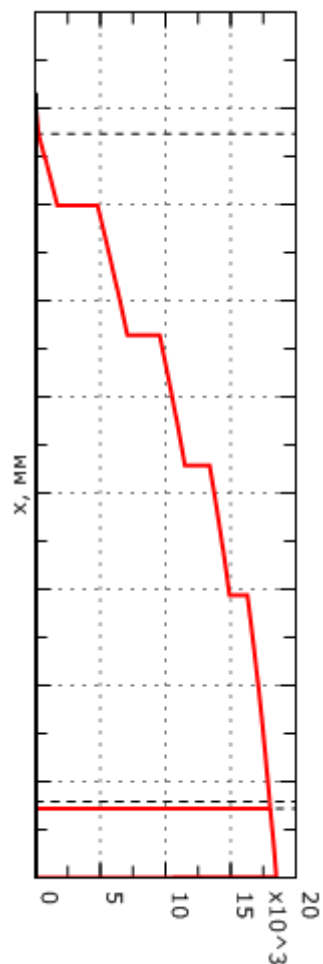
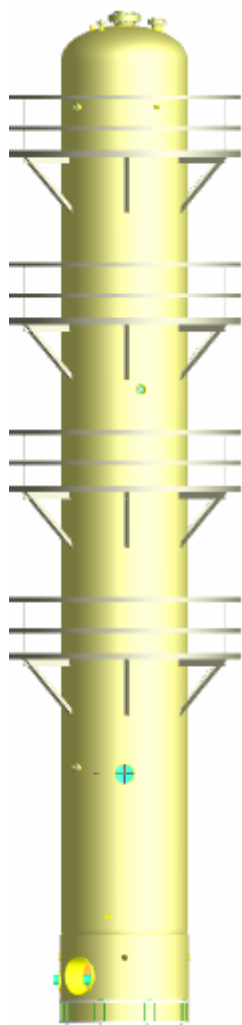
Нормативное значение ветрового давления (для I ветрового района): $q_0 = 0,23 \cdot 10^{-3}$ МПа

Период колебаний $T = 1,083$ с (см. Расчёт периода колебаний)

$\varepsilon = \frac{T \cdot \sqrt{q_0}}{790} = 0,02058$

$\xi = 1.1 + \sqrt{15.5 \cdot \varepsilon} = 1,665$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
19744.4									
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата					
					К-5.00.00.000 PP				Лист
									18



Ветровая нагрузка,
 P_w , Н

Изгибающий момент,
 M_w , Н м

— P_w

— M_w

Элемент	Высота до начала элемента, мм	Наружный диаметр, мм	Нагрузка от площадок, Н	Суммарная нагрузка, Н	Изгибающий момент, Н м
Опора колонного аппарата	0	2066	0	$1,846 \cdot 10^4$	$1,867 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое (нижнее)	1419	2036	0	$1,798 \cdot 10^4$	$1,58 \cdot 10^5$
Обечайка цилиндрическая	1571	2036	8826	$1,798 \cdot 10^4$	$1,58 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое (верхнее)	$1,545 \cdot 10^4$	2036	0	247,5	84

Расчёт в расчётных условиях (коррозия не учтена)

Период колебаний $T = 1,063$ с (см. Расчёт периода колебаний)

$$\varepsilon = \frac{T \cdot \sqrt{q_{10}}}{790} = 0,02021$$

$$\xi = 1,1 + \sqrt{15,5 \cdot \varepsilon} = 1,66$$

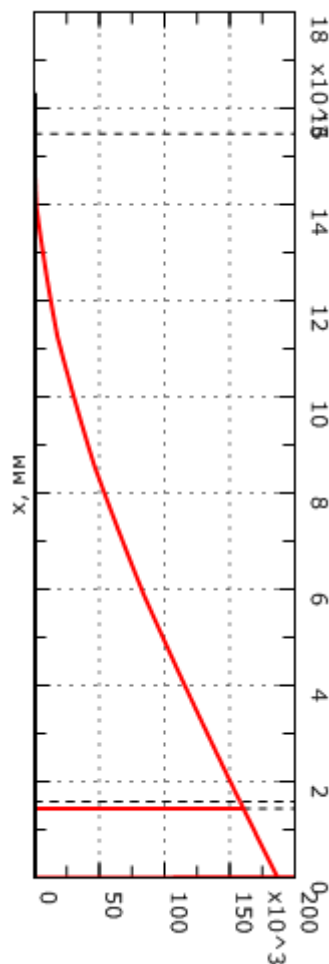
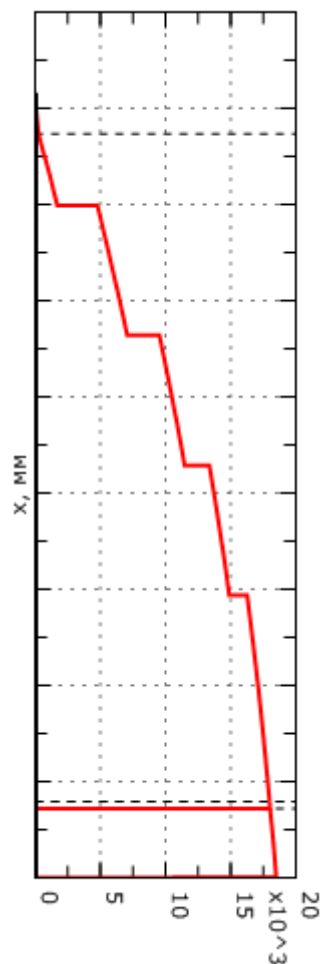
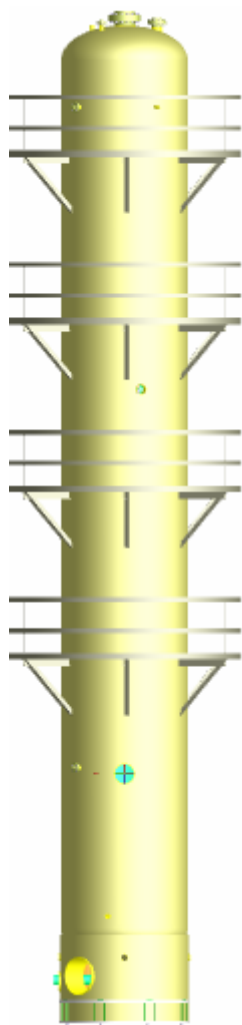
Инов. № подл.	Подпись и дата
19744.4	
Взам. инв. №	Инов. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

К-5.00.00.000 PP

Лист

19



Ветровая нагрузка,
 P_w , Н

Изгибающий момент,
 M_w , Н м

— P_w

— M_w

Элемент	Высота до начала элемента, мм	Наружный диаметр, мм	Нагрузка от площадок, Н	Суммарная нагрузка, Н	Изгибающий момент, Н м
Опора колонного аппарата	0	2066	0	$1,845 \cdot 10^4$	$1,864 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое (нижнее)	1419	2036	0	$1,797 \cdot 10^4$	$1,578 \cdot 10^5$
Обечайка цилиндрическая	1571	2036	8814	$1,797 \cdot 10^4$	$1,578 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое (верхнее)	$1,545 \cdot 10^4$	2036	0	247,5	84

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление) (коррозия учтена)

Нормативное значение ветрового давления (для I ветрового района): $q_0 = 0,23 \cdot 10^{-3}$ МПа

Период колебаний $T = 1,032$ с (см. Расчёт периода колебаний)

$$\varepsilon = \frac{T \cdot \sqrt{q_0}}{790} = 0,01962$$

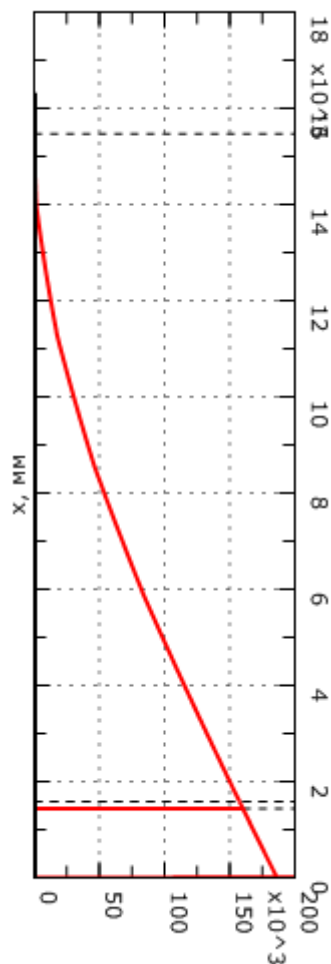
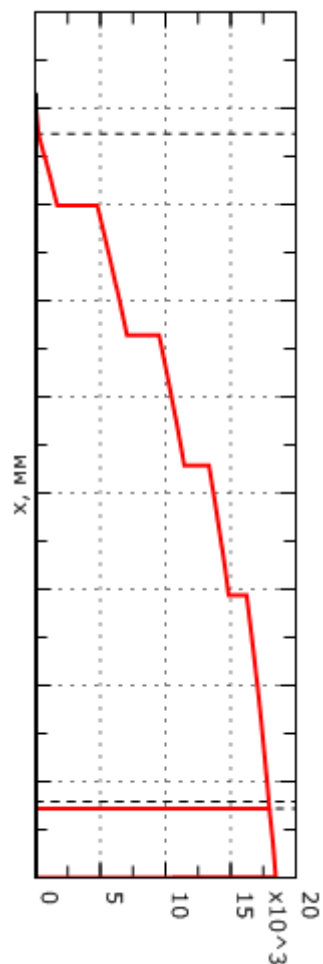
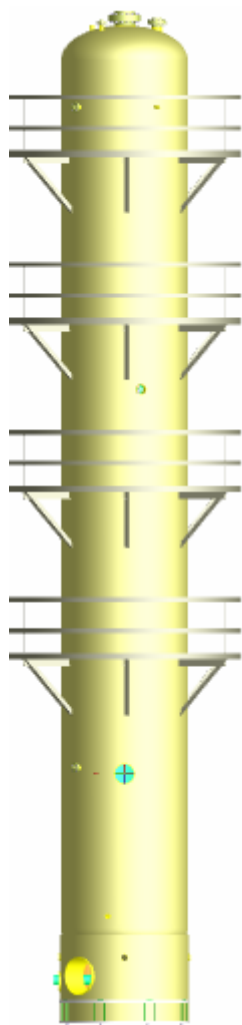
$$\xi = 1,1 + \sqrt{15,5 \cdot \varepsilon} = 1,651$$

Инов. № подл.	Подпись и дата
19744.4	
Изм.	Лист
№ докум.	Подп.
Дата	

К-5.00.00.000 PP

Лист

20



Ветровая нагрузка,
 P_w , Н

Изгибающий момент,
 M_w , Н м

— P_w

— M_w

Элемент	Высота до начала элемента, мм	Наружный диаметр, мм	Нагрузка от площадок, Н	Суммарная нагрузка, Н	Изгибающий момент, Н м
Опора колонного аппарата	0	2066	0	$1,841 \cdot 10^4$	$1,859 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое (нижнее)	1419	2036	0	$1,791 \cdot 10^4$	$1,574 \cdot 10^5$
Обечайка цилиндрическая	1571	2036	8796	$1,791 \cdot 10^4$	$1,574 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое (верхнее)	$1,545 \cdot 10^4$	2036	0	247,5	84

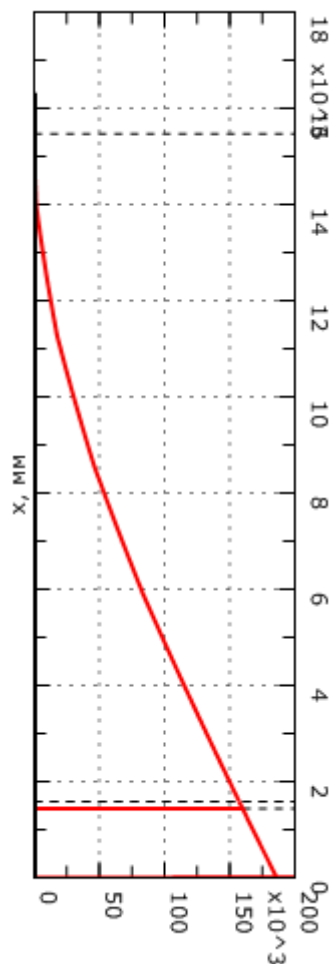
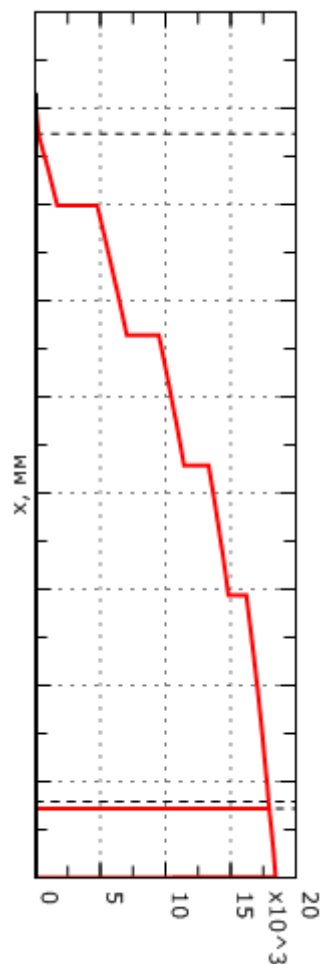
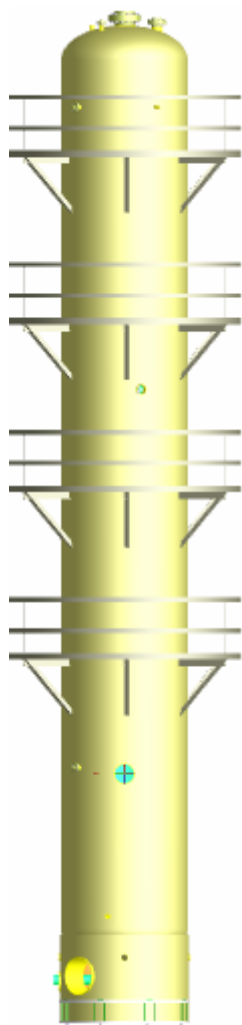
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление) (коррозия не учтена)

Период колебаний $T = 1,013$ с (см. Расчёт периода колебаний)

$$\varepsilon = \frac{T \cdot \sqrt{q_0}}{790} = 0,01926$$

$$\xi = 1,1 + \sqrt{15,5 \cdot \varepsilon} = 1,646$$

Инов. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
К-5.00.00.000 PP				Лист 21



Ветровая нагрузка,
 P_w , Н

Изгибающий момент,
 M_w , Н м

— P_w

— M_w

Элемент	Высота до начала элемента, мм	Наружный диаметр, мм	Нагрузка от площадок, Н	Суммарная нагрузка, Н	Изгибающий момент, Н м
Опора колонного аппарата	0	2066	0	$1,84 \cdot 10^4$	$1,857 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое (нижнее)	1419	2036	0	$1,79 \cdot 10^4$	$1,571 \cdot 10^5$
Обечайка цилиндрическая	1571	2036	8784	$1,79 \cdot 10^4$	$1,571 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое (верхнее)	$1,545 \cdot 10^4$	2036	0	247,5	84

Расчёт в условиях монтажа (коррозия учтена)

Период колебаний $T = 0,8819$ с (см. Расчёт периода колебаний)

$$\varepsilon = \frac{T \cdot \sqrt{q_{10}}}{790} = 0,01677$$

$$\xi = 1,1 + \sqrt{15,5 \cdot \varepsilon} = 1,61$$

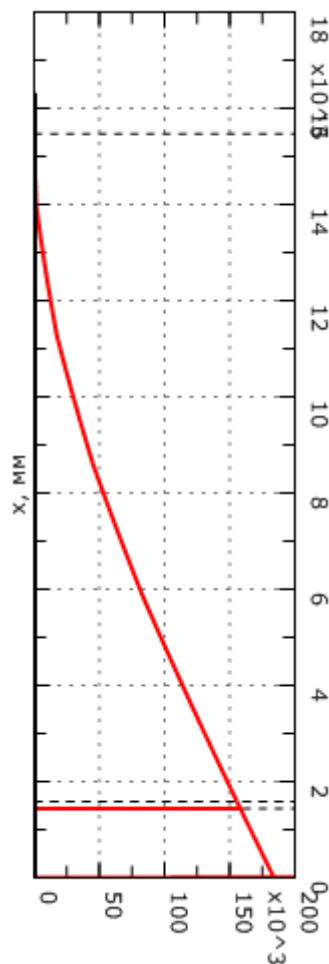
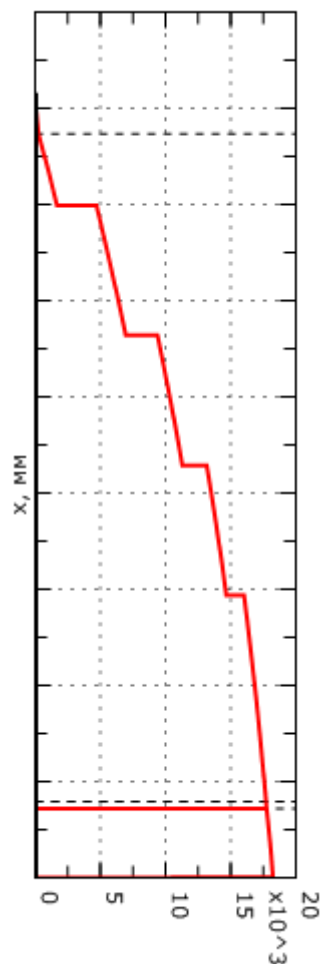
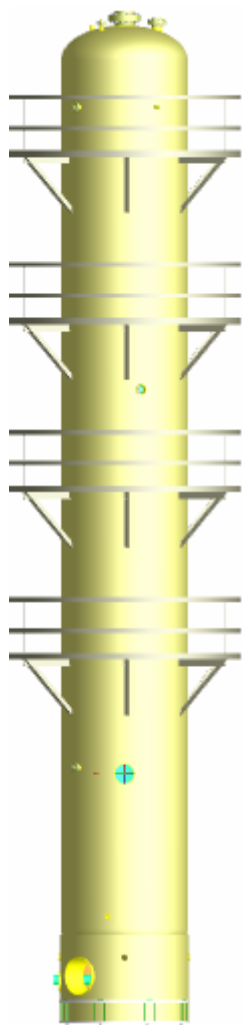
Инов. № подл.	Подпись и дата
19744.4	
Взам. инв. №	Подпись и дата
Инов. № дубл.	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

К-5.00.00.000 PP

Лист

22



Ветровая нагрузка,
 P_w , Н

Изгибающий момент,
 M_w , Н м

— P_w

— M_w

Элемент	Высота до начала элемента, мм	Наружный диаметр, мм	Нагрузка от площадок, Н	Суммарная нагрузка, Н	Изгибающий момент, Н м
Опора колонного аппарата	0	2066	0	$1,82 \cdot 10^4$	$1,836 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое (нижнее)	1419	2036	0	$1,77 \cdot 10^4$	$1,554 \cdot 10^5$
Обечайка цилиндрическая	1571	2036	8700	$1,77 \cdot 10^4$	$1,554 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое (верхнее)	$1,545 \cdot 10^4$	2036	0	247,5	84

Расчёт в условиях монтажа (коррозия не учтена)

Период колебаний $T = 0,8667$ с (см. Расчёт периода колебаний)

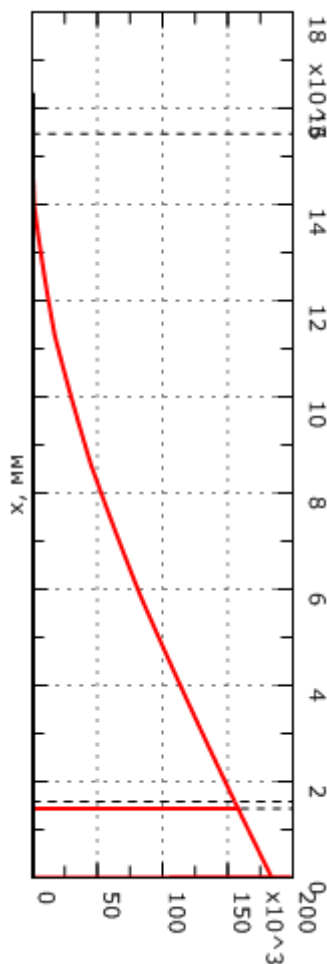
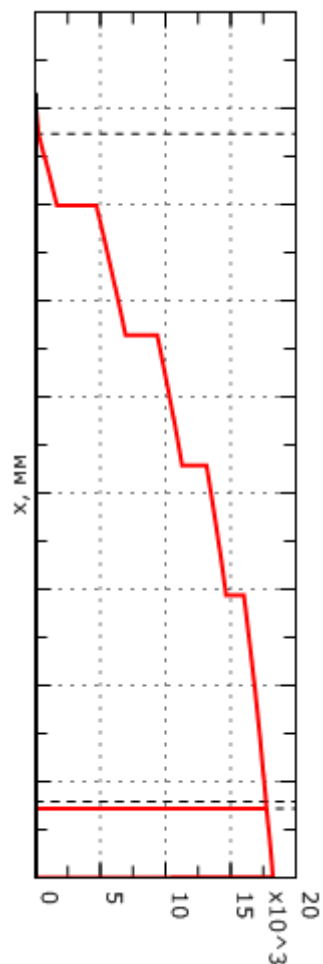
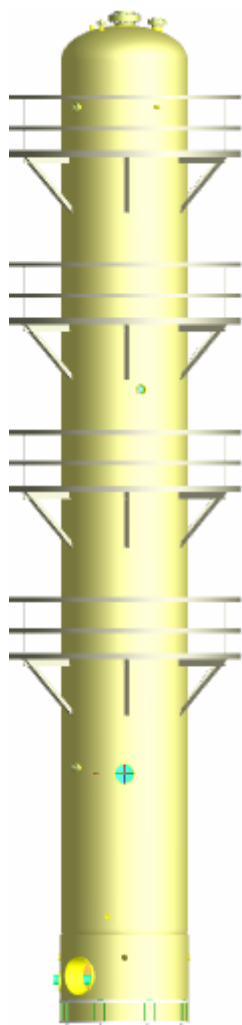
$$\varepsilon = \frac{T \cdot \sqrt{q_{10}}}{790} = 0,01648$$

$$\xi = 1,1 + \sqrt{15,5 \cdot \varepsilon} = 1,605$$

Инов. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

К-5.00.00.000 PP

Лист
23



Ветровая нагрузка,
 P_w , Н

Изгибающий момент,
 M_w , Н м

— P_w

— M_w

Элемент	Высота до начала элемента, мм	Наружный диаметр, мм	Нагрузка от площадок, Н	Суммарная нагрузка, Н	Изгибающий момент, Н м
Опора колонного аппарата	0	2066	0	$1,819 \cdot 10^4$	$1,835 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое (нижнее)	1419	2036	0	$1,769 \cdot 10^4$	$1,552 \cdot 10^5$
Обечайка цилиндрическая	1571	2036	8690	$1,769 \cdot 10^4$	$1,552 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое (верхнее)	$1,545 \cdot 10^4$	2036	0	247,5	84

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания, коррозия учтена)

Период колебаний $T = 1,507$ с (см. Расчёт периода колебаний)

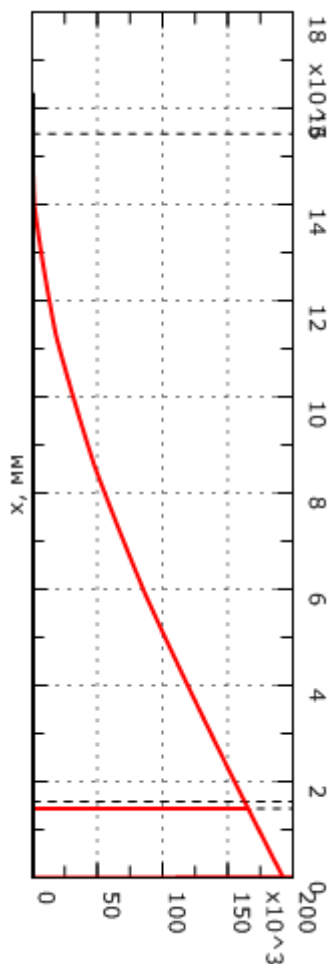
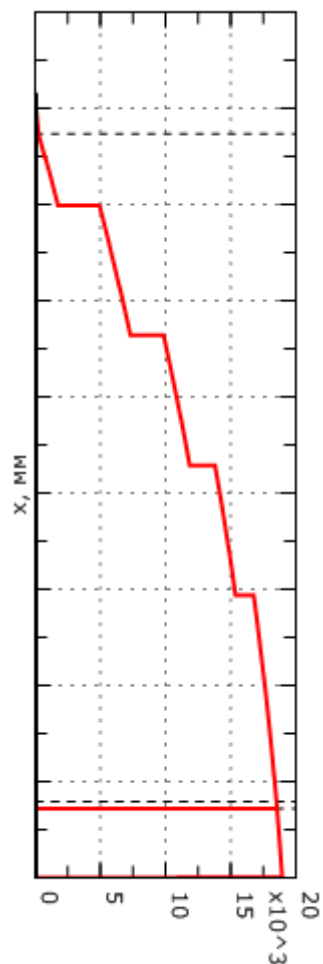
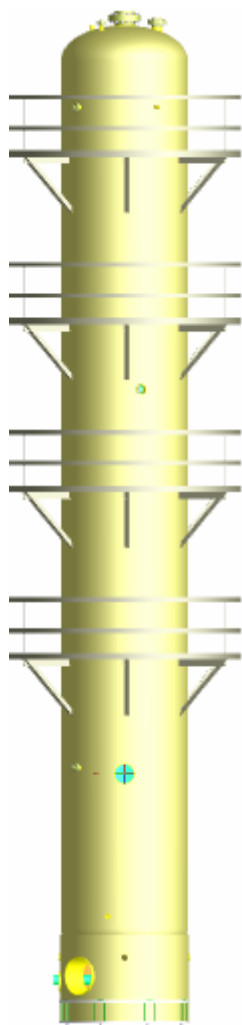
$$\varepsilon = \frac{T \cdot \sqrt{q_{10}}}{790} = 0,02865$$

$$\xi = 1,1 + \sqrt{15,5 \cdot \varepsilon} = 1,766$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

К-5.00.00.000 PP



Ветровая нагрузка,
 P_w , Н

Изгибающий момент,
 M_w , Н м

— P_w

— M_w

Элемент	Высота до начала элемента, мм	Наружный диаметр, мм	Нагрузка от площадок, Н	Суммарная нагрузка, Н	Изгибающий момент, Н м
Опора колонного аппарата	0	2066	0	$1,891 \cdot 10^4$	$1,923 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое (нижнее)	1419	2036	0	$1,85 \cdot 10^4$	$1,628 \cdot 10^5$
Обечайка цилиндрическая	1571	2036	9058	$1,85 \cdot 10^4$	$1,628 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое (верхнее)	$1,545 \cdot 10^4$	2036	0	247,5	84

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания, коррозия не учтена)

Период колебаний $T = 1,482$ с (см. Расчёт периода колебаний)

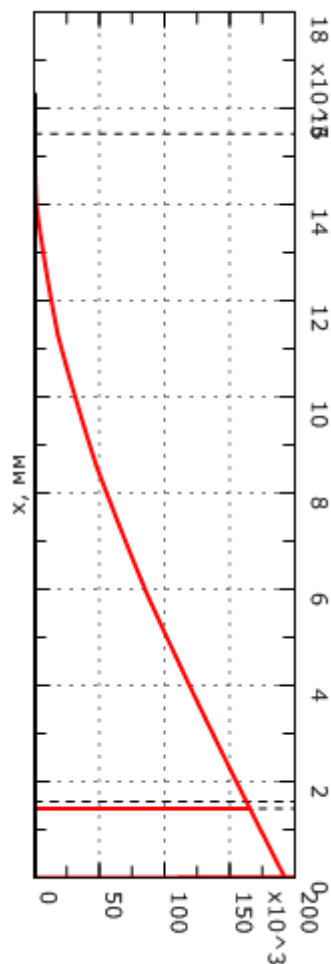
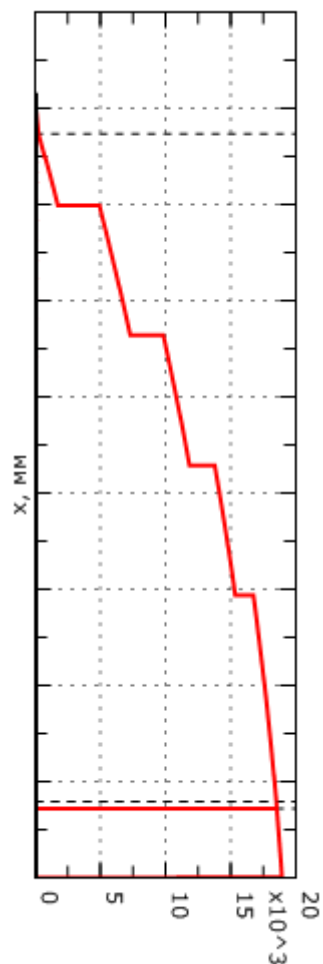
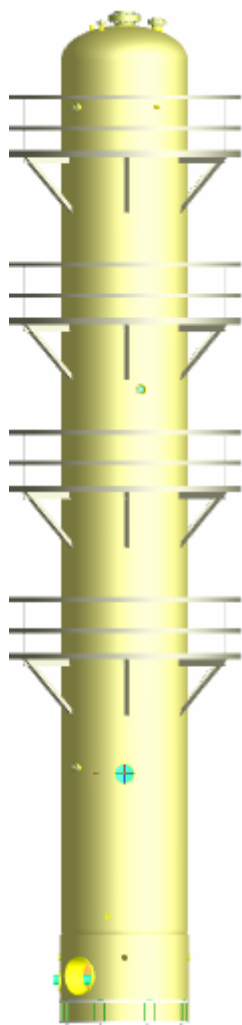
$$\varepsilon = \frac{T \cdot \sqrt{q_{10}}}{790} = 0,02817$$

$$\xi = 1,1 + \sqrt{15,5 \cdot \varepsilon} = 1,761$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

К-5.00.00.000 PP



Ветровая нагрузка,
 P_w , Н

Изгибающий момент,
 M_w , Н м

— P_w

— M_w

Элемент	Высота до начала элемента, мм	Наружный диаметр, мм	Нагрузка от площадок, Н	Суммарная нагрузка, Н	Изгибающий момент, Н м
Опора колонного аппарата	0	2066	0	$1,889 \cdot 10^4$	$1,92 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое (нижнее)	1419	2036	0	$1,849 \cdot 10^4$	$1,626 \cdot 10^5$
Обечайка цилиндрическая	1571	2036	9045	$1,849 \cdot 10^4$	$1,626 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое (верхнее)	$1,545 \cdot 10^4$	2036	0	247,5	84

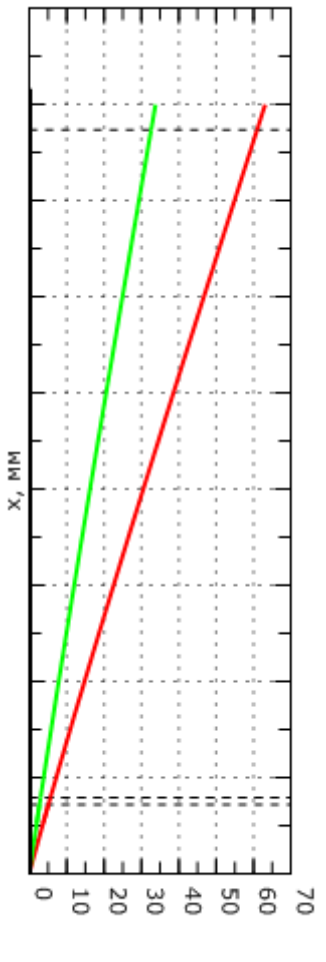
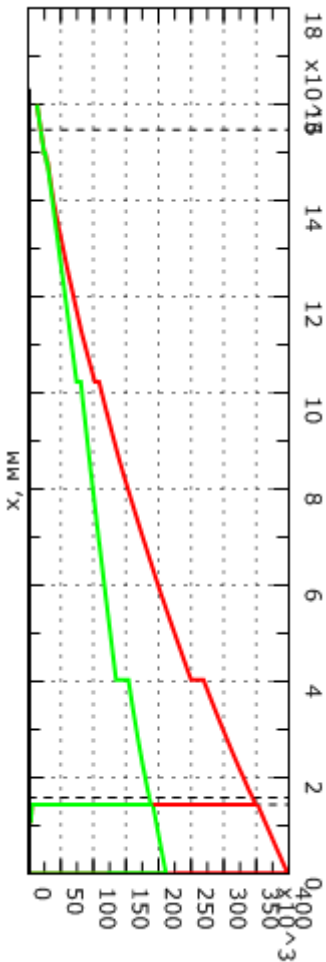
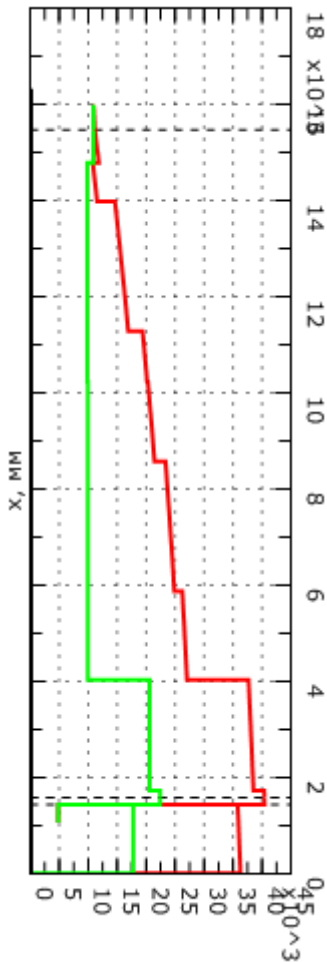
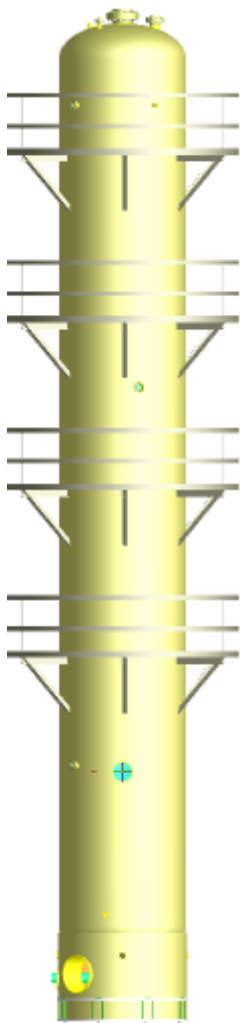
Инов. № подл.	Подпись и дата
19744.4	
Взам. инв. №	Инов. № дубл.
Подпись и дата	
Инов. № подл.	Подпись и дата
19744.4	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

К-5.00.00.000 РР

Расчёт суммарных нагрузок

Расчёт в расчётных условиях (коррозия учтена)



Горизонтальная нагрузка,
 Q_{sum}, H

— Q_{sum}
— ветр.

Изгибающий момент,
 $M_{sum}, H\ m$

— M_{sum}
— ветр.

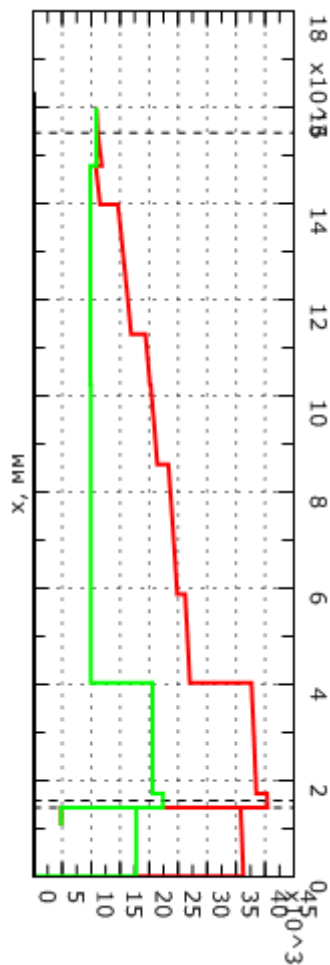
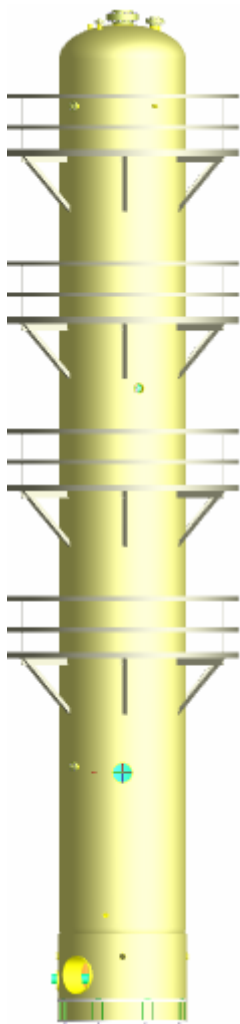
Перемещения от суммарных
нагрузок, y, mm

— Y_{sum}
— ветр.

Элемент корпуса	Высота до начала элемента, мм	Вертикальная нагрузка, Н	Горизонтальная нагрузка с учётом ветр. нагрузки, Н	Изгибающий момент с учётом ветр. нагрузки, Н м
Опора колонного аппарата	0	$(-3,368 \cdot 10^5)$	$3,625 \cdot 10^4$	$3,977 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое (нижнее)	1419	$(-2,774 \cdot 10^5)$	$4,039 \cdot 10^4$	$3,438 \cdot 10^5$
Обечайка цилиндрическая	1571	$(-2,769 \cdot 10^5)$	$4,039 \cdot 10^4$	$3,438 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое (верхнее)	$1,545 \cdot 10^4$	2709	$1,114 \cdot 10^4$	$1,914 \cdot 10^4$

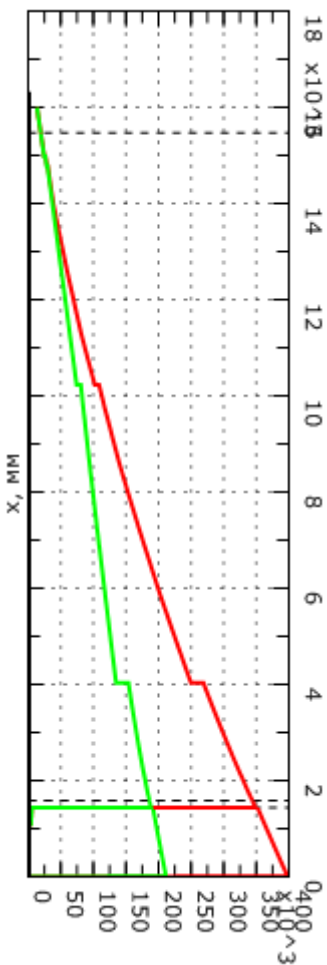
Инов. № подл.	Подпись и дата
19744.4	
Изм.	Лист
№ докум.	Подп.
Дата	

Расчёт в расчётных условиях (коррозия не учтена)



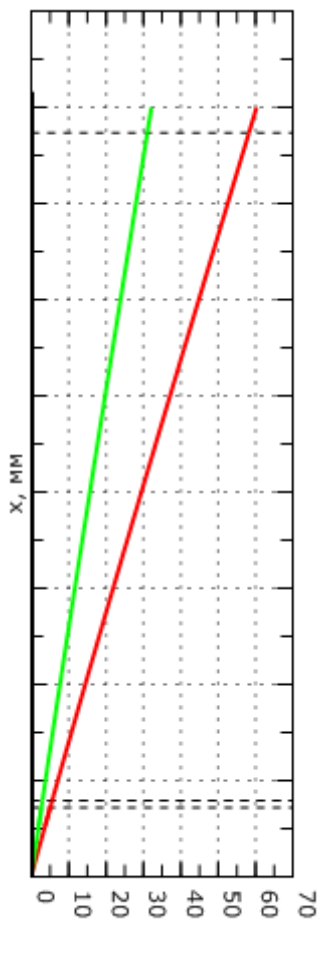
Горизонтальная нагрузка,
 Q_{sum} , Н

— Q_{sum}
— ветр.



Изгибающий момент,
 M_{sum} , Н·м

— M_{sum}
— ветр.



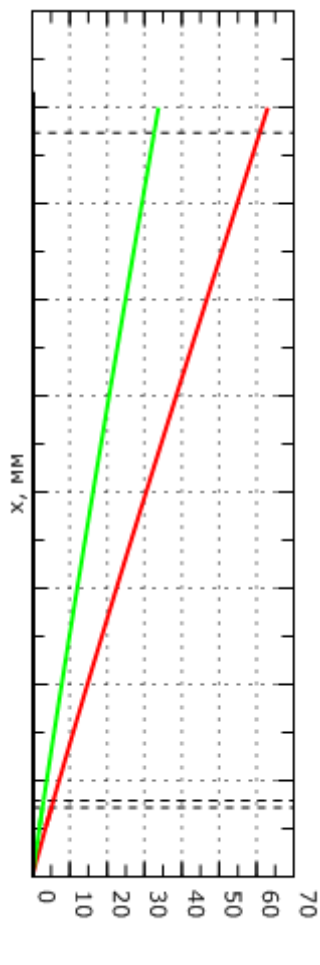
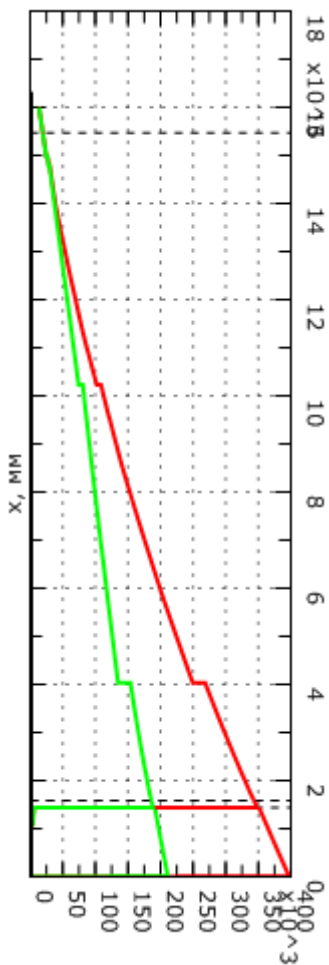
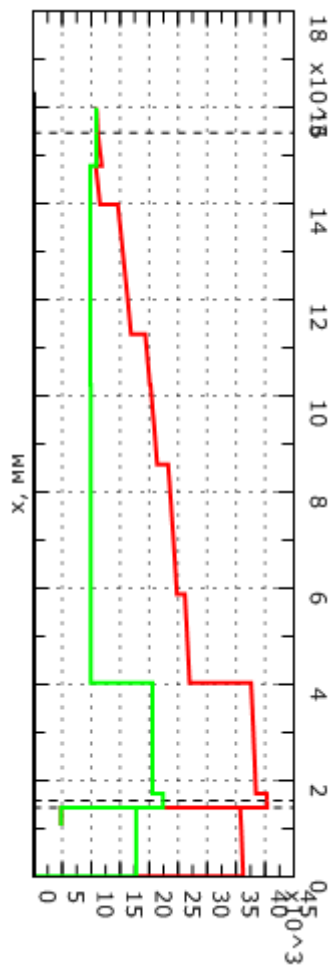
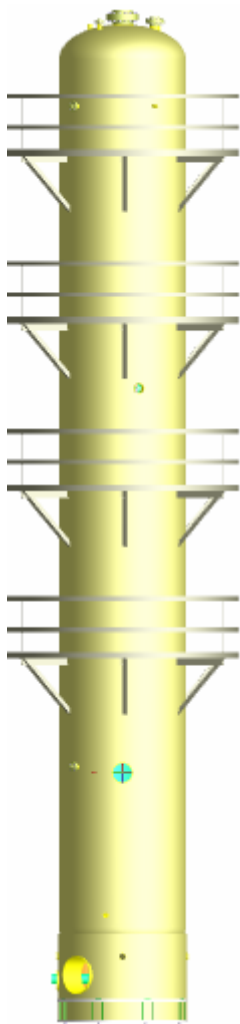
Перемещения от суммарных
нагрузок, y , мм

— Y_{sum}
— ветр.

Элемент корпуса	Высота до начала элемента, мм	Вертикальная нагрузка, Н	Горизонтальная нагрузка с учётом ветр. нагрузки, Н	Изгибающий момент с учётом ветр. нагрузки, Н·м
Опора колонного аппарата	0	$(-3,368 \cdot 10^5)$	$3,624 \cdot 10^4$	$3,975 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое (нижнее)	1419	$(-2,774 \cdot 10^5)$	$4,038 \cdot 10^4$	$3,436 \cdot 10^5$
Обечайка цилиндрическая	1571	$(-2,769 \cdot 10^5)$	$4,038 \cdot 10^4$	$3,436 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое (верхнее)	$1,545 \cdot 10^4$	2709	$1,114 \cdot 10^4$	$1,914 \cdot 10^4$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление) (коррозия учтена)



Горизонтальная нагрузка,
 Q_{sum} , Н

— Q_{sum}
— ветр.

Изгибающий момент,
 M_{sum} , Н·м

— M_{sum}
— ветр.

Перемещения от суммарных
нагрузок, y , мм

— Y_{sum}
— ветр.

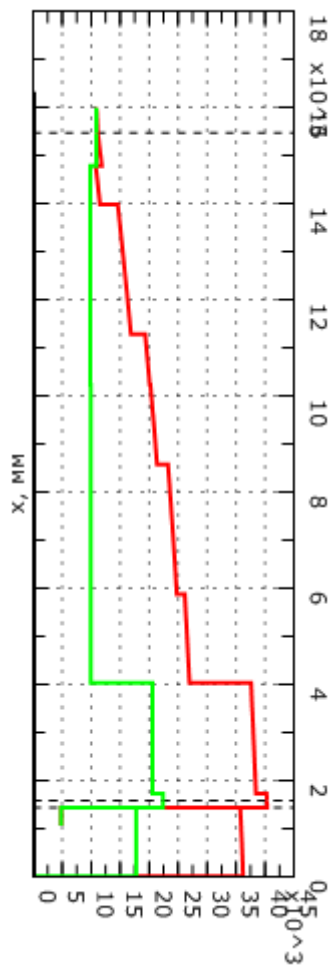
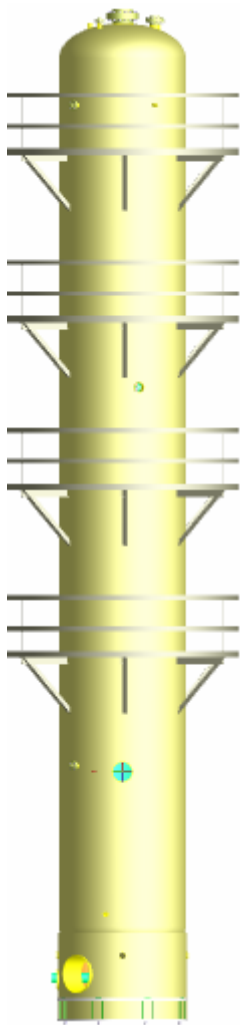
Элемент корпуса	Высота до начала элемента, мм	Вертикальная нагрузка, Н	Горизонтальная нагрузка с учётом ветр. нагрузки, Н	Изгибающий момент с учётом ветр. нагрузки, Н·м
Опора колонного аппарата	0	$(-2,984 \cdot 10^5)$	$3,621 \cdot 10^4$	$3,968 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое (нижнее)	1419	$(-2,464 \cdot 10^5)$	$4,032 \cdot 10^4$	$3,43 \cdot 10^5$
Обечайка цилиндрическая	1571	$(-2,459 \cdot 10^5)$	$4,032 \cdot 10^4$	$3,43 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое (верхнее)	$1,545 \cdot 10^4$	2856	$1,114 \cdot 10^4$	$1,915 \cdot 10^4$

Инов. № подл.	Подпись и дата
19744.4	
Взам. инв. №	Инов. № дубл.
Подпись и дата	
Инов. № подл.	Подпись и дата
19744.4	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

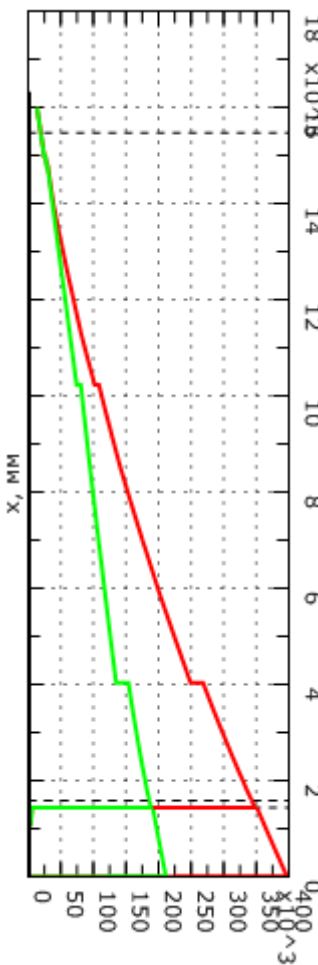
К-5.00.00.000 PP

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление) (коррозия не учтена)



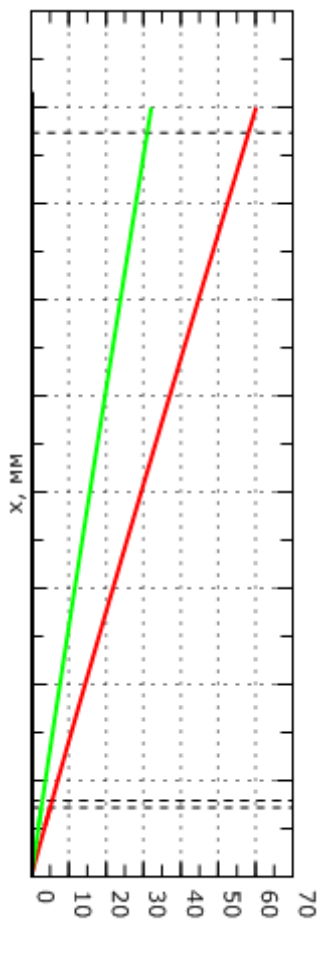
Горизонтальная нагрузка,
 Q_{sum} , Н

— Q_{sum}
— ветр.



Изгибающий момент,
 M_{sum} , Н·м

— M_{sum}
— ветр.



Перемещения от суммарных
нагрузок, у, мм

— Y_{sum}
— ветр.

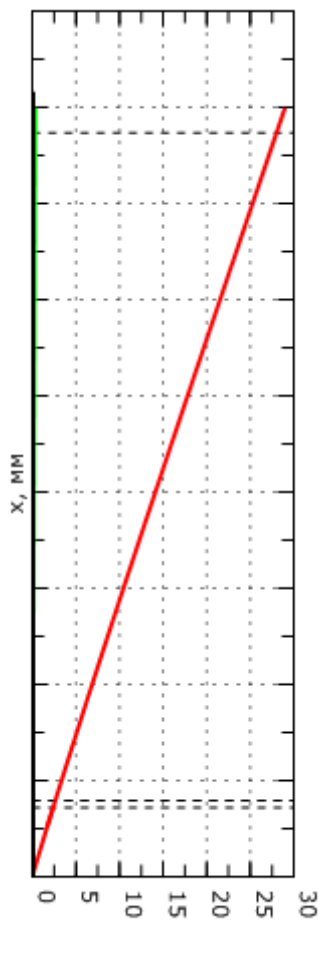
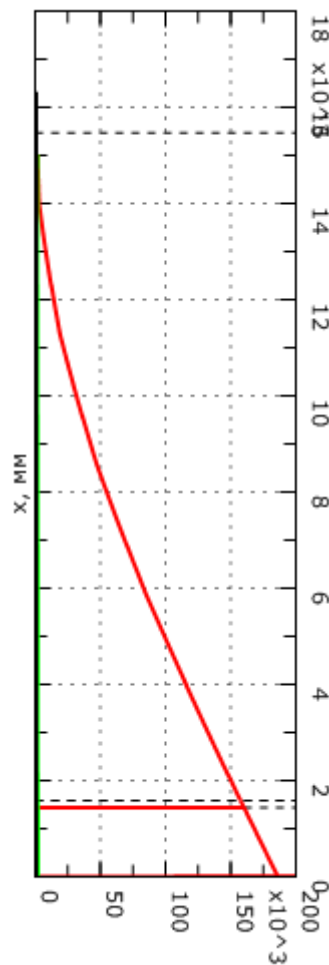
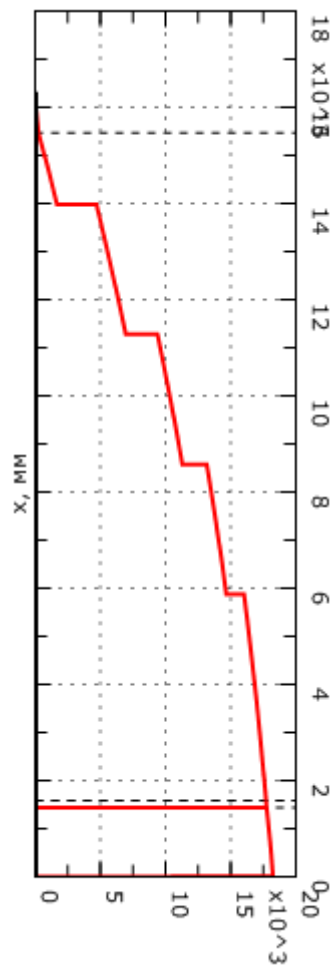
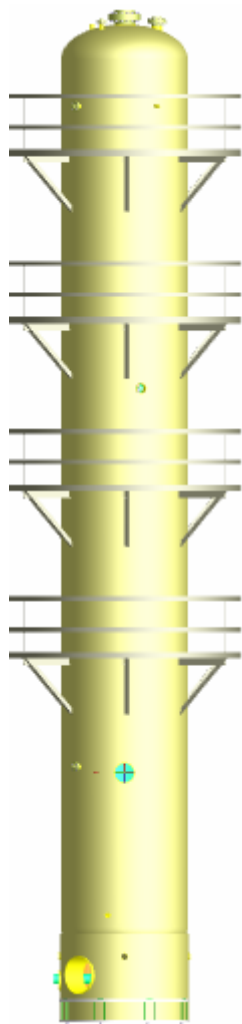
Элемент корпуса	Высота до начала элемента, мм	Вертикальная нагрузка, Н	Горизонтальная нагрузка с учётом ветр. нагрузки, Н	Изгибающий момент с учётом ветр. нагрузки, Н·м
Опора колонного аппарата	0	$(-2,984 \cdot 10^5)$	$3,62 \cdot 10^4$	$3,966 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое (нижнее)	1419	$(-2,464 \cdot 10^5)$	$4,031 \cdot 10^4$	$3,428 \cdot 10^5$
Обечайка цилиндрическая	1571	$(-2,459 \cdot 10^5)$	$4,031 \cdot 10^4$	$3,428 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое (верхнее)	$1,545 \cdot 10^4$	2856	$1,114 \cdot 10^4$	$1,915 \cdot 10^4$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

К-5.00.00.000 РР

Расчёт в условиях монтажа (коррозия учтена)



Горизонтальная нагрузка,
 Q_{sum} , Н

Изгибающий момент,
 M_{sum} , Н м

Перемещения от суммарных
нагрузок, y , мм

— Q_{sum}
— ветр.

— M_{sum}
— ветр.

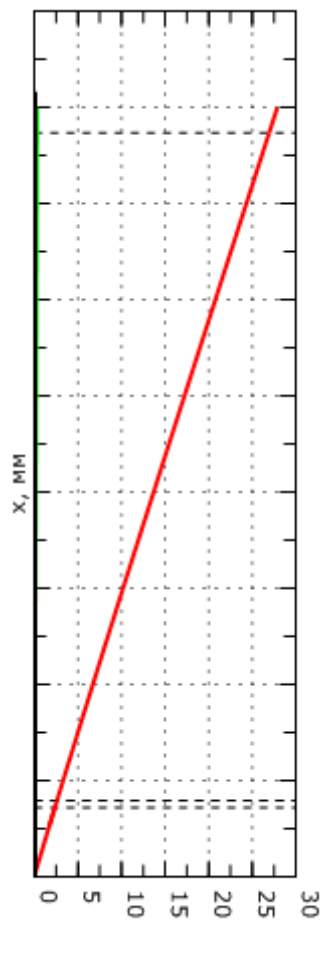
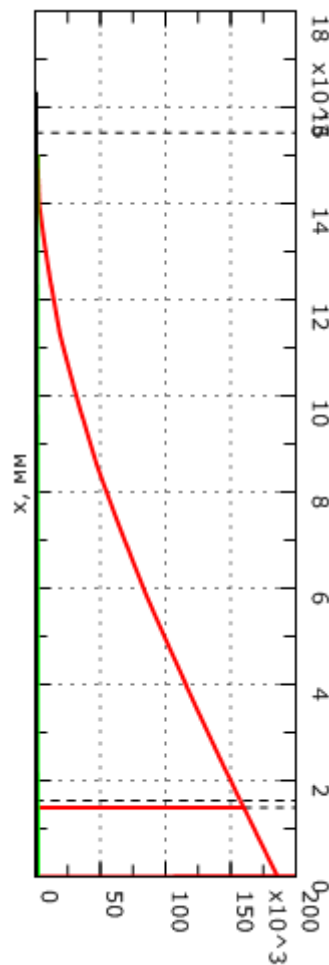
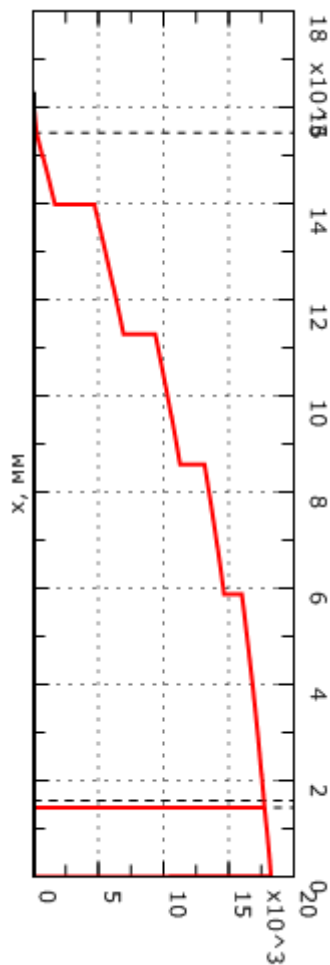
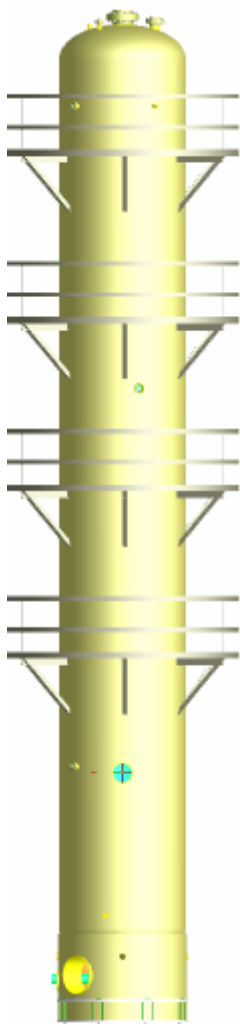
— Y_{sum}
— ветр.

Элемент корпуса	Высота до начала элемента, мм	Вертикальная нагрузка, Н	Горизонтальная нагрузка с учётом ветр. нагрузки, Н	Изгибающий момент с учётом ветр. нагрузки, Н м
Опора колонного аппарата	0	$(-2,437 \cdot 10^5)$	$1,823 \cdot 10^4$	$1,858 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое (нижнее)	1419	$(-1,965 \cdot 10^5)$	$1,77 \cdot 10^4$	$1,574 \cdot 10^5$
Обечайка цилиндрическая	1571	$(-1,96 \cdot 10^5)$	$1,77 \cdot 10^4$	$1,574 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое (верхнее)	$1,545 \cdot 10^4$	(-8044)	247,5	225,7

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Расчёт в условиях монтажа (коррозия не учтена)



Горизонтальная нагрузка,
 Q_{sum} , Н

Изгибающий момент,
 M_{sum} , Н м

Перемещения от суммарных
нагрузок, у, мм

— Q_{sum}
— ветр.

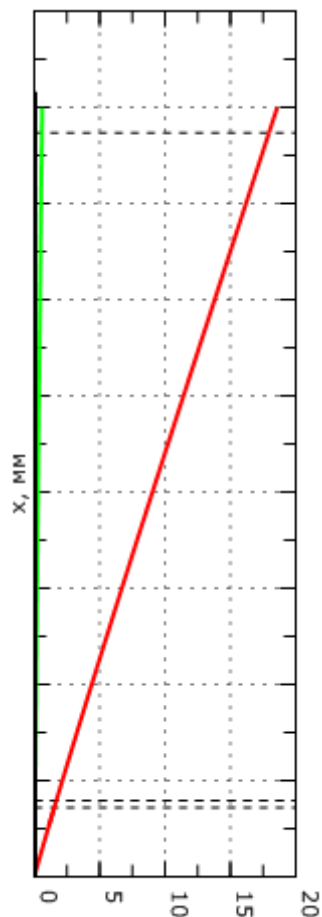
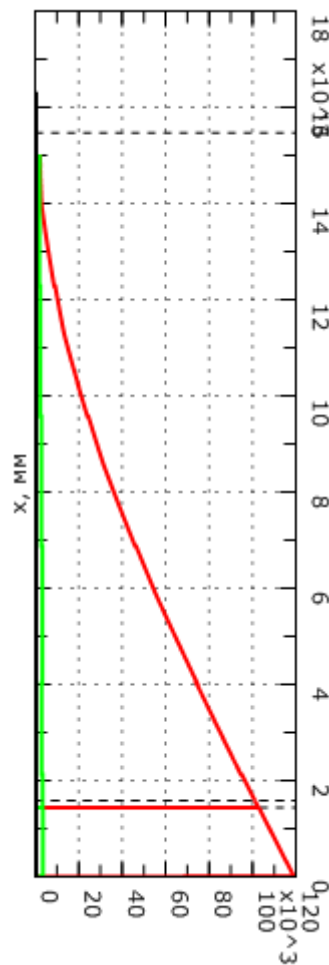
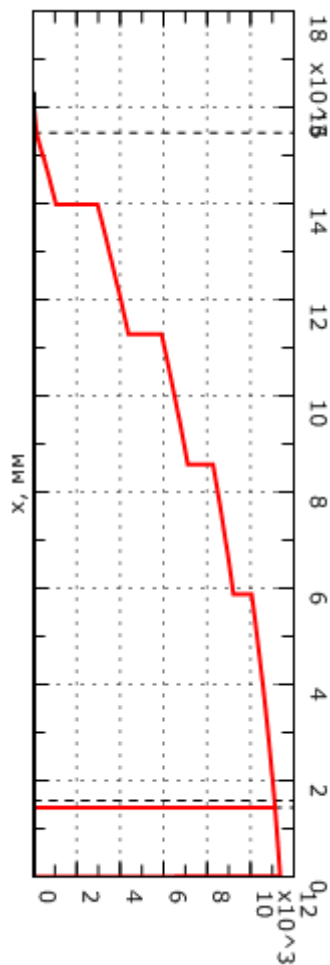
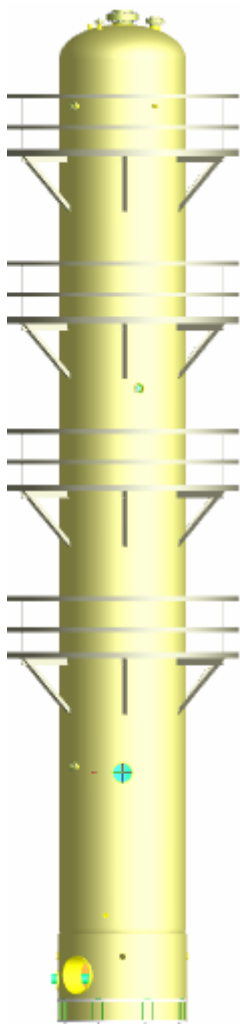
— M_{sum}
— ветр.

— Y_{sum}
— ветр.

Элемент корпуса	Высота до начала элемента, мм	Вертикальная нагрузка, Н	Горизонтальная нагрузка с учётом ветр. нагрузки, Н	Изгибающий момент с учётом ветр. нагрузки, Н м
Опора колонного аппарата	0	$(-2,437 \cdot 10^5)$	$1,822 \cdot 10^4$	$1,856 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое (нижнее)	1419	$(-1,965 \cdot 10^5)$	$1,769 \cdot 10^4$	$1,572 \cdot 10^5$
Обечайка цилиндрическая	1571	$(-1,96 \cdot 10^5)$	$1,769 \cdot 10^4$	$1,572 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое (верхнее)	$1,545 \cdot 10^4$	(-8044)	247,5	225,7

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания, коррозия учтена)



Горизонтальная нагрузка,
 Q_{sum} , Н

Изгибающий момент,
 M_{sum} , Н·м

Перемещения от суммарных
нагрузок, y , мм

— Q_{sum}
— ветр.

— M_{sum}
— ветр.

— Y_{sum}
— ветр.

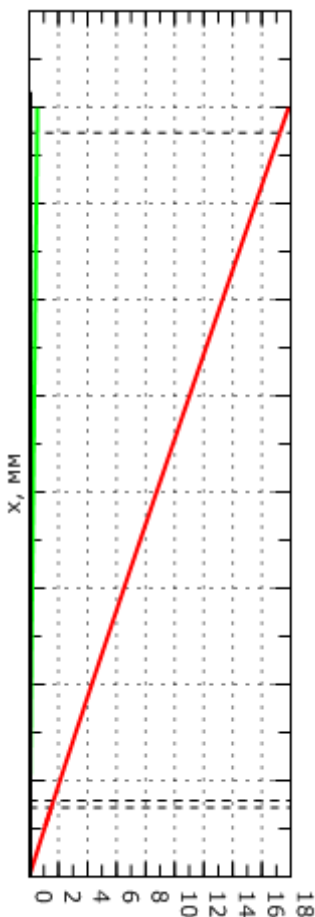
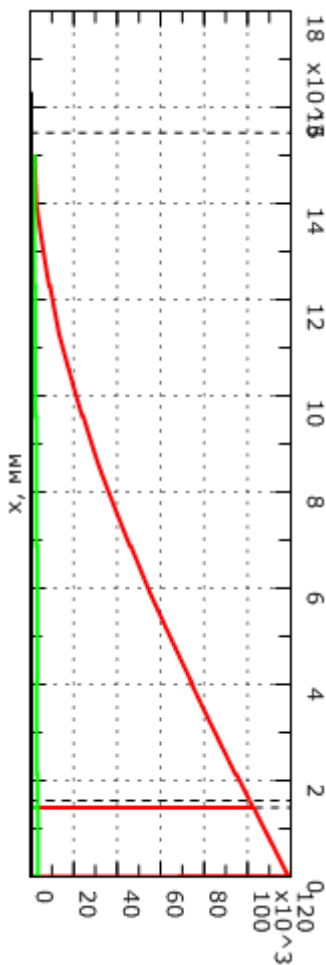
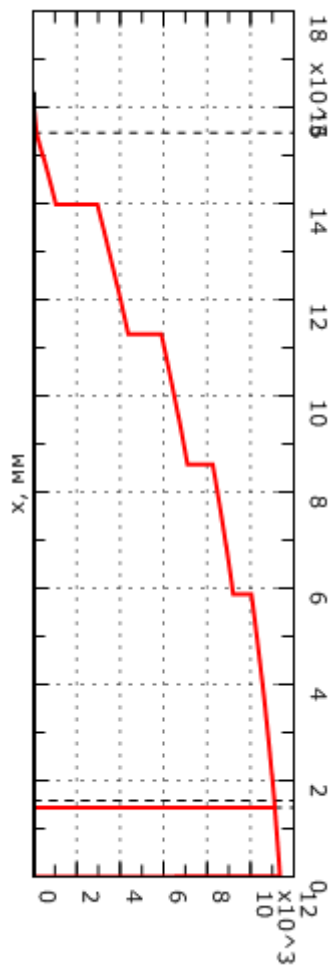
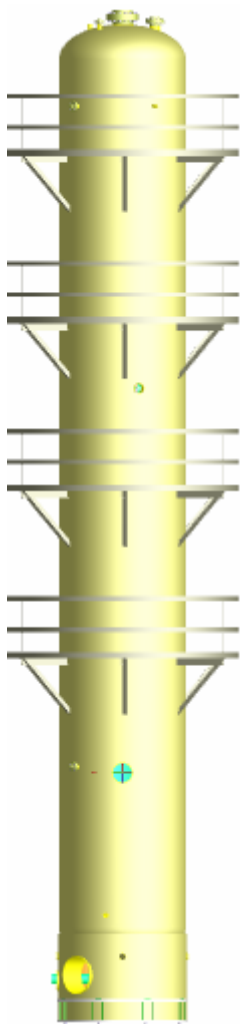
Элемент корпуса	Высота до начала элемента, мм	Вертикальная нагрузка, Н	Горизонтальная нагрузка с учётом ветр. нагрузки, Н	Изгибающий момент с учётом ветр. нагрузки, Н·м
Опора колонного аппарата	0	$(-6,657 \cdot 10^5)$	$1,136 \cdot 10^4$	$1,189 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое (нижнее)	1419	$(-6,093 \cdot 10^5)$	$1,11 \cdot 10^4$	$1,011 \cdot 10^5$
Обечайка цилиндрическая	1571	$(-6,076 \cdot 10^5)$	$1,11 \cdot 10^4$	$1,011 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое (верхнее)	$1,545 \cdot 10^4$	$(-1,728 \cdot 10^4)$	148,5	215,9

Инов. № подл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Инов. № дубл.
Подпись и дата	
Инов. № подл.	19744.4

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

К-5.00.00.000 РР

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания, коррозия не учтена)



Горизонтальная нагрузка,
 Q_{sum}, H

Изгибающий момент,
 $M_{sum}, H \cdot m$

Перемещения от суммарных
нагрузок, y, mm

— Q_{sum}
— ветр.

— M_{sum}
— ветр.

— Y_{sum}
— ветр.

Элемент корпуса	Высота до начала элемента, мм	Вертикальная нагрузка, Н	Горизонтальная нагрузка с учётом ветр. нагрузки, Н	Изгибающий момент с учётом ветр. нагрузки, Н·м
Опора колонного аппарата	0	$(-6,657 \cdot 10^5)$	$1,135 \cdot 10^4$	$1,188 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое (нижнее)	1419	$(-6,093 \cdot 10^5)$	$1,109 \cdot 10^4$	$1,009 \cdot 10^5$
Обечайка цилиндрическая	1571	$(-6,076 \cdot 10^5)$	$1,109 \cdot 10^4$	$1,009 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое (верхнее)	$1,545 \cdot 10^4$	$(-1,728 \cdot 10^4)$	148,5	215,9

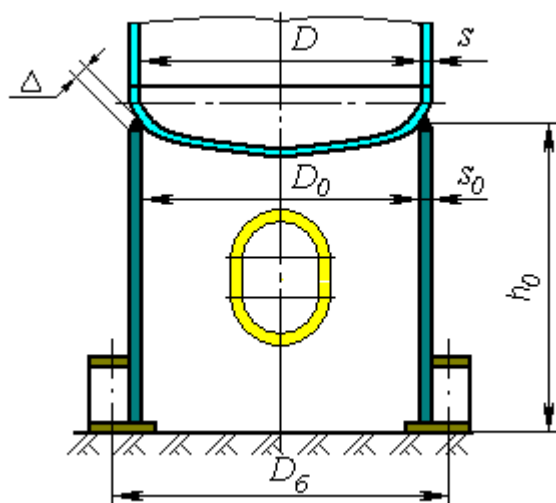
Инов. № подл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Инов. № дубл.
Подпись и дата	
Инов. № подл.	19744.4

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

К-5.00.00.000 PP

Опора колонного аппарата

Опорная обечайка



Исходные данные

Несущий элемент: Днище эллиптическое (нижнее)

Высота опоры, h_0 : 1407 мм

Диаметр верхнего основания, D_0 : 1800 мм

Опорный элемент

Группа патрубков

Цилиндрический участок:

Материал: 09Г2С

Толщина стенки, s_0 : 8 мм

Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c_1 : 2 мм

Прибавка для компенсации минусового допуска, c_2 : 0,8 мм

Прибавка технологическая, c_3 : 0 мм

Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, c : 2,8 мм

Фундамент:

Бетон: В10 (М150)

Изоляция:

Название: Огнезащита

Толщина, $s_{из}$: 125 мм

Плотность, $\rho_{из}$: 1800 кг/м³

Футеровка:

Название: Огнезащита

Толщина, $s_{ф}$: 125 мм

Плотность, $\rho_{ф}$: 1800 кг/м³

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T : 150 °С

Расчётный изгибающий момент в верхнем сечении: $3,518 \cdot 10^5$ Н м

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
К-5.00.00.000 РР			
Лист			
35			

Расчётный изгибающий момент в нижнем сечении: $3,975 \cdot 10^5$ Н м
Расчётное поперечное усилие в верхнем сечении: $3,577 \cdot 10^4$ Н
Расчётное поперечное усилие в нижнем сечении: $3,624 \cdot 10^4$ Н
Расчётное осевое сжимающее усилие, F: $3,368 \cdot 10^5$ Н

Свойства материала опорной обечайки в месте сопряжения с корпусом:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 150 °С (расчётные условия):
[σ]₀= 171 МПа

Свойства материала корпуса аппарата:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 150 °С (расчётные условия):
[σ]_к= 171 МПа

Расчёт опорной обечайки по ГОСТ Р 51274-99

Параметры опасного сечения (п. 7)

Координата сечения (от нижней точки основания): x = 704 мм
Диаметр в опасном сечении: D₂ = 1800 мм
Элемент, содержащий опасное сечение: Цилиндрический участок опоры
Площадь: A = 0,02147 м²
Толщина стенки в опасном сечении: s' = 8 мм
Суммарная прибавка в опасном сечении: c' = 2,8 мм

$$\Psi_1 = \frac{A}{\pi \cdot (D_2 + s' - c') \cdot (s' - c')} = 0,02147 / (3,142 \cdot (1800 + 8 - 2,8) \cdot (8 - 2,8)) = 0,7281$$

Наименьший момент сопротивления: W = 0,006831 м³

$$\Psi_2 = \frac{4 \cdot W}{\pi \cdot (D_2 + s' - c')^2 \cdot (s' - c')} = 4 \cdot 0,006831 / (3,142 \cdot (1800 + 8 - 2,8)^2 \cdot (8 - 2,8)) = 0,5133$$

Расстояние от оси до центра тяжести: b_s = 69,18 мм

$$\Psi_3 = \frac{b_s}{D_2} = 69,18 / 1800 = 0,03843$$

Осевая нагрузка, действующая в сечении x = 704 мм:

$$F = 3,368 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Изгибающий момент, действующий в сечении x = 704 мм:

$$M = 3,748 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Устойчивость опорной обечайки в опасном сечении:

$$\frac{F}{\Psi_1 \cdot [F]} + \frac{M + F \cdot \Psi_3 \cdot D_2}{\Psi_2 \cdot [M]} = 3,368 \cdot 10^5 / (0,7281 \cdot 2,871 \cdot 10^6) + (3,748 \cdot 10^5 + 3,368 \cdot 10^5 \cdot 0,03843 \cdot 1800) / (0,5133 \cdot 1,408 \cdot 10^6) = 0,712$$

$$\frac{F}{\Psi_1 \cdot [F]} + \frac{M + F \cdot \Psi_3 \cdot D_2}{\Psi_2 \cdot [M]} \leq 1,0; \text{ Условие устойчивости выполнено}$$

Прочность сварного шва, соединяющего корпус колонны с опорной обечайкой (сечение Г-Г):

$$\frac{1}{\pi \cdot D_0 \cdot \Delta} \left(\frac{4 \cdot M}{D_0} + F \right) = 1 / (3,142 \cdot 1800 \cdot 8) \cdot (4 \cdot 3,518 \cdot 10^5 / 1800 + 3,368 \cdot 10^5) = 24,72 \text{ МПа}$$

$$0,8 \cdot \min\{[\sigma]_0; [\sigma]_k\} = 0,8 \cdot \min\{171; 171\} = 136,8 \text{ МПа}$$

$$\frac{1}{\pi \cdot D_0 \cdot \Delta} \cdot \left(\frac{4 \cdot M}{D_0} + F \right) \leq 0,8 \cdot \min\{[\sigma]_0; [\sigma]_k\} \text{ Условие прочности выполнено}$$

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Подпись и дата	Инов. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата	Инов. № подл.
				19744.4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 РР				Лист
				36

Условия нагружения:

Расчётная температура, T:	180 °C
Расчётный изгибающий момент в верхнем сечении:	$3,509 \cdot 10^5$ Н м
Расчётный изгибающий момент в нижнем сечении:	$3,966 \cdot 10^5$ Н м
Расчётное поперечное усилие в верхнем сечении:	$3,57 \cdot 10^4$ Н
Расчётное поперечное усилие в нижнем сечении:	$3,62 \cdot 10^4$ Н
Расчётное осевое сжимающее усилие, F:	$2,984 \cdot 10^5$ Н

Свойства материала опорной обечайки в месте сопряжения с корпусом:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 180 °C (расчётные условия (наружное давление)):

$$[\sigma]_0 = 167 \text{ МПа}$$

Свойства материала корпуса аппарата:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 180 °C (расчётные условия (наружное давление)):

$$[\sigma]_K = 167 \text{ МПа}$$

Расчёт опорной обечайки по ГОСТ Р 51274-99

Параметры опасного сечения (п. 7)

Координата сечения (от нижней точки основания): x = 704 мм

Диаметр в опасном сечении: D₂ = 1800 мм

Элемент, содержащий опасное сечение: Цилиндрический участок опоры

Площадь: A = 0,02147 м²

Толщина стенки в опасном сечении: s' = 8 мм

Суммарная прибавка в опасном сечении: c' = 2,8 мм

$$\Psi_1 = \frac{A}{\pi \cdot (D_2 + s' - c') \cdot (s' - c')} = 0,02147 / (3,142 \cdot (1800 + 8 - 2,8) \cdot (8 - 2,8)) = 0,7281$$

Наименьший момент сопротивления: W = 0,006831 м³

$$\Psi_2 = \frac{4 \cdot W}{\pi \cdot (D_2 + s' - c')^2 \cdot (s' - c')} = 4 \cdot 0,006831 / (3,142 \cdot (1800 + 8 - 2,8)^2 \cdot (8 - 2,8)) = 0,5133$$

Расстояние от оси до центра тяжести: b_s = 69,18 мм

$$\Psi_3 = \frac{b_s}{D_2} = 69,18 / 1800 = 0,03843$$

Осевая нагрузка, действующая в сечении x = 704 мм:

$$F = 2,984 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Изгибающий момент, действующий в сечении x = 704 мм:

$$M = 3,739 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Устойчивость опорной обечайки в опасном сечении:

$$\frac{F}{\Psi_1 \cdot [F]} + \frac{M + F \cdot \Psi_3 \cdot D_2}{\Psi_2 \cdot [M]} = \frac{2,984 \cdot 10^5}{(0,7281 \cdot 2,818 \cdot 10^6)} + \frac{(3,739 \cdot 10^5 + 2,984 \cdot 10^5 \cdot 0,03843 \cdot 1800)}{(0,5133 \cdot 1,381 \cdot 10^6)} = 0,7019$$

$$\frac{F}{\Psi_1 \cdot [F]} + \frac{M + F \cdot \Psi_3 \cdot D_2}{\Psi_2 \cdot [M]} \leq 1,0; \text{ Условие устойчивости выполнено}$$

Прочность сварного шва, соединяющего корпус колонны с опорной обечайкой (сечение Г-Г):

$$\frac{1}{\pi \cdot D_0 \cdot \Delta} \left(\frac{4 \cdot M}{D_0} + F \right) = 1 / (3,142 \cdot 1800 \cdot 8) \cdot (4 \cdot 3,509 \cdot 10^5 / 1800 + 2,984 \cdot 10^5) = 23,83 \text{ МПа}$$

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 PP				Лист
				37

$$0.8 \cdot \min \{ [\sigma]_0; [\sigma]_k \} = 0.8 * \min \{ 167; 167 \} = 133,6 \text{ МПа}$$

$$\frac{1}{\pi \cdot D_0 \cdot \Delta} \cdot \left(\frac{4 \cdot M}{D_0} + F \right) \leq 0.8 \cdot \min \{ [\sigma]_0; [\sigma]_k \} \quad \text{Условие прочности выполнено}$$

Расчёт в условиях испытаний

Условия нагружения:

Расчётная температура, T:	20 °С
Расчётный изгибающий момент в верхнем сечении:	$1,028 \cdot 10^5 \text{ Н м}$
Расчётный изгибающий момент в нижнем сечении:	$1,188 \cdot 10^5 \text{ Н м}$
Расчётное поперечное усилие в верхнем сечении:	$1,111 \cdot 10^4 \text{ Н}$
Расчётное поперечное усилие в нижнем сечении:	$1,135 \cdot 10^4 \text{ Н}$
Расчётное осевое сжимающее усилие, F:	$6,657 \cdot 10^5 \text{ Н}$

Свойства материала опорной обечайки в месте сопряжения с корпусом:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 20 °С (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]_0^{20} = \eta * R_{e/20} / n_T = 1 * 300 / 1,1 = 272,7 \text{ МПа}$$

Свойства материала корпуса аппарата:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 20 °С (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]_k^{20} = \eta * R_{e/20} / n_T = 1 * 300 / 1,1 = 272,7 \text{ МПа}$$

Расчёт опорной обечайки по ГОСТ Р 51274-99

Параметры опасного сечения (п. 7)

Элемент, содержащий опасное сечение: Цилиндрический участок опоры

Осевая нагрузка, действующая в сечении x = 704 мм:

$$F = 6,657 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Изгибающий момент, действующий в сечении x = 704 мм:

$$M = 1,109 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Устойчивость опорной обечайки в опасном сечении:

$$\frac{F}{\psi_1 \cdot [F]} + \frac{M + F \cdot \psi_3 \cdot D_2}{\psi_2 \cdot [M]} = \frac{6,657 \cdot 10^5}{(0,7281 * 4,235 \cdot 10^6)} + \frac{(1,109 \cdot 10^5 + 6,657 \cdot 10^5 * 0,03843 * 1800)}{(0,5133 * 2,091 \cdot 10^6)} = 0,3623$$

$$\frac{F}{\psi_1 \cdot [F]} + \frac{M + F \cdot \psi_3 \cdot D_2}{\psi_2 \cdot [M]} \leq 1,0; \quad \text{Условие устойчивости выполнено}$$

Прочность сварного шва, соединяющего корпус колонны с опорной обечайкой (сечение Г-Г):

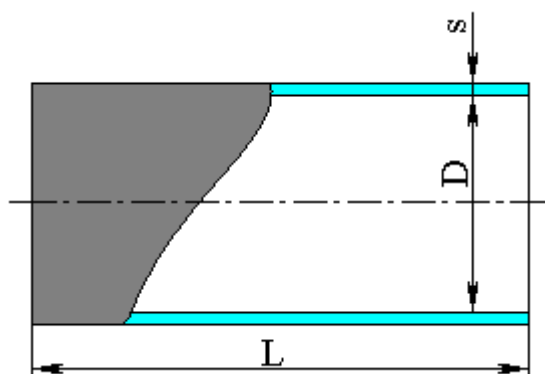
$$\frac{1}{\pi \cdot D_0 \cdot \Delta} \cdot \left(\frac{4 \cdot M}{D_0} + F \right) = 1 / (3,142 * 1800 * 8) * (4 * 1,028 \cdot 10^5 / 1800 + 6,657 \cdot 10^5) = 19,77 \text{ МПа}$$

$$0.8 \cdot \min \{ [\sigma]_0; [\sigma]_k \} = 0.8 * \min \{ 272,7; 272,7 \} = 218,2 \text{ МПа}$$

$$\frac{1}{\pi \cdot D_0 \cdot \Delta} \cdot \left(\frac{4 \cdot M}{D_0} + F \right) \leq 0.8 \cdot \min \{ [\sigma]_0; [\sigma]_k \} \quad \text{Условие прочности выполнено}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	К-5.00.00.000 РР					Лист
19744.4										38
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

Цилиндрический участок опоры



Исходные данные

Материал: 09Г2С
 Внутр. диаметр, D: 1800 мм
 Толщина стенки, s: 8 мм
 Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c_1 : 2 мм
 Прибавка для компенсации минусового допуска, c_2 : 0,8 мм
 Прибавка технологическая, c_3 : 0 мм
 Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, c : 2,8 мм
 Длина обечайки, L: 1383 мм
 Коэффициенты прочности сварных швов:
 Продольный шов:

$$\varphi_P = 1$$

Окружной шов:

$$\varphi_T = 1$$

Изоляция:

Название: Огнезащита

Толщина, $s_{из}$: 125 мм

Плотность, $\rho_{из}$: 1800 кг/м³

Футеровка:

Название: Огнезащита

Толщина, $s_{ф}$: 125 мм

Плотность, $\rho_{ф}$: 1800 кг/м³

Расчётные условия

Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием (п. 5.3.4)

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 150$ °С (расчётные условия):

$$[\sigma] = 171 \text{ МПа}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$[F]_{\text{пр}} = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3,142 \cdot (1800 + 8 - 2,8) \cdot (8 - 2,8) \cdot 171 = 5,043 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре $T = 150$ °С:

$$E = 1,86 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:

Инов. № подл.	Подпись и дата
19744.4	
Взам. инв. №	Инов. № дубл.
Подпись и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

К-5.00.00.000 РР

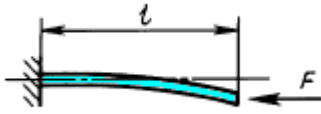
Лист

39

$$[F]_{E1} = \frac{31.0 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2.5} = 310 \cdot 10^6 \cdot 1,86 \cdot 10^5 \cdot 1800^2 / (2,4) \cdot (100 \cdot (8 - 2,8) / 1800)^{2.5} = 3,492 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Расчётная длина для расчёта от действия осевой силы:

$$l_F = 1395 \text{ мм}$$



Приведённая длина: $l_{np} = 2790 \text{ мм}$

Гибкость:

$$\lambda = \frac{2.83 \cdot l_{np}}{D + s - c} = 2.83 \cdot 2790 / (1800 + 8 - 2,8) = 4,36$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия общей устойчивости:

$$[F]_{E2} = \frac{\pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot E}{n_y} \cdot \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2 = 3,142 \cdot (1800 + 8 - 2,8) \cdot (8 - 2,8) \cdot 1,86 \cdot 10^5 / (2,4) \cdot (3,142 / 4,36)^2 = 1,186 \cdot 10^9 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия устойчивости:

$$[F]_E = \min \{ [F]_{E1}, [F]_{E2} \} = \min \{ 3,492 \cdot 10^6, 1,186 \cdot 10^9 \} = 3,492 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие:

$$[F] = \frac{[F]_H}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_H}{[F]_E} \right)^2}} = 5,043 \cdot 10^6 / (1 + (5,043 \cdot 10^6 / 3,492 \cdot 10^6)^2)^{1/2} = 2,871 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Обечайка, нагруженная изгибающим моментом (п. 5.3.5)

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны сжатия:

$$[M]_H = \frac{D}{4} \cdot [F]_H = 1800 / 4 \cdot 5,043 \cdot 10^6 = 2,269 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_E = \frac{D}{3,5} \cdot [F]_{E1} = 1800 / 3,5 \cdot 3,492 \cdot 10^6 = 1,796 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \frac{[M]_H}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_H}{[M]_E} \right)^2}} = 2,269 \cdot 10^6 / (1 + (2,269 \cdot 10^6 / 1,796 \cdot 10^6)^2)^{1/2} = 1,408 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Расчётные условия (наружное давление)

Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием (п. 5.3.4)

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 180 \text{ °C}$ (расчётные условия (наружное давление)):

$$[\sigma] = 167 \text{ МПа}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$[F]_H = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3,142 \cdot (1800 + 8 - 2,8) \cdot (8 - 2,8) \cdot 167 = 4,925 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре $T = 180 \text{ °C}$:

$$E = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

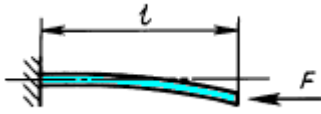
Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 PP				Лист
				40

$$[F]_{E1} = \frac{31.0 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2.5} = 310 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 1800^2 / (2,4) \cdot (100 \cdot (8 - 2,8) / 1800)^{2.5} = 3,435 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Расчётная длина для расчёта от действия осевой силы:

$$l_F = 1395 \text{ мм}$$



Приведённая длина: $l_{np} = 2790 \text{ мм}$

Гибкость:

$$\lambda = \frac{2.83 \cdot l_{np}}{D + s - c} = 2.83 \cdot 2790 / (1800 + 8 - 2,8) = 4,36$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия общей устойчивости:

$$[F]_{E2} = \frac{\pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot E}{n_y} \cdot \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2 = 3,142 \cdot (1800 + 8 - 2,8) \cdot (8 - 2,8) \cdot 1,83 \cdot 10^5 / (2,4) \cdot (3,142 / 4,36)^2 = 1,167 \cdot 10^9 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия устойчивости:

$$[F]_E = \min \{ [F]_{E1}, [F]_{E2} \} = \min \{ 3,435 \cdot 10^6, 1,167 \cdot 10^9 \} = 3,435 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие:

$$[F] = \frac{[F]_H}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_H}{[F]_E} \right)^2}} = 4,925 \cdot 10^6 / (1 + (4,925 \cdot 10^6 / 3,435 \cdot 10^6)^2)^{1/2} = 2,818 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Обечайка, нагруженная изгибающим моментом (п. 5.3.5)

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны сжатия:

$$[M]_H = \frac{D}{4} \cdot [F]_H = 1800 / 4 \cdot 4,925 \cdot 10^6 = 2,216 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_E = \frac{D}{3,5} \cdot [F]_{E1} = 1800 / 3,5 \cdot 3,435 \cdot 10^6 = 1,767 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \frac{[M]_H}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_H}{[M]_E} \right)^2}} = 2,216 \cdot 10^6 / (1 + (2,216 \cdot 10^6 / 1,767 \cdot 10^6)^2)^{1/2} = 1,381 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Условия испытаний

Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием (п. 5.3.4)

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 20 \text{ °C}$ (условия гидротестирования):

$$[\sigma]^{20} = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 300 / 1,1 = 272,7 \text{ МПа}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$[F]_H = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3,142 \cdot (1800 + 8 - 2,8) \cdot (8 - 2,8) \cdot 272,7 = 8,043 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре $T = 20 \text{ °C}$:

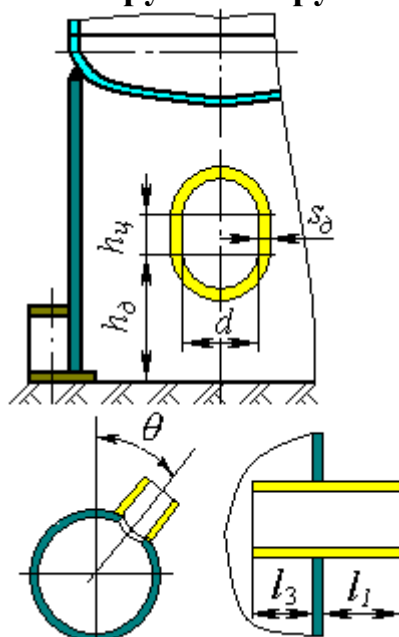
$$E^{20} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:

Инв. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	К-5.00.00.000 PP					Лист
										41
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

Группа патрубков элемента 'Опора колонного аппарата'

Группа патрубков



Исходные данные

Несущий элемент: Опора колонного аппарата

№	Название патрубка	d, мм	s _d , мм	h _d , мм	h _ц , мм	θ, °	l ₁ , мм	l ₃ , мм
1	Д	305	10	665	0	270	150	162
2	С1	600	8	750	0	45	150	212
3	С2	600	8	750	0	225	150	212
4	Т1	96	6	1050	0	0	150	152
5	Т2	96	6	1050	0	90	150	152
6	Т3	96	6	1050	0	180	150	152
7	Т4	96	6	1050	0	270	150	152

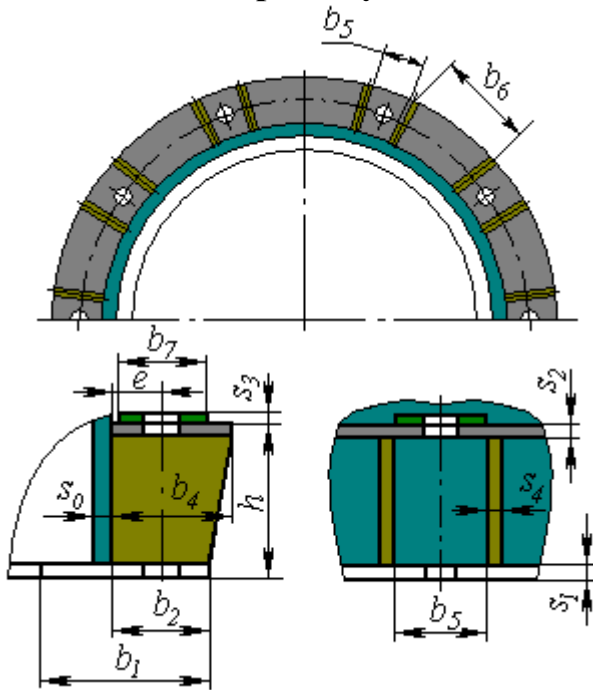
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

К-5.00.00.000 РР

Опорный узел элемента 'Опора колонного аппарата'

Расчёт опорного узла по ГОСТ Р 51274-99



Несущий элемент:	Опора колонного аппарата	
Тип элемента:	4	
Материал:	09Г2С	
Исполнительная толщина нижнего опорного кольца, s_1 :	24	мм
Ширина нижнего опорного кольца, b_1 :	200	мм
Выступающая ширина нижнего опорного кольца, b_2 :	142	мм
Наличие усиливающей пластины	Да	
Толщина усиливающей пластины, s_3 :	12	мм
Ширина усиливающей пластины, b_7 :	100	мм
Ширина верхнего опорного кольца, b_4 :	142	мм
Минимальное расстояние между двумя смежными ребрами, b_5 :	160	мм
Исполнительная толщина верхнего опорного кольца, s_2 :	40	мм
Исполнительная толщина ребра, s_4 :	12	мм
Высота опорного узла, h :	364	мм
Анкерные болты:		
Материал:		
Номинальный диаметр, d :	36	мм
Количество, n	8	
Диаметр болтовой окружности, D_6 :	1980	мм

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётный изгибающий момент, M : 3,975·10⁵ Н м

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
19744.4									
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 РР				
									Лист
									44

Расчётное осевое сжимающее усилие, F: 3,368·10⁵ Н

Результаты расчёта:

Свойства материала элемента опорного узла:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре Т = 180 °С (расчётные условия):

[σ]= 150 МПа

Свойства материала опорной обечайки в зоне верхнего опорного кольца:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре Т = 150 °С (расчётные условия):

[σ]₀= 171 МПа

Свойства материала анкерных болтов:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (расчётные условия):

σ_В= 180 МПа

Свойства материала бетона:

Допускаемые напряжения для бетона класса В10 (М150):

[σ]_{бет}= 6 МПа

Прочность анкерных болтов (п. 9)

$$\chi_6 = 2.7 - 2 \cdot \frac{F \cdot D_6}{M} + 3.7 \cdot \left(\frac{F \cdot D_6}{M}\right)^2 - 2.5 \cdot \left(\frac{F \cdot D_6}{M}\right)^3 + 0.65 \cdot \left(\frac{F \cdot D_6}{M}\right)^4 \quad \text{при } \frac{F \cdot D_6}{M} \geq 0.5$$

$$= 2.7 - 2 \cdot \frac{3,368 \cdot 10^5 \cdot 1980}{3,975 \cdot 10^5} + 3.7 \cdot \left(\frac{3,368 \cdot 10^5 \cdot 1980}{3,975 \cdot 10^5}\right)^2 - 2.5 \cdot \left(\frac{3,368 \cdot 10^5 \cdot 1980}{3,975 \cdot 10^5}\right)^3 + 0.65 \cdot \left(\frac{3,368 \cdot 10^5 \cdot 1980}{3,975 \cdot 10^5}\right)^4 = 3,024$$

$$\chi_6 \cdot \sqrt{\frac{M - 0.44 \cdot F \cdot D_6}{n \cdot [\sigma]_B \cdot D_6}} = 3,024 \cdot ((3,975 \cdot 10^5 - 0.44 \cdot 3,368 \cdot 10^5 \cdot 1980) / (8 \cdot 180 \cdot 1980))^{1/2} = 18,27 \text{ мм}$$

Внутренний диаметр резьбы анкерного болта:
d₆ = 31,09 мм

Условие работоспособности: $d_6 \geq \chi_6 \cdot \sqrt{\frac{M - 0.44 \cdot F \cdot D_6}{n \cdot [\sigma]_B \cdot D_6}}$

31,09 мм ≥ 18,27 мм. Условие прочности выполнено

Толщина нижнего опорного кольца (п. 8.2)

Расстояние между двумя смежными ребрами b₆ = 630,6 мм

$$\chi_1 = \frac{\left(1 + 1.81 \cdot \left(\frac{b_2}{b_6}\right)^3\right)^2}{1 + 2.97 \cdot \left(\frac{b_2}{b_6}\right)^3} = (1 + 1.81 \cdot (142 / 630,6)^3) / (1 + 2.97 \cdot (142 / 630,6)^3)^2 = 0,9745$$

$$\max \left\{ \chi_1 \cdot b_2 \cdot \sqrt{\frac{\frac{4 \cdot M}{D_6} + F}{D_6 \cdot b_1 \cdot [\sigma]_A}} + c; 1.5 \cdot s_0 \right\} = \max \{ 0,9745 \cdot 142 \cdot ((4 \cdot 3,975 \cdot 10^5 / 1980 + 3,368 \cdot 10^5) / (1980 \cdot 200 \cdot 150))^{1/2} + 3,1; 1.5 \cdot 8 \} = 22,27 \text{ мм}$$

Подпись и дата		Инов. № дубл.		Взам. инв. №		Подпись и дата		Инов. № подл.	19744.4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 РР				Лист
									45

$$\text{Условие работоспособности: } s_1 \geq \max \left\{ \chi_1 \cdot b_2 \cdot \sqrt{\frac{\frac{4 \cdot M}{D_6} + F}{D_6 \cdot b_1 \cdot [\sigma]_A}} + c; 1.5 \cdot s_0 \right\}$$

$24 \text{ мм} \geq 22,27 \text{ мм}$. Условие прочности выполнено

Ширина нижнего опорного кольца (п. 8.3)

$$\frac{\frac{4 \cdot M}{D_6} + F}{\pi \cdot D_6 \cdot [\sigma]_{\text{сер}}} = (4 * 3,975 \cdot 10^5 / 1980 + 3,368 \cdot 10^5) / (3,142 * 1980 * 6) = 30,54 \text{ мм}$$

$$\text{Условие работоспособности: } b_1 \geq \frac{\frac{4 \cdot M}{D_6} + F}{\pi \cdot D_6 \cdot [\sigma]_6}$$

$200 \text{ мм} \geq 30,54 \text{ мм}$. Условие прочности выполнено

Толщина верхнего опорного кольца с усиливающей пластиной (п.8.4)

$$\chi_3 = \frac{b_7}{b_4} \left(\frac{s_3}{s_2} \right)^2 = 100/142 * (12/40)^2 = 0,06338$$

$$(s_2 + x_3 \cdot s_3) = 40 + 0,06338 \cdot 12 = 40,76 \text{ mm}$$

Диаметр окружности, вписанной в шестигранник гайки:

$$d = 51,1 \text{ mm}$$

$$\chi_2 = \frac{\sqrt{3 \cdot \frac{b_4}{b_5}}}{\sqrt{1 + \frac{\left(\frac{b_4}{b_5}\right)^2}{1 - \frac{d}{b_5}}}} = (3 * 142 / 160 / (1 + (142 / 160)^2 / (1 - 51,1 / 160)))^{1/2} = 1,111$$

Площадь поперечного сечения анкерного болта по внутреннему диаметру резьбы:

$$A_{\sigma} = 0,7593 \cdot 10^{-3} \text{ M}^2$$

$$\chi_2 \cdot \sqrt{\frac{A_{\sigma} \cdot [\sigma]_B}{[\sigma]_A}} + c = \{1,111 * (0,7593 \cdot 10^{-3} * 180 / 150)^{1/2} + 3,1 = 36,63 \text{ mm}$$

$$\text{Условие работоспособности: } (s_2 + \chi_3 \cdot s_3) \geq \chi_2 \cdot \sqrt{\frac{A_\sigma \cdot [\sigma]_B}{[\sigma]_A}} + c$$

$40,76 \text{ мм} \geq 36,63 \text{ мм}$. Условие прочности выполнено

Толщина ребра (п. 8.5)

$$\chi_4 = 2$$

$$\max \left\{ \frac{A_{\sigma} \cdot [\sigma]_B}{\gamma_4 \cdot b_2 \cdot [\sigma]_A} + c; 0,4 \cdot s_1 \right\} = \max \{ 0,7593 \cdot 10^{-3} * 180 / (2 * 142 * 150) + 3,1; 0,4 * 24 \} = 9,6 \text{ mm}$$

Условие работоспособности: $s_4 \geq \max \left\{ \frac{A_{\sigma} \cdot [\sigma]_B}{\chi_4 \cdot b_2 \cdot [\sigma]_A} + c; 0.4 \cdot s_1 \right\}$

$12 \text{ мм} \geq 9,6 \text{ мм}$. Условие прочности выполнено

Инв. № подл.	19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$\chi_2 = \frac{3 \cdot \frac{b_4}{b_5}}{\sqrt{1 + \frac{\left(\frac{b_4}{b_5}\right)^2}{1 - \frac{d}{b_5}}}} = (3 * 142 / 160 / (1 + (142 / 160)^2 / (1 - 51,1 / 160)))^{1/2} = 1,111$ <p>Площадь поперечного сечения анкерного болта по внутреннему диаметру резьбы:</p> $A_\sigma = 0,7593 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ $\chi_2 \cdot \sqrt{\frac{A_\sigma \cdot [\sigma]_B}{[\sigma]_A}} + c = 1,111 * (0,7593 \cdot 10^{-3} * 180 / 150)^{1/2} + 3,1 = 36,63 \text{ мм}$ <p>Условие работоспособности: $(s_2 + \chi_3 \cdot s_3) \geq \chi_2 \cdot \sqrt{\frac{A_\sigma \cdot [\sigma]_B}{[\sigma]_A}} + c$</p> <p>40,76 мм ≥ 36,63 мм. Условие прочности выполнено</p> <p>Толщина ребра (п. 8.5)</p> $\chi_4 = 2$ $\max \left\{ \frac{A_\sigma \cdot [\sigma]_B}{\chi_4 \cdot b_2 \cdot [\sigma]_A} + c; 0.4 \cdot s_1 \right\} = \max \{ 0,7593 \cdot 10^{-3} * 180 / (2 * 142 * 150) + 3,1; 0.4 * 24 \} = 9,6 \text{ мм}$ <p>Условие работоспособности: $s_4 \geq \max \left\{ \frac{A_\sigma \cdot [\sigma]_B}{\chi_4 \cdot b_2 \cdot [\sigma]_A} + c; 0.4 \cdot s_1 \right\}$</p> <p>12 мм ≥ 9,6 мм. Условие прочности выполнено</p>
						<div> <div>Изм.</div> <div>Лист</div> <div>№ докум.</div> <div>Подп.</div> <div>Дата</div> </div> <div>К-5.00.00.000 PP</div> <div>Лист 46</div>

Прочность опорной обечайки в зоне верхнего опорного кольца (п. 8.6)

$$b_3 = b_5 + b_6 = 160 + 630,6 = 790,6 \text{ мм}$$

$$N = \frac{D_2}{2 \cdot (s_0 - c)} \cdot \left(\frac{10 \cdot b_3}{D_2} \right)^{2.05} = 1800 / (2 \cdot (8 - 3,1)) \cdot (10 \cdot 790,6 / 1800)^{2.05} = 2898$$

$$K = 0 \quad \text{при } N \leq 10^4 = 0$$

$$K = -0.002 \cdot \ln(10^{-4} \cdot N) \quad \text{при } N > 10^4$$

$$\chi_5 = -0.0248 \cdot \left\{ \ln\left(\frac{N}{1100}\right) - \sqrt{\left[\ln\left(\frac{N}{1100}\right)\right]^2 + 2.628} \right\} + K = -0.0248 \cdot \{ \ln(2898 / 1100) - ([\ln(2898 / 1100)]^2 + 2.628)^{1/2} \} + 0 = 0,02281$$

$$\frac{\delta \cdot \chi_5 \cdot A_{\sigma} \cdot [\sigma]_B \cdot e}{(s_0 - c)^2 \cdot h} = 6 \cdot 0,02281 \cdot 0,7593 \cdot 10^{-3} \cdot 180 \cdot 82 / ((8 - 3,1)^2 \cdot 364) = 175,5 \text{ МПа}$$

Условие работоспособности: $\frac{\delta \cdot \chi_5 \cdot A_{\sigma} \cdot [\sigma]_B \cdot e}{(s_0 - c)^2 \cdot h} \leq 1,5 \cdot [\sigma]_0$

$$175,5 \text{ МПа} \leq 256,5 \text{ МПа. Условие прочности выполнено}$$

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения:

Расчётный изгибающий момент, М: $3,966 \cdot 10^5 \text{ Н м}$

Расчётное осевое сжимающее усилие, F: $2,984 \cdot 10^5 \text{ Н}$

Результаты расчёта:

Свойства материала элемента опорного узла:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 180 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия (наружное давление)):

$$[\sigma] = 150 \text{ МПа}$$

Свойства материала опорной обечайки в зоне верхнего опорного кольца:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 180 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия (наружное давление)):

$$[\sigma]_0 = 167 \text{ МПа}$$

Свойства материала анкерных болтов:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (расчётные условия (наружное давление)):

$$\sigma_B = 180 \text{ МПа}$$

Свойства материала бетона:

Допускаемые напряжения для бетона класса В10 (М150):

$$[\sigma]_{\text{бет}} = 6 \text{ МПа}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
К-5.00.00.000 PP			Лист
			47

Прочность анкерных болтов (п. 9)

$$\chi_6 = 2.7 - 2 \cdot \frac{F \cdot D_6}{M} + 3.7 \cdot \left(\frac{F \cdot D_6}{M} \right)^2 - 2.5 \cdot \left(\frac{F \cdot D_6}{M} \right)^3 + 0.65 \cdot \left(\frac{F \cdot D_6}{M} \right)^4 \quad \text{при } \frac{F \cdot D_6}{M} \geq 0.5$$

$$= 2.7 - 2 \cdot \frac{2,984 \cdot 10^5 \cdot 1980}{3,966 \cdot 10^5} + 3.7 \cdot \left(\frac{2,984 \cdot 10^5 \cdot 1980}{3,966 \cdot 10^5} \right)^2 - 2.5 \cdot \left(\frac{2,984 \cdot 10^5 \cdot 1980}{3,966 \cdot 10^5} \right)^3 + 0.65 \cdot \left(\frac{2,984 \cdot 10^5 \cdot 1980}{3,966 \cdot 10^5} \right)^4 = 2,819$$

$$\chi_6 \cdot \sqrt{\frac{M - 0.44 \cdot F \cdot D_6}{n \cdot [\sigma]_B \cdot D_6}} = 2,819 \cdot ((3,966 \cdot 10^5 - 0.44 \cdot 2,984 \cdot 10^5 \cdot 1980) / (8 \cdot 180 \cdot 1980))^{1/2} = 19,51 \text{ мм}$$

Внутренний диаметр резьбы анкерного болта:
 $d_6 = 31,09 \text{ мм}$

$$\text{Условие работоспособности: } d_6 \geq \chi_6 \cdot \sqrt{\frac{M - 0.44 \cdot F \cdot D_6}{n \cdot [\sigma]_B \cdot D_6}}$$

31,09 мм \geq 19,51 мм. **Условие прочности выполнено**

Толщина нижнего опорного кольца (п. 8.2)

Расстояние между двумя смежными ребрами $b_6 = 630,6 \text{ мм}$

$$\chi_1 = \frac{\left(1 + 1.81 \cdot \left(\frac{b_2}{b_6} \right)^3 \right)^2}{1 + 2.97 \cdot \left(\frac{b_2}{b_6} \right)^3} = (1 + 1.81 \cdot (142 / 630,6)^3) / (1 + 2.97 \cdot (142 / 630,6)^3)^2 = 0,9745$$

$$\max \left\{ \chi_1 \cdot b_2 \cdot \sqrt{\frac{\frac{4 \cdot M}{D_6} + F}{D_6 \cdot b_1 \cdot [\sigma]_A}} + c; 1.5 \cdot s_0 \right\} = \max \{ 0,9745 \cdot 142 \cdot ((4 \cdot 3,966 \cdot 10^5 / 1980 + 2,984 \cdot 10^5) / (1980 \cdot 200 \cdot 150))^{1/2} + 3,1; 1.5 \cdot 8 \} = 21,93 \text{ мм}$$

$$\text{Условие работоспособности: } s_1 \geq \max \left\{ \chi_1 \cdot b_2 \cdot \sqrt{\frac{\frac{4 \cdot M}{D_6} + F}{D_6 \cdot b_1 \cdot [\sigma]_A}} + c; 1.5 \cdot s_0 \right\}$$

24 мм \geq 21,93 мм. **Условие прочности выполнено**

Ширина нижнего опорного кольца (п. 8.3)

$$\frac{\frac{4 \cdot M}{D_6} + F}{\pi \cdot D_6 \cdot [\sigma]_{\text{бет}}} = (4 \cdot 3,966 \cdot 10^5 / 1980 + 2,984 \cdot 10^5) / (3,142 \cdot 1980 \cdot 6) = 29,46 \text{ мм}$$

$$\text{Условие работоспособности: } b_1 \geq \frac{\frac{4 \cdot M}{D_6} + F}{\pi \cdot D_6 \cdot [\sigma]_6}$$

200 мм \geq 29,46 мм. **Условие прочности выполнено**

Толщина верхнего опорного кольца с усиливающей пластиной (п.8.4)

Изн.	№ подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19744.4					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
					К-5.00.00.000 PP
					Лист 48

$$\chi_3 = \frac{b_7}{b_4} \left(\frac{s_3}{s_2} \right)^2 = 100 / 142 * (12 / 40)^2 = 0,06338$$

$$(s_2 + \chi_3 \cdot s_3) = 40 + 0,06338 * 12 = 40,76 \text{ мм}$$

Диаметр окружности, вписанной в шестигранник гайки:

$$d = 51,1 \text{ мм}$$

$$\chi_2 = \frac{\frac{3 \cdot \frac{b_4}{b_5}}{1 + \frac{\left(\frac{b_4}{b_5} \right)^2}{1 - \frac{d}{b_5}}}}{1} = (3 * 142 / 160 / (1 + (142 / 160)^2 / (1 - 51,1 / 160)))^{1/2} = 1,111$$

Площадь поперечного сечения анкерного болта по внутреннему диаметру резьбы:

$$A_{\sigma} = 0,7593 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

$$\chi_2 \cdot \sqrt{\frac{A_{\sigma} \cdot [\sigma]_B}{[\sigma]_A}} + c = 1,111 * (0,7593 \cdot 10^{-3} * 180 / 150)^{1/2} + 3,1 = 36,63 \text{ мм}$$

$$\text{Условие работоспособности: } (s_2 + \chi_3 \cdot s_3) \geq \chi_2 \cdot \sqrt{\frac{A_{\sigma} \cdot [\sigma]_B}{[\sigma]_A}} + c$$

$$40,76 \text{ мм} \geq 36,63 \text{ мм. Условие прочности выполнено}$$

Толщина ребра (п. 8.5)

$$\chi_4 = 2$$

$$\max \left\{ \frac{A_{\sigma} \cdot [\sigma]_B}{\chi_4 \cdot b_2 \cdot [\sigma]_A} + c; 0,4 \cdot s_1 \right\} = \max \{ 0,7593 \cdot 10^{-3} * 180 / (2 * 142 * 150) + 3,1; 0,4 * 24 \} = 9,6 \text{ мм}$$

$$\text{Условие работоспособности: } s_4 \geq \max \left\{ \frac{A_{\sigma} \cdot [\sigma]_B}{\chi_4 \cdot b_2 \cdot [\sigma]_A} + c; 0,4 \cdot s_1 \right\}$$

$$12 \text{ мм} \geq 9,6 \text{ мм. Условие прочности выполнено}$$

Прочность опорной обечайки в зоне верхнего опорного кольца (п. 8.6)

$$b_3 = b_5 + b_6 = 160 + 630,6 = 790,6 \text{ мм}$$

$$N = \frac{D_2}{2 \cdot (s_0 - c)} \cdot \left(\frac{10 \cdot b_3}{D_2} \right)^{2,05} = 1800 / (2 * (8 - 3,1)) * (10 * 790,6 / 1800)^{2,05} = 2898$$

$$K = 0 \quad \text{при } N \leq 10^4 = 0$$

$$K = -0,002 \cdot \ln(10^{-4} \cdot N) \quad \text{при } N > 10^4$$

$$\chi_5 = -0,0248 \cdot \left\{ \ln \left(\frac{N}{1100} \right) - \sqrt{\left[\ln \left(\frac{N}{1100} \right) \right]^2 + 2,628} \right\} + K = -0,0248 * \{ \ln(2898 / 1100) - ([\ln(2898 / 1100)]^2 + 2,628)^{1/2} \} + 0 = 0,02281$$

Инв. № подл. 19744.4	Подпись и дата				
	Взам. инв. №				
	Инв. № дубл.				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 PP
					Лист
					49

$$\frac{b \cdot \chi_s \cdot A_{\sigma} \cdot [\sigma]_B \cdot e}{(s_0 - c)^2 \cdot h} = 6 \cdot 0,02281 \cdot 0,7593 \cdot 10^{-3} \cdot 180 \cdot 82 / ((8 - 3,1)^2 \cdot 364) = 175,5 \text{ МПа}$$

Условие работоспособности: $\frac{b \cdot \chi_s \cdot A_{\sigma} \cdot [\sigma]_B \cdot e}{(s_0 - c)^2 \cdot h} \leq 1,5 \cdot [\sigma]_0$

175,5 МПа ≤ 250,5 МПа. **Условие прочности выполнено**

Расчёт в условиях монтажа

Условия нагружения при монтаже:

Расчётный изгибающий момент, М: $1,856 \cdot 10^5 \text{ Н м}$

Расчётное осевое сжимающее усилие, F: $2,437 \cdot 10^5 \text{ Н}$

Результаты расчёта:

Свойства материала элемента опорного узла:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 20 °С (условия монтажа):

$$[\sigma]^{20} = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 280 / 1,1 = 254,5 \text{ МПа}$$

Свойства материала опорной обечайки в зоне верхнего опорного кольца:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 20 °С (условия монтажа):

$$[\sigma]^{20}_0 = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 300 / 1,1 = 272,7 \text{ МПа}$$

Свойства материала анкерных болтов:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (условия монтажа):

$$\sigma_B = 180 \text{ МПа}$$

Свойства материала бетона:

Допускаемые напряжения для бетона класса В10 (М150):

$$[\sigma]_{\text{бет}} = 6 \text{ МПа}$$

Прочность анкерных болтов (п. 9)

$$M \leq 0,44 \cdot F \cdot D_{\text{б}}$$

Условие прочности выполнено

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётный изгибающий момент, М: $1,188 \cdot 10^5 \text{ Н м}$

Расчётное осевое сжимающее усилие, F: $6,657 \cdot 10^5 \text{ Н}$

Результаты расчёта:

Свойства материала элемента опорного узла:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 20 °С (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]^{20} = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 280 / 1,1 = 254,5 \text{ МПа}$$

Свойства материала опорной обечайки в зоне верхнего опорного кольца:

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	<div>К-5.00.00.000 РР</div> <div>Лист 50</div>				
19744.4									
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата					

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре Т = 20 °С (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]_{0=20}^{20} = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 300 / 1,1 = 272,7 \text{ МПа}$$

Свойства материала анкерных болтов:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (условия гидроиспытаний):

$$\sigma_B = 180 \text{ МПа}$$

Свойства материала бетона:

Допускаемые напряжения для бетона класса В10 (М150):

$$[\sigma]_{бет} = 6 \text{ МПа}$$

Прочность анкерных болтов (п. 9)

$$M \leq 0,44 \cdot F \cdot D_6$$

Условие прочности выполнено

Толщина нижнего опорного кольца (п. 8.2)

Расстояние между двумя смежными ребрами $b_6 = 630,6 \text{ мм}$

$$\chi_1 = \frac{\left(1 + 1,81 \cdot \left(\frac{b_2}{b_6} \right)^3 \right)^2}{\left(1 + 2,97 \cdot \left(\frac{b_2}{b_6} \right)^3 \right)} = (1 + 1,81 \cdot (142 / 630,6)^3) / (1 + 2,97 \cdot (142 / 630,6)^3) = 0,9745$$

$$\max \left\{ \chi_1 \cdot b_2 \cdot \sqrt{\frac{\frac{4 \cdot M}{D_6} + F}{D_6 \cdot b_1 \cdot [\sigma]_A}} + c; 1,5 \cdot s_0 \right\} = \max \{ 0,9745 \cdot 142 \cdot ((4 \cdot 1,188 \cdot 10^5 / 1980 + 6,657 \cdot 10^5) / (1980 \cdot 200 \cdot 254,5))^{1/2} + 3,1; 1,5 \cdot 8 \} = 16,22 \text{ мм}$$

$$\text{Условие работоспособности: } s_1 \geq \max \left\{ \chi_1 \cdot b_2 \cdot \sqrt{\frac{\frac{4 \cdot M}{D_6} + F}{D_6 \cdot b_1 \cdot [\sigma]_A}} + c; 1,5 \cdot s_0 \right\}$$

$$24 \text{ мм} \geq 16,22 \text{ мм. Условие прочности выполнено}$$

Ширина нижнего опорного кольца (п. 8.3)

$$\frac{\frac{4 \cdot M}{D_6} + F}{\pi \cdot D_6 \cdot [\sigma]_{бет}} = (4 \cdot 1,188 \cdot 10^5 / 1980 + 6,657 \cdot 10^5) / (3,142 \cdot 1980 \cdot 6) = 24,26 \text{ мм}$$

$$\text{Условие работоспособности: } b_1 \geq \frac{\frac{4 \cdot M}{D_6} + F}{\pi \cdot D_6 \cdot [\sigma]_6}$$

$$200 \text{ мм} \geq 24,26 \text{ мм. Условие прочности выполнено}$$

Толщина верхнего опорного кольца с усиливающей пластиной (п.8.4)

$$\chi_3 = \frac{b_7}{b_4} \left(\frac{s_3}{s_2} \right)^2 = 100 / 142 \cdot (12 / 40)^2 = 0,06338$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
			Дата
К-5.00.00.000 PP			
Лист			
51			

$$(s_2 + \chi_3 \cdot s_3) = 40 + 0,06338 \cdot 12 = 40,76 \text{ мм}$$

$$\chi_2 = \sqrt{\frac{3 \cdot \frac{b_4}{b_5}}{1 + \frac{\left(\frac{b_4}{b_5}\right)^2}{1 - \frac{d}{b_5}}}} = (3 \cdot 142 / 160 / (1 + (142 / 160)^2 / (1 - 51,1 / 160)))^{1/2} = 1,111$$

$$\chi_2 \cdot \sqrt{\frac{A_\sigma \cdot [\sigma]_B}{[\sigma]_A}} + c = 1,111 \cdot (0,7593 \cdot 10^{-3} \cdot 180 / 254,5)^{1/2} + 3,1 = 28,84 \text{ мм}$$

$$\text{Условие работоспособности: } (s_2 + \chi_3 \cdot s_3) \geq \chi_2 \cdot \sqrt{\frac{A_\sigma \cdot [\sigma]_B}{[\sigma]_A}} + c$$

40,76 мм ≥ 28,84 мм. **Условие прочности выполнено**

Толщина ребра (п. 8.5)

$$\chi_4 = 2$$

$$\max \left\{ \frac{A_\sigma \cdot [\sigma]_B}{\chi_4 \cdot b_2 \cdot [\sigma]_A} + c; 0,4 \cdot s_1 \right\} = \max \{ 0,7593 \cdot 10^{-3} \cdot 180 / (2 \cdot 142 \cdot 254,5) + 3,1; 0,4 \cdot 24 \} = 9,6 \text{ мм}$$

$$\text{Условие работоспособности: } s_4 \geq \max \left\{ \frac{A_\sigma \cdot [\sigma]_B}{\chi_4 \cdot b_2 \cdot [\sigma]_A} + c; 0,4 \cdot s_1 \right\}$$

12 мм ≥ 9,6 мм. **Условие прочности выполнено**

Прочность опорной обечайки в зоне верхнего опорного кольца (п. 8.6)

$$b_3 = b_5 + b_6 = 160 + 630,6 = 790,6 \text{ мм}$$

$$N = \frac{D_2}{2 \cdot (s_0 - c)} \cdot \left(\frac{10 \cdot b_3}{D_2} \right)^{2,05} = 1800 / (2 \cdot (8 - 3,1)) \cdot (10 \cdot 790,6 / 1800)^{2,05} = 2898$$

$$K = 0 \quad \text{при } N \leq 10^4 = 0$$

$$K = -0,002 \cdot \ln(10^{-4} \cdot N) \quad \text{при } N > 10^4$$

$$\chi_5 = -0,0248 \cdot \left\{ \ln \left(\frac{N}{1100} \right) - \sqrt{\left[\ln \left(\frac{N}{1100} \right) \right]^2 + 2,628} \right\} + K = -0,0248 \cdot \{ \ln(2898 / 1100) - ([\ln(2898 / 1100)]^2 + 2,628)^{1/2} \} + 0 = 0,02281$$

$$\frac{\delta \cdot \chi_5 \cdot A_\sigma \cdot [\sigma]_B \cdot e}{(s_0 - c)^2 \cdot h} = 6 \cdot 0,02281 \cdot 0,7593 \cdot 10^{-3} \cdot 180 \cdot 82 / ((8 - 3,1)^2 \cdot 364) = 175,5 \text{ МПа}$$

$$\text{Условие работоспособности: } \frac{\delta \cdot \chi_5 \cdot A_\sigma \cdot [\sigma]_B \cdot e}{(s_0 - c)^2 \cdot h} \leq 1,5 \cdot [\sigma]_0$$

175,5 МПа ≤ 409,1 МПа. **Условие прочности выполнено**

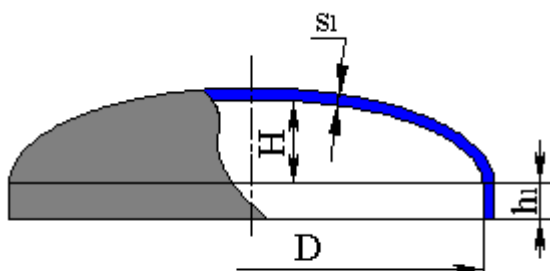
Инов. № подл.	19744.4	Подпись и дата	
Взам. инв. №		Подпись и дата	
Инов. № дубл.		Подпись и дата	
Инов. № подл.	19744.4	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
		Дата	
К-5.00.00.000 PP			Лист
			52

Нагрузки на фундамент

Состояние	Осевая сила, Н	Изгибающий момент, Н м	Горизонтальная сила, Н
Расчётные условия	$3,383 \cdot 10^5$	$3,975 \cdot 10^5$	$3,624 \cdot 10^4$
Расчётные условия (наружное давление)	$2,999 \cdot 10^5$	$3,966 \cdot 10^5$	$3,62 \cdot 10^4$
Условия монтажа	$2,452 \cdot 10^5$	$1,856 \cdot 10^5$	$1,822 \cdot 10^4$
Условия испытаний	$6,672 \cdot 10^5$	$1,188 \cdot 10^5$	$1,135 \cdot 10^4$

Инв. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата						Лист 53
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 РР					

Днище эллиптическое



Исходные данные

Материал:	09Г2С
Внутр. диаметр, D:	1800 мм
Толщина стенки днища, s_1 :	18 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c_1 :	6 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, c_2 :	0,8 мм
Прибавка технологическая, c_3 :	2,7 мм
Суммарная прибавка к толщине стенки, c :	9,5 мм
Высота днища, H:	450 мм
Длина отбортовки, h_1 :	60 мм
Радиус кривизны в вершине днища:	

$$R = \frac{D^2}{4 \cdot H} = 1800^2 / (4 \cdot 450) = 1800 \text{ mm}$$

Коэффициент прочности сварного шва:

$$\varphi = 1$$

Изоляция:

Название: Теплоизоляция

Толщина, $s_{из}$: 100 мм

Плотность, $\rho_{\text{из}}$: 200 кг/м³

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, Т: 150 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,4161 МПа

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma] = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{256,5 / 1,6; 430 / 2,6\} = 160,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E = 1,86 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Подпись и дата		Инв. № дубл.		Взам. инв. №		Подпись и дата		Инв. № подл.	19744.4
<p>Длина отбортовки, n_l: 60 мм</p> <p>Радиус кривизны в вершине днища:</p> $R = \frac{D^2}{4 \cdot H} = 1800^2 / (4 \cdot 450) = 1800 \text{ мм}$ <p>Коэффициент прочности сварного шва:</p> <p>$\Phi = 1$</p> <p>Изоляция:</p> <p>Название: Теплоизоляция</p> <p>Толщина, $s_{из}$: 100 мм</p> <p>Плотность, $\rho_{из}$: 200 кг/м³</p> <p style="text-align: center;">Расчёт в расчётных условиях</p> <p style="text-align: center;">Условия нагружения:</p> <p>Расчётная температура, T: 150 °C</p> <p>Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,4161 МПа</p> <p style="text-align: center;">Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007</p> <p style="text-align: center;">Допускаемые напряжения:</p> <p>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 150$ °C (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):</p> <p>$[\sigma] = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{256,5 / 1,6; 430 / 2,6\} = 160,3 \text{ МПа}$</p> <p>Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре $T = 150$ °C:</p> <p>$E = 1,86 \cdot 10^5 \text{ МПа}$</p>									
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 РР				
					Лист 54				

Днища, нагруженные внутренним избыточным давлением.

Радиус кривизны в вершине днища:

$$R = \frac{D^2}{4 \cdot H} = 1800^2 / (4 \cdot 450) = 1800 \text{ mm}$$

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_p + c = \frac{p \cdot R}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi - 0.5 \cdot p} + c = (0,4161 \cdot 1800) / (2 \cdot 160,3 \cdot 1 - 0.5 \cdot 0,4161) + 9,5 = 11,84 \text{ mm}$$

$$11,84 \text{ mm} \leq 18 \text{ mm}$$

Заключение: Условие работоспособности выполнено

Допускаемое давление:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi \cdot (s_1 - c)}{R + 0.5 \cdot (s_1 - c)} = 2 \cdot 160,3 \cdot 1 \cdot (18 - 9,5) / (1800 + 0.5 \cdot (18 - 9,5)) = 1,51 \text{ МПа}$$

$$1,51 \text{ МПа} \geq 0,4161 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения:

Расчётная температура, Т: 180 °C

Расчётное наружное избыточное давление, р: 0,1000 МПа

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия (наружное давление), коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma] = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{251,1 / 1,6; 435,4 / 2,6\} = 156,9 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре $T = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Днища, нагруженные наружным давлением.

Радиус кривизны в вершине днища:

$$R = \frac{D^2}{4 \cdot H} = 1800^2 / (4 * 450) = 1800 \text{ mm}$$

$$x = 10 \cdot \frac{s_1 - c}{D} \cdot \left[\frac{D}{2 \cdot H} - \frac{2 \cdot H}{D} \right] = 10 \cdot (18 - 9,5) / 1800 \cdot (1800 / (2 \cdot 450) - 2 \cdot 450 / 1800) = 0,07083$$

$$K_3 = \frac{1 + (2.4 + 8 \cdot x) \cdot x}{1 + (3.0 + 10 \cdot x) \cdot x} = (1 + (2.4 + 8 * 0.07083) * 0.07083) / (1 + (3.0 + 10 * 0.07083) * 0.07083) = 0.9584$$

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

$$s_p + c = \max \left\{ \frac{K_y \cdot R}{161} \cdot \sqrt{\frac{n_y \cdot p}{10^{-5} \cdot E}}; \frac{1,2 \cdot p \cdot R}{2 \cdot [\sigma]} \right\} + c = \max \{ 0,9584 \cdot 1800 / 161 \cdot (2,4 \cdot 0,1000 / (10^{-5} \cdot 1,83 \cdot 10^5))^{1/2}; 1,2 \cdot 0,1000 \cdot 1800 / (2 \cdot 156,9) \} + 9,5 = 13,38 \text{ mm}$$

$$13,38 \text{ mm} \leq 18 \text{ mm}$$

Заключение: **Условие работоспособности выполнено**

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$[p]_{\text{н}} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s_1 - c)}{R + 0.5 \cdot (s_1 - c)} = 2 * 156,9 * (18 - 9,5) / (1800 + 0.5 * (18 - 9,5)) = 1,479 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости:

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p>$[\sigma] = \min(R_{\sigma/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{251,1 / 1,6; 435,4 / 2,6\} = 156,9 \text{ МПа}$</p> <p>Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре $T = 180 \text{ }^\circ\text{C}$:</p> <p>$E = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$</p> <p style="text-align: center;"><i>Днища, нагруженные наружным давлением.</i></p> <p>Радиус кривизны в вершине днища:</p> $R = \frac{D^2}{4 \cdot H} = 1800^2 / (4 \cdot 450) = 1800 \text{ мм}$ $x = 10 \cdot \frac{s_1 - c}{D} \cdot \left[\frac{D}{2 \cdot H} - \frac{2 \cdot H}{D} \right] = 10 \cdot (18 - 9,5) / 1800 \cdot (1800 / (2 \cdot 450) - 2 \cdot 450 / 1800) = 0,07083$ $K_3 = \frac{1 + (2,4 + 8 \cdot x) \cdot x}{1 + (3,0 + 10 \cdot x) \cdot x} = (1 + (2,4 + 8 \cdot 0,07083) \cdot 0,07083) / (1 + (3,0 + 10 \cdot 0,07083) \cdot 0,07083) = 0,9584$ <p>Расчётная толщина стенки с учётом прибавок (при давлении $p = 0,1000 \text{ МПа}$):</p> $s_p + c = \max \left\{ \frac{K_3 \cdot R}{161} \cdot \sqrt{\frac{n_y \cdot p}{10^{-5} \cdot E}}, \frac{1,2 \cdot p \cdot R}{2 \cdot [\sigma]} \right\} + c = \max\{0,9584 \cdot 1800 / 161 \cdot (2,4 \cdot 0,1000 / (10^{-5} \cdot 1,83 \cdot 10^5))^{1/2}; 1,2 \cdot 0,1000 \cdot 1800 / (2 \cdot 156,9)\} + 9,5 = 13,38 \text{ мм}$ <p>$13,38 \text{ мм} \leq 18 \text{ мм}$</p> <p>Заключение: Условие работоспособности выполнено</p> <p>Допускаемое наружное давление из условия прочности:</p> $[p]_п = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s_1 - c)}{R + 0,5 \cdot (s_1 - c)} = 2 \cdot 156,9 \cdot (18 - 9,5) / (1800 + 0,5 \cdot (18 - 9,5)) = 1,479 \text{ МПа}$ <p>Допускаемое наружное давление из условия устойчивости:</p>
					<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>Изм.</p> <p>Лист</p> <p>№ докум.</p> <p>Подп.</p> <p>Дата</p> </div> <div> <p>К-5.00.00.000 РР</p> </div> <div> <p>Лист</p> <p>55</p> </div> </div>

$$[p]_{\text{E}} = \frac{26 \cdot 10^{-6} E}{n_y} \cdot \left[\frac{100(s_1 - c)}{K_3 \cdot R} \right]^2 = 26 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 / 2,4 \cdot (100 \cdot (18 - 9,5) / (0,9584 \cdot 1800))^2 = 0,4813 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\text{п}}}{[p]_{\text{E}}} \right)^2}} = 1,479 / (1 + (1,479 / 0,4813)^2)^{1/2} = 0,4577 \text{ МПа}$$

0,4577 МПа \geq 0,1000 МПа

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, T: 20 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,7095 МПа

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 20 °С (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]^{20} = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 300 / 1,1 = 272,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре T = 20 °С:

$$E^{20} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Днища, нагруженные внутренним избыточным давлением.

Радиус кривизны в вершине днища:

$$R = \frac{D^2}{4 \cdot H} = 1800^2 / (4 \cdot 450) = 1800 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_{\text{п}} + c = \frac{p \cdot R}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi - 0,5 \cdot p} + c = (0,7095 \cdot 1800) / (2 \cdot 272,7 \cdot 1 - 0,5 \cdot 0,7095) + 9,5 = 11,84 \text{ мм}$$

$$11,84 \text{ мм} \leq 18 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие работоспособности выполнено**

Допускаемое давление:

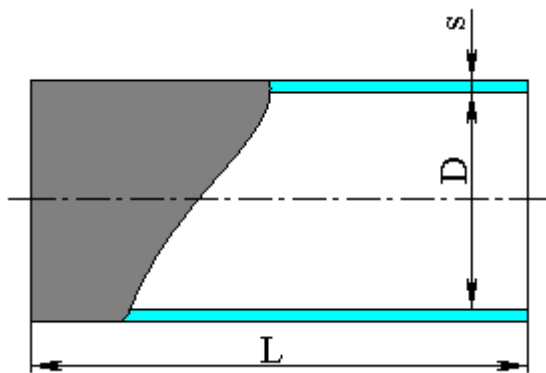
$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi \cdot (s_1 - c)}{R + 0,5 \cdot (s_1 - c)} = 2 \cdot 272,7 \cdot 1 \cdot (18 - 9,5) / (1800 + 0,5 \cdot (18 - 9,5)) = 2,57 \text{ МПа}$$

$$2,57 \text{ МПа} \geq 0,7095 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата					
19744.4									
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата					
					К-5.00.00.000 PP				Лист
									56

Обечайка цилиндрическая



Исходные данные

Материал: 09Г2С
Внутр. диаметр, D: 1800 мм
Толщина стенки, s: 18 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c₁: 6 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, c₂: 0,8 мм
Прибавка технологическая, c₃: 0 мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, c: 6,8 мм
Длина обечайки, L: 1,388·10⁴ мм
Коэффициенты прочности сварных швов:
Продольный шов:

$\varphi_p = 1$
Окружной шов:
 $\varphi_T = 1$

Сопряжённые элементы жёсткости:

№	Название элемента	Расстояние от начала координат до оси, l _i , мм	Ширина, t _i , мм	Площадь сечения, A _{ki} , м ²	Момент инерции, I _{ki} , м ⁴	Коэффициент жёсткости обечайки, подкреплённой этим кольцом, k
1	Кольцо жёсткости №1	1940	12	0,72·10 ⁻³	0,216·10 ⁻⁶	1,928
2	Кольцо жёсткости №2	4440	12	0,72·10 ⁻³	0,216·10 ⁻⁶	1,928
3	Кольцо жёсткости №3	6940	12	0,72·10 ⁻³	0,216·10 ⁻⁶	1,928
4	Кольцо жёсткости №4	9440	12	0,72·10 ⁻³	0,216·10 ⁻⁶	1,928
5	Кольцо жёсткости №5	1,194·10 ⁴	12	0,72·10 ⁻³	0,216·10 ⁻⁶	1,928

Изоляция:

Название: Теплоизоляция
Толщина, s_{из}: 100 мм
Плотность, ρ_{из}: 200 кг/м³

Расчёт в расчётных условиях

Инов. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
					Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
					К-5.00.00.000 PP				
					Лист 57				

Условия нагружения:

Расчётная температура, T:	180 °C
Расчётное внутреннее избыточное давление, p:	0,4121 МПа
Расчётный изгибающий момент, M:	$3,438 \cdot 10^5$ Н м
Расчётное поперечное усилие, Q:	$4,039 \cdot 10^4$ Н
Расчётное осевое сжимающее усилие, F:	$2,769 \cdot 10^5$ Н

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 180 °C (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma] = \min(R_{\sigma/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min[251,1 / 1,6; 435,4 / 2,6] = 156,9 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре T = 180 °C:

$$E = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Обечайка с кольцами жёсткости, нагруженная внутренним избыточным давлением (п. 5.4.1)

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок (без учёта колец жёсткости):

$$s_p + c = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} + c = (0,4121 \cdot 1800) / (2 \cdot 156,9 \cdot 1 - 0,4121) + 6,8 = 9,167 \text{ мм}$$

$$9,167 \text{ мм} \leq 18 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие работоспособности выполнено**

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$$l = 2500 \text{ мм}$$

Допускаемое внутреннее давление из условия прочности всей обечайки:

$$[p]_1 = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c) + \frac{A_{k1}}{1} \cdot [\sigma]_{K1} \cdot \varphi_{K1} + \frac{A_{k2}}{1} \cdot [\sigma]_{K2} \cdot \varphi_{K2}}{D + (s - c)} = \frac{[2 \cdot 156,9 \cdot 1 \cdot (18 - 6,8) + 0,72 \cdot 10^{-3} \cdot 167 \cdot 1 / 2500 + 0,72 \cdot 10^{-3} \cdot 167 \cdot 1 / 2500] / (1800 + 18 - 6,8)}{1800 + 18 - 6,8} = 1,994 \text{ МПа}$$

Расстояние между кольцами для расчёта от действия давления:

$$b = 2488 \text{ мм}$$

$$\lambda_{II}^2 = \frac{b^2}{D \cdot (s - c)} = 2488^2 / (1800 \cdot (18 - 6,8)) = 307,1$$

Допускаемое внутреннее давление из условия прочности обечайки между двумя соседними кольцами жёсткости:

$$[p]_2 = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T \cdot (s - c)}{D + (s - c)} \cdot \frac{2 + \lambda_{II}^2}{1 + \frac{\varphi_T \cdot \lambda_{II}^2}{\varphi_p}} = 2 \cdot 156,9 \cdot 1 \cdot (18 - 6,8) / (1800 + 18 - 6,8) \cdot [2 + 307,1] / [1 + (1 \cdot 307,1) / 1] = 1,947 \text{ МПа}$$

Допускаемое внутреннее давление:

$$[p] = \min\{[p]_1; [p]_2\} = \min\{1,994; 1,947\} = 1,947 \text{ МПа}$$

$$1,947 \text{ МПа} \geq 0,4121 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Минимальное расстояние между “одинокими” штуцерами:

$$b_0 = 2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} = 2 \cdot \sqrt{1800 \cdot (18 - 6,8)} = 284 \text{ мм}$$

Расчётная длина для расчёта от действия осевой силы:

$$l_F = 1,43 \cdot 10^4 \text{ мм}$$

Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием (п. 5.3.4)

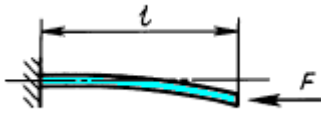
Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$[F]_{\pi} = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3,142 \cdot (1800 + 18 - 6,8) \cdot (18 - 6,8) \cdot 156,9 = 1 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:

Изн. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	К-5.00.00.000 PP					Лист
										58
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

$$[F]_{E1} = \frac{31.0 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2.5} = 310 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 1800^2 / (2,4) \cdot (100 \cdot (18 - 6,8) / 1800)^{2.5} = 2,339 \cdot 10^7 \text{ Н}$$



Приведённая длина: $l_{np} = 2,86 \cdot 10^4 \text{ мм}$

Гибкость:

$$\lambda = \frac{2.83 \cdot l_{np}}{D + s - c} = 2.83 \cdot 2,86 \cdot 10^4 / (1800 + 18 - 6,8) = 44,35$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия общей устойчивости:

$$[F]_{E2} = \frac{\pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot E}{n_y} \cdot \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2 = 3,142 \cdot (1800 + 18 - 6,8) \cdot (18 - 6,8) \cdot 1,83 \cdot 10^5 / (2,4) \cdot (3,142 / 44,35)^2 = 2,438 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия устойчивости:

$$[F]_E = \min \{ [F]_{E1}, [F]_{E2} \} = \min \{ 2,339 \cdot 10^7, 2,438 \cdot 10^7 \} = 2,339 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие:

$$[F] = \frac{[F]_{np}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{np}}{[F]_E} \right)^2}} = 1 \cdot 10^7 / (1 + (1 \cdot 10^7 / 2,339 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 9,196 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$9,196 \cdot 10^6 \text{ Н} \geq 2,769 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Обечайка, нагруженная изгибающим моментом (п. 5.3.5)

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны сжатия:

$$[M]_{np} = \frac{D}{4} \cdot [F]_{np} = 1800 / 4 \cdot 1 \cdot 10^7 = 4,501 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_E = \frac{D}{3.5} \cdot [F]_{E1} = 1800 / 3.5 \cdot 2,339 \cdot 10^7 = 1,203 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \frac{[M]_{np}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{np}}{[M]_E} \right)^2}} = 4,501 \cdot 10^6 / (1 + (4,501 \cdot 10^6 / 1,203 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 4,215 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

$$4,215 \cdot 10^6 \text{ Н м} \geq 3,438 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Обечайка, нагруженная поперечным усилием (п. 5.3.6)

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности:

$$[Q]_{np} = 0.25 \cdot \pi \cdot D \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 0.25 \cdot 3,142 \cdot 1800 \cdot (18 - 6,8) \cdot 156,9 = 2,485 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$$l_p = 2500 \text{ мм}$$

Расчётная длина для расчёта от действия поперечной силы:

$$l_Q = 2500 \text{ мм}$$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

$$[Q]_E = \frac{2.4 \cdot E \cdot (s - c)^2}{n_y} \cdot \left[0.18 + 3.3 \cdot \frac{D(s - c)}{l^2} \right] = \frac{2.4 \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot (18 - 6,8)^2}{2500^2} / 2.4 \cdot (0.18 + 3.3 \cdot 1800 \cdot (18 - 6,8) / 2500^2) = 4,376 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 PP				Лист
				59

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\text{п}}}{[Q]_{\text{в}}}\right)^2}} = 2,485 \cdot 10^6 / (1 + (2,485 \cdot 10^6 / 4,376 \cdot 10^6)^2)^{1/2} = 2,161 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$2,161 \cdot 10^6 \text{ Н} \geq 4,039 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0 / 0 + 2,769 \cdot 10^5 / 9,196 \cdot 10^6 + 3,438 \cdot 10^5 / 4,215 \cdot 10^6 + (4,039 \cdot 10^4 / 2,161 \cdot 10^6)^2 = 0,112 \leq 1$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием (п. 5.3.3)

Допускаемое осевое растягивающее усилие:

$$[F] = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = 3,142 \cdot (1800 + 18 - 6,8) \cdot (18 - 6,8) \cdot 156,9 \cdot 1 = 1 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны растяжения:

$$[M]_{\text{пр}} = \frac{D}{4} \cdot [F] = 1800 / 4 \cdot 1 \cdot 10^7 = 4,501 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

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

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

$$\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{пр}}} = (0 + 0,4121 \cdot 3,142 \cdot 1800^2 / 4) / 1 \cdot 10^7 + 3,438 \cdot 10^5 / 4,501 \cdot 10^6 = 0,1812 \leq 1$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Дополнительный расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 51274-99

Продольные напряжения на наветренной стороне:

$$\sigma_{x1} = \frac{p \cdot (D + s)}{4 \cdot (s - c)} - \frac{F}{\pi \cdot D \cdot (s - c)} + \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = \frac{0,4121 \cdot (1800 + 18) / (4 \cdot (18 - 6,8)) - 2,769 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot 1800 \cdot (18 - 6,8)) + 4 \cdot 3,438 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot 1800^2 \cdot (18 - 6,8))}{24,42 \text{ МПа}}$$

Кольцевые напряжения:

$$\sigma_y = \frac{p \cdot (D + s)}{2 \cdot (s - c)} = 0,4121 \cdot (1800 + 18) / (2 \cdot (18 - 6,8)) = 33,45 \text{ МПа}$$

Эквивалентные напряжения на наветренной стороне:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\sigma_{x1}^2 - \sigma_{x1} \cdot \sigma_y + \sigma_y^2} = (24,42^2 - 24,42 \cdot 33,45 + 33,45^2)^{1/2} = 29,97 \text{ МПа}$$

Условие прочности на наветренной стороне

Инов. № подл.	19744.4	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
К-5.00.00.000 РР					Лист
					60

$$\max\{\sigma_{x1}; \sigma_{\Sigma 1}\} \leq [\sigma]_{\text{к}} \cdot \varphi$$

$$\max\{\sigma_{x1}; \sigma_{\Sigma 1}\} = \max\{24,42; 29,97\} = 29,97 \text{ МПа}$$

$$[\sigma]_{\text{к}} \cdot \varphi = 156,9 \cdot 1 = 156,9 \text{ МПа}$$

Условие прочности выполнено

Продольные напряжения на подветренной стороне:

$$\sigma_{x2} = \frac{p \cdot (D + s)}{4 \cdot (s - c)} - \frac{F}{\pi \cdot D \cdot (s - c)} - \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = \frac{0,4121 \cdot (1800 + 18) / (4 \cdot (18 - 6,8)) - 2,769 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot 1800 \cdot (18 - 6,8)) - 4 \cdot 3,438 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot 1800^2 \cdot (18 - 6,8))}{0,2899 \text{ МПа}}$$

Эквивалентные напряжения на подветренной стороне:

$$\sigma_{\Sigma 2} = \sqrt{\sigma_{x2}^2 - \sigma_{x2} \cdot \sigma_y + \sigma_y^2} = (0,2899^2 - 0,2899 \cdot 33,45 + 33,45^2)^{1/2} = 33,3 \text{ МПа}$$

Условие прочности на подветренной стороне

$$\max\{\sigma_{x2}; \sigma_{\Sigma 2}\} \leq [\sigma]_{\text{к}} \cdot \varphi$$

$$\max\{\sigma_{x2}; \sigma_{\Sigma 2}\} = \max\{0,2899; 33,3\} = 33,3 \text{ МПа}$$

$$[\sigma]_{\text{к}} \cdot \varphi = 156,9 \cdot 1 = 156,9 \text{ МПа}$$

Условие прочности выполнено

Условие устойчивости для колонн, работающих под внутренним избыточным давлением или без давления:

$$\frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} \leq 1,0$$

$$\frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} = 2,769 \cdot 10^5 / 9,196 \cdot 10^6 + 3,438 \cdot 10^5 / 4,215 \cdot 10^6 = 0,1117$$

Условие устойчивости выполнено

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения:

Расчётная температура, T:	180 °C
Расчётное наружное избыточное давление, p:	0,1000 МПа
Расчётный изгибающий момент, M:	$3,43 \cdot 10^5$ Н м
Расчётное поперечное усилие, Q:	$4,032 \cdot 10^4$ Н
Расчётное осевое сжимающее усилие, F:	$2,459 \cdot 10^5$ Н

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 180 °C (расчётные условия (наружное давление), коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma] = \min(R_{\sigma T} / n_T; R_{mT} / n_B) = \min\{251,1 / 1,6; 435,4 / 2,6\} = 156,9 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре T = 180 °C:

$$E = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Обечайка с кольцами жёсткости, нагруженная наружным избыточным давлением (п. 5.4.2)

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$$l_p = 2500 \text{ мм}$$

$$B = \max\left\{1; 0,47 \cdot \left(\frac{p}{10^{-5} \cdot E}\right)^{0,067} \cdot \left(\frac{1}{D}\right)^{0,4}\right\} = \max\{1; 0,47 \cdot (0,1000 / (10^{-5} \cdot 1,83 \cdot 10^5))^{0,067} \cdot (2500 / 1800)^{0,4}\} = 1$$

Расчётная толщина стенки с учетом прибавок:

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	К-5.00.00.000 РР					Лист
19744.4										61
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

$$s_p + c = \max \left\{ 1.06 \cdot \frac{10^{-2} \cdot D}{B} \cdot \left(\frac{p}{10^{-5} \cdot E} \cdot \frac{1}{D} \right)^{0.4}, \frac{1.2 \cdot p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] - p} \right\} = \max \left\{ 1.06 \cdot 10^{-2} \cdot 1800 / 1 \cdot (0.1000 / (10^{-5} \cdot 1.83 \cdot 10^5)) \cdot 2500 / 1800^{0.4}; 1.2 \cdot 0.1000 \cdot 1800 / (2 \cdot 156.9 - 0.1000) \right\} + 6.8 = 13.6 \text{ мм}$$

13,6 мм ≤ 18 мм

Заключение: **Условие работоспособности выполнено**

Расчётная длина для расчёта устойчивости всей обечайки:

$$L = 1,43 \cdot 10^4 \text{ мм}$$

$$B_2 = \min \left\{ 1.0; 9.45 \cdot \frac{D}{L} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot k \cdot (s - c)}} \right\} = \min \{ 1.0; 9.45 \cdot 1800 / 1,43 \cdot 10^4 \cdot (1800 / (100 \cdot 1,928 \cdot (18 - 6,8)))^{1/2} \} = 1$$

Допускаемое давление из условия устойчивости:

$$[p]_{1E} = \frac{2.08 \cdot 10^{-5} \cdot E}{k \cdot n_y \cdot B_2} \cdot \frac{D}{L} \cdot \left[\frac{100 \cdot k \cdot (s - c)}{D} \right]^{2.5} = \frac{2.08 \cdot 10^{-5} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 1800 / (1,928 \cdot 2,4 \cdot 1 \cdot 1,43 \cdot 10^4) \cdot (100 \cdot 1,928 \cdot (18 - 6,8) / 1800)^{2.5}}{1,928 \cdot (18 - 6,8) / 1800} = 0,1633 \text{ МПа}$$

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$$l = 2150 \text{ мм}$$

Допускаемое давление из условия прочности:

$$[p]_{1П} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s - c) + \frac{A_{k1}}{1} \cdot [\sigma]_{k1} + \frac{A_{k2}}{1} \cdot [\sigma]_{k2}}{D + (s - c)} = \frac{2 \cdot 156,9 \cdot (18 - 6,8) + 0,72 \cdot 10^{-3} \cdot 167 / 2150 + 0 \cdot 0 / 2150}{(1800 + 18 - 6,8)} = 1,972 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости всей обечайки:

$$[p]_1 = \frac{[p]_{1П}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{1П}}{[p]_{1E}} \right)^2}} = 1,972 / (1 + (1,972 / 0,1633)^2)^{1/2} = 0,1627 \text{ МПа}$$

Расстояние между кольцами для расчёта от действия давления:

$$l = 2144 \text{ мм}$$

$$B_1 = \min \left\{ 1.0; 9.45 \cdot \frac{D}{l} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (s - c)}} \right\} = \min \{ 1.0; 9.45 \cdot 1800 / 2144 \cdot (1800 / (100 \cdot (18 - 6,8)))^{1/2} \} = 1$$

Допускаемое давление из условия устойчивости:

$$[p]_{2E} = \frac{2.08 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D}{l} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2.5} = \frac{2.08 \cdot 10^{-5} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 1800 / (2,4 \cdot 1 \cdot 2144) \cdot (100 \cdot (18 - 6,8) / 1800)^{2.5}}{2,4 \cdot 1 \cdot 2144} = 0,4066 \text{ МПа}$$

$$\lambda_{II}^2 = \frac{b^2}{D \cdot (s - c)} = 2144^2 / (1800 \cdot (18 - 6,8)) = 228$$

Допускаемое давление из условия прочности:

$$[p]_{2П} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s - c)}{D + (s - c)} \cdot \frac{2 + \lambda_{II}^2}{1 + \frac{\varphi_T \cdot \lambda_{II}^2}{\varphi_P}} = \frac{2 \cdot 156,9 \cdot (18 - 6,8)}{(1800 + 18 - 6,8)} \cdot \frac{2 + 228}{1 + (1,0 \cdot 228) / 1} = 1,949 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости обечайки между кольцами жёсткости:

$$[p]_2 = \frac{[p]_{2П}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{2П}}{[p]_{2E}} \right)^2}} = 1,949 / (1 + (1,949 / 0,4066)^2)^{1/2} = 0,3981 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление:

$$[p] = \min \{ [p]_1; [p]_2 \} = \min \{ 0,1627; 0,3981 \} = 0,1627 \text{ МПа}$$

$$0,1627 \text{ МПа} \geq 0,1000 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Минимальное расстояние между “одиночными” штуцерами:

Инв. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
К-5.00.00.000 PP					Лист 62

$$b_0 = 2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} = 2 \cdot (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 284 \text{ мм}$$

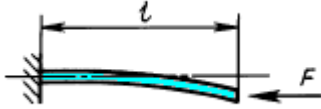
Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием (п. 5.3.4)

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$[F]_{\pi} = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3,142 \cdot (1800 + 18 - 6,8) \cdot (18 - 6,8) \cdot 156,9 = 1 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:

$$[F]_{\text{Е1}} = \frac{31 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2,5} = 310 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 1800^2 / (2,4) \cdot (100 \cdot (18 - 6,8) / 1800)^{2,5} = 2,339 \cdot 10^7 \text{ Н}$$



Приведённая длина: $l_{\text{пр}} = 2,86 \cdot 10^4 \text{ мм}$

Гибкость:

$$\lambda = \frac{2,83 \cdot l_{\text{пр}}}{D + s - c} = 2,83 \cdot 2,86 \cdot 10^4 / (1800 + 18 - 6,8) = 44,35$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия общей устойчивости:

$$[F]_{\text{Е2}} = \frac{\pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot E}{n_y} \cdot \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2 = 3,142 \cdot (1800 + 18 - 6,8) \cdot (18 - 6,8) \cdot 1,83 \cdot 10^5 / (2,4) \cdot (3,142 / 44,35)^2 = 2,438 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия устойчивости:

$$[F]_{\text{Е}} = \min \{ [F]_{\text{Е1}}, [F]_{\text{Е2}} \} = \min \{ 2,339 \cdot 10^7, 2,438 \cdot 10^7 \} = 2,339 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие:

$$[F] = \frac{[F]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\pi}}{[F]_{\text{Е}}} \right)^2}} = 1 \cdot 10^7 / (1 + (1 \cdot 10^7 / 2,339 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 9,196 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$9,196 \cdot 10^6 \text{ Н} \geq 2,459 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Обечайка, нагруженная изгибающим моментом (п. 5.3.5)

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны сжатия:

$$[M]_{\pi} = \frac{D}{4} \cdot [F]_{\pi} = 1800 / 4 \cdot 1 \cdot 10^7 = 4,501 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_{\text{Е}} = \frac{D}{3,5} \cdot [F]_{\text{Е1}} = 1800 / 3,5 \cdot 2,339 \cdot 10^7 = 1,203 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \frac{[M]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\pi}}{[M]_{\text{Е}}} \right)^2}} = 4,501 \cdot 10^6 / (1 + (4,501 \cdot 10^6 / 1,203 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 4,215 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

$$4,215 \cdot 10^6 \text{ Н м} \geq 3,43 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Обечайка, нагруженная поперечным усилием (п. 5.3.6)

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности:

$$[Q]_{\pi} = 0,25 \cdot \pi \cdot D \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 0,25 \cdot 3,142 \cdot 1800 \cdot (18 - 6,8) \cdot 156,9 = 2,485 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Инов. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	$[F] = \frac{[F]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\Pi}}{[F]_{\text{E}}}\right)^2}} = 1 \cdot 10^7 / (1 + (1 \cdot 10^7 / 2,339 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 9,196 \cdot 10^6 \text{ Н}$ <p>9,196·10⁶ Н ≥ 2,459·10⁵ Н</p> <p>Заключение: Условие прочности и устойчивости выполнено</p> <p>Обечайка, нагруженная изгибающим моментом (п. 5.3.5)</p> <p>Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны сжатия:</p> $[M]_{\Pi} = \frac{D}{4} \cdot [F]_{\Pi} = 1800 / 4 \cdot 1 \cdot 10^7 = 4,501 \cdot 10^6 \text{ Н м}$ <p>Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:</p> $[M]_{\text{E}} = \frac{D}{3.5} \cdot [F]_{\text{E1}} = 1800 / 3.5 \cdot 2,339 \cdot 10^7 = 1,203 \cdot 10^7 \text{ Н м}$ <p>Допускаемый изгибающий момент:</p> $[M] = \frac{[M]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\Pi}}{[M]_{\text{E}}}\right)^2}} = 4,501 \cdot 10^6 / (1 + (4,501 \cdot 10^6 / 1,203 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 4,215 \cdot 10^6 \text{ Н м}$ <p>4,215·10⁶ Н м ≥ 3,43·10⁵ Н м</p> <p>Заключение: Условие прочности и устойчивости выполнено</p> <p>Обечайка, нагруженная поперечным усилием (п. 5.3.6)</p> <p>Допускаемое поперечное усилие из условия прочности:</p> $[Q]_{\Pi} = 0.25 \cdot \pi \cdot D \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 0.25 \cdot 3,142 \cdot 1800 \cdot (18 - 6,8) \cdot 156,9 = 2,485 \cdot 10^6 \text{ Н}$
					Изм.

К-5.00.00.000 PP

Лист
63

Расчётная длина для расчёта от действия поперечной силы:

$l_Q = 2500$ мм

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

$$[Q]_E = \frac{2.4 \cdot E \cdot (s - c)^2}{n_y} \cdot \left[0.18 + 3.3 \cdot \frac{D(s - c)}{l^2} \right] = \frac{2.4 \cdot 1.83 \cdot 10^5 \cdot (18 - 6.8)^2}{2500^2} / 2.4 \cdot (0.18 + 3.3 \cdot 1800 \cdot (18 - 6.8) / 2500^2) = 4,376 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_E}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_E}{[Q]_H} \right)^2}} = 2,485 \cdot 10^6 / (1 + (2,485 \cdot 10^6 / 4,376 \cdot 10^6)^2)^{1/2} = 2,161 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$2,161 \cdot 10^6 \text{ Н} \geq 4,032 \cdot 10^4 \text{ Н}$

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0,1000 / 0,1627 + 2,459 \cdot 10^5 / 9,196 \cdot 10^6 + 3,43 \cdot 10^5 / 4,215 \cdot 10^6 + (4,032 \cdot 10^4 / 2,161 \cdot 10^6)^2 = 0,723 \leq 1$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Дополнительный расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 51274-99

Продольные напряжения на наветренной стороне:

$$\sigma_{x1} = \frac{p \cdot (D + s)}{4 \cdot (s - c)} - \frac{F}{\pi \cdot D \cdot (s - c)} + \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = \frac{0,1000 \cdot (1800 + 18) / (4 \cdot (18 - 6,8)) - 2,459 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot 1800 \cdot (18 - 6,8)) + 4 \cdot 3,43 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot 1800^2 \cdot (18 - 6,8))}{12,21 \text{ МПа}}$$

Кольцевые напряжения:

$$\sigma_y = \frac{p \cdot (D + s)}{2 \cdot (s - c)} = 0,1000 \cdot (1800 + 18) / (2 \cdot (18 - 6,8)) = 8,116 \text{ МПа}$$

Эквивалентные напряжения на наветренной стороне:

$$\sigma_{\text{эк1}} = \sqrt{\sigma_{x1}^2 - \sigma_{x1} \cdot \sigma_y + \sigma_y^2} = (12,21^2 - 12,21 \cdot 8,116 + 8,116^2)^{1/2} = 10,76 \text{ МПа}$$

Условие прочности на наветренной стороне

$$\max\{\sigma_{x1}; \sigma_{\text{эк1}}\} \leq [\sigma]_{\text{к}} \cdot \varphi$$

$$\max\{\sigma_{x1}; \sigma_{\text{эк1}}\} = \max\{12,21; 10,76\} = 12,21 \text{ МПа}$$

$$[\sigma]_{\text{к}} \cdot \varphi = 156,9 \cdot 1 = 156,9 \text{ МПа}$$

Условие прочности выполнено

Продольные напряжения на подветренной стороне:

$$\sigma_{x2} = \frac{p \cdot (D + s)}{4 \cdot (s - c)} - \frac{F}{\pi \cdot D \cdot (s - c)} - \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = \frac{0,1000 \cdot (1800 + 18) / (4 \cdot (18 - 6,8)) - 2,459 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot 1800 \cdot (18 - 6,8)) - 4 \cdot 3,43 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot 1800^2 \cdot (18 - 6,8))}{-11,86 \text{ МПа}}$$

Эквивалентные напряжения на подветренной стороне:

$$\sigma_{\text{эк2}} = \sqrt{\sigma_{x2}^2 - \sigma_{x2} \cdot \sigma_y + \sigma_y^2} = ((-11,86)^2 - (-11,86) \cdot 8,116 + 8,116^2)^{1/2} = 17,4 \text{ МПа}$$

Условие прочности на подветренной стороне

$$\max\{\sigma_{x2}; \sigma_{\text{эк2}}\} \leq [\sigma]_{\text{к}} \cdot \varphi$$

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 PP				Лист
				64

$$\max\{|\sigma_{x2}|; \sigma_{\text{из}2}\} = \max\{(-11,86); 17,4\} = 17,4 \text{ МПа}$$

$$[\sigma]_{\text{к}} \varphi = 156,9 * 1 = 156,9 \text{ МПа}$$

Условие прочности выполнено

Условие устойчивости для колонн, работающих под наружным давлением:

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} \leq 1,0$$

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} = 0,1000 / 0,1627 + 2,459 \cdot 10^5 / 9,196 \cdot 10^6 + 3,43 \cdot 10^5 / 4,215 \cdot 10^6 = 0,7227$$

Условие устойчивости выполнено

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, T:	20 °C
Расчётное внутреннее избыточное давление (с учётом гидростатического), p:	0,7045 МПа
Расчётный изгибающий момент, M:	$1,011 \cdot 10^5$ Н·м
Расчётное поперечное усилие, Q:	$1,11 \cdot 10^4$ Н
Расчётное осевое сжимающее усилие, F:	$6,076 \cdot 10^5$ Н

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 20 °C (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]^{20} = \eta * R_{e/20} / n_T = 1 * 300 / 1,1 = 272,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре T = 20 °C:

$$E^{20} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Обечайка с кольцами жёсткости, нагруженная внутренним избыточным давлением (п. 5.4.1)

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок (без учёта колец жёсткости):

$$s_p + c = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} + c = (0,7045 * 1800) / (2 * 272,7 * 1 - 0,7045) + 6,8 = 9,128 \text{ мм}$$

$$9,128 \text{ мм} \leq 18 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие работоспособности выполнено**

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$$l = 2500 \text{ мм}$$

Допускаемое внутреннее давление из условия прочности всей обечайки:

$$[p]_1 = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c) + \frac{A_{k1}}{1} \cdot [\sigma]_{K1} \cdot \varphi_{K1} + \frac{A_{k2}}{1} \cdot [\sigma]_{K2} \cdot \varphi_{K2}}{D + (s - c)} = \frac{[2 * 272,7 * 1 * (18 - 6,8) + 0,72 \cdot 10^{-3} * 272,7 * 1 / 2500 + 0,72 \cdot 10^{-3} * 272,7 * 1 / 2500] / (1800 + 18 - 6,8)}{6,8} = 3,46 \text{ МПа}$$

Расстояние между кольцами для расчёта от действия давления:

$$b = 2488 \text{ мм}$$

$$\lambda_{\Pi}^2 = \frac{b^2}{D \cdot (s - c)} = 2488^2 / (1800 * (18 - 6,8)) = 307,1$$

Допускаемое внутреннее давление из условия прочности обечайки между двумя соседними кольцами жёсткости:

$$[p]_2 = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T \cdot (s - c)}{D + (s - c)} \cdot \frac{2 + \lambda_{\Pi}^2}{1 + \frac{\varphi_T \cdot \lambda_{\Pi}^2}{\varphi_p}} = 2 * 272,7 * 1 * (18 - 6,8) / (1800 + 18 - 6,8) * [2 + 307,1] / [1 + (1 * 307,1) / 1] = 3,384 \text{ МПа}$$

Допускаемое внутреннее давление:

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 PP				Лист
				65

$$[p] = \min \{ [p]_1; [p]_2 \} = \min \{ 3,46; 3,384 \} = 3,384 \text{ МПа}$$

$$3,384 \text{ МПа} \geq 0,7045 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Минимальное расстояние между "одиночными" штуцерами:

$$b_0 = 2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} = 2 \cdot (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 284 \text{ мм}$$

Расчётная длина для расчёта от действия осевой силы:

$$l_F = 1,43 \cdot 10^4 \text{ мм}$$

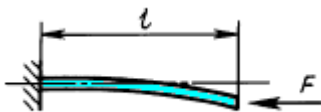
Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием (п. 5.3.4)

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$[F]_{\Pi} = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3,142 \cdot (1800 + 18 - 6,8) \cdot (18 - 6,8) \cdot 272,7 = 1,738 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:

$$[F]_{E1} = \frac{31,0 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2,5} = 310 \cdot 10^{-6} \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot 1800^2 / (1,8) \cdot (100 \cdot (18 - 6,8) / 1800)^{2,5} = 3,391 \cdot 10^7 \text{ Н}$$



Приведённая длина: $l_{np} = 2,86 \cdot 10^4 \text{ мм}$

Гибкость:

$$\lambda = \frac{2,83 \cdot l_{np}}{D + s - c} = 2,83 \cdot 2,86 \cdot 10^4 / (1800 + 18 - 6,8) = 44,35$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия общей устойчивости:

$$[F]_{E2} = \frac{\pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot E}{n_y} \cdot \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2 = 3,142 \cdot (1800 + 18 - 6,8) \cdot (18 - 6,8) \cdot 1,99 \cdot 10^5 / (1,8) \cdot (\pi / 44,35)^2 = 3,535 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия устойчивости:

$$[F]_E = \min \{ [F]_{E1}; [F]_{E2} \} = \min \{ 3,391 \cdot 10^7; 3,535 \cdot 10^7 \} = 3,391 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие:

$$[F] = \frac{[F]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\Pi}}{[F]_E} \right)^2}} = 1,738 \cdot 10^7 / (1 + (1,738 \cdot 10^7 / 3,391 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 1,547 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

$$1,547 \cdot 10^7 \text{ Н} \geq 6,076 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Обечайка, нагруженная изгибающим моментом (п. 5.3.5)

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны сжатия:

$$[M]_{\Pi} = \frac{D}{4} \cdot [F]_{\Pi} = 1800 / 4 \cdot 1,738 \cdot 10^7 = 7,821 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_E = \frac{D}{3,5} \cdot [F]_{E1} = 1800 / 3,5 \cdot 3,391 \cdot 10^7 = 1,744 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \frac{[M]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\Pi}}{[M]_E} \right)^2}} = 7,821 \cdot 10^6 / (1 + (7,821 \cdot 10^6 / 1,744 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 7,136 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Инов. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 PP
					Лист
					66

$$7,136 \cdot 10^6 \text{ Н м} \geq 1,011 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Обечайка, нагруженная поперечным усилием (п. 5.3.6)

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности:

$$[Q]_{\pi} = 0.25 \cdot \pi \cdot D \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 0.25 \cdot 3,142 \cdot 1800 \cdot (18 - 6,8) \cdot 272,7 = 4,318 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$$l_p = 2500 \text{ мм}$$

Расчётная длина для расчёта от действия поперечной силы:

$$l_Q = 2500 \text{ мм}$$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

$$[Q]_E = \frac{2.4 \cdot E \cdot (s - c)^2}{n_y} \cdot \left[0.18 + 3.3 \cdot \frac{D(s - c)}{l^2} \right] = \frac{2.4 \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot (18 - 6,8)^2}{1,8 \cdot (0.18 + 3.3 \cdot 1800 \cdot (18 - 6,8) / 2500^2)} = 6,345 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\pi}}{[Q]_E} \right)^2}} = 4,318 \cdot 10^6 / (1 + (4,318 \cdot 10^6 / 6,345 \cdot 10^6)^2)^{1/2} = 3,57 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$3,57 \cdot 10^6 \text{ Н} \geq 1,11 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0 / 0 + 6,076 \cdot 10^5 / 1,547 \cdot 10^7 + 1,011 \cdot 10^5 / 7,136 \cdot 10^6 + (1,11 \cdot 10^4 / 3,57 \cdot 10^6)^2 = 0,05345 \leq 1$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием (п. 5.3.3)

Допускаемое осевое растягивающее усилие:

$$[F] = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = 3,142 \cdot (1800 + 18 - 6,8) \cdot (18 - 6,8) \cdot 272,7 \cdot 1 = 1,738 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны растяжения:

$$[M]_{\pi} = \frac{D}{4} \cdot [F] = 1800 / 4 \cdot 1,738 \cdot 10^7 = 7,821 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

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

Проверка условия прочности: $\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\pi}} \leq 1.0$

$$\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\pi}} = (0 + 0,7045 \cdot 3,142 \cdot 1800^2 / 4) / 1,738 \cdot 10^7 + 1,011 \cdot 10^5 / 7,821 \cdot 10^6 = 0,1161 \leq 1$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	19744.4	Подпись и дата	
Взам. инв. №		Подпись и дата	
Инов. № дубл.		Подпись и дата	
Инов. № подл.	19744.4	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
		Дата	
К-5.00.00.000 PP			Лист
			67

Дополнительный расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 51274-99

Продольные напряжения на наветренной стороне:

$$\sigma_{x1} = \frac{p \cdot (D + s)}{4 \cdot (s - c)} - \frac{F}{\pi \cdot D \cdot (s - c)} + \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = \frac{0,7045 \cdot (1800 + 18) / (4 \cdot (18 - 6,8)) - 6,076 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot 1800 \cdot (18 - 6,8)) + 4 \cdot 1,011 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot 1800^2 \cdot (18 - 6,8))}{1} = 22,54 \text{ МПа}$$

Кольцевые напряжения:

$$\sigma_y = \frac{p \cdot (D + s)}{2 \cdot (s - c)} = 0,7045 \cdot (1800 + 18) / (2 \cdot (18 - 6,8)) = 57,18 \text{ МПа}$$

Эквивалентные напряжения на наветренной стороне:

$$\sigma_{\Sigma 1} = \sqrt{\sigma_{x1}^2 - \sigma_{x1} \cdot \sigma_y + \sigma_y^2} = (22,54^2 - 22,54 \cdot 57,18 + 57,18^2)^{1/2} = 49,89 \text{ МПа}$$

Условие прочности на наветренной стороне

$$\max\{\sigma_{x1}; \sigma_{\Sigma 1}\} \leq [\sigma]_{\text{к}} \cdot \varphi$$

$$\max\{\sigma_{x1}; \sigma_{\Sigma 1}\} = \max\{22,54; 49,89\} = 49,89 \text{ МПа}$$

$$[\sigma]_{\text{к}} \varphi = 272,7 \cdot 1 = 272,7 \text{ МПа}$$

Условие прочности выполнено

Продольные напряжения на подветренной стороне:

$$\sigma_{x2} = \frac{p \cdot (D + s)}{4 \cdot (s - c)} - \frac{F}{\pi \cdot D \cdot (s - c)} - \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = \frac{0,7045 \cdot (1800 + 18) / (4 \cdot (18 - 6,8)) - 6,076 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot 1800 \cdot (18 - 6,8)) - 4 \cdot 1,011 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot 1800^2 \cdot (18 - 6,8))}{1} = 15,45 \text{ МПа}$$

Эквивалентные напряжения на подветренной стороне:

$$\sigma_{\Sigma 2} = \sqrt{\sigma_{x2}^2 - \sigma_{x2} \cdot \sigma_y + \sigma_y^2} = (15,45^2 - 15,45 \cdot 57,18 + 57,18^2)^{1/2} = 51,23 \text{ МПа}$$

Условие прочности на подветренной стороне

$$\max\{\sigma_{x2}; \sigma_{\Sigma 2}\} \leq [\sigma]_{\text{к}} \cdot \varphi$$

$$\max\{\sigma_{x2}; \sigma_{\Sigma 2}\} = \max\{15,45; 51,23\} = 51,23 \text{ МПа}$$

$$[\sigma]_{\text{к}} \varphi = 272,7 \cdot 1 = 272,7 \text{ МПа}$$

Условие прочности выполнено

Условие устойчивости для колонн, работающих под внутренним избыточным давлением или без давления:

$$\frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} \leq 1,0$$

$$\frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} = 6,076 \cdot 10^5 / 1,547 \cdot 10^7 + 1,011 \cdot 10^5 / 7,136 \cdot 10^6 = 0,05344$$

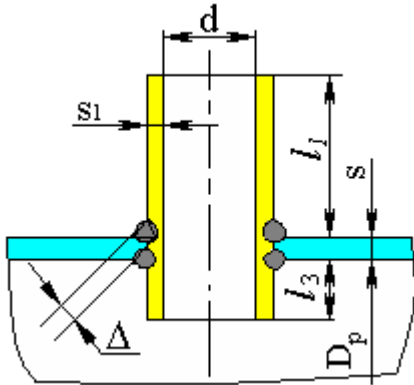
Условие устойчивости выполнено

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. №	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 PP	Лист
19744.4							68					

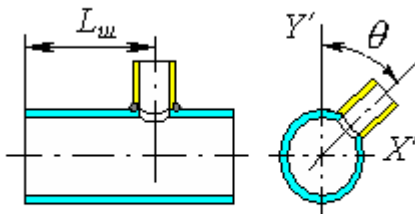
Штуцер А1-А5 DN500

Исходные данные

Элемент: Штуцер А5 DN500
 Условное обозначение (метка) Штуцер А5
 Элемент, несущий штуцер: Обечайка цилиндрическая
 Тип элемента, несущего штуцер: Обечайка цилиндрическая
 Тип штуцера: Проходящий без укрепления

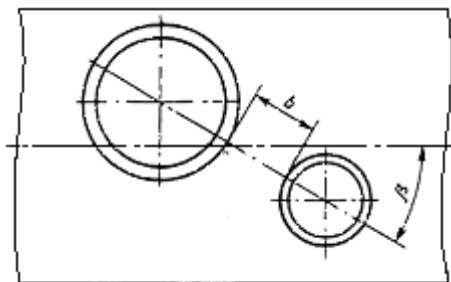


Материал несущего элемента: 09Г2С
 Толщина стенки несущего элемента, s : 18 мм
 Сумма прибавок к стенке несущего элемента, c : 6,8 мм
 Материал штуцера: 09Г2С
 Внутренний диаметр штуцера, d : 500 мм
 Толщина стенки штуцера, s_1 : 12 мм
 Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c_s : 6,8 мм
 Длина штуцера, l_1 : 140 мм



Смещение штуцера, $L_{ш}$: 540 мм
 Угол поворота штуцера, θ : 330 °
 Длина внутр. части штуцера, l_3 : 0 мм
 Прибавка на коррозию, c_{s1} : 0 мм
 Минимальный размер сварного шва, Δ : 1 мм
 Расчётные параметры размещения штуцера:
 Ближайший штуцер

Исх. № подл.	Исх. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата
19744.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
			Дата
К-5.00.00.000 РР			
Лист 69			



Название штуцера: Штуцер И DN50

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b : 1905 мм

Угол β : 121,6 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$$\varphi_1 = 1$$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$$\wp = 1$$

Изоляция:

Название: Теплоизоляция

Толщина, $s_{из}$: 100 мм

Плотность, $\rho_{из}$: 200 кг/м³

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 1800 \text{ mm}$$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, Т: 150 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,4099 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma] = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{256,5 / 1,6; 430 / 2,6\} = 160,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °С:

$$E = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma]_I = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{256,5 / 1,6; 430 / 2,6\} = 160,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 150 °С:

$$E_1 = 1,86 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_{lp} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot |\sigma_1| \cdot \varphi_1 - p} = 0,4099 \cdot (500 + 2 \cdot 6,8) / (2 \cdot 160,3 \cdot 1 - 0,4099) = 0,6574 \text{ mm}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

Инв. № подл.	19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p align="center">Условия нагружения:</p> <p>Расчётная температура, T: 150 °C</p> <p>Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,4099 МПа</p> <p align="center">Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007</p> <p align="center"><i>Свойства материала элемента, несущего штуцер</i></p> <p>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 150 °C (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):</p> <p>$[\sigma] = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{256,5 / 1,6; 430 / 2,6\} = 160,3 \text{ МПа}$</p> <p>Модуль продольной упругости при температуре 180 °C:</p> <p>$E = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$</p> <p align="center"><i>Свойства материала штуцера</i></p> <p>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 150 °C (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):</p> <p>$[\sigma]_I = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{256,5 / 1,6; 430 / 2,6\} = 160,3 \text{ МПа}$</p> <p>Модуль продольной упругости при температуре 150 °C:</p> <p>$E_1 = 1,86 \cdot 10^5 \text{ МПа}$</p> <p>Расчётная толщина стенки штуцера:</p> $s_{\text{ш}} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_I \cdot \varphi_1 - p} = 0,4099 \cdot (500 + 2 \cdot 6,8) / (2 \cdot 160,3 \cdot 1 - 0,4099) = 0,6574 \text{ мм}$ <p>Допускаемое давление для патрубка штуцера:</p>
						<p align="center">К-5.00.00.000 PP</p>
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
						70

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 160,3 \cdot 1 \cdot (12 - 6,8) / (500 + 12 + 6,8) = 3,214 \text{ МПа}$$

$$3,214 \text{ МПа} \geq 0,4099 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 1800 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 2,353 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 500 + 2 \cdot 6,8 = 513,6 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((18 - 6,8) / 2,353 - 0,8) \cdot (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 1124 \text{ мм}$$

$$d_p < d_0: \text{Условие прочности выполнено}$$

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 140; 1,25 \cdot ((500 + 2 \cdot 6,8) \cdot (12 - 6,8))^{1/2} \} = 64,6 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_h}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 160,3 / 160,3 \} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((500 + 2 \cdot 6,8) \cdot (12 - 6,8 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 142 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 338 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 142 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 56,79 \text{ мм}$$

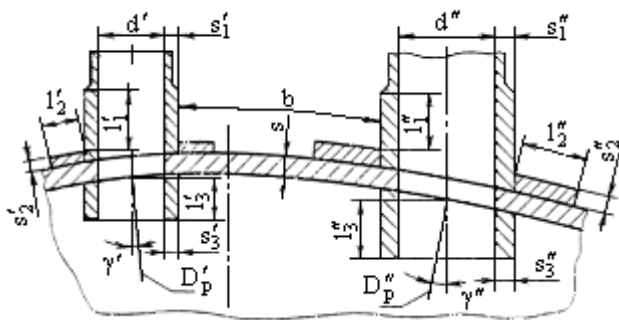
$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0,5 \cdot \frac{d_p - d_{0p}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}}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

$$= \min \{ 1; [1 + (64,6 \cdot (12 - 6,8) \cdot 1 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (12 - 6,8 - 0) \cdot 1) / (142 \cdot (18 - 6,8))] / [1 + 0,5 \cdot (513,6 - 56,79) / 142 + 1 \cdot (500 + 2 \cdot 6,8) / 1800 \cdot 1 / 1 \cdot 64,6 / 142] \} = 0,4423$$

$$= 0,4423$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} = 2 \cdot 1 \cdot (18 - 6,8) \cdot 1 \cdot 160,3 \cdot 0,4423 / [1800 + (18 - 6,8) \cdot 0,4423] = 0,88 \text{ МПа}$$

Изнв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изнв. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 РР				Лист
				71



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер И DN50 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} + (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 284 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 0,88 \text{ МПа}$

$0,88 \text{ МПа} \geq 0,4099 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 180 °C

Расчётное наружное избыточное давление, p: 0,1000 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 180 °C (расчётные условия (наружное давление), коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma] = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{251,1 / 1,6; 435,4 / 2,6\} = 156,9 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °C:

$$E = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 180 °C (расчётные условия (наружное давление), коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma]_1 = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{251,1 / 1,6; 435,4 / 2,6\} = 156,9 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °C:

$$E_1 = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 - p} = 0,1000 \cdot (500 + 2 \cdot 6,8) / (2 \cdot 156,9 - 0,1000) = 0,1637 \text{ мм}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$B_1 = \min \left\{ 1,0, 9,45 \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \sqrt{\frac{d}{100 \cdot (s_1 - c_s)}} \right\} = \min \{ 1,0, 9,45 \cdot 500 / 140 \cdot (500 / (100 \cdot (12 - 6,8)))^{1/2} \} = 1$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия устойчивости:

$$[p]_e = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E_1}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_1 - c_s)}{d} \right]^{2,5} = 20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 500 / (2,4 \cdot 1 \cdot 140) \cdot (100 \cdot (12 - 6,8) / 500)^{2,5} = 6,248 \text{ МПа}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 PP				Лист
				72

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия прочности:

$$[p]_{\pi} = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + (s_1 - c_s)} = 2 \cdot 156,9 \cdot (12 - 6,8) / (500 + 12 - 6,8) = 3,231 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\pi}}{[p]_E} \right)^2}} = 3,231 / (1 + (3,231 / 6,248)^2)^{1/2} = 2,87 \text{ МПа}$$

$$2,87 \text{ МПа} \geq 0,1000 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 1800 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 500 + 2 \cdot 6,8 = 513,6 \text{ мм}$$

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 140; 1,25 \cdot ((500 + 2 \cdot 6,8) \cdot (12 - 6,8))^{1/2} \} = 64,6 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0; 156,9 / 156,9 \} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((500 + 2 \cdot 6,8) \cdot (12 - 6,8 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 142 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 338 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 142 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 56,79 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (64,6 \cdot (12 - 6,8) \cdot 1 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (0 - 2 \cdot 6,8) \cdot 1) / (142 \cdot (18 - 6,8))] / [1 + 0,5 \cdot (513,6 - 56,79) / 142 + 1 \cdot (500 + 2 \cdot 6,8) / 1800 \cdot 64,6 / 142] \} = 0,4423$$

$$= 0,4423$$

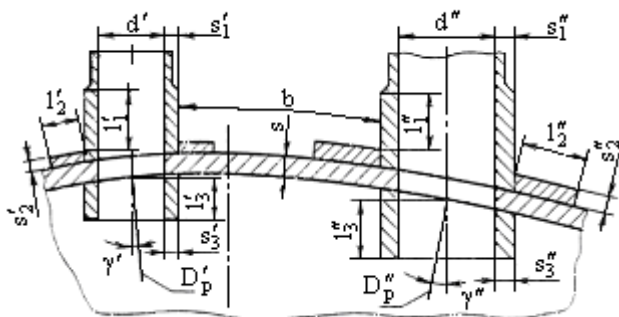
$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} = 2 \cdot 1 \cdot (18 - 6,8) \cdot 156,9 \cdot 0,4423 / [1800 + (18 - 6,8) \cdot 0,4423] = 0,8615 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление:

Инов. № подл.	19744.4	Подпись и дата	
Взам. инв. №		Инов. № дубл.	
Подпись и дата		Подпись и дата	
Инов. № подл.	19744.4	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
		Дата	
К-5.00.00.000 PP			
Лист			
73			

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_p}{[p]_E}\right)^2}} = 0,8615 / (1 + (0,8615 / 0,1633)^2)^{1/2} = 0,1604 \text{ МПа}$$

где $[p]_E$ – допускаемое наружное давление в пределах упругости для элемента, несущего штуцер (см. расчёт элемента “Обечайка цилиндрическая”)



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер И DN50 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} + (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 284 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 0,1604 \text{ МПа}$

$0,1604 \text{ МПа} \geq 0,1000 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, T: 20 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,7017 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 20 °C (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]^{20} = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 300 / 1,1 = 272,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:

$$E = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 20 °C (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]^{20}_1 = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 300 / 1,1 = 272,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:

$$E_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_{fp} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,7017 \cdot (500 + 2 \cdot 6,8) / (2 \cdot 272,7 \cdot 1 - 0,7017) = 0,6616 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
К-5.00.00.000 PP			
Лист 74			

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 * 272,7 * 1 * (12 - 6,8) / (500 + 12 + 6,8) = 5,467 \text{ МПа}$$

$$5,467 \text{ МПа} \geq 0,7017 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 1800 \text{ mm}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 2,319 \text{ MM}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 500 + 2 \cdot 6,8 = 513,6 \text{ mm}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s-c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = 2 \cdot ((18-6,8)/2,319-0,8) \cdot (1800 \cdot (18-6,8))^{1/2} = 1145 \text{ mm}$$

$d_p < d_0$: **Условие прочности выполнено**

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min[l_1; 1.25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)}] = \min[140; 1.25 \cdot ((500 + 2 \cdot 6,8) \cdot (12 - 6,8))^{1/2}] = 64,6 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 272,7 / 272,7 \} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{30} = \min \{ l_3; 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \} = \min \{ 0; 0.5 \cdot ((500 + 2 \cdot 6,8) \cdot (12 - 6,8 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ mm}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 142 \text{ mm}$$

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

$$L_k = 338 \text{ mm}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 142 \text{ mm}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{op} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 56,79 \text{ mm}$$

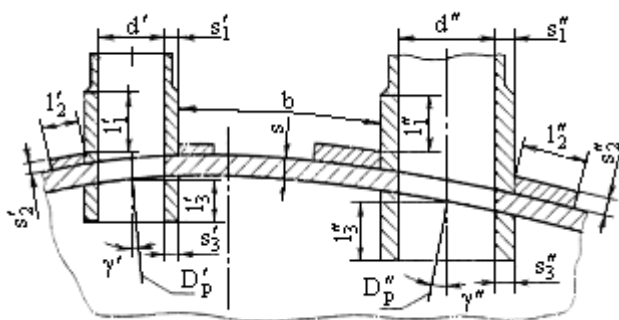
$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{1_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + 1_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + 1_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{1_p \cdot (s - c)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{op}}{1_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{1_{1p}}{1_p}}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

$$= \min\{1; [1 + (64,6 * (12 - 6,8) * 1 + 0 * 0 * 0 + 0 * (12 - 6,8 - 0) * 1) / (142 * (18 - 6,8))] / [1 + 0,5 * (513,6 - 56,79) / 142 + 1 * (500 + 2 * 6,8) / 1800 * 1 / 1 * 64,6 / 142] = \mathbf{0,4423}\}$$

$$= 0,4423$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_v + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (18 - 6,8) \cdot 1 \cdot 272,7 \cdot 0,4423 / [1800 + (18 - 6,8) \cdot 0,4423] = 1,497 \text{ МПа}$$

Инв. № подл.	19744.4	Подпись и дата		Взам. инв. №		Инв. № дубл.		Подпись и дата		$l_{3p} = 1800 - 1800 \cdot \sqrt{\frac{d + 2 \cdot c_s}{s_3 - c_s - c_{s1}}} = \min\{6,6; \frac{(500 + 2 \cdot 6,8) \cdot (12 - 6,8 - 0)}{(1800 - 6,8)}\} = 6 \text{ мм}$
Ширина зоны укрепления:										$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 142 \text{ мм}$
Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (Днище эллиптическое (нижнее)):										
L _k = 338 мм										
Расчётная ширина зоны укрепления:										
l _p = L ₀ = 142 мм										
Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:										
d _{0p} = 0.4 · √D _p · (s - c) = 0.4 · (1800 · (18 - 6,8)) ^{1/2} = 56,79 мм										
$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{0p}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}} \right\}$										
$= \min\{1; [1 + (64,6 \cdot (12 - 6,8) \cdot 1 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (12 - 6,8 - 0) \cdot 1) / (142 \cdot (18 - 6,8))] / [1 + 0.5 \cdot (513,6 - 56,79) / 142 + 1 \cdot (500 + 2 \cdot 6,8) / 1800 \cdot 1 / 1 \cdot 64,6 / 142] = 0,4423\}$										
= 0,4423										
$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (18 - 6,8) \cdot 1 \cdot 272,7 \cdot 0,4423 / [1800 + (18 - 6,8) \cdot 0,4423] = 1,497 \text{ МПа}$										
Инв. № подл.	19744.4	Подпись и дата		Взам. инв. №		Инв. № дубл.		Подпись и дата		К-5.00.00.000 РР
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						Лист
										75



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер И DN50 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} + (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 284 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 1,497 \text{ МПа}$

$1,497 \text{ МПа} \geq 0,7017 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5 \cdot (d_p - d_{0p}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (513,6 - 56,79) \cdot 2,319 = 0,5296 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

$$= 64,6 \cdot (12 - 0,6616 - 6,8) \cdot 1 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (12 - 6,8 - 0) \cdot 1 + 142 \cdot (18 - 2,319 - 6,8)$$

$$= 0,001554 \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,5296 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \leq 0,001554 \text{ м}^2$$

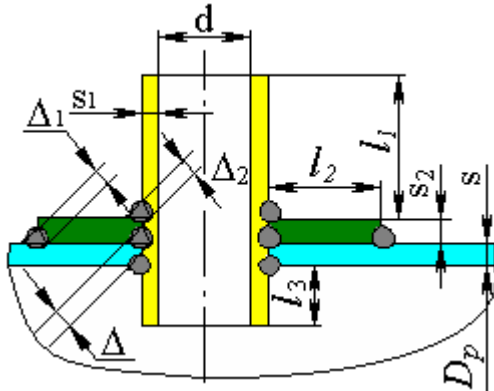
Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 РР				
				Лист
				76

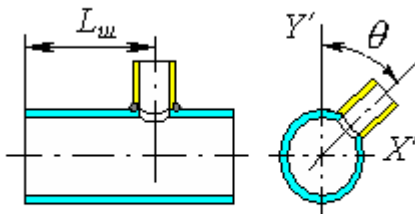
Штуцер Б DN300

Исходные данные

Элемент: Штуцер Б DN300
 Условное обозначение (метка) Штуцер Б
 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 : 18 мм
 Сумма прибавок к стенке несущего элемента, c : 6,8 мм
 Материал штуцера: 09Г2С (КП245) Gr.
 Внутренний диаметр штуцера, d : 301 мм
 Толщина стенки штуцера, s_1 : 17 мм
 Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c_s : 6 мм
 Длина штуцера, l_1 : 114 мм



Смещение штуцера, $L_{ш}$: 2440 мм
 Угол поворота штуцера, θ : 180 °
 Длина внутр. части штуцера, l_3 : 0 мм
 Прибавка на коррозию, c_{s1} : 0 мм
 Материал кольца: 09Г2С
 Ширина кольца, l_2 : 170 мм

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 РР				Лист
				77

Толщина кольца, s_2 : 12 мм

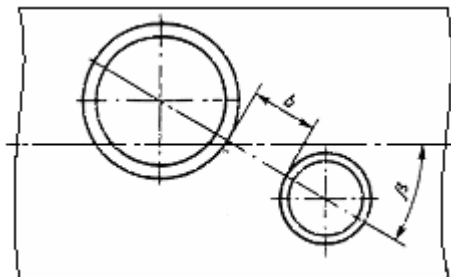
Минимальный размер сварного шва, Δ : 1 мм

Минимальный размер сварного шва, Δ_1 : 1 мм

Минимальный размер сварного шва, Δ_2 : 1 мм

Расчётные параметры размещения штуцера:

Ближайший штуцер



Название штуцера: Штуцер П DN50

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b : 521,5 мм

Угол β : 81,24 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$\phi_1 = 1$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$\phi = 1$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 1800$ мм

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T : 150 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p : 0,4 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 150$ °C (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$[\sigma] = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{256,5 / 1,6; 430 / 2,6\} = 160,3$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 180 °C:

$E = 1,83 \cdot 10^5$ МПа

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 150$ °C (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$[\sigma]_1 = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{202,1 / 1,6; 430 / 2,6\} = 126,3$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 150 °C:

$E_1 = 1,86 \cdot 10^5$ МПа

Свойства материала кольца

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 PP				Лист
				78

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma]_2 = \min(R_{eH} / n_T; R_{mH} / n_B) = \min\{256,5 / 1,6; 430 / 2,6\} = 160,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре $150\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_2 = 1,86 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,4 \cdot (301 + 2 \cdot 6) / (2 \cdot 126,3 \cdot 1 - 0,4) = 0,4964 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 126,3 \cdot 1 \cdot (17 - 6) / (301 + 17 + 6) = 8,577 \text{ МПа}$$

$$8,577 \text{ МПа} \geq 0,4 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 1800 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 2,297 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 301 + 2 \cdot 6 = 313 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((18 - 6,8) / 2,297 - 0,8) \cdot (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 1158 \text{ мм}$$

$$d_p < d_0: \text{Условие прочности выполнено}$$

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min\{l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)}\} = \min\{114; 1,25 \cdot ((301 + 2 \cdot 6) \cdot (17 - 6))^{1/2}\} = 73,35 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min\left\{1,0; \frac{[\sigma]_H}{[\sigma]}\right\} = \min\{1,0, 126,3 / 160,3\} = 0,7879$$

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

$$L_k = 2332 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 142 \text{ мм}$$

Расчётная ширина кольца:

$$l_{2p} = \min\{l_2; \sqrt{D_p \cdot (s_2 + s - c)}\} = \min\{170; (1800 \cdot (12 + 18 - 6,8))^{1/2}\} = 170 \text{ мм}$$

Для накладного кольца:

$$\chi_2 = \min\left\{1,0; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]}\right\} = \min\{1,0, 160,3 / 160,3\} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min\{l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})}\} = \min\{0; 0,5 \cdot ((301 + 2 \cdot 6) \cdot (17 - 6 - 0))^{1/2}\} = 0 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 142 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

Инов. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	$l_{1p} = \min\{l_1; \quad 1.25 \cdot \sqrt{\{d + 2 \cdot c_s\} \cdot \{s_1 - c_s\}}\} = \min\{114; 1.25 \cdot ((301 + 2 \cdot 6) \cdot (17 - 6))^{1/2}\} = 73,35 \text{ мм}$						
					Отношения допускаемых напряжений						
					Для внешней части штуцера:						
					$\chi_1 = \min\left\{1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]}\right\} = \min\{1,0, 126,3 / 160,3\} = 0,7879$						
					Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (Днище эллиптическое (нижнее)):						
					$L_k = 2332 \text{ мм}$ Ширина зоны укрепления:						
Инов. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	$L_0 = \sqrt{D_p \cdot \{s - c\}} = (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 142 \text{ мм}$						
					Расчётная ширина кольца:						
					$l_{2p} = \min\left\{l_2; \quad \sqrt{D_p \cdot \{s_2 + s - c\}}\right\} = \min\{170; (1800 \cdot (12 + 18 - 6,8))^{1/2}\} = 170 \text{ мм}$						
					Для накладного кольца:						
					$\chi_2 = \min\left\{1,0; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]}\right\} = \min\{1,0, 160,3 / 160,3\} = 1$						
					Расчётная длина внутренней части штуцера:						
Инов. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	$l_{3p} = \min\left\{l_3; \quad 0.5 \cdot \sqrt{\{d + 2 \cdot c_s\} \cdot \{s_3 - c_s - c_{s1}\}}\right\} = \min\{0; 0.5 \cdot ((301 + 2 \cdot 6) \cdot (17 - 6 - 0))^{1/2}\} = 0 \text{ мм}$						
					Расчётная ширина зоны укрепления:						
					$l_p = L_0 = 142 \text{ мм}$						
					Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:						
Инов. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 PP	Лист
											79

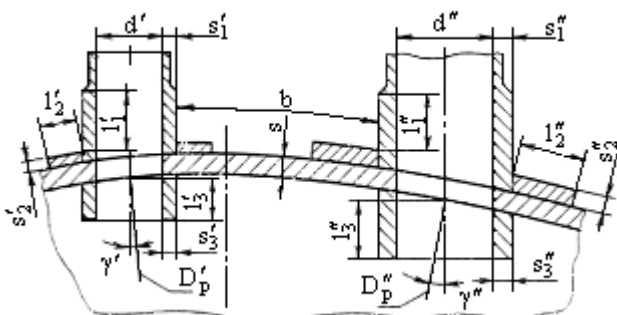
$$d_{0p} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (1800 \cdot (18 - 6.8))^{1/2} = 56.79 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (73.35 \cdot (17 - 6) \cdot 0.7879 + 170 \cdot 12 \cdot 1 + 0 \cdot (17 - 6 - 0) \cdot 0.7879) / (142 \cdot (18 - 6.8))] / [1 + 0.5 \cdot (313 - 56.79) / 142 + 1 \cdot (301 + 2 \cdot 6) / 1800 \cdot 1 / 1 \cdot 73.35 / 142] = 1.347 \}$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (18 - 6.8) \cdot 1 \cdot 160.3 \cdot 1 / [1800 + (18 - 6.8) \cdot 1] = 1.983 \text{ МПа}$$



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер П DN50 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (18 - 6.8))^{1/2} + (1800 \cdot (18 - 6.8))^{1/2} = 284 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

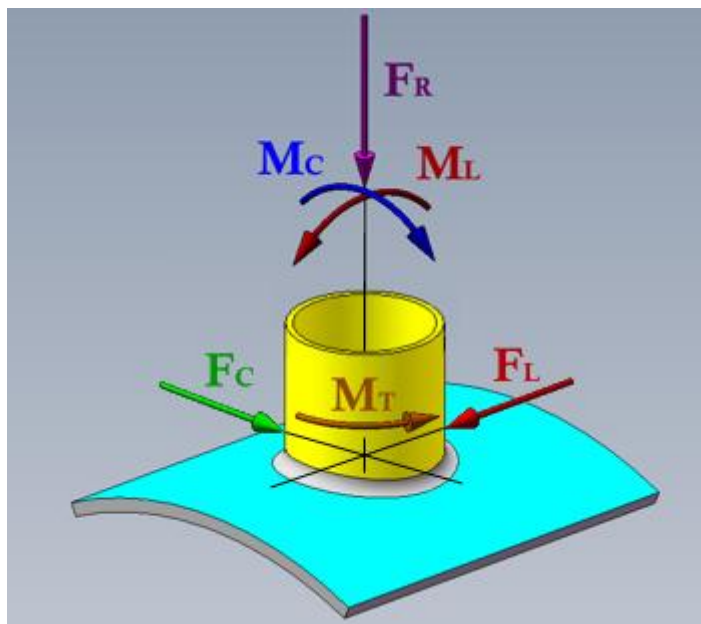
Допускаемое давление $[p] = 1.983 \text{ МПа}$

$$1.983 \text{ МПа} \geq 0.4 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
К-5.00.00.000 РР			
Лист			
80			

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



Радиальная нагрузка, F_R : $(-1,09 \cdot 10^4)$ Н

Окружной момент, M_C : 9400 Н м

Продольный момент, M_L : 9400 Н м

Крутящий момент, M_T : $1,33 \cdot 10^4$ Н м

Сдвиговая нагрузка, F_C : 7700 Н

Сдвиговая нагрузка, F_L : 7700 Н

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c + s_2 = 1800 + 18 + 6,8 + 12 = 1837 \text{ мм}$$

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D_c}{2} = 1837 / 2 = 918,4 \text{ мм}$$

Эквивалентная толщина обечайки около штуцера при $1_2 \geq \sqrt{R_c \cdot (s + s_2)}$:

$$s_3 = s + s_2 \cdot \chi_2 - c = 18 + 12 \cdot 1 - 6,8 = 23,2 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_s = 301 + 17 + 6 = 324 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} = 324 / (1837 \cdot 23,2)^{1/2} = 1,57$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 351,5 \text{ мм}$$

Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |0,4 / 1,983| = 0,2017$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

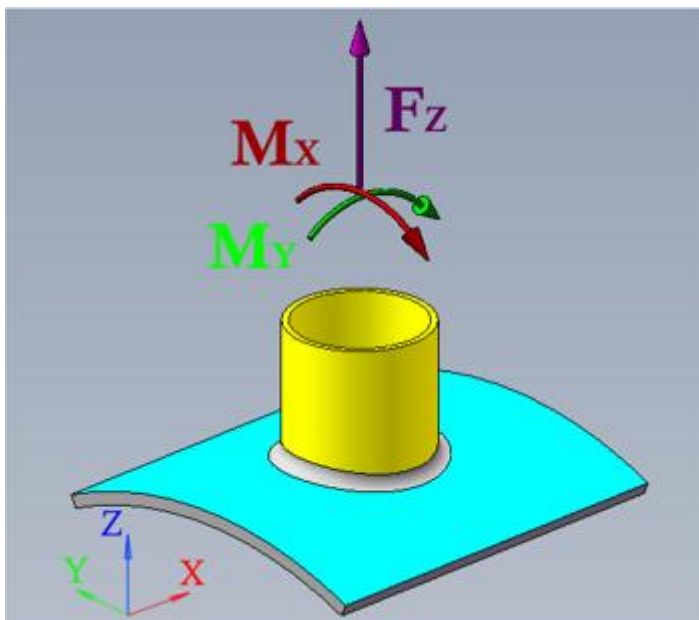
$0,2017 \leq 1,0$. Условие прочности выполнено

Расчетная схема по ГОСТ Р 52857.3-2007

Инов. № подл.	Подпись и дата
19744.4	
Взам. инв. №	Инов. № дубл.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

К-5.00.00.000 РР



Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_z = -F_R = -(1,09 \cdot 10^4) = 1,09 \cdot 10^4 \text{ N}$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 1,57 + 0,005196 \cdot 1,57^2 + (-0,001406) \cdot 1,57^3 + 0 \cdot 1,57^4 = 2,102$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ($\lambda_c = 1,57$):

$$[F_{\tau}] = [\sigma] \cdot (s + \gamma_0 \cdot s_0 - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1.81\} = 160,3 * (18 + 1 * 12 - 6,8)^2 * \max\{2,102; 1.81\} = 1,814 \cdot 10^5 \text{ H}$$

Наружный диаметр накладного кольца:

$$D_2 = d + 2 \cdot s_1 + 2 \cdot l_2 = 30l + 2 \cdot 17 + 2 \cdot 170 = 675 \text{ mm}$$

$$\lambda_c = \frac{D_2}{\sqrt{D_c \cdot [s - c]}} = 675 / (1837 \cdot (18 - 6,8)^{1/2}) = 4,706$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 4,706 + 0,005196 \cdot 4,706^2 + (-0,001406) \cdot 4,706^3 + 0 \cdot 4,706^4 = 5,049$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_c = 4,706$):

$$[F_{\sigma}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1.81\} = 160,3 \cdot (18 - 6,8)^2 \cdot \max\{5,049; 1.81\} = 1,015 \cdot 10^5 \text{ H}$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при наличии накладного кольца:

$$[F_x] = \min \{ [F_{x1}; F_{x2}] \} = \min \{ 1,814 \cdot 10^5; 1,015 \cdot 10^5 \} = 1,015 \cdot 10^5 \text{ H}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{F_x} \right| = |1,09 \cdot 10^4 / 1,015 \cdot 10^5| = 0,1073$$

Условие прочности: $\Phi_x \leq 1$

$0,1073 \leq 1.0$. Условие прочности выполнено

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_y = M_c = 9400 \text{ H}_M$$

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_v = M_L = 9400 M_\odot$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = \frac{4,526}{1,57^4} + 0,06402 \cdot 1,57 + 0,1589 \cdot 1,57^2 + (-0,02142) \cdot 1,57^3 + 0,001035 \cdot 1,57^4 = 4,942$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ($\lambda_c = 1,57$):

$$[M_{x1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 160,3 \cdot (18 + 1 \cdot 12 - 6,8)^2 \cdot 324 / 4 \cdot \max\{4,942; 4.9\} = 3,454 \cdot 10^4 \text{ H}_M$$

Инв. № подл.	19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$\lambda_c = \frac{D_2}{\sqrt{D_c \cdot (s - c)}} = 675 / (1837 \cdot (18 - 6,8)^{1/2}} = 4,706$ $C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 4,706 + 0,005196 \cdot 4,706^2 + (-0,001406) \cdot 4,706^3 + 0 \cdot 4,706^4 = 5,049$ <p>Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_c = 4,706$):</p> $[F_{x2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1,81\} = 160,3 \cdot (18 - 6,8)^2 \cdot \max\{5,049; 1,81\} = 1,015 \cdot 10^5 \text{ Н}$ <p>Допускаемое осевое усилие на штуцер при наличии накладного кольца:</p> $[F_x] = \min\{[F_{x1}]; F_{x2}\} = \min\{1,814 \cdot 10^5; 1,015 \cdot 10^5\} = 1,015 \cdot 10^5 \text{ Н}$ <p>Прочность от действия осевой нагрузки:</p> $\Phi_x = \left \frac{F_x}{[F_x]} \right = 1,09 \cdot 10^4 / 1,015 \cdot 10^5 = 0,1073$ <p>Условие прочности: $\Phi_x \leq 1$</p> <p>$0,1073 \leq 1,0$. Условие прочности выполнено</p> <p>Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:</p> $M_x = M_c = 9400 \text{ Н м}$ <p>Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:</p> $M_y = M_L = 9400 \text{ Н м}$ $C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 1,57 + 0,1589 \cdot 1,57^2 + (-0,02142) \cdot 1,57^3 + 0,001035 \cdot 1,57^4 = 4,942$ <p>Допускаемый изгибающий момент из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ($\lambda_c = 1,57$):</p> $[M_{x1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4,9\} = 160,3 \cdot (18 + 1 \cdot 12 - 6,8)^2 \cdot 324 / 4 \cdot \max\{4,942; 4,9\} = 3,454 \cdot 10^4 \text{ Н м}$
						<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <div>Изм.</div> <div>Лист</div> <div>№ докум.</div> <div>Подп.</div> <div>Дата</div> </div> <div> <div>K-5.00.00.000 PP</div> <div>Лист</div> <div>82</div> </div> </div>

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 * 4,706 + 0,1589 * 4,706^2 + (-0,02142) * 4,706^3 + 0,001035 * 4,706^4 = 6,622$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_c = 4,706$):

$$[M_{x2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{D_2}{4} \cdot \max\{C_2; 4,9\} = 160,3 * (18 - 6,8)^2 * 675 / 4 * \max\{6,622; 4,9\} = 2,247 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

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

$$[M_x] = \min\{[M_{x1}; M_{x2}\} = \min\{3,454 \cdot 10^4; 2,247 \cdot 10^4\} = 2,247 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)}} = 324 / (1837 * (18 + 1 * 12 - 6,8))^{1/2} = 1,57$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 8,787$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ($\lambda_c = 1,57$):

$$[M_{y1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4,9\} = 160,3 * (18 + 1 * 12 - 6,8)^2 * 324 / 4 * \max\{8,787; 4,9\} = 6,141 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 27,33$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_c = 4,706$):

$$[M_{y2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{D_2}{4} \cdot \max\{C_3; 4,9\} = 160,3 * (18 - 6,8)^2 * 675 / 4 * \max\{27,33; 4,9\} = 9,275 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

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

$$[M_y] = \min\{[M_{y1}; M_{y2}\} = \min\{6,141 \cdot 10^4; 9,275 \cdot 10^4\} = 6,141 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((9400 / 2,247 \cdot 10^4)^2 + (9400 / 6,141 \cdot 10^4)^2)^{1/2} = 0,4455$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

0,4455 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_x\right|; \left|\Phi_x\right|; \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0,2 \cdot \Phi_x\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} = \left(\max(|0,2017 / 1 + 0,1073|; |0,1073|; |0,2017 / 1 - 0,2 * 0,1073|)^2 + 0,4455^2\right)^{1/2} = 0,5422$$

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

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

0,5422 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = 0,4 * (301 + 17) / (4 * (17 - 6)) + 4 * (9400^2 + 9400^2)^{1/2} / (3,142 * (301 + 17)^2 * (17 - 6)) + 1,09 \cdot 10^4 / (3,142 * (301 + 17) * (17 - 6)) = 19,1 \text{ МПа}$$

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

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

19,1 МПа ≤ 126,3 МПа. **Условие прочности выполнено**

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0 / 8,577 + (9400^2 + 9400^2)^{1/2} / 1,025 \cdot 10^5 + |0| / 1,362 \cdot 10^6 = 0,1297$$

Изн.	Изн. № подл.	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 PP				Лист
				83

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

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

0,1297 ≤ 1.0. **Условие устойчивости выполнено**

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения:

Расчётная температура, T : 180 °C

Расчётное наружное избыточное давление, p : 0,1000 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 180$ °C (расчётные условия (наружное давление), коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma] = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{251,1 / 1,6; 435,4 / 2,6\} = 156,9 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °C:

$$E = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 180$ °C (расчётные условия (наружное давление), коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma]_1 = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{197,2 / 1,6; 435,4 / 2,6\} = 123,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °C:

$$E_1 = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала кольца

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 180$ °C (расчётные условия (наружное давление), коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma]_2 = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{251,1 / 1,6; 435,4 / 2,6\} = 156,9 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °C:

$$E_2 = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_{\text{ш}} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 - p} = 0,1000 \cdot (301 + 2 \cdot 6) / (2 \cdot 123,3 - 0,1000) = 0,127 \text{ мм}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$B_1 = \min \left\{ 1.0, 9.45 \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \sqrt{\frac{d}{100 \cdot (s_1 - c_s)}} \right\} = \min\{1.0, 9.45 \cdot 301 / 160 \cdot (301 / (100 \cdot (17 - 6)))^{1/2}\} = 1$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия устойчивости:

$$[p]_e = \frac{20.8 \cdot 10^{-6} E_1}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_1 - c_s)}{d} \right]^{2.5} = 20.8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 301 / (2,4 \cdot 1 \cdot 160) \cdot (100 \cdot (17 - 6) / 301)^{2.5} = 76,18 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия прочности:

$$[p]_{\text{п}} = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + (s_1 - c_s)} = 2 \cdot 123,3 \cdot (17 - 6) / (301 + 17 - 6) = 8,692 \text{ МПа}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 PP				Лист
				84

$$[p] = \frac{[p]_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\text{п}}}{[p]_{\text{е}}}\right)^2}} = 8,692 / (1 + (8,692 / 76,18)^2)^{1/2} = 8,636 \text{ МПа}$$

8,636 МПа \geq 0,1000 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 1800 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 301 + 2 \cdot 6 = 313 \text{ мм}$$

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 114; 1,25 \cdot ((301 + 2 \cdot 6) \cdot (17 - 6))^{1/2} \} = 73,35 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 123,3 / 156,9 \} = 0,7855$$

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

$$L_k = 2332 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 142 \text{ мм}$$

Расчётная ширина кольца:

$$l_{2p} = \min \left\{ l_2; \sqrt{D_p \cdot (s_2 + s - c)} \right\} = \min \{ 170; (1800 \cdot (12 + 18 - 6,8))^{1/2} \} = 170 \text{ мм}$$

Для накладного кольца:

$$\chi_2 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 156,9 / 156,9 \} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((301 + 2 \cdot 6) \cdot (17 - 6 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 142 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 56,79 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (73,35 \cdot (17 - 6) \cdot 0,7855 + 170 \cdot 12 \cdot 1 + 0 \cdot (0 - 2 \cdot 6) \cdot 0,7855) / (142 \cdot (18 - 6,8))] / [1 + 0,5 \cdot (313 - 56,79) / 142 + 1 \cdot (301 + 2 \cdot 6) / 1800 \cdot 73,35 / 142] \} = 1,346$$

$$= 1$$

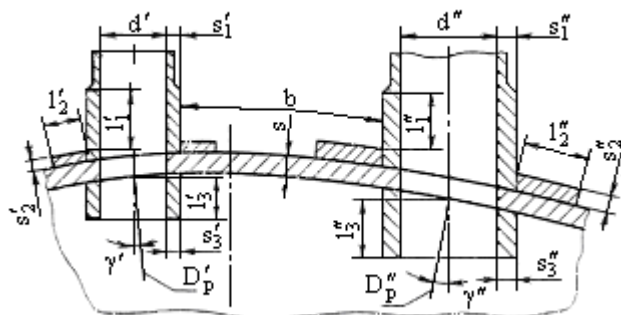
$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} = 2 \cdot 1 \cdot (18 - 6,8) \cdot 156,9 \cdot 1 / [1800 + (18 - 6,8) \cdot 1] = 1,941 \text{ МПа}$$

Инов. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	$l_{2p} = \min \left\{ l_2; \sqrt{D_p \cdot (s_2 + s - c)} \right\} = \min \{ 170; (1800 \cdot (12 + 18 - 6,8))^{1/2} \} = 170 \text{ мм}$	
					Для накладного кольца:	
					$\chi_2 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 156,9 / 156,9 \} = 1$	
					Расчётная длина внутренней части штуцера:	
					$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((301 + 2 \cdot 6) \cdot (17 - 6 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$	
Инов. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Расчётная ширина зоны укрепления:	
					$l_p = L_0 = 142 \text{ мм}$	
					Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:	
					$d_{op} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 56,79 \text{ мм}$	
					$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0,5 \cdot \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}} \right\}$	
Инов. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	$= \min \{ 1; [1 + (73,35 \cdot (17 - 6) \cdot 0,7855 + 170 \cdot 12 \cdot 1 + 0 \cdot (0 - 2 \cdot 6) \cdot 0,7855) / (142 \cdot (18 - 6,8))] / [1 + 0,5 \cdot (313 - 56,79) / 142 + 1 \cdot (301 + 2 \cdot 6) / 1800 \cdot 73,35 / 142] = 1,346 \}$	
					$= 1$	
					$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c)} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (18 - 6,8) \cdot 156,9 \cdot 1 / [1800 + (18 - 6,8) \cdot 1] = 1,941 \text{ МПа}$	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 РР	Лист
						85

Допускаемое наружное давление:

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_p}{[p]_E} \right)^2}} = 1,941 / (1 + (1,941 / 0,1633)^2)^{1/2} = 0,1627 \text{ МПа}$$

где $[p]_E$ – допускаемое наружное давление в пределах упругости для элемента, несущего штуцер (см. расчёт элемента “Обечайка цилиндрическая”)



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер П DN50 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D'_p \cdot (s - c)} + \sqrt{D''_p \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} + (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 284 \text{ мм}$$

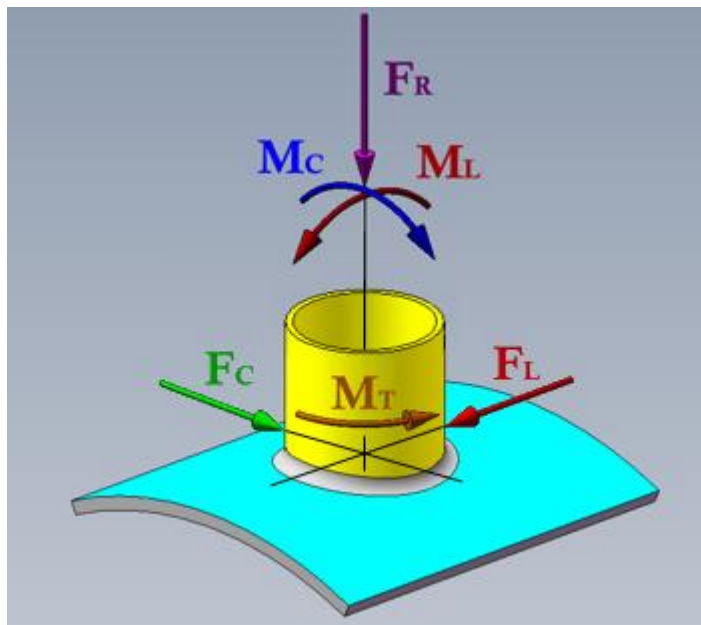
Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 0,1627 \text{ МПа}$

$0,1627 \text{ МПа} \geq 0,1000 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

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



Радиальная нагрузка, F_R : $(-1,09 \cdot 10^4) \text{ Н}$

Окружной момент, M_C : 9400 Н м

Продольный момент, M_L : 9400 Н м

Крутящий момент, M_T : $1,33 \cdot 10^4 \text{ Н м}$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
К-5.00.00.000 PP			
Лист			
86			

Сдвиговая нагрузка, F_c : 7700 Н

Сдвиговая нагрузка, F_L : 7700 Н

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c + s_2 = 1800 + 18 + 6,8 + 12 = 1837 \text{ мм}$$

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D_c}{2} = 1837 / 2 = 918,4 \text{ мм}$$

Эквивалентная толщина обечайки около штуцера при $1_2 \geq \sqrt{R_c \cdot (s + s_2)}$:

$$s_3 = s + s_2 \cdot \chi_2 - c = 18 + 12 \cdot 1 - 6,8 = 23,2 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_s = 301 + 17 + 6 = 324 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} = 324 / (1837 \cdot 23,2)^{1/2} = 1,57$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 351,5 \text{ мм}$$

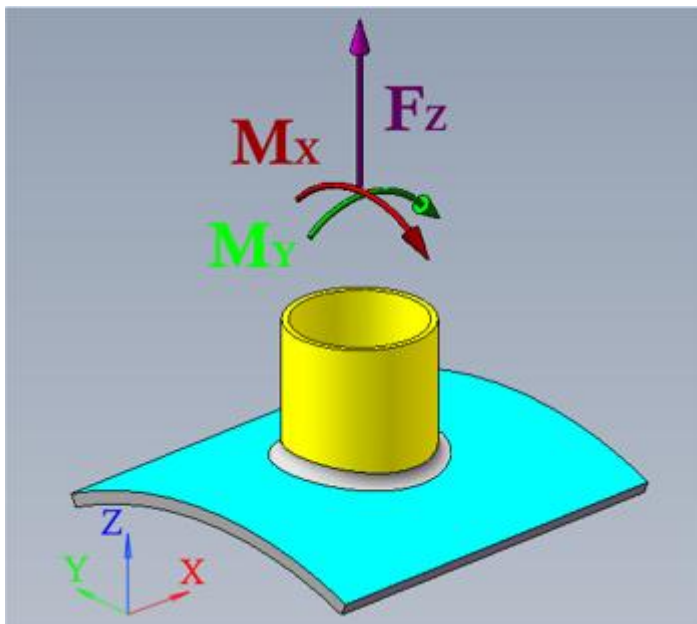
Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |(-0,1000) / 0,1627| = 0,6146$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

$0,6146 \leq 1,0$. Условие прочности выполнено

Расчетная схема по ГОСТ Р 52857.3-2007



Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_z = -F_R = -(-1,09 \cdot 10^4) = 1,09 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 1,57 + 0,005196 \cdot 1,57^2 + (-0,001406) \cdot 1,57^3 + 0 \cdot 1,57^4 = 2,102$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ($\lambda_c = 1,57$):

$$[F_{z1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1,81\} = 156,9 \cdot (18 + 1 \cdot 12 - 6,8)^2 \cdot \max\{2,102; 1,81\} = 1,776 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Наружный диаметр накладного кольца:

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 РР				Лист
				87

$$D_2 = d + 2 \cdot s_1 + 2 \cdot l_2 = 301 + 2 \cdot 17 + 2 \cdot 170 = 675 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{D_2}{\sqrt{D_c \cdot (s - c)}} = 675 / (1837 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 4,706$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 4,706 + 0,005196 \cdot 4,706^2 + (-0,001406) \cdot 4,706^3 + 0 \cdot 4,706^4 = 5,049$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_c = 4,706$):

$$[F_{x2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1,81\} = 156,9 \cdot (18 - 6,8)^2 \cdot \max\{5,049; 1,81\} = 9,94 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при наличии накладного кольца:

$$[F_x] = \min\{[F_{x1}]; [F_{x2}]\} = \min\{1,776 \cdot 10^5; 9,94 \cdot 10^4\} = 9,94 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_x = \frac{|F_x|}{[F_x]} = |1,09 \cdot 10^4 / 9,94 \cdot 10^4| = 0,1097$$

Условие прочности: $\Phi_x \leq 1$

0,1097 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_x = M_c = 9400 \text{ Н м}$$

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_y = M_L = 9400 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 1,57 + 0,1589 \cdot 1,57^2 + (-0,02142) \cdot 1,57^3 + 0,001035 \cdot 1,57^4 = 4,942$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ($\lambda_c = 1,57$):

$$[M_{x1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4,9\} = 156,9 \cdot (18 + 1 \cdot 12 - 6,8)^2 \cdot 324 / 4 \cdot \max\{4,942; 4,9\} = 3,381 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 4,706 + 0,1589 \cdot 4,706^2 + (-0,02142) \cdot 4,706^3 + 0,001035 \cdot 4,706^4 = 6,622$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_c = 4,706$):

$$[M_{x2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{D_2}{4} \cdot \max\{C_2; 4,9\} = 156,9 \cdot (18 - 6,8)^2 \cdot 675 / 4 \cdot \max\{6,622; 4,9\} = 2,2 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

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

$$[M_x] = \min\{[M_{x1}]; [M_{x2}]\} = \min\{3,381 \cdot 10^4; 2,2 \cdot 10^4\} = 2,2 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)}} = 324 / (1837 \cdot (18 + 1 \cdot 12 - 6,8))^{1/2} = 1,57$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 8,787$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ($\lambda_c = 1,57$):

$$[M_{y1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4,9\} = 156,9 \cdot (18 + 1 \cdot 12 - 6,8)^2 \cdot 324 / 4 \cdot \max\{8,787; 4,9\} = 6,012 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 27,33$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_c = 4,706$):

$$[M_{y2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{D_2}{4} \cdot \max\{C_3; 4,9\} = 156,9 \cdot (18 - 6,8)^2 \cdot 675 / 4 \cdot \max\{27,33; 4,9\} = 9,079 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

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

Инв. № подл. 19744.4	Подпись и дата				
	Инв. № дубл.				
	Взам. инв. №				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 РР
					Лист
					88

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0.5 \cdot ((301 + 2 \cdot 6) \cdot (17 - 6 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 142 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

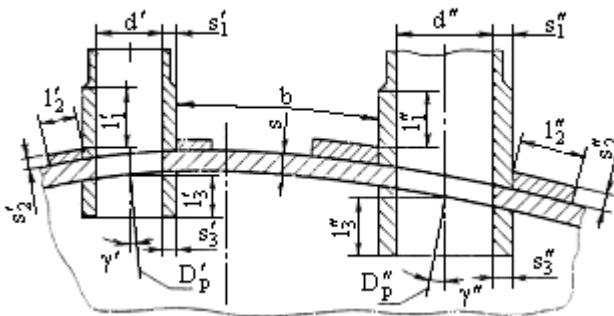
$$d_{0p} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (1800 \cdot (18 - 6.8))^{1/2} = 56.79 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (73.35 \cdot (17 - 6) \cdot 0.8167 + 170 \cdot 12 \cdot 1 + 0 \cdot (17 - 6 - 0) \cdot 0.8167) / (142 \cdot (18 - 6.8))] / [1 + 0.5 \cdot (313 - 56.79) / 142 + 1 \cdot (301 + 2 \cdot 6) / 1800 \cdot 1 / 1 \cdot 73.35 / 142] \} = 1.354 \}$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (18 - 6.8) \cdot 1 \cdot 272.7 \cdot 1 / [1800 + (18 - 6.8) \cdot 1] = 3.373 \text{ МПа}$$



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер П DN50 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D'_p \cdot (s - c)} + \sqrt{D''_p \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (18 - 6.8))^{1/2} + (1800 \cdot (18 - 6.8))^{1/2} = 284 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 3.373 \text{ МПа}$

$$3.373 \text{ МПа} \geq 0.6821 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0.5 \cdot (d_p - d_{0p}) \cdot s_p = 0.5 \cdot (313 - 56.79) \cdot 2.254 = 0.2887 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

$$= 73.35 \cdot (17 - 0.48 - 6) \cdot 0.8167 + 170 \cdot 12 \cdot 1 + 0 \cdot (17 - 6 - 0) \cdot 0.8167 + 142 \cdot (18 - 2.254 - 6.8)$$

$$= 0.003940 \text{ м}^2$$

$$A_r = 0.2887 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \leq 0.003940 \text{ м}^2$$

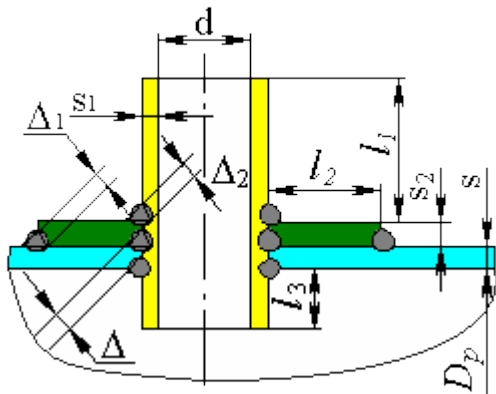
Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	19744.4	Подпись и дата	
Взам. инв. №		Инов. № дубл.	
Подпись и дата		Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
К-5.00.00.000 PP			Лист
			91

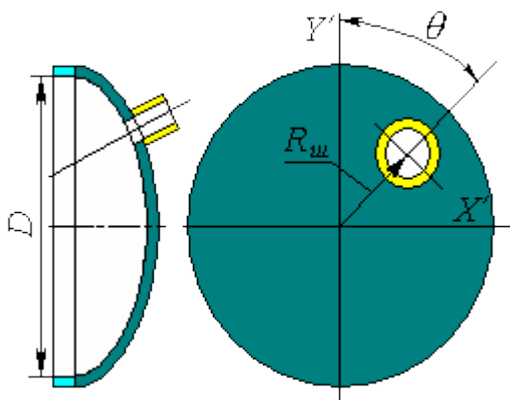
Штуцер В DN300

Исходные данные

Элемент: Штуцер В DN300
 Условное обозначение (метка) Штуцер В
 Элемент, несущий штуцер: Днище эллиптическое (верхнее)
 Тип элемента, несущего штуцер: Днище эллиптическое
 Тип штуцера: Проходящий с накладным кольцом



Материал несущего элемента: 09Г2С
 Толщина стенки несущего элемента, s: 18 мм
 Сумма прибавок к стенке несущего элемента, c: 9,5 мм
 Материал штуцера: 09Г2С (КП245) Gr.
 Внутренний диаметр штуцера, d: 301 мм
 Толщина стенки штуцера, s₁: 17 мм
 Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c_s: 6 мм
 Длина штуцера, l₁: 114 мм



Смещение штуцера, R_ш: 0 мм
 Угол поворота штуцера, θ: 180 °
 Длина внутр. части штуцера, l₃: 0 мм
 Прибавка на коррозию, c_{s1}: 0 мм

Подпись и дата

Инов. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инов. № подл.
19744.4

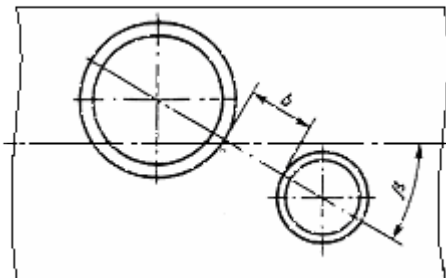
К-5.00.00.000 PP

Лист

92

Изм. Лист № докум. Подп. Дата

Материал кольца: 09Г2С
 Ширина кольца, l_2 : 80 мм
 Толщина кольца, s_2 : 12 мм
 Минимальный размер сварного шва, Δ : 1 мм
 Минимальный размер сварного шва, Δ_1 : 1 мм
 Минимальный размер сварного шва, Δ_2 : 1 мм
 Расчётные параметры размещения штуцера:
 Ближайший штуцер



Название штуцера: Штуцер Г DN150
 Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b : 273,1 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:

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{ш}^2} = 1800^2 / (2 \cdot 450) \cdot (1 - 4 \cdot (1800^2 - 4 \cdot 450^2) \cdot 0^2 / 1800^4)^{1/2} = 3600 \text{ мм}$$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T : 150 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, p : 0,4 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 150$ °С (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma] = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{256,5 / 1,6; 430 / 2,6\} = 160,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 150 °С:

$$E = 1,86 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 РР				Лист
				93

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma]_1 = \min(R_{eH} / n_T; R_{mH} / n_B) = \min\{202,1 / 1,6; 430 / 2,6\} = 126,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре $150\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_1 = 1,86 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала кольца

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma]_2 = \min(R_{eH} / n_T; R_{mH} / n_B) = \min\{256,5 / 1,6; 430 / 2,6\} = 160,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре $150\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_2 = 1,86 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,4 \cdot (301 + 2 \cdot 6) / (2 \cdot 126,3 \cdot 1 - 0,4) = 0,4964 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 126,3 \cdot 1 \cdot (17 - 6) / (301 + 17 + 6) = 8,577 \text{ МПа}$$

$$8,577 \text{ МПа} \geq 0,4 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища:

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{ш}^2} = 1800^2 / (2 \cdot 450) \cdot (1 - 4 \cdot (1800^2 - 4 \cdot 450^2) \cdot 0^2 / 1800^4)^{1/2} = 3600 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 2,247 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 301 + 2 \cdot 6 = 313 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((18 - 9,5) / 2,247 - 0,8) \cdot (3600 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 1044 \text{ мм}$$

$$d_p < d_0: \text{Условие прочности выполнено}$$

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min\{l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)}\} = \min\{114; 1,25 \cdot ((301 + 2 \cdot 6) \cdot (17 - 6))^{1/2}\} = 73,35 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min\left\{1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]}\right\} = \min\{1,0, 126,3 / 160,3\} = 0,7879$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3600 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 174,9 \text{ мм}$$

Расчётная ширина кольца:

$$l_{2p} = \min\{l_2; \sqrt{D_p \cdot (s_2 + s - c)}\} = \min\{80; (3600 \cdot (12 + 18 - 9,5))^{1/2}\} = 80 \text{ мм}$$

Для накладного кольца:

$$\chi_2 = \min\left\{1,0; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]}\right\} = \min\{1,0, 160,3 / 160,3\} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

Инов. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	К-5.00.00.000 PP					Лист
										94
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

$$l_{3p} = \min\{l_3; 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})}\} = \min\{0; 0.5 \cdot ((301 + 2 \cdot 6) \cdot (17 - 6 - 0))^{1/2}\} = 0 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 174,9 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

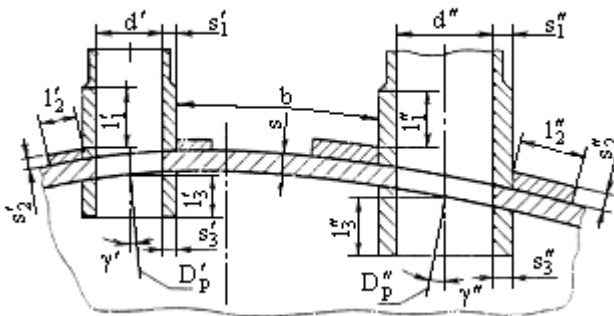
$$d_{0p} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (3600 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 69,97 \text{ мм}$$

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

$$= \min\{1; [1 + (73,35 \cdot (17 - 6) \cdot 0,7879 + 80 \cdot 12 \cdot 1 + 0 \cdot (17 - 6 - 0) \cdot 0,7879) / (174,9 \cdot (18 - 9,5))] / [1 + 0.5 \cdot (313 - 69,97) / 174,9 + 2 \cdot (301 + 2 \cdot 6) / 3600 \cdot 1 / 1 \cdot 73,35 / 174,9] = 1,173\}$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} = 2 \cdot 2 \cdot (18 - 9,5) \cdot 1 \cdot 160,3 \cdot 1 / [3600 + (18 - 9,5) \cdot 1] = 1,51 \text{ МПа}$$



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер Г DN150 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (3600 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} + (3117 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 337,7 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, требуется дополнительный расчёт креплений.

$$K_3 = 1$$

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

$$= \min\{1; (1 + [(73,35 \cdot (17 - 6) \cdot 0,7879 + 80 \cdot 12 \cdot 1 + 0 \cdot (17 - 6 - 0) \cdot 0,7879 + 29,06 \cdot (11 - 7,65) \cdot 0,9006 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (11 - 7,65 - 0) \cdot 0,9006) / (273,1 \cdot (18 - 9,5))] / (1 \cdot (0.8 + (313 + 171,1) / (2 \cdot 273,1) + 2 \cdot [(301 + 2 \cdot 6) / 3600 \cdot 1 / 1 \cdot 73,35 / 273,1 + [(146 + 2 \cdot 7,65) / 3117 \cdot 1 / 1 \cdot 29,06 / 273,1] \cdot 0,9892]) = 0,9892\}$$

$$= 0,9892$$

$$[p]_E = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{0.5 \cdot (D_p' + D_p'') + (s - c) \cdot V_1} = 2 \cdot 2 \cdot (18 - 9,5) \cdot 1 \cdot 160,3 / [0.5 \cdot (3600 + 3117) + (18 - 9,5) \cdot 0,9892] \cdot 0,9892 = 1,601 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление $[p] = \min\{1,51; 1,601\} \text{ МПа}$

Инов. № подл.	19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
К-5.00.00.000 PP					Лист
					95

$$1,51 \text{ МПа} \geq 0,4 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

При наличии коррозионно-активной сероводородосодержащей среды проводится дополнительная проверка условий прочности по п. 3 РД 26-02-62-98:

$$K_d \cdot p \cdot \frac{D_p + s - c}{4 \cdot (s - c)} \leq 1,5 \cdot [\sigma] \cdot \chi_1$$

$$K_d \cdot p \cdot \frac{D_p + s - c}{4 \cdot (s - c)} = 1,688 \cdot 0,4 \cdot (3600 + 18 - 9,5) / (4 \cdot (18 - 9,5)) = 71,67 \text{ МПа}$$

$$1,5 \cdot [\sigma] \cdot \chi_1 = 1,5 \cdot 160,3 \cdot 0,7879 = 189,5 \text{ МПа}$$

Коэффициент концентрации K_d определяется в зависимости от соотношений:

$$\frac{d_p}{D_p} = 313 / 3600 = 0,08694$$

$$\frac{s - c}{D_p} = (18 - 9,5) / 3600 = 0,002361$$

$$\frac{s_1 - c_s}{s - c} = (17 - 6) / (18 - 9,5) = 1,294$$

$$K_d = 1,688$$

Расчётные напряжения $71,67 \text{ МПа} \leq 189,5 \text{ МПа}$, **Условие прочности выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (313 - 69,97) \cdot 2,247 = 0,273 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

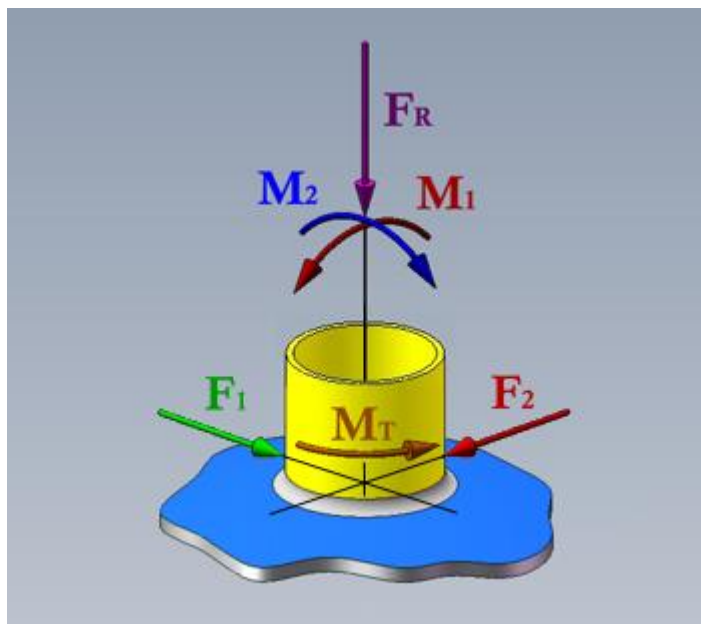
$$= 73,35 \cdot (17 - 0,4964 - 6) \cdot 0,7879 + 80 \cdot 0 \cdot 1 + 0 \cdot (17 - 6 - 0) \cdot 0,7879 + 174,9 \cdot (18 - 2,247 - 9,5)$$

$$= 0,002661 \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,273 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \leq 0,002661 \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

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



Радиальная нагрузка, $F_R: (-1,09 \cdot 10^4) \text{ Н}$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

K-5.00.00.000 PP

Окружной момент, M_1 : 9400 Н м

Продольный момент, M_2 : 9400 Н м

Крутящий момент, M_T : $1,33 \cdot 10^4$ Н м

Сдвиговая нагрузка, F_1 : 7700 Н

Сдвиговая нагрузка, F_2 : 7700 Н

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D^2}{4 \cdot H} + \frac{s + s_2}{2} = 1800^2 / (4 \cdot 450) + (18 + 12) / 2 = 1815 \text{ мм}$$

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c + s_2 = 3600 + 18 + 9,5 + 12 = 3639 \text{ мм}$$

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

$$s_3 = s + \min \left\{ s_2 \cdot \frac{l_2}{\sqrt{D_c \cdot (s + s_2)}}; s_2 \right\} \cdot \chi_2 - c = 18 + \min \{ 12 \cdot 80 / (3639 \cdot (18 + 12))^{1/2}; 12 \} \cdot 1 - 9,5 = 11,41 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_s = 301 + 17 + 6 = 324 \text{ мм}$$

$$\lambda_s = \frac{d_c}{\sqrt{R_c \cdot s_3}} = 324 / (1815 \cdot 11,41)^{1/2} = 2,252$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 193,1 \text{ мм}$$

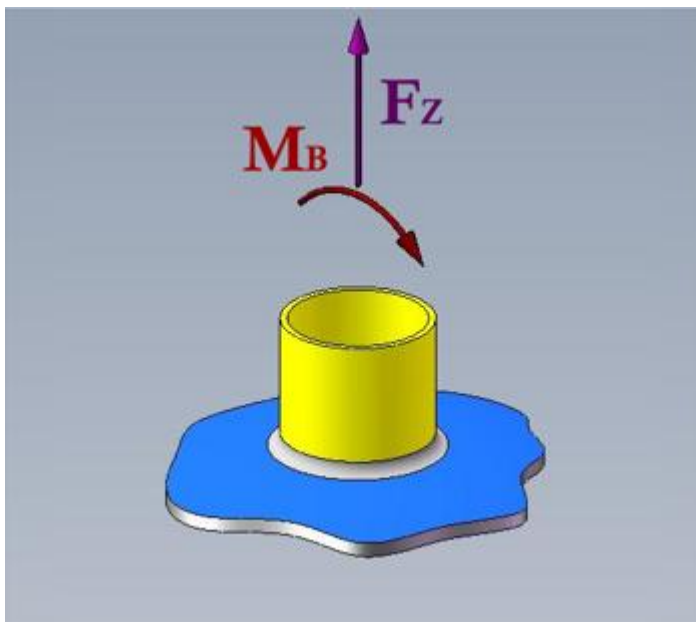
Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |0,4 / 1,51| = 0,2648$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

$0,2648 \leq 1,0$. Условие прочности выполнено

Расчетная схема по ГОСТ Р 52857.3-2007



Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_z = -F_R = -(-1,09 \cdot 10^4) = 1,09 \cdot 10^4$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 РР				Лист
				97

Н

$$\lambda_s = \frac{d_c}{\sqrt{R_c \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)}} = 324 / (1815 \cdot (18 + 1 \cdot 12 - 9,5))^{1/2} = 1,68$$

$$K_4 = \min \left(\frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c_s)}{[\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)} \cdot \sqrt{\frac{s_1 - c_s}{d_c}}; 1 \right) = \min(2 \cdot 126,3 \cdot (17 - 6) / (160,3 \cdot (18 + 1 \cdot 12 - 9,5)) \cdot ((17 - 6) / 324)^{1/2}; 1) = 0,1558$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ($\lambda_s = 1,68$, $K = 0,1558$)

$$[F_{z1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \left(1,82 + 2,4 \cdot \sqrt{1 + K_4} \cdot \lambda_s + 0,91 \cdot K_4 \cdot \lambda_s^2 \right) = 160,3 \cdot (18 + 1 \cdot 12 - 9,5)^2 \cdot (1,82 + 2,4 \cdot (1 + 0,1558)^{1/2} \cdot 1,68 + 0,91 \cdot 0,1558 \cdot 1,68^2) = 4,415 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Наружный диаметр накладного кольца:

$$D_2 = d + 2 \cdot s_1 + 2 \cdot l_2 = 301 + 2 \cdot 17 + 2 \cdot 80 = 495 \text{ мм}$$

$$\lambda_s = \frac{D_2}{\sqrt{R_c \cdot (s - c)}} = 495 / (1815 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 3,985$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_s = 3,985$):

$$[F_{z2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \left(1,82 + 2,4 \cdot \sqrt{1 + K_4} \cdot \lambda_s + 0,91 \cdot K_4 \cdot \lambda_s^2 \right) = 160,3 \cdot (18 - 9,5)^2 \cdot (1,82 + 2,4 \cdot (1 + 1)^{1/2} \cdot 3,985 + 0,91 \cdot 3,985^2) = 3,452 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при наличии накладного кольца:

$$[F_z] = \min \{ [F_{z1}]; [F_{z2}] \} = \min \{ 4,415 \cdot 10^5; 3,452 \cdot 10^5 \} = 3,452 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{[F_z]} \right| = |1,09 \cdot 10^4 / 3,452 \cdot 10^5| = 0,03158$$

Условие прочности: $\Phi_z \leq 1$

0,03158 ≤ 1,0. **Условие прочности выполнено**

Приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_b = \sqrt{M_1^2 + M_2^2} = (9400^2 + 9400^2)^{1/2} = 1,329 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

$$K_4 = \min \left(\frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c_s)}{[\sigma] \cdot s_2} \cdot \sqrt{\frac{s_1 - c_s}{d_c}}; 1 \right) = \min(2 \cdot 126,3 \cdot (17 - 6) / (160,3 \cdot 11,41) \cdot ((17 - 6) / 324)^{1/2}; 1) = 0,28$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ($\lambda_s = 2,252$, $K = 0,28$):

$$[M_{b1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \left(4,9 + 2,0 \cdot \sqrt{1 + K_4} \cdot \lambda_s + 0,91 \cdot K_4 \cdot \lambda_s^2 \right) = 160,3 \cdot (18 + 1 \cdot 12 - 9,5)^2 \cdot 324 / 4 \cdot (4,9 + 2,0 \cdot (1 + 0,28)^{1/2} \cdot 2,252 + 0,91 \cdot 0,28 \cdot 2,252^2) = 6,16 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_s = 3,985$):

$$[M_{b2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{D_2}{4} \cdot \left(4,9 + 2,0 \cdot \sqrt{1 + K_4} \cdot \lambda_s + 0,91 \cdot K_4 \cdot \lambda_s^2 \right) = 160,3 \cdot (18 - 9,5)^2 \cdot 495 / 4 \cdot (4,9 + 2,0 \cdot (1 + 1)^{1/2} \cdot 3,985 + 0,91 \cdot 3,985^2) = 4,39 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент при наличии накладного кольца:

$$[M_b] = \min \{ [M_{b1}]; [M_{b2}] \} = \min \{ 6,16 \cdot 10^4; 4,39 \cdot 10^4 \} = 4,39 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \left| \frac{M_b}{[M_b]} \right| = |1,329 \cdot 10^4 / 4,39 \cdot 10^4| = 0,3028$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

0,3028 ≤ 1,0. **Условие прочности выполнено**

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\max \{ |\Phi_p + \Phi_z|; |\Phi_z|; |\Phi_p - 0,2 \cdot \Phi_z| \} + \Phi_b = \max \{ |0,2648 + 0,03158|; |0,03158|; |0,2648 - 0,2 \cdot 0,03158| \} + 0,3028 = 0,5992$$

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

19744.4

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

K-5.00.00.000 PP

Лист

98

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

Условие прочности: $\max \left(\left| \Phi_p + \Phi_z \right|; \left| \Phi_z \right|; \left| \Phi_p - 0.2 \cdot \Phi_z \right| \right) + \Phi_b \leq 1$

$0,5992 \leq 1.0$. Условие прочности выполнено

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot M_b}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = \frac{0,4 \cdot (301 + 17) / (4 \cdot (17 - 6)) + 4 \cdot 1,329 \cdot 10^4 / (3,142 \cdot (301 + 17)^2 \cdot (17 - 6)) + 1,09 \cdot 10^4 / (3,142 \cdot (301 + 17) \cdot (17 - 6))}{(17 - 6)} = 19,1 \text{ МПа}$$

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

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

$19,1 \text{ МПа} \leq 126,3 \text{ МПа}$. Условие прочности выполнено

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 180 °C

Расчётное наружное избыточное давление, p: 0,1000 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 180 °C (расчётные условия (наружное давление), коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$[\sigma] = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{251,1 / 1,6; 435,4 / 2,6\} = 156,9 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °C:

$E = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 180 °C (расчётные условия (наружное давление), коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$[\sigma]_1 = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{197,2 / 1,6; 435,4 / 2,6\} = 123,3 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °C:

$E_1 = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала кольца

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 180 °C (расчётные условия (наружное давление), коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$[\sigma]_2 = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{251,1 / 1,6; 435,4 / 2,6\} = 156,9 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °C:

$E_2 = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 - p} = \frac{0,1000 \cdot (301 + 2 \cdot 6)}{(2 \cdot 123,3 - 0,1000)} = 0,127 \text{ мм}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$B_1 = \min \left\{ 1,0, 9,45 \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \sqrt{\frac{d}{100 \cdot (s_1 - c_s)}} \right\} = \min \{ 1,0, 9,45 \cdot 301 / 114 \cdot (301 / (100 \cdot (17 - 6)))^{1/2} \} = 1$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия устойчивости:

Инов. № подл.	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
К-5.00.00.000 PP			
Лист 99			

$$[p]_e = \frac{20.8 \cdot 10^{-6} E_1}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_1 - c_s)}{d} \right]^{2.5} = 20.8 \cdot 10^{-6} \cdot 1.83 \cdot 10^5 \cdot 301 / (2.4 \cdot 1 \cdot 114) \cdot (100 \cdot (17 - 6) / 301)^{2.5} = 106.9 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия прочности:

$$[p]_n = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + (s_1 - c_s)} = 2 \cdot 123.3 \cdot (17 - 6) / (301 + 17 - 6) = 8.692 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_n}{[p]_e} \right)^2}} = 8.692 / (1 + (8.692 / 106.9)^2)^{1/2} = 8.664 \text{ МПа}$$

8,664 МПа \geq 0,1000 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища:

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{ш}^2} = 1800^2 / (2 \cdot 450) \cdot (1 - 4 \cdot (1800^2 - 4 \cdot 450^2) \cdot 0^2 / 1800^4)^{1/2} = 3600 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 301 + 2 \cdot 6 = 313 \text{ мм}$$

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1.25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 114; 1.25 \cdot ((301 + 2 \cdot 6) \cdot (17 - 6))^{1/2} \} = 73.35 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1.0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1.0, 123.3 / 156.9 \} = 0.7855$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3600 \cdot (18 - 9.5))^{1/2} = 174.9 \text{ мм}$$

Расчётная ширина кольца:

$$l_{2p} = \min \left\{ l_2; \sqrt{D_p \cdot (s_2 + s - c)} \right\} = \min \{ 80; (3600 \cdot (12 + 18 - 9.5))^{1/2} \} = 80 \text{ мм}$$

Для накладного кольца:

$$\chi_2 = \min \left\{ 1.0; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1.0, 156.9 / 156.9 \} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0.5 \cdot ((301 + 2 \cdot 6) \cdot (17 - 6 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 174.9 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (3600 \cdot (18 - 9.5))^{1/2} = 69.97 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (73.35 \cdot (17 - 6) \cdot 0.7855 + 80 \cdot 12 \cdot 1 + 0 \cdot (0 - 2 \cdot 6) \cdot 0.7855) / (174.9 \cdot (18 - 9.5))] / [1 + 0.5 \cdot (313 - 69.97) / 174.9 + 2 \cdot (301 + 2 \cdot 6) / 3600 \cdot 73.35 / 174.9] \} = 1.172 \}$$

Инв. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	К-5.00.00.000 РР					Лист
										100
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

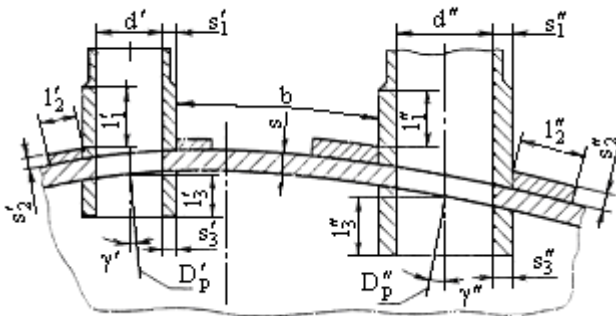
= 1

$$[p]_P = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{D_P + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 2 \cdot (18 - 9,5) \cdot 156,9 \cdot 1 / [3600 + (18 - 9,5) \cdot 1] = 1,479 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление:

$$[p] = \frac{[p]_P}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_P}{[p]_E} \right)^2}} = 1,479 / (1 + (1,479 / 0,4813)^2)^{1/2} = 0,4577 \text{ МПа}$$

где $[p]_E$ – допускаемое наружное давление в пределах упругости для элемента, несущего штуцер (см. расчёт элемента “Днище эллиптическое (верхнее)”)



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер Г DN150 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D'_P \cdot (s - c)} + \sqrt{D''_P \cdot (s - c)} = (3600 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} + (3117 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 337,7 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, требуется дополнительный расчёт укреплений.

$$K_3 = 1$$

$$V_1 = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l'_{1p} \cdot (s'_1 - c'_s) \cdot \chi'_1 + l'_{2p} \cdot s'_2 \cdot \chi'_2 + l'_{3p} \cdot (s'_3 - c'_s - c'_{s1}) \cdot \chi'_3 + l'_{1p} \cdot (s''_1 - c''_s - c''_{s1}) \cdot \chi''_1 + l'_{2p} \cdot s''_2 \cdot \chi''_2 + l'_{3p} \cdot (s''_3 - c''_s - c''_{s1}) \cdot \chi''_3}{b \cdot (s - c)}}{K_3 \left(0,8 + \frac{d'_P + d''_P}{2 \cdot b} \right) + K_1 \left(\frac{d' + 2 \cdot c'_s}{D'_P} \cdot \frac{l'_{1p}}{b} + \frac{d'' + 2 \cdot c''_s}{D''_P} \cdot \frac{l'_{1p}}{b} \right)} \right\}$$

$$= \min \{ 1; (1 + [(73,35 \cdot (17 - 6) \cdot 0,7855 + 80 \cdot 12 \cdot 1 + 0 \cdot (17 - 6 - 0) \cdot 0,7855 + 29,06 \cdot (11 - 7,65) \cdot 0,8984 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (11 - 7,65 - 0) \cdot 0,8984) / (273,1 \cdot (18 - 9,5))] / (1 \cdot (0,8 + (313 + 171,1) / (2 \cdot 273,1)) + 2 \cdot [(301 + 2 \cdot 6) / 3600 \cdot 73,35 / 273,1 + [(146 + 2 \cdot 7,65) / 3117 \cdot 29,06 / 273,1]]) = 0,9886 \}$$

$$= 0,9886$$

$$[p]_E = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{0,5 \cdot (D'_P + D''_P) + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2 \cdot 2 \cdot (18 - 9,5) \cdot 156,9 / [0,5 \cdot (3600 + 3117) + (18 - 9,5) \cdot 0,9886] \cdot 0,9886 = 1,567 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_E}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_E}{[p]_E} \right)^2}} = 1,567 / (1 + (1,567 / 0,4813)^2)^{1/2} = 0,4601 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление $[p] = \min \{ 0,4577; 0,4601 \} \text{ МПа}$

0,4577 МПа \geq 0,1000 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Инов. № подл.	19744.4	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 PP				Лист 101

При наличии коррозионно-активной сероводородосодержащей среды проводится дополнительная проверка условий прочности по п. 3 РД 26-02-62-98:

$$K_d \cdot p \cdot \frac{D_p + s - c}{4 \cdot (s - c)} \leq 1,5 \cdot [\sigma] \cdot \chi_1$$

$$K_d \cdot p \cdot \frac{D_p + s - c}{4 \cdot (s - c)} = 1,688 \cdot 0,1000 \cdot (3600 + 18 - 9,5) / (4 \cdot (18 - 9,5)) = 17,92 \text{ МПа}$$

$$1,5 \cdot [\sigma] \cdot \chi_1 = 1,5 \cdot 156,9 \cdot 0,7855 = 184,9 \text{ МПа}$$

Коэффициент концентрации K_d определяется в зависимости от соотношений:

$$\frac{d_p}{D_p} = 313 / 3600 = 0,08694$$

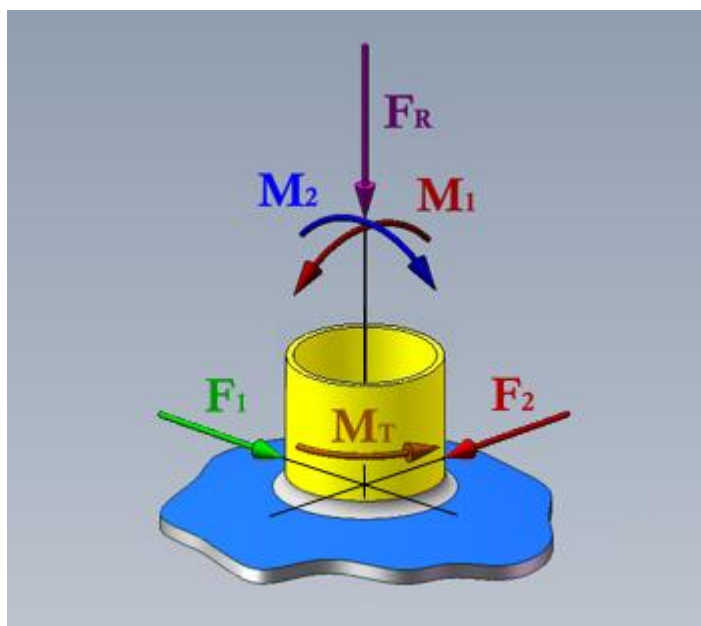
$$\frac{s - c}{D_p} = (18 - 9,5) / 3600 = 0,002361$$

$$\frac{s_1 - c_s}{s - c} = (17 - 6) / (18 - 9,5) = 1,294$$

$$K_d = 1,688$$

Расчётные напряжения $17,92 \text{ МПа} \leq 184,9 \text{ МПа}$, **Условие прочности выполнено**

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



Радиальная нагрузка, F_R : $(-1,09 \cdot 10^4) \text{ Н}$

Окружной момент, M_1 : 9400 Н м

Продольный момент, M_2 : 9400 Н м

Крутящий момент, M_T : $1,33 \cdot 10^4 \text{ Н м}$

Сдвиговая нагрузка, F_1 : 7700 Н

Сдвиговая нагрузка, F_2 : 7700 Н

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D^2}{4 \cdot H} + \frac{s + s_2}{2} = 1800^2 / (4 \cdot 450) + (18 + 12) / 2 = 1815 \text{ мм}$$

Средний диаметр обечайки у отверстия:

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 PP				Лист
				102

$$D_c = D_p + s + c + s_2 = 3600 + 18 + 9,5 + 12 = 3639 \text{ мм}$$

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

$$s_3 = s + \min \left\{ s_2 \cdot \frac{l_2}{\sqrt{D_c \cdot (s + s_2)}}; s_2 \right\} \cdot \chi_2 - c = 18 + \min \{ 12 \cdot 80 / (3639 \cdot (18 + 12))^{1/2}; 12 \} \cdot 1 - 9,5 = 11,41 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_s = 301 + 17 + 6 = 324 \text{ мм}$$

$$\lambda_s = \frac{d_c}{\sqrt{R_c \cdot s_3}} = 324 / (1815 \cdot 11,41)^{1/2} = 2,252$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 193,1 \text{ мм}$$

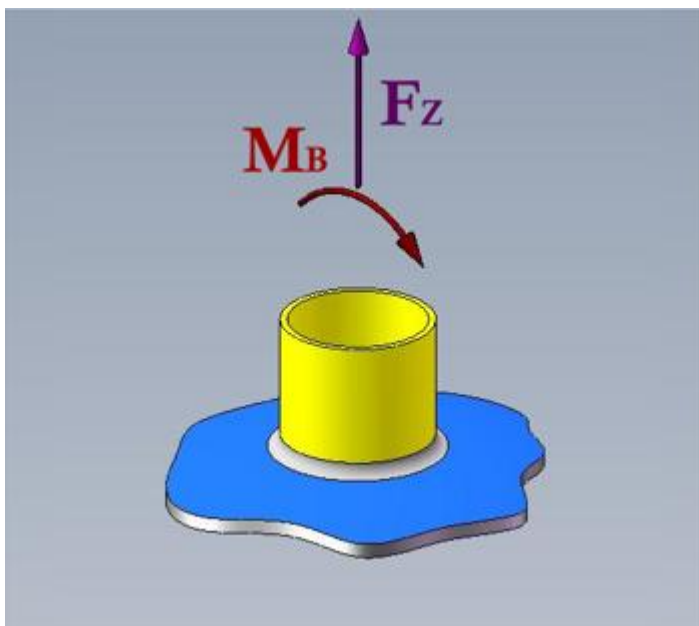
Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |(-0,1000) / 0,4577| = 0,2185$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

$0,2185 \leq 1,0$. Условие прочности выполнено

Расчетная схема по ГОСТ Р 52857.3-2007



Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_x = -F_R = -(-1,09 \cdot 10^4) = 1,09 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

$$\lambda_s = \frac{d_c}{\sqrt{R_c \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)}} = 324 / (1815 \cdot (18 + 1 \cdot 12 - 9,5))^{1/2} = 1,68$$

$$K_4 = \min \left(\frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c_s)}{[\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)} \cdot \sqrt{\frac{s_1 - c_s}{d_c}}; 1 \right) = \min(2 \cdot 123,3 \cdot (17 - 6) / (156,9 \cdot (18 + 1 \cdot 12 - 9,5)) \cdot ((17 - 6) / 324)^{1/2}; 1) = 0,1553$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ($\lambda_s = 1,68$, $K = 0,1553$)

$$[F_{z1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot (1,82 + 2,4 \cdot \sqrt{1 + K_4} \cdot \lambda_s + 0,91 \cdot K_4 \cdot \lambda_s^2) = 156,9 \cdot (18 + 1 \cdot 12 - 9,5)^2 \cdot (1,82 + 2,4 \cdot (1 + 0,1553)^{1/2} \cdot 1,68 + 0,91 \cdot 0,1553 \cdot 1,68^2) = 4,321 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Изн. № подл.	Изн. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата
19744.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
К-5.00.00.000 PP			Лист
			103

Наружный диаметр накладного кольца:

$$D_2 = d + 2 \cdot s_1 + 2 \cdot l_2 = 301 + 2 \cdot 17 + 2 \cdot 80 = 495 \text{ мм}$$

$$\lambda_s = \frac{D_2}{\sqrt{R_c \cdot (s - c)}} = 495 / (1815 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 3,985$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_s = 3,985$):

$$[F_{x2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \left(1,82 + 2,4 \cdot \sqrt{1 + \lambda_s} \cdot \lambda_s + 0,91 \cdot \lambda_s^2 \right) = \frac{156,9 \cdot (18 - 9,5)^2 \cdot (1,82 + 2,4 \cdot (1 + 1)^{1/2} \cdot 3,985 + 0,91 \cdot 3,985^2)}{3,985^2} = 3,379 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при наличии накладного кольца:

$$[F_x] = \min \{ [F_{x1}]; [F_{x2}] \} = \min \{ 4,321 \cdot 10^5; 3,379 \cdot 10^5 \} = 3,379 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_x = \left| \frac{F_x}{[F_x]} \right| = |1,09 \cdot 10^4 / 3,379 \cdot 10^5| = 0,03226$$

Условие прочности: $\Phi_x \leq 1$

$0,03226 \leq 1,0$. **Условие прочности выполнено**

Приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_b = \sqrt{M_1^2 + M_2^2} = (9400^2 + 9400^2)^{1/2} = 1,329 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

$$K_4 = \min \left(\frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c_s)}{[\sigma] \cdot s_s} \cdot \sqrt{\frac{s_1 - c_s}{d_c}}; 1 \right) = \min \left(2 \cdot 123,3 \cdot (17 - 6) / (156,9 \cdot 11,41) \cdot ((17 - 6) / 324)^{1/2}; 1 \right) = 0,2792$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ($\lambda_s = 2,252$, $K = 0,2792$):

$$[M_{b1}] = [\sigma] \cdot (s + \lambda_s \cdot s_2 - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \left(4,9 + 2,0 \cdot \sqrt{1 + K_4} \cdot \lambda_s + 0,91 \cdot K_4 \cdot \lambda_s^2 \right) = \frac{156,9 \cdot (18 + 1 \cdot 12 - 9,5)^2 \cdot 324 / 4 \cdot (4,9 + 2,0 \cdot (1 + 0,2792)^{1/2} \cdot 2,252 + 0,91 \cdot 0,2792 \cdot 2,252^2)}{0,2792 \cdot 2,252^2} = 6,027 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_s = 3,985$):

$$[M_{b2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{D_2}{4} \cdot \left(4,9 + 2,0 \cdot \sqrt{1 + \lambda_s} \cdot \lambda_s + 0,91 \cdot \lambda_s^2 \right) = \frac{156,9 \cdot (18 - 9,5)^2 \cdot 495 / 4 \cdot (4,9 + 2,0 \cdot (1 + 1)^{1/2} \cdot 3,985 + 0,91 \cdot 3,985^2)}{3,985 + 0,91 \cdot 3,985^2} = 4,297 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент при наличии накладного кольца:

$$[M_b] = \min \{ [M_{b1}]; [M_{b2}] \} = \min \{ 6,027 \cdot 10^4; 4,297 \cdot 10^4 \} = 4,297 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \left| \frac{M_b}{[M_b]} \right| = |1,329 \cdot 10^4 / 4,297 \cdot 10^4| = 0,3094$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

$0,3094 \leq 1,0$. **Условие прочности выполнено**

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\max \left(\left| \Phi_p + \Phi_x \right|; \left| \Phi_x \right|; \left| \Phi_p - 0,2 \cdot \Phi_x \right| \right) + \Phi_b = \max \{ 0,2185 + 0,03226; 0,03226; 0,2185 - 0,2 \cdot 0,03226 \} + 0,3094 = 0,5601$$

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

Условие прочности: $\max \left(\left| \Phi_p + \Phi_x \right|; \left| \Phi_x \right|; \left| \Phi_p - 0,2 \cdot \Phi_x \right| \right) + \Phi_b \leq 1$

$0,5601 \leq 1,0$. **Условие прочности выполнено**

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot M_b}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_x}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = \frac{(-0,1000) \cdot (301 + 17) / (4 \cdot (17 - 6)) + 4 \cdot 1,329 \cdot 10^4 / (3,142 \cdot (301 + 17)^2 \cdot (17 - 6)) + 1,09 \cdot 10^4 / (3,142 \cdot (301 + 17) \cdot (17 - 6))}{(3,142 \cdot (301 + 17)^2 \cdot (17 - 6))} = 15,49 \text{ МПа}$$

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

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

$15,49 \text{ МПа} \leq 123,3 \text{ МПа}$. **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	19744.4	Подпись и дата		Подпись и дата	
Взам. инв. №		Инов. № дубл.		Подпись и дата	
Инов. № подл.	19744.4	Подпись и дата		Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
К-5.00.00.000 РР					Лист
					104

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, T: 20 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,5633 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 20 °C (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]^{20} = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 300 / 1,1 = 272,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:

$$E = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 20 °C (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]^{20}_1 = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 245 / 1,1 = 222,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:

$$E_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала кольца

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 20 °C (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]^{20}_2 = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 300 / 1,1 = 272,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:

$$E_2 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,5633 \cdot (301 + 2 \cdot 6) / (2 \cdot 222,7 \cdot 1 - 0,5633) = 0,3963 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 222,7 \cdot 1 \cdot (17 - 6) / (301 + 17 + 6) = 15,12 \text{ МПа}$$

$$15,12 \text{ МПа} \geq 0,5633 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища:

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{ш}^2} = 1800^2 / (2 \cdot 450) \cdot (1 - 4 \cdot (1800^2 - 4 \cdot 450^2) \cdot 0^2 / 1800^4)^{1/2} = 3600 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 1,86 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 301 + 2 \cdot 6 = 313 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((18 - 9,5) / 1,86 - 0,8) \cdot (3600 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 1319 \text{ мм}$$

$d_p < d_0$: **Условие прочности выполнено**

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 114; 1,25 \cdot ((301 + 2 \cdot 6) \cdot (17 - 6))^{1/2} \} = 73,35 \text{ мм}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
19744.4									
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата					
					К-5.00.00.000 PP				
					Лист				
					105				

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 222,7 / 272,7 \} = 0,8167$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3600 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 174,9 \text{ мм}$$

Расчётная ширина кольца:

$$l_{2p} = \min \left\{ l_2; \sqrt{D_p \cdot (s_2 + s - c)} \right\} = \min \{ 80; (3600 \cdot (12 + 18 - 9,5))^{1/2} \} = 80 \text{ мм}$$

Для накладного кольца:

$$\chi_2 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 272,7 / 272,7 \} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((301 + 2 \cdot 6) \cdot (17 - 6 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 174,9 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

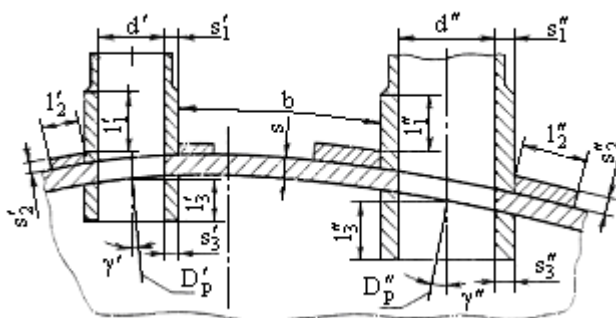
$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (3600 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 69,97 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (73,35 \cdot (17 - 6) \cdot 0,8167 + 80 \cdot 12 \cdot 1 + 0 \cdot (17 - 6 - 0) \cdot 0,8167) / (174,9 \cdot (18 - 9,5))] / [1 + 0,5 \cdot (313 - 69,97) / 174,9 + 2 \cdot (301 + 2 \cdot 6) / 3600 \cdot 1 / 1 \cdot 73,35 / 174,9] \} = 1,182$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 2 \cdot (18 - 9,5) \cdot 1 \cdot 272,7 \cdot 1 / [3600 + (18 - 9,5) \cdot 1] = 2,57 \text{ МПа}$$



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер Г DN150 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (3600 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} + (3117 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 337,7 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, требуется дополнительный расчёт укреплений.

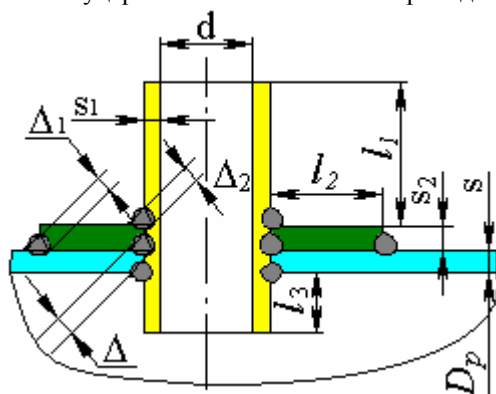
$$K_3 = 1$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 PP				Лист
				106

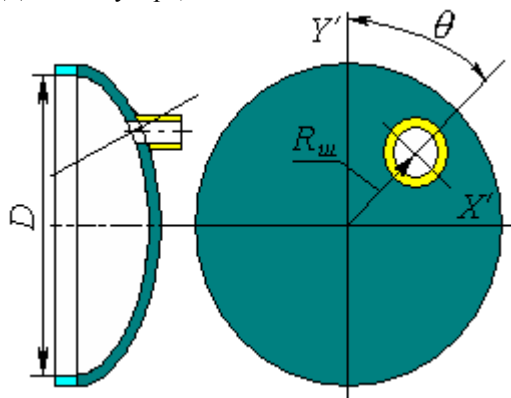
Штуцер Г DN150

Исходные данные

Элемент:	Штуцер Г DN150
Условное обозначение (метка)	Штуцер Г
Элемент, несущий штуцер:	Днище эллиптическое (верхнее)
Тип элемента, несущего штуцер:	Днище эллиптическое
Тип штуцера:	Проходящий с накладным кольцом

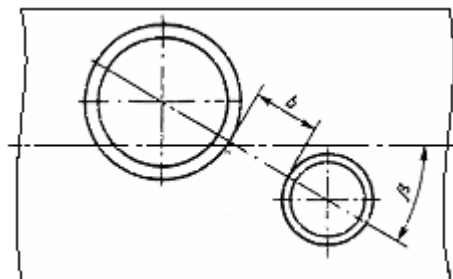


Материал несущего элемента:	09Г2С
Толщина стенки несущего элемента, s:	18 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, с:	9,5 мм
Материал штуцера:	09Г2С Gr.ГОСТ 19281
Внутренний диаметр штуцера, d:	146 мм
Толщина стенки штуцера, s ₁ :	11 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), с _s :	7,65 мм
Длина штуцера, l ₁ :	105 мм



Смещение штуцера, $R_{ш}$:	520 мм
Угол поворота штуцера, ϑ :	90 °
Полученный угол наклона штуцера, γ :	(-19,31) °
Длина внутр. части штуцера, l_3 :	0 мм
Прибавка на коррозию, c_{s1} :	0 мм
Материал кольца:	09Г2С

Ширина кольца, l_2 : 80 мм
Толщина кольца, s_2 : 12 мм
Минимальный размер сварного шва, Δ : 1 мм
Минимальный размер сварного шва, Δ_1 : 1 мм
Минимальный размер сварного шва, Δ_2 : 1 мм
Расчётные параметры размещения штуцера:
Ближайший штуцер



Название штуцера: Штуцер В DN300

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b : 274,1 мм

Угол β : 0 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$\phi_1 = 1$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$\phi = 1$

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища:

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{ш}^2} = 1800^2 / (2 \cdot 450) \cdot (1 - 4 \cdot (1800^2 - 4 \cdot 450^2) \cdot 520^2 / 1800^4)^{1/2} = 3117 \text{ мм}$$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T : 150 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p : 0,4 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 150$ °C (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$[\sigma] = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{256,5 / 1,6; 430 / 2,6\} = 160,3 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 150 °C:

$E = 1,86 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 150$ °C (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$[\sigma]_1 = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{231 / 1,6; 430 / 2,6\} = 144,4 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 150 °C:

$E_1 = 1,86 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 PP				Лист
				109

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

$$l_p = L_0 = 162,8 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

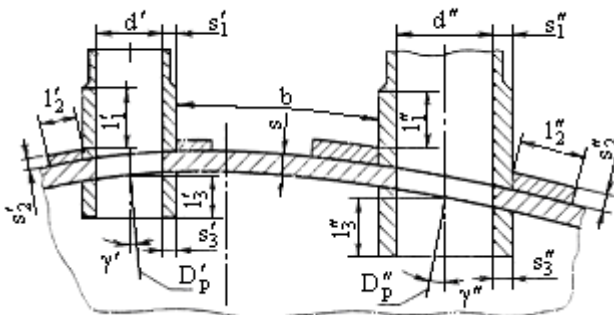
$$d_{op} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (3117 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 65,11 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (29,06 \cdot (11 - 7,65) \cdot 0,9006 + 80 \cdot 12 \cdot 1 + 0 \cdot (11 - 7,65 - 0) \cdot 0,9006) / (162,8 \cdot (18 - 9,5))] / [1 + 0,5 \cdot (171,1 - 65,11) / 162,8 + 2 \cdot (146 + 2 \cdot 7,65) / 3117 \cdot 1 / 1 \cdot 29,06 / 162,8] \} = 1,307$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 2 \cdot (18 - 9,5) \cdot 1 \cdot 160,3 \cdot 1 / [3117 + (18 - 9,5) \cdot 1] = 1,744 \text{ МПа}$$



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер В DN300 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (3117 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} + (3600 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 337,7 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, требуется дополнительный расчёт укреплений.

$$K_3 = 1$$

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

$$= \min \{ 1; (1 + [(29,06 \cdot (11 - 7,65) \cdot 0,9006 + 80 \cdot 12 \cdot 1 + 0 \cdot (11 - 7,65 - 0) \cdot 0,9006 + 69,93 \cdot (16 - 6) \cdot 0,7879 + 80 \cdot 12 \cdot 1 + 0 \cdot (16 - 6 - 0) \cdot 0,7879) / (274,1 \cdot (18 - 9,5))] / (1 \cdot (0,8 + (171,1 + 313) / (2 \cdot 274,1) + 2 \cdot [(146 + 2 \cdot 7,65) / 3117 \cdot 1 / 1 \cdot 29,06 / 274,1 + [(301 + 2 \cdot 6) / 3600 \cdot 1 / 1 \cdot 69,93 / 274,1] \cdot 1])) = 1,207$$

$$= 1$$

$$[p]_k = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{0,5 \cdot (D_p' + D_p'') + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2 \cdot 2 \cdot (18 - 9,5) \cdot 1 \cdot 160,3 / [0,5 \cdot (3117 + 3600) + (18 - 9,5) \cdot 1] \cdot 1 = 1,619 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление $[p] = \min \{ 1,744; 1,619 \} \text{ МПа}$

$$1,619 \text{ МПа} \geq 0,4 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Инв. № подл.	19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
К-5.00.00.000 PP					Лист
					111

Свойства материала штуцера

Допускаемые растягивающие напряжения при температуре 150 °С в условиях коррозионно-активной среды, группа аппарата III, IV:

$$[s]_1^s = \frac{1}{K_m} \cdot \eta \cdot \min \left\{ \frac{R_e}{1.6}; \frac{R_m}{2.6} \right\} = 1 / 1,3 * 1 * \min (231 / 1.6; 430 / 2.6) = 111,1 \text{ МПа}$$

Номинальные допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре 150 °С:

$$[s]_1 = \frac{[\sigma]_s}{K_m} = 154 / 1,3 = 118,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 150 °С:

$$E_1 = 1,86 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала кольца

Допускаемые растягивающие напряжения при температуре 150 °С в условиях коррозионно-активной среды, группа аппарата III, IV:

$$[s]_2^s = \frac{1}{K_m} \cdot \eta \cdot \min \left\{ \frac{R_e}{1.6}; \frac{R_m}{2.6} \right\} = 1 / 1,3 * 1 * \min (256,5 / 1.6; 430 / 2.6) = 123,3 \text{ МПа}$$

Номинальные допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре 150 °С:

$$[s]_2 = \frac{[\sigma]_s}{K_m} = 171 / 1,3 = 131,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 150 °С:

$$E_2 = 1,86 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

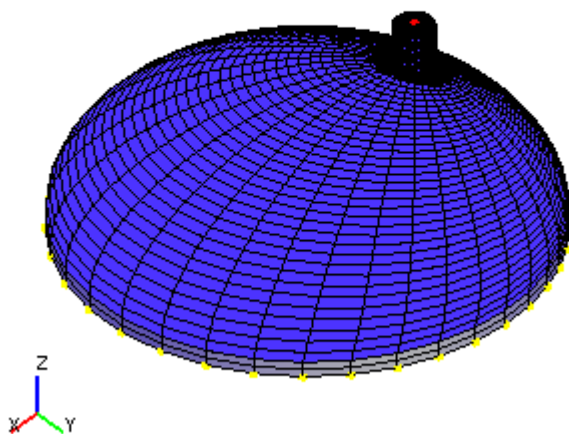


Рис. 1. Конечно-элементная модель узла врезки

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 РР				Лист
				113

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Для штуцера $\sigma_{mb\ max} = 295,1\ \text{МПа} \leq 3[s]_1 = 355,4\ \text{МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

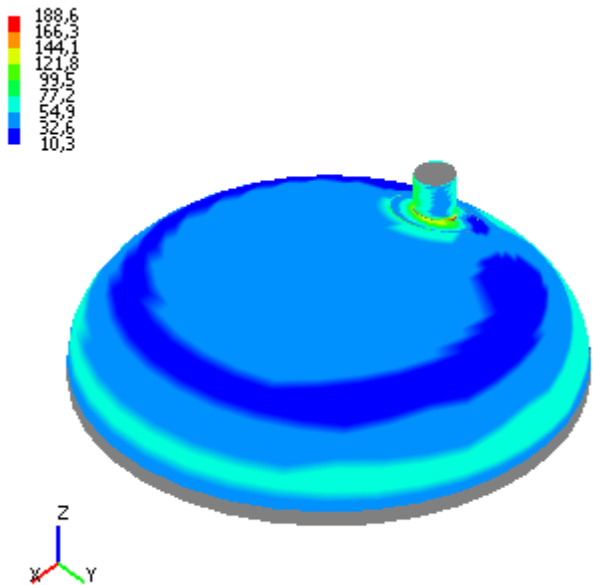


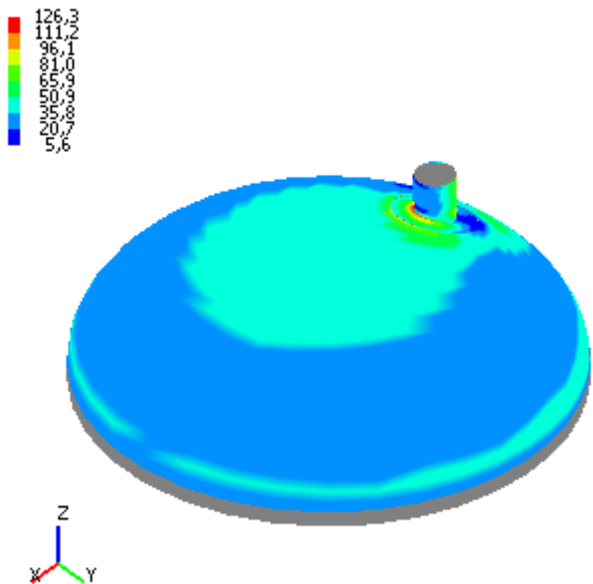
Рис. 4. Общие (мембранные и изгибные) напряжения на внутренней поверхности, МПа.
Заключение:

Для несущего элемента $\sigma_{mb\ max} = 141,9\ \text{МПа} \leq 3[s] = 394,6\ \text{МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Для штуцера $\sigma_{mb\ max} = 188,6\ \text{МПа} \leq 3[s]_1 = 355,4\ \text{МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.



Инов. № подл. 19744.4	Подпись и дата		Инов. № дубл.		Подпись и дата	
	Взам. инв. №					
	Подпись и дата					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 РР	
						Лист 115

Рис. 5. Общие (мембранные и изгибные) растягивающие напряжения на внутренней поверхности, МПа.
 Заключение:

Для несущего элемента $\sigma_{in,max} = 118,8 \text{ МПа} \leq 3[s]^s = 370 \text{ МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Для штуцера $\sigma_{in,max} = 126,3 \text{ МПа} \leq 3[s]_1^s = 333,2 \text{ МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

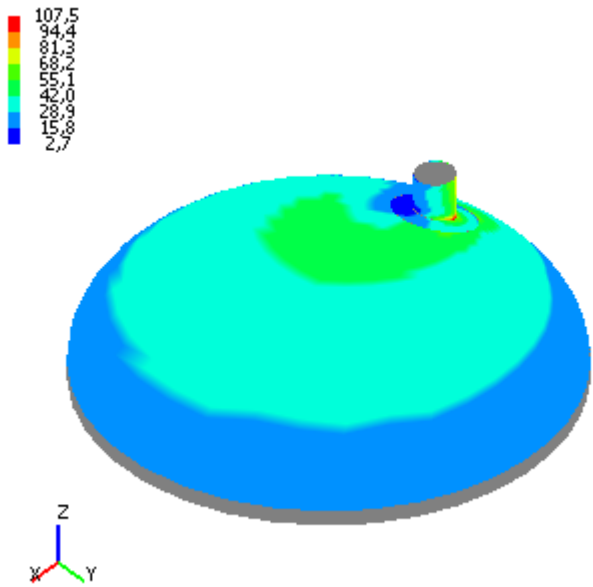


Рис. 6. Мембранные растягивающие напряжения от совместного действия сил и давления, МПа.
 Заключение:

Для несущего элемента $\sigma_{in,max} = 68,27 \text{ МПа} \leq 1.5[s]^s = 185 \text{ МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Для штуцера $\sigma_{in,max} = 107,5 \text{ МПа} \leq 1.5[s]_1^s = 166,6 \text{ МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Общее заключение: **Условия прочности выполнены.**

Допускаемые индивидуальные нагрузки на штуцер при отсутствии действия остальных, включая давление*

$F_x, \text{ Н}$	$F_y, \text{ Н}$	$F_z, \text{ Н}$	$M_x, \text{ Н м}$	$M_y, \text{ Н м}$	$M_z, \text{ Н м}$	$p, \text{ МПа}$
$2,592 \cdot 10^4$	$5,217 \cdot 10^4$	$2,491 \cdot 10^4$	7127	1593	5417	1,474

* При превышении любого компонента требуется усиление врезки, либо уменьшение нагрузки

Допускаемые нагрузки на штуцер при расчетном давлении**

$F_x, \text{ Н}$	$F_y, \text{ Н}$	$F_z, \text{ Н}$	$M_x, \text{ Н м}$	$M_y, \text{ Н м}$	$M_z, \text{ Н м}$	$p, \text{ МПа}$
4722	9502	4537	1298	290,1	986,6	0,4

** При превышении одного или нескольких компонентов необходим дополнительный расчёт на прочность

Инов. № подл. 19744.4	Подпись и дата		Инов. № дубл.		Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 РР	
					Лист	116

$$D_P = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{ur}^2} = 1800^2 / (2 \cdot 450) \cdot (1 - 4 \cdot (1800^2 - 4 \cdot 450^2) \cdot 520^2 / 1800^4)^{1/2} = 3117 \text{ mm}$$

Расчётный диаметр отверстия (смещённый штуцер на эллиптическом днище):

$$d_p = \frac{d + 2 \cdot c_s}{\sqrt{1 - \left(\frac{2 \cdot R_{\text{mf}}}{D_p} \right)^2}} = (146 + 2 \cdot 7,65) / [1 - (2 \cdot 520 / 3117)^2]^{1/2} = 171,1 \text{ mm}$$

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{lp} = \min\{l_1; 1.25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)}\} = \min\{105; 1.25 \cdot ((146 + 2 \cdot 7,65) \cdot (11 - 7,65))^{1/2}\} = 29,06 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_h}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 141 / 156,9 \} = 0,8984$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3117 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 162,8 \text{ mm}$$

Расчётная ширина кольца:

$$l_{2p} = \min \left\{ l_2; \sqrt{D_p \cdot (s_2 + s - c)} \right\} = \min \{ 80; (3117 \cdot (12 + 18 - 9,5))^{1/2} \} = 80 \text{ mm}$$

Для накладного кольца:

$$\chi_2 = \min \left\{ 1, 0; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1, 0, 156,9 / 156,9 \} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{30} = \min\{l_3; 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})}\} = \min\{0; 0.5 \cdot ((146 + 2 \cdot 7,65) \cdot (11 - 7,65 - 0))^{1/2}\} = 0 \text{ mm}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 162,8 \text{ mm}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{op} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (3117 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 65,11 \text{ mm}$$

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

$$= \min\{1; [1 + (29,06 * (11 - 7,65) * 0,8984 + 80 * 12 * 1 + 0 * (0 - 2 * 7,65) * 0,8984) / (162,8 * (18 - 9,5))] / [1 + 0.5 * (171,1 - 65,11) / 162,8 + 2 * (146 + 2 * 7,65) / 3117 * 29,06 / 162,8]\} = \mathbf{1,307}$$

$$= \mathbf{1}$$

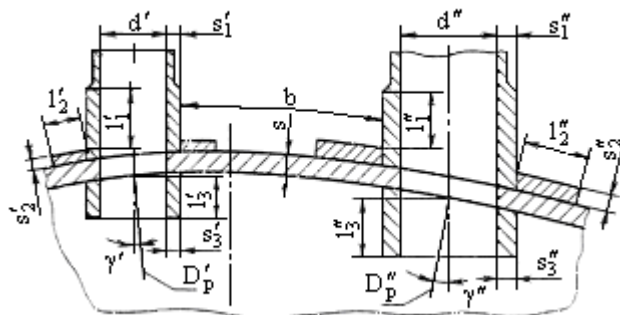
$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 2 \cdot (18 - 9,5) \cdot 156,9 \cdot 1 / [3117 + (18 - 9,5) \cdot 1] = 1,707 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление:

$$[\mathbf{p}] = \frac{[\mathbf{p}]_{\mathbf{p}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[\mathbf{p}]_{\mathbf{p}}}{[\mathbf{p}]_{\mathbf{E}}} \right)^2}} = 1,707 / (1 + (1,707 / 0,4813)^2)^{1/2} = 0,4632 \text{ МПа}$$

Инв. № подл.	19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$l_{3p} = \min\{l_3; 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})}\} = \min\{0; 0.5 \cdot ((146 + 2 \cdot 7,65) \cdot (11 - 7,65 - 0))^{1/2}\} = 0 \text{ мм}$ Расчётная ширина зоны укрепления: $l_p = L_0 = 162,8 \text{ мм}$ Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления: $d_{op} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (3117 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 65,11 \text{ мм}$ $V = \min\left\{1; \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{l_p}{l_p}}\right\}$ $= \min\{1; [1 + (29,06 \cdot (11 - 7,65) \cdot 0,8984 + 80 \cdot 12 \cdot 1 + 0 \cdot (0 - 2 \cdot 7,65) \cdot 0,8984) / (162,8 \cdot (18 - 9,5))] / [1 + 0.5 \cdot (171,1 - 65,11) / 162,8 + 2 \cdot (146 + 2 \cdot 7,65) / 3117 \cdot 29,06 / 162,8]\} = 1,307\}$ $= 1$ $[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 2 \cdot (18 - 9,5) \cdot 156,9 \cdot 1 / [3117 + (18 - 9,5) \cdot 1] = 1,707 \text{ МПа}$ Допускаемое наружное давление: $[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_p}{[p]_E}\right)^2}} = 1,707 / (1 + (1,707 / 0,4813)^2)^{1/2} = 0,4632 \text{ МПа}$
						<div>Изм.</div> <div>Лист</div> <div>№ докум.</div> <div>Подп.</div> <div>Дата</div>

где $[P]_E$ – допускаемое наружное давление в пределах упругости для элемента, несущего штуцер (см. расчёт элемента “Днище эллиптическое (верхнее)”)



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер В DN300 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D'_p \cdot (s - c)} + \sqrt{D''_p \cdot (s - c)} = (3117 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} + (3600 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 337,7 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, требуется дополнительный расчёт укреплений.

$$K_3 = 1$$

$$V_1 = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l'_{1p} \cdot (s'_1 - c'_s) \cdot \chi'_1 + l'_{2p} \cdot s'_2 \cdot \chi'_2 + l'_{3p} \cdot (s'_3 - c'_s - c'_{s1}) \cdot \chi'_3 + l'_{1p} \cdot (s''_1 - c''_s - c''_{s1}) \cdot \chi''_1 + l'_{2p} \cdot s''_2 \cdot \chi''_2 + l'_{3p} \cdot (s''_3 - c''_s - c''_{s1}) \cdot \chi''_3}{b \cdot (s - c)}}{K_3 \left(0,8 + \frac{d'_p + d''_p}{2 \cdot b} \right) + K_1 \left(\frac{d' + 2 \cdot c'_s}{D'_p} \cdot \frac{l'_{1p}}{b} + \frac{d'' + 2 \cdot c''_s}{D''_p} \cdot \frac{l'_{1p}}{b} \right)} \right\}$$

$$= \min \{ 1; (1 + [(29,06 \cdot (11 - 7,65) \cdot 0,8984 + 80 \cdot 12 \cdot 1 + 0 \cdot (11 - 7,65 - 0) \cdot 0,8984 + 69,93 \cdot (16 - 6) \cdot 0,7855 + 80 \cdot 12 \cdot 1 + 0 \cdot (16 - 6 - 0) \cdot 0,7855) / (274,1 \cdot (18 - 9,5))] / (1 \cdot (0,8 + (171,1 + 313) / (2 \cdot 274,1) + 2 \cdot [(146 + 2 \cdot 7,65) / 3117 \cdot 29,06 / 274,1 + [(301 + 2 \cdot 6) / 3600 \cdot 69,93 / 274,1])]) = 1,206 \}$$

$$= 1$$

$$[p]_E = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{0,5 \cdot (D'_p + D''_p) + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2 \cdot 2 \cdot (18 - 9,5) \cdot 156,9 / [0,5 \cdot (3117 + 3600) + (18 - 9,5) \cdot 1] \cdot 1 = 1,585 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_E}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_E}{[p]_E} \right)^2}} = 1,585 / (1 + (1,585 / 0,4813)^2)^{1/2} = 0,4605 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление $[p] = \min \{ 0,4632; 0,4605 \}$ МПа

0,4605 МПа \geq 0,1000 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчет на прочность по МКЭ

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения:

Расчётная температура, Т: 180 °С
 Расчётное наружное избыточное давление, р: 0,1000 МПа
 Коррозионная сероводородосодержащая среда: Да
 Группа аппарата: III, IV

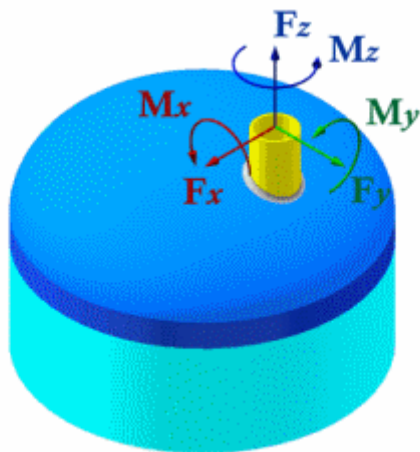
Инов. № подл.	Подпись и дата
19744.4	
Изм.	Лист
№ докум.	Подп.
Дата	

К-5.00.00.000 РР

Лист

119

Нагрузки на штуцер (в системе координат аппарата):



$F_x, \text{ Н}$	$F_y, \text{ Н}$	$F_z, \text{ Н}$	$M_x, \text{ Н м}$	$M_y, \text{ Н м}$	$M_z, \text{ Н м}$
3400	3400	4800	2400	2400	3400

Допускаемые напряжения в соответствии с ГОСТ Р 52857.1-2007 и ГОСТ Р 52857.10-2007

Уровень разбивки - 1

Коэффициент запаса, учитывающий уровень разбивки: $K_m = 1,3$

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые растягивающие напряжения при температуре 180 °С в условиях коррозионно-активной среды, группа аппарата III, IV:

$$[s]^s = \frac{1}{K_m} \cdot \eta \cdot \min \left\{ \frac{R_e}{1.6}; \frac{R_m}{2.6} \right\} = 1 / 1,3 * 1 * \min (251,1 / 1.6; 435,4 / 2.6) = 120,7 \text{ МПа}$$

Номинальные допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре 180 °С:

$$[s] = \frac{[\sigma]_s}{K_m} = 167 / 1,3 = 128,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °С:

$$E = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые растягивающие напряжения при температуре 180 °С в условиях коррозионно-активной среды, группа аппарата III, IV:

$$[s]_1^s = \frac{1}{K_m} \cdot \eta \cdot \min \left\{ \frac{R_e}{1.6}; \frac{R_m}{2.6} \right\} = 1 / 1,3 * 1 * \min (225,6 / 1.6; 435,4 / 2.6) = 108,5 \text{ МПа}$$

Номинальные допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре 180 °С:

$$[s]_1 = \frac{[\sigma]_s}{K_m} = 150 / 1,3 = 115,4 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °С:

$$E_1 = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата
19744.4	
Взам. инв. №	Инов. № дубл.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

K-5.00.00.000 PP

Лист

120

Свойства материала кольца

Допускаемые растягивающие напряжения при температуре 180 °С в условиях коррозионно-активной среды, группа аппарата III, IV:

$$[s]_2^s = \frac{1}{K_m} \cdot \eta \cdot \min \left\{ \frac{R_e}{1.6}; \frac{R_m}{2.6} \right\} = 1 / 1,3 * 1 * \min (251,1 / 1.6; 435,4 / 2.6) = 120,7 \text{ МПа}$$

Номинальные допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре 180 °С:

$$[s]_2 = \frac{[\sigma]_s}{K_m} = 167 / 1,3 = 128,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °С:

$$E_2 = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

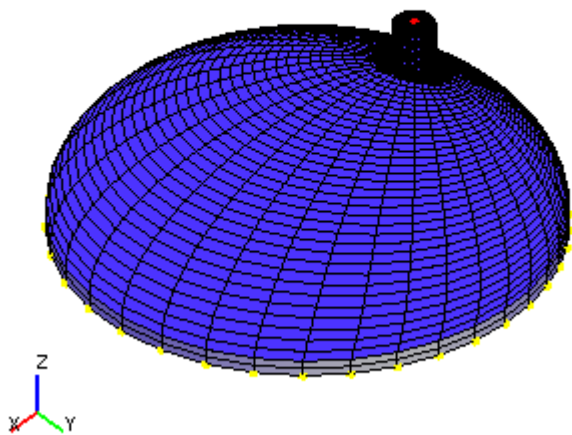
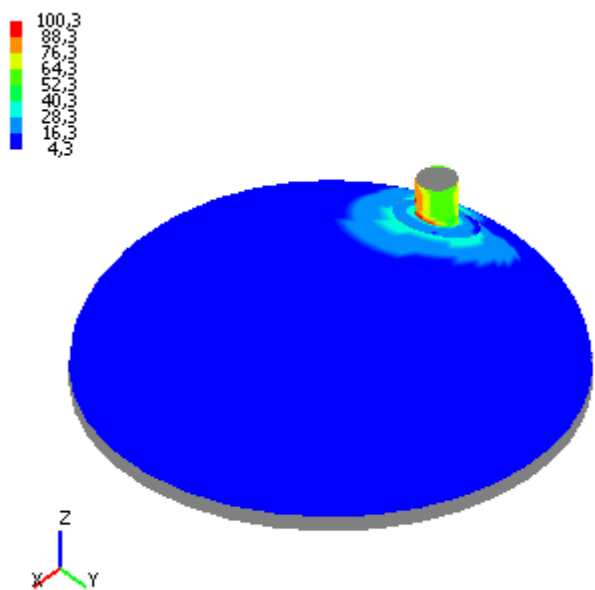


Рис. 1. Конечно-элементная модель узла врезки



Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 РР				Лист
				121

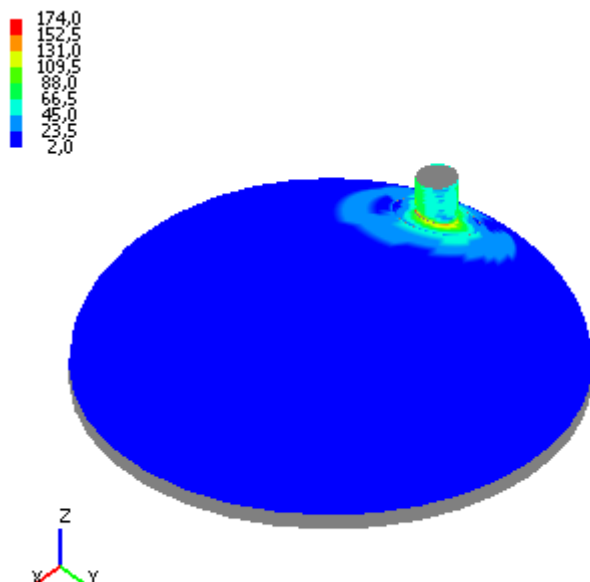


Рис. 4. Общие (мембранные и изгибные) напряжения на внутренней поверхности, МПа.
Заключение:

Для несущего элемента $\sigma_{mb\ max} = 140,5\ \text{МПа} \leq 3[s] = 386,3\ \text{МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Для штуцера $\sigma_{mb\ max} = 174\ \text{МПа} \leq 3[s]_1 = 347,1\ \text{МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

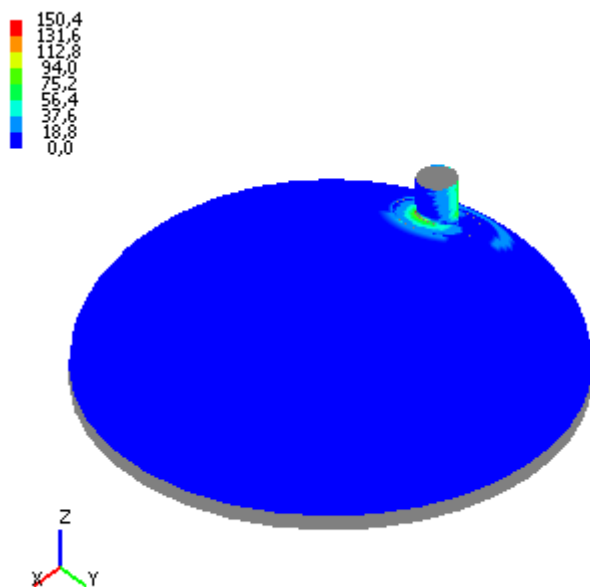


Рис. 5. Общие (мембранные и изгибные) растягивающие напряжения на внутренней поверхности, МПа.
Заключение:

Для несущего элемента $\sigma_{it\ max} = 89,5\ \text{МПа} \leq 3[s]^s = 362,2\ \text{МПа}$.

Инов. № подл. 19744.4	Подпись и дата				Лист 123
	Взам. инв. №				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 РР

Инов. № дубл.	Подпись и дата

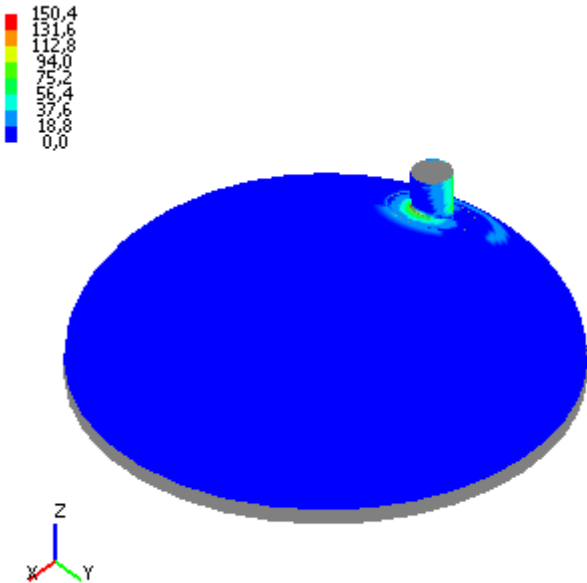


Рис. 5. Общие (мембранные и изгибные) растягивающие напряжения на внутренней поверхности, МПа.
Заключение:

Для несущего элемента $\sigma_{\text{н. max}} = 89,5 \text{ МПа} \leq 3[s]^s = 362,2 \text{ МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Для штуцера $\sigma_{\text{in max}} = 150,4 \text{ МПа} \leq 3[s]_1^s = 325,4 \text{ МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

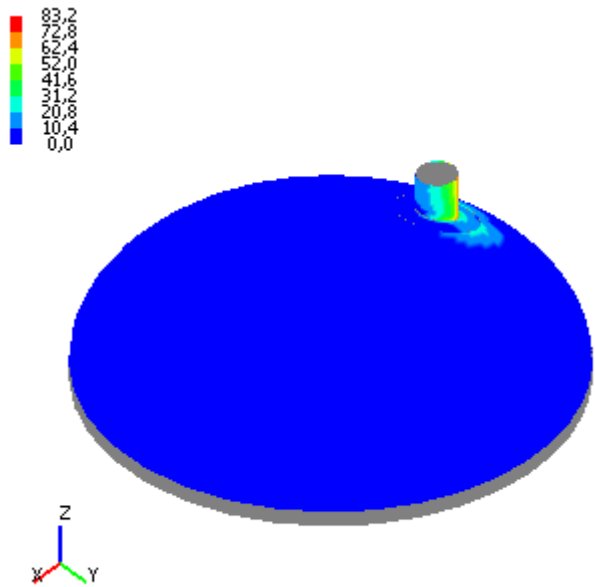


Рис. 6. Мембранные растягивающие напряжения от совместного действия сил и давления, МПа.
Заключение:

Для несущего элемента $\sigma_{\text{in max}} = 35,16 \text{ МПа} \leq 1,5[s]^s = 181,1 \text{ МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Для штуцера $\sigma_{\text{in max}} = 83,25 \text{ МПа} \leq 1,5[s]_1^s = 162,7 \text{ МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Общее заключение: Условия прочности выполнены.

Допускаемые индивидуальные нагрузки на штуцер при отсутствии действия остальных, включая давление*

$F_x, \text{ Н}$	$F_y, \text{ Н}$	$F_z, \text{ Н}$	$M_x, \text{ Н м}$	$M_y, \text{ Н м}$	$M_z, \text{ Н м}$	$p, \text{ МПа}$
$2,532 \cdot 10^4$	$5,095 \cdot 10^4$	$2,433 \cdot 10^4$	6961	1555	5290	(-1,443)

* При превышении любого компонента требуется усиление врезки, либо уменьшение нагрузки

Допускаемые нагрузки на штуцер при расчетном давлении**

$F_x, \text{ Н}$	$F_y, \text{ Н}$	$F_z, \text{ Н}$	$M_x, \text{ Н м}$	$M_y, \text{ Н м}$	$M_z, \text{ Н м}$	$p, \text{ МПа}$
5891	$1,185 \cdot 10^4$	5660	1620	361,9	1231	(-0,1000)

** При превышении одного или нескольких компонентов необходим дополнительный расчёт на прочность

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
19744.4									
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата					
					К-5.00.00.000 РР				Лист
									124

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, T: 20 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,5642 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 20 °C (условия гидротестирования):

$$[\sigma]^{20} = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 300 / 1,1 = 272,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:

$$E = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 20 °C (условия гидротестирования):

$$[\sigma]^{20}_1 = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 280 / 1,1 = 254,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:

$$E_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала кольца

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 20 °C (условия гидротестирования):

$$[\sigma]^{20}_2 = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 300 / 1,1 = 272,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:

$$E_2 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \phi_1 - p} = 0,5642 \cdot (146 + 2 \cdot 7,65) / (2 \cdot 254,5 \cdot 1 - 0,5642) = 0,1789 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \phi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 254,5 \cdot 1 \cdot (11 - 7,65) / (146 + 11 + 7,65) = 10,36 \text{ МПа}$$

$$10,36 \text{ МПа} \geq 0,5642 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища:

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{ш}^2} = 1800^2 / (2 \cdot 450) \cdot (1 - 4 \cdot (1800^2 - 4 \cdot 450^2) \cdot 520^2 / 1800^4)^{1/2} = 3117 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 1,613 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия (смещённый штуцер на эллиптическом днище):

$$d_p = \frac{d + 2 \cdot c_s}{\sqrt{1 - \left(\frac{2 \cdot R_{ш}}{D_p} \right)^2}} = (146 + 2 \cdot 7,65) / [1 - (2 \cdot 520 / 3117)^2]^{1/2} = 171,1 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((18 - 9,5) / 1,613 - 0,8) \cdot (3117 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 1455 \text{ мм}$$

$$d_p < d_0: \text{Условие прочности выполнено}$$

Расчётная длина внешней части штуцера:

Подпись и дата	Инов. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата	Инов. № подл.	19744.4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

К-5.00.00.000 PP

Лист
125

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1.25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 105; 1.25 \cdot ((146 + 2 \cdot 7,65) \cdot (11 - 7,65))^{1/2} \} = 29,06 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 254,5 / 272,7 \} = 0,9333$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3117 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 162,8 \text{ мм}$$

Расчётная ширина кольца:

$$l_{2p} = \min \left\{ l_2; \sqrt{D_p \cdot (s_2 + s - c)} \right\} = \min \{ 80; (3117 \cdot (12 + 18 - 9,5))^{1/2} \} = 80 \text{ мм}$$

Для накладного кольца:

$$\chi_2 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 272,7 / 272,7 \} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((146 + 2 \cdot 7,65) \cdot (11 - 7,65 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 162,8 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

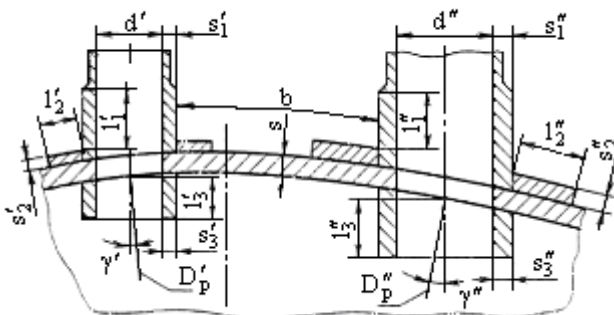
$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (3117 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 65,11 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (29,06 \cdot (11 - 7,65) \cdot 0,9333 + 80 \cdot 12 \cdot 1 + 0 \cdot (11 - 7,65 - 0) \cdot 0,9333) / (162,8 \cdot (18 - 9,5))] / [1 + 0,5 \cdot (171,1 - 65,11) / 162,8 + 2 \cdot (146 + 2 \cdot 7,65) / 3117 \cdot 1 / 1 \cdot 29,06 / 162,8] \} = 1,309$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 2 \cdot (18 - 9,5) \cdot 1 \cdot 272,7 \cdot 1 / [3117 + (18 - 9,5) \cdot 1] = 2,967 \text{ МПа}$$



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер В DN300 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (3117 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} + (3600 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 337,7 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, требуется дополнительный расчёт укреплений.

Инов. № подл.	19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
К-5.00.00.000 PP					Лист
					126

$$K_3 = 1$$

$$V_1 = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l'_{1p} \cdot (s'_1 - c'_s) \cdot \chi'_1 + l'_{2p} \cdot s'_2 \cdot \chi'_2 + l'_{3p} \cdot (s'_3 - c'_s - c'_{s1}) \cdot \chi'_3 + l'_{1p} \cdot (s''_1 - c_s) \cdot \chi''_1 + l'_{2p} \cdot s''_2 \cdot \chi''_2 + l'_{3p} \cdot (s''_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi''_3}{b \cdot (s - c)}}{K_3 \left(0.8 + \frac{d'_p + d''_p}{2 \cdot b} \right) + K_1 \left(\frac{d' + 2 \cdot c'_s}{D'_p} \cdot \frac{\varphi'}{\varphi'_1} \cdot \frac{l'_{1p}}{b} + \frac{d'' + 2 \cdot c''_s}{D''_p} \cdot \frac{\varphi''}{\varphi''_1} \cdot \frac{l''_{1p}}{b} \right)} \right\}$$

$$= \min \{ 1; (1 + [(29,06 \cdot (11 - 7,65) \cdot 0,9333 + 80 \cdot 12 \cdot 1 + 0 \cdot (11 - 7,65 - 0) \cdot 0,9333 + 69,93 \cdot (16 - 6) \cdot 0,8167 + 80 \cdot 12 \cdot 1 + 0 \cdot (16 - 6 - 0) \cdot 0,8167) / (274,1 \cdot (18 - 9,5))] / (1 \cdot (0,8 + (171,1 + 313) / (2 \cdot 274,1) + 2 \cdot [(146 + 2 \cdot 7,65) / 3117 \cdot 1 / 1 \cdot 29,06 / 274,1 + [(301 + 2 \cdot 6) / 3600 \cdot 1 / 1 \cdot 69,93 / 274,1]])) = 1,213 \}$$

$$= 1$$

$$[p]_{\Sigma} = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{0.5 \cdot (D'_p + D''_p) + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2 \cdot 2 \cdot (18 - 9,5) \cdot 1 \cdot 272,7 / [0.5 \cdot (3117 + 3600) + (18 - 9,5) \cdot 1] \cdot 1 = 2,754 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление $[p] = \min \{ 2,967; 2,754 \}$ МПа

$$2,754 \text{ МПа} \geq 0,5642 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0.5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0.5 \cdot (171,1 - 65,11) \cdot 1,613 = 0,8547 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

$$= 29,06 \cdot (11 - 0,1789 - 7,65) \cdot 0,9333 + 80 \cdot 12 \cdot 1 + 0 \cdot (16 - 7,65 - 0) \cdot 0,9333 + 162,8 \cdot (18 - 1,613 - 9,5)$$

$$= 0,002167 \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,8547 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \leq 0,002167 \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инв. № подл. 19744.4	Подпись и дата		Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 РР	Лист
						127

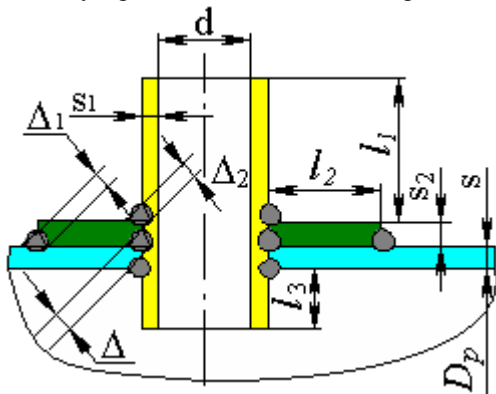
$A_r = 0,8547 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-4} \leq 0,002167 \text{ м}^{-4}$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

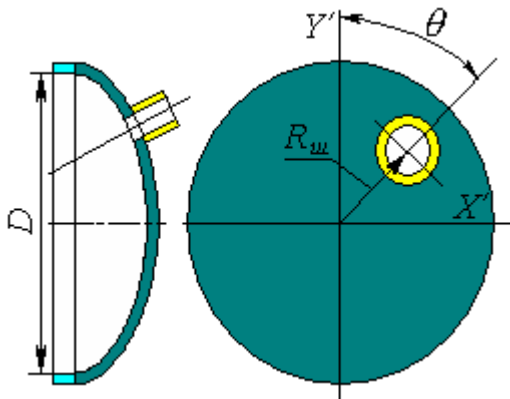
Штуцер Д DN150

Исходные данные

Элемент:	Штуцер Д DN150
Условное обозначение (метка)	Штуцер Д
Элемент, несущий штуцер:	Днище эллиптическое (нижнее)
Тип элемента, несущего штуцер:	Днище эллиптическое
Тип штуцера:	Проходящий с накладным кольцом



Материал несущего элемента:	09Г2С
Толщина стенки несущего элемента, s:	18 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, с:	9,5 мм
Материал штуцера:	09Г2С(КП265) Gr.
Внутренний диаметр штуцера, d:	146 мм
Толщина стенки штуцера, s1:	16 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), сs:	6 мм
Длина штуцера, l1:	116 мм



Смещение штуцера, Rш:	0 мм
Угол поворота штуцера, θ:	180 °
Длина внутр. части штуцера, l3:	0 мм
Прибавка на коррозию, сs1:	0 мм
Материал кольца:	09Г2С
Ширина кольца, l2:	80 мм

Инов. № подл.	19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
К-5.00.00.000 PP					Лист
					128

Толщина кольца, s_2 : 12 мм

Минимальный размер сварного шва, Δ : 1 мм

Минимальный размер сварного шва, Δ_1 : 1 мм

Минимальный размер сварного шва, Δ_2 : 1 мм

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$$\varphi_1 = 1$$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$$\varphi = 1$$

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища:

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{ш}^2} = 1800^2 / (2 \cdot 450) \cdot (1 - 4 \cdot (1800^2 - 4 \cdot 450^2) \cdot 0^2 / 1800^4)^{1/2} = 3600 \text{ мм}$$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T : 150 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p : 0,4173 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 150$ °C (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma] = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min(256,5 / 1,6; 430 / 2,6) = 160,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 150 °C:

$$E = 1,86 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре $T = 150$ °C (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma]_1 = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min(202,1 / 1,6; 430 / 2,6) = 126,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 150 °C:

$$E_1 = 1,86 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала кольца

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 150$ °C (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma]_2 = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min(256,5 / 1,6; 430 / 2,6) = 160,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 150 °C:

$$E_2 = 1,86 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_{ш} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,4173 \cdot (146 + 2 \cdot 6) / (2 \cdot 126,3 \cdot 1 - 0,4173) = 0,2614 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 126,3 \cdot 1 \cdot (16 - 6) / (146 + 16 + 6) = 15,04 \text{ МПа}$$

$$15,04 \text{ МПа} \geq 0,4173 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4			

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 PP	Лист
						129

$$D_P = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_w^2} = 1800^2 / (2 \cdot 450) \cdot (1 - 4 \cdot (1800^2 - 4 \cdot 450^2) \cdot 0^2 / 1800^4)^{1/2} = 3600 \text{ MM}$$
$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s-c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = 2 \cdot ((18-9,5)/2,344-0,8) \cdot (3600 \cdot (18-9,5))^{1/2} = 988,7 \text{ мм}$$
$$l_{lp} = \min \{ l_1; \quad 1.25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 116; 1.25 \cdot ((146 + 2 \cdot 6) \cdot (16 - 6))^{1/2} \} = 49,69 \text{ mm}$$
$$\chi_1 = \min \left\{ 1, 0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1, 0; 126,3 / 160,3 \} = 0,7879$$
$$l_{2p} = \min \left\{ l_2; \sqrt{D_p \cdot (s_2 + s - c)} \right\} = \min \{ 80; (3600 \cdot (12 + 18 - 9,5))^{1/2} \} = 80 \text{ мм}$$
$$\chi_2 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 160,3 / 160,3 \} = 1$$
$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; \quad 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0.5 \cdot ((146 + 2 \cdot 6) \cdot (16 - 6 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ mm}$$
$$l_p = L_0 = 174,9 \text{ mm}$$
$$d_{op} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (3600 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 69,97 \text{ mm}$$

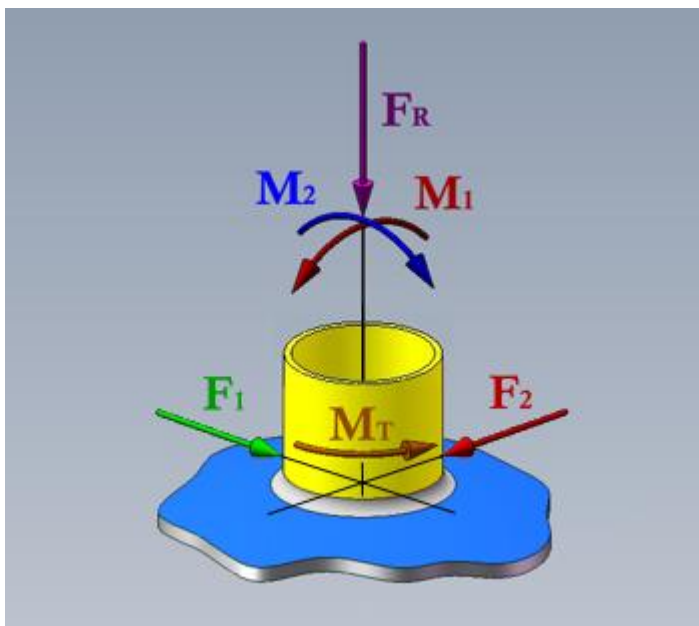
$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{1_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + 1_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + 1_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{1_p \cdot (s - c)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{op}}{1_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{1_{1p}}{1_p}}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

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 2 \cdot (18 - 9,5) \cdot 1 \cdot 160,3 \cdot 1 / [3600 + (18 - 9,5) \cdot 1] = 1,51 \text{ МПа}$$

$$1,51 \text{ МПа} \geq 0,4173 \text{ МПа}$$

Закключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

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



Радиальная нагрузка, F_R : (-4800) Н

Окружной момент, M_1 : 2400 Н м

Продольный момент, M_2 : 2400 Н м

Крутящий момент, M_T : 3400 Н м

Сдвиговая нагрузка, F_1 : 3400 Н

Сдвиговая нагрузка, F_2 : 3400 Н

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D^2}{4 \cdot H} + \frac{s + s_2}{2} = 1800^2 / (4 \cdot 450) + (18 + 12) / 2 = 1815 \text{ мм}$$

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c + s_2 = 3600 + 18 + 9,5 + 12 = 3639 \text{ мм}$$

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

$$s_3 = s + \min \left\{ s_2 \cdot \frac{l_2}{\sqrt{D_c \cdot (s + s_2)}}; s_2 \right\} \cdot \chi_2 - c = 18 + \min \{ 12 \cdot 80 / (3639 \cdot (18 + 12))^{1/2}; 12 \} \cdot 1 - 9,5 = 11,41 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_s = 146 + 16 + 6 = 168 \text{ мм}$$

$$\lambda_s = \frac{d_c}{\sqrt{R_c \cdot s_3}} = 168 / (1815 \cdot 11,41)^{1/2} = 1,168$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 1008 \text{ мм}$$

Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |0,4173 / 1,51| = 0,2763$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

$0,2763 \leq 1,0$. **Условие прочности выполнено**

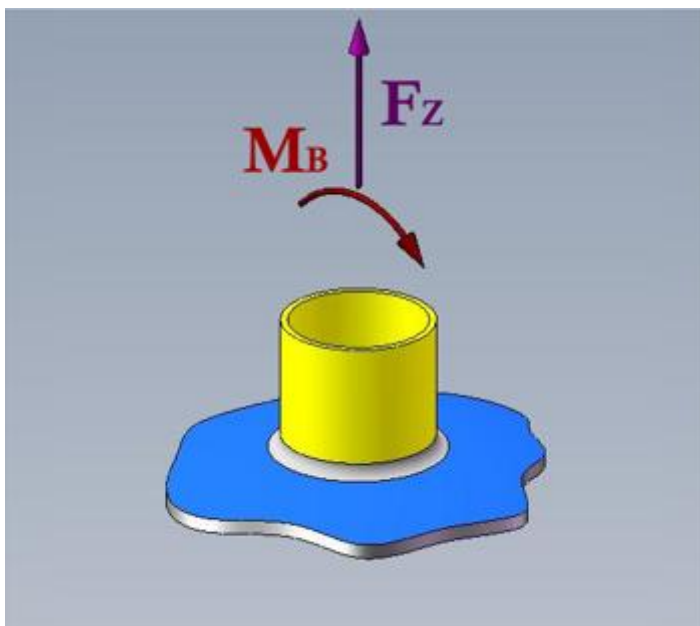
Инов. № подл.	Подпись и дата
19744.4	
Изм.	Лист
№ докум.	Подп.
Дата	

K-5.00.00.000 PP

Лист

131

Расчетная схема по ГОСТ Р 52857.3-2007



Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_z = -F_R = -(-4800) = 4800 \text{ Н}$$

$$\lambda_s = \frac{d_c}{\sqrt{R_c \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)}} = 168 / (1815 \cdot (18 + 1 \cdot 12 - 9,5))^{1/2} = 0,871$$

$$K_4 = \min \left(\frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c_s)}{[\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)} \cdot \sqrt{\frac{s_1 - c_s}{d_c}}; 1 \right) = \min(2 \cdot 126,3 \cdot (16 - 6) / (160,3 \cdot (18 + 1 \cdot 12 - 9,5)) \cdot ((16 - 6) / 168)^{1/2}; 1) = 0,1875$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ($\lambda_s = 0,871$, $K = 0,1875$)

$$[F_{z1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \left(1,82 + 2,4 \cdot \sqrt{1 + K_4} \cdot \lambda_s + 0,91 \cdot K_4 \cdot \lambda_s^2 \right) = 160,3 \cdot (18 + 1 \cdot 12 - 9,5)^2 \cdot (1,82 + 2,4 \cdot (1 + 0,1875)^{1/2} \cdot 0,871 + 0,91 \cdot 0,1875 \cdot 0,871^2) = 2,848 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Наружный диаметр накладного кольца:

$$D_2 = d + 2 \cdot s_1 + 2 \cdot l_2 = 146 + 2 \cdot 16 + 2 \cdot 80 = 338 \text{ мм}$$

$$\lambda_s = \frac{D_2}{\sqrt{R_c \cdot (s - c)}} = 338 / (1815 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 2,721$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_s = 2,721$):

$$[F_{z2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \left(1,82 + 2,4 \cdot \sqrt{1 + 1} \cdot \lambda_s + 0,91 \cdot \lambda_s^2 \right) = 160,3 \cdot (18 - 9,5)^2 \cdot (1,82 + 2,4 \cdot (1 + 1)^{1/2} \cdot 2,721 + 0,91 \cdot 2,721^2) = 2,061 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при наличии накладного кольца:

$$[F_z] = \min \{ [F_{z1}]; [F_{z2}] \} = \min \{ 2,848 \cdot 10^5; 2,061 \cdot 10^5 \} = 2,061 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{[F_z]} \right| = |4800 / 2,061 \cdot 10^5| = 0,02329$$

Условие прочности: $\Phi_z \leq 1$

0,02329 \leq 1,0. **Условие прочности выполнено**

Приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_b = \sqrt{M_1^2 + M_2^2} = (2400^2 + 2400^2)^{1/2} = 3394 \text{ Н м}$$

$$K_4 = \min \left(\frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c_s)}{[\sigma] \cdot s_3} \cdot \sqrt{\frac{s_1 - c_s}{d_c}}; 1 \right) = \min(2 \cdot 126,3 \cdot (16 - 6) / (160,3 \cdot 11,41) \cdot ((16 - 6) / 168)^{1/2}; 1) = 0,3371$$

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.
19744.4

Лист

K-5.00.00.000 PP

132

Изм. Лист № докум. Подп. Дата

Подпись и дата

Инв. № дубл

Взам. инв. №

Подпись и дата

ИНВ. № подл.

19744.4

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

K-5.00.00.000 PP

Лист

134

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

$$[p] = \frac{[p]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\pi}}{[p]_{\text{E}}}\right)^2}} = 15,8 / (1 + (15,8/218,7)^2)^{1/2} = 15,76 \text{ МПа}$$

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища:

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

Отношения допускаемых напряжений

$$\chi_1 = \min \left\{ 1, 0; \frac{\left[\frac{\sigma}{\sigma} \right]_1}{\left[\frac{\sigma}{\sigma} \right]} \right\} = \min \{ 1, 0, 123,3 / 156,9 \} = 0,7855$$
$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3600 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 174,9 \text{ mm}$$
$$l_{2p} = \min \left\{ l_2; \sqrt{D_p \cdot (s_2 + s - c)} \right\} = \min \{ 80; (3600 \cdot (12 + 18 - 9,5))^{1/2} \} = 80 \text{ mm}$$
$$\chi_2 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 156,9 / 156,9 \} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0.5 \cdot ((146 + 2 \cdot 6) \cdot (16 - 6 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 174,9 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (3600 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 69,97 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (49,69 \cdot (16 - 6) \cdot 0,7855 + 80 \cdot 12 \cdot 1 + 0 \cdot (0 - 2 \cdot 6) \cdot 0,7855) / (174,9 \cdot (18 - 9,5))] / [1 + 0.5 \cdot (158 - 69,97) / 174,9 + 2 \cdot (146 + 2 \cdot 6) / 3600 \cdot 49,69 / 174,9] \} = 1,495 \}$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 2 \cdot (18 - 9,5) \cdot 156,9 \cdot 1 / [3600 + (18 - 9,5) \cdot 1] = 1,479 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление:

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_p}{[p]_E} \right)^2}} = 1,479 / (1 + (1,479 / 0,4813)^2)^{1/2} = 0,4577 \text{ МПа}$$

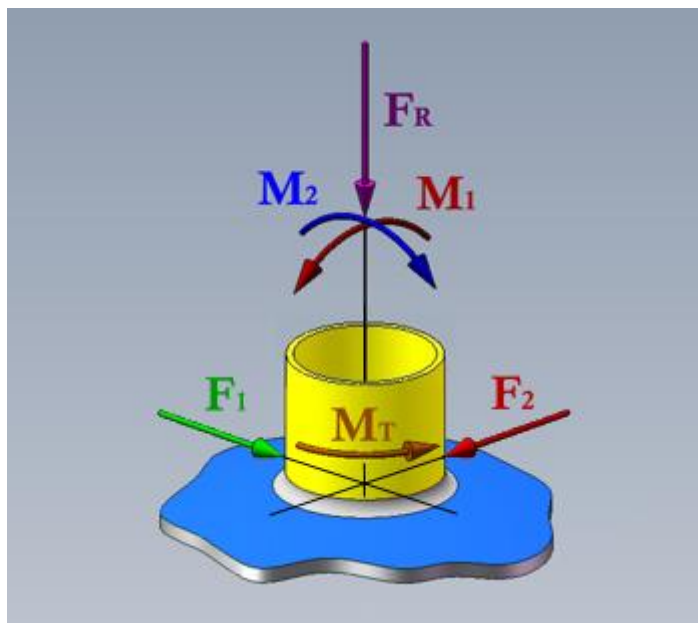
где $[p]_E$ – допускаемое наружное давление в пределах упругости для элемента, несущего штуцер (см. расчёт элемента “Днище эллиптическое (нижнее)”)

Допускаемое давление $[p] = 0,4577 \text{ МПа}$

$0,4577 \text{ МПа} \geq 0,1000 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

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



Радиальная нагрузка, F_R : $(-4800) \text{ Н}$

Инов. № подл.	Подпись и дата
19744.4	
Инов. № дубл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Подпись и дата
Инов. № подл.	Подпись и дата
19744.4	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

К-5.00.00.000 РР

Окружной момент, M_1 : 2400 Н м

Продольный момент, M_2 : 2400 Н м

Крутящий момент, M_T : 3400 Н м

Сдвиговая нагрузка, F_1 : 3400 Н

Сдвиговая нагрузка, F_2 : 3400 Н

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D^2}{4 \cdot H} + \frac{s + s_2}{2} = 1800^2 / (4 \cdot 450) + (18 + 12) / 2 = 1815 \text{ мм}$$

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c + s_2 = 3600 + 18 + 9,5 + 12 = 3639 \text{ мм}$$

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

$$s_3 = s + \min \left\{ s_2 \cdot \frac{l_2}{\sqrt{D_c \cdot (s + s_2)}}; s_2 \right\} \cdot \chi_2 - c = 18 + \min \{ 12 \cdot 80 / (3639 \cdot (18 + 12))^{1/2}; 12 \} \cdot 1 - 9,5 = 11,41 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_s = 146 + 16 + 6 = 168 \text{ мм}$$

$$\lambda_s = \frac{d_c}{\sqrt{R_c \cdot s_3}} = 168 / (1815 \cdot 11,41)^{1/2} = 1,168$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 1008 \text{ мм}$$

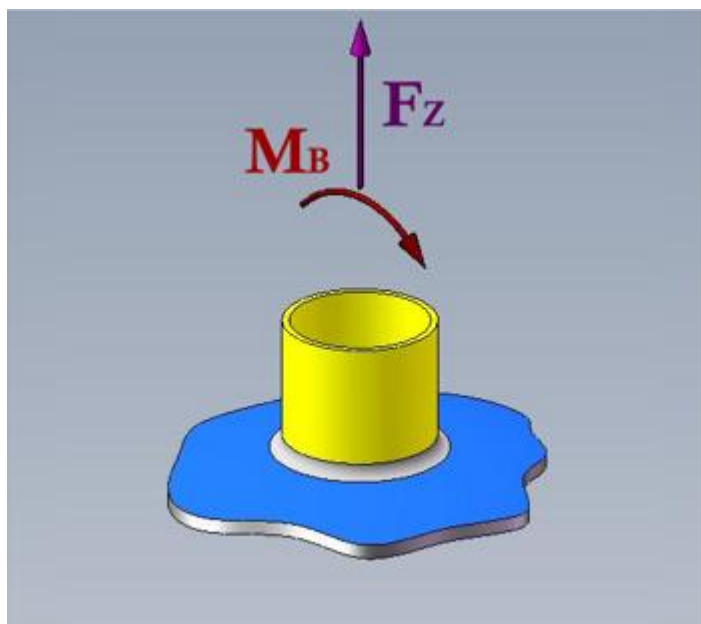
Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |(-0,1000) / 0,4577| = 0,2185$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

$0,2185 \leq 1,0$. Условие прочности выполнено

Расчетная схема по ГОСТ Р 52857.3-2007



Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_z = -F_R = -(-4800) = 4800 \text{ Н}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

К-5.00.00.000 РР

Лист
136

$$\lambda_s = \frac{d_c}{\sqrt{R_c \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)}} = 168 / (1815 \cdot (18 + 1 \cdot 12 - 9,5))^{1/2} = 0,871$$

$$K_4 = \min \left(\frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c_s)}{[\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)} \cdot \sqrt{\frac{s_1 - c_s}{d_c}}; 1 \right) = \min(2 \cdot 123,3 \cdot (16 - 6) / (156,9 \cdot (18 + 1 \cdot 12 - 9,5)) \cdot ((16 - 6) / 168)^{1/2}; 1) = 0,187$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ($\lambda_s = 0,871$, $K = 0,187$)

$$[F_{z1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \left(1,82 + 2,4 \cdot \sqrt{1 + K_4} \cdot \lambda_s + 0,91 \cdot K_4 \cdot \lambda_s^2 \right) = 156,9 \cdot (18 + 1 \cdot 12 - 9,5)^2 \cdot (1,82 + 2,4 \cdot (1 + 0,187)^{1/2} \cdot 0,871 + 0,91 \cdot 0,187 \cdot 0,871^2) = 2,787 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Наружный диаметр накладного кольца:

$$D_2 = d + 2 \cdot s_1 + 2 \cdot l_2 = 146 + 2 \cdot 16 + 2 \cdot 80 = 338 \text{ мм}$$

$$\lambda_s = \frac{D_2}{\sqrt{R_c \cdot (s - c)}} = 338 / (1815 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 2,721$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_s = 2,721$):

$$[F_{z2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \left(1,82 + 2,4 \cdot \sqrt{1 + K_4} \cdot \lambda_s + 0,91 \cdot K_4 \cdot \lambda_s^2 \right) = 156,9 \cdot (18 - 9,5)^2 \cdot (1,82 + 2,4 \cdot (1 + 0,187)^{1/2} \cdot 2,721 + 0,91 \cdot 0,187 \cdot 2,721^2) = 2,018 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при наличии накладного кольца:

$$[F_z] = \min \{ [F_{z1}]; [F_{z2}] \} = \min \{ 2,787 \cdot 10^5; 2,018 \cdot 10^5 \} = 2,018 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \frac{|F_z|}{[F_z]} = |4800 / 2,018 \cdot 10^5| = 0,02379$$

Условие прочности: $\Phi_z \leq 1$

$0,02379 \leq 1,0$. **Условие прочности выполнено**

Приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_b = \sqrt{M_1^2 + M_2^2} = (2400^2 + 2400^2)^{1/2} = 3394 \text{ Н м}$$

$$K_4 = \min \left(\frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c_s)}{[\sigma] \cdot s_3} \cdot \sqrt{\frac{s_1 - c_s}{d_c}}; 1 \right) = \min(2 \cdot 123,3 \cdot (16 - 6) / (156,9 \cdot 11,41) \cdot ((16 - 6) / 168)^{1/2}; 1) = 0,3361$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ($\lambda_s = 1,168$, $K = 0,3361$):

$$[M_{b1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \left(4,9 + 2,0 \cdot \sqrt{1 + K_4} \cdot \lambda_s + 0,91 \cdot K_4 \cdot \lambda_s^2 \right) = 156,9 \cdot (18 + 1 \cdot 12 - 9,5)^2 \cdot 168 / 4 \cdot (4,9 + 2,0 \cdot (1 + 0,3361)^{1/2} \cdot 1,168 + 0,91 \cdot 0,3361 \cdot 1,168^2) = 2,221 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_s = 2,721$):

$$[M_{b2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{D_2}{4} \cdot \left(4,9 + 2,0 \cdot \sqrt{1 + K_4} \cdot \lambda_s + 0,91 \cdot K_4 \cdot \lambda_s^2 \right) = 156,9 \cdot (18 - 9,5)^2 \cdot 338 / 4 \cdot (4,9 + 2,0 \cdot (1 + 0,187)^{1/2} \cdot 2,721 + 0,91 \cdot 0,187 \cdot 2,721^2) = 1,853 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент при наличии накладного кольца:

$$[M_b] = \min \{ [M_{b1}]; [M_{b2}] \} = \min \{ 2,221 \cdot 10^4; 1,853 \cdot 10^4 \} = 1,853 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \frac{|M_b|}{[M_b]} = |3394 / 1,853 \cdot 10^4| = 0,1832$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

$0,1832 \leq 1,0$. **Условие прочности выполнено**

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\max \left(|\Phi_p + \Phi_z|; |\Phi_z|; |\Phi_p - 0,2 \cdot \Phi_z| \right) + \Phi_b = \max \{ |0,2185 + 0,02379|; |0,02379|; |0,2185 - 0,2 \cdot 0,02379| \} + 0,1832 = 0,4255$$

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

Инв. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
К-5.00.00.000 PP					Лист
					137

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 146 + 2 \cdot 6 = 158 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s-c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = 2 \cdot ((18-9,5)/2,348 - 0,8) \cdot (3600 \cdot (18-9,5))^{1/2} = 986,8 \text{ мм}$$

$d_p < d_0$: **Условие прочности выполнено**

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d+2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 116; 1,25 \cdot ((146+2 \cdot 6) \cdot (16-6))^{1/2} \} = 49,69 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 222,7 / 272,7 \} = 0,8167$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = (3600 \cdot (18-9,5))^{1/2} = 174,9 \text{ мм}$$

Расчётная ширина кольца:

$$l_{2p} = \min \left\{ l_2; \sqrt{D_p \cdot (s_2 + s - c)} \right\} = \min \{ 80; (3600 \cdot (12+18-9,5))^{1/2} \} = 80 \text{ мм}$$

Для накладного кольца:

$$\chi_2 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 272,7 / 272,7 \} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d+2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((146+2 \cdot 6) \cdot (16-6-0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 174,9 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = 0,4 \cdot (3600 \cdot (18-9,5))^{1/2} = 69,97 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (49,69 \cdot (16-6) \cdot 0,8167 + 80 \cdot 12 \cdot 1 + 0 \cdot (16-6-0) \cdot 0,8167) / (174,9 \cdot (18-9,5))] / [1 + 0,5 \cdot (158-69,97) / 174,9 + 2 \cdot (146+2 \cdot 6) / 3600 \cdot 1 / 1 \cdot 49,69 / 174,9] \} = 1,503$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s-c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s-c) \cdot V} = 2 \cdot 2 \cdot (18-9,5) \cdot 1 \cdot 272,7 \cdot 1 / [3600 + (18-9,5) \cdot 1] = 2,57 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление $[p] = 2,57 \text{ МПа}$

$$2,57 \text{ МПа} \geq 0,711 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5 \cdot (d_p - d_{0p}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (158 - 69,97) \cdot 2,348 = 0,1033 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

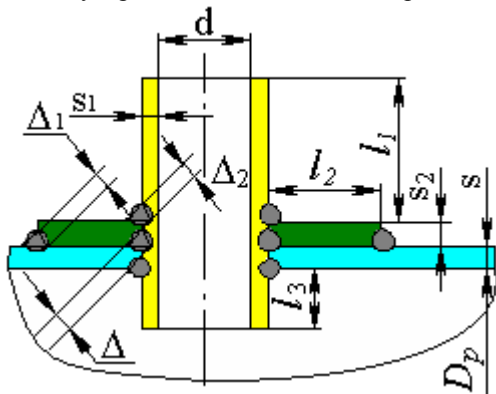
$$A_a = l_{1p} \cdot (s_1 - s_{1p} - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + l_p \cdot (s - s_p - c)$$

Инов. № подл.	19744.4	Подпись и дата	
Взам. инв. №		Инов. № дубл.	
Подпись и дата		Подпись и дата	
Инов. № подл.	19744.4	Инов. № дубл.	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
К-5.00.00.000 PP			Лист
			139

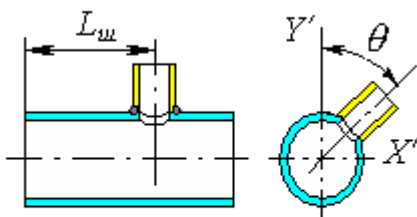
Штуцер Е DN150

Исходные данные

Элемент: Штуцер Е DN150
 Условное обозначение (метка) Штуцер Е
 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 : 18 мм
 Сумма прибавок к стенке несущего элемента, c : 6,8 мм
 Материал штуцера: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281
 Внутренний диаметр штуцера, d : 146 мм
 Толщина стенки штуцера, s_1 : 11 мм
 Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c_s : 7,65 мм
 Длина штуцера, l_1 : 106 мм



Смещение штуцера, $L_{ш}$: 8640 мм
 Угол поворота штуцера, θ : 165 °
 Длина внутр. части штуцера, l_3 : 0 мм
 Прибавка на коррозию, c_{s1} : 0 мм
 Материал кольца: 09Г2С
 Ширина кольца, l_2 : 80 мм

Исх. № подл.	Исх. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата
19744.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
К-5.00.00.000 РР			Лист
			141

12 mm

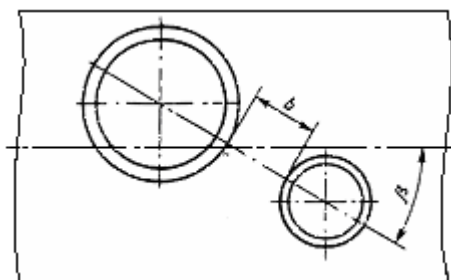
1 MM

1 MM

1 MM

epa:

•



Штуцер АЗ DN500

2448 MM

159.9 °

3:

Ч

9

I

150 °C

H

R

10

6

e

1

9:

e

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$D_p = D = 1800 \text{ мм}$ Расчёт в расчётных условиях Условия нагружения: Расчётная температура, T: 150 °C Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,4 МПа
					Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007 <i>Свойства материала элемента, несущего штуцер</i> Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 150 °C (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV): $[\sigma] = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{256,5 / 1,6; 430 / 2,6\} = 160,3 \text{ МПа}$ Модуль продольной упругости при температуре 180 °C: $E = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ <i>Свойства материала штуцера</i> Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 150 °C (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV): $[\sigma]_I = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{231 / 1,6; 430 / 2,6\} = 144,4 \text{ МПа}$ Модуль продольной упругости при температуре 150 °C: $E_I = 1,86 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ <i>Свойства материала кольца</i>
19744.4					Изм. Лист № докум. Подп. Дата

К-5.00.00.000 PP

Лист 142

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma]_2 = \min(R_{eH} / n_T; R_{mH} / n_B) = \min\{256,5 / 1,6; 430 / 2,6\} = 160,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре $150\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_2 = 1,86 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,4 \cdot (146 + 2 \cdot 7,65) / (2 \cdot 144,4 \cdot 1 - 0,4) = 0,2238 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 144,4 \cdot 1 \cdot (11 - 7,65) / (146 + 11 + 7,65) = 5,875 \text{ МПа}$$

$$5,875 \text{ МПа} \geq 0,4 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 1800 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 2,297 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 146 + 2 \cdot 7,65 = 161,3 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((18 - 6,8) / 2,297 - 0,8) \cdot (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 1158 \text{ мм}$$

$$d_p < d_0: \text{Условие прочности выполнено}$$

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min\{l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)}\} = \min\{106; 1,25 \cdot ((146 + 2 \cdot 7,65) \cdot (11 - 7,65))^{1/2}\} = 29,06 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min\left\{1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]}\right\} = \min\{1,0, 144,4 / 160,3\} = 0,9006$$

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

$$L_k = 5216 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 142 \text{ мм}$$

Расчётная ширина кольца:

$$l_{2p} = \min\{l_2; \sqrt{D_p \cdot (s_2 + s - c)}\} = \min\{80; (1800 \cdot (12 + 18 - 6,8))^{1/2}\} = 80 \text{ мм}$$

Для накладного кольца:

$$\chi_2 = \min\left\{1,0; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]}\right\} = \min\{1,0, 160,3 / 160,3\} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min\{l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})}\} = \min\{0; 0,5 \cdot ((146 + 2 \cdot 7,65) \cdot (11 - 7,65 - 0))^{1/2}\} = 0 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 142 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

Инов. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата	К-5.00.00.000 PP					Лист 143
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

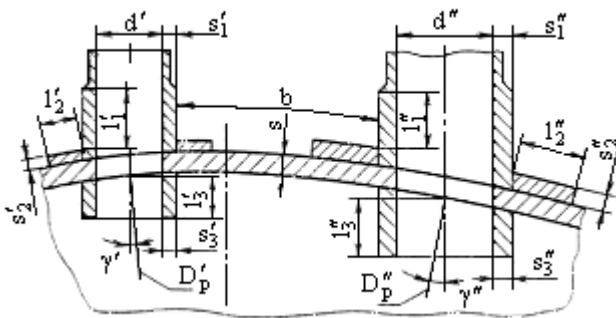
$$d_{0p} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (1800 \cdot (18 - 6.8))^{1/2} = 56.79 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{1; [1 + (29.06 \cdot (11 - 7.65) \cdot 0.9006 + 80 \cdot 12 \cdot 1 + 0 \cdot (11 - 7.65 - 0) \cdot 0.9006) / (142 \cdot (18 - 6.8))] / [1 + 0.5 \cdot (161.3 - 56.79) / 142 + 1 \cdot (146 + 2 \cdot 7.65) / 1800 \cdot 1 / 1 \cdot 29.06 / 142] = 1.197\}$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (18 - 6.8) \cdot 1 \cdot 160.3 \cdot 1 / [1800 + (18 - 6.8) \cdot 1] = 1.983 \text{ МПа}$$



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер АЗ DN500 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (18 - 6.8))^{1/2} + (1800 \cdot (18 - 6.8))^{1/2} = 284 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

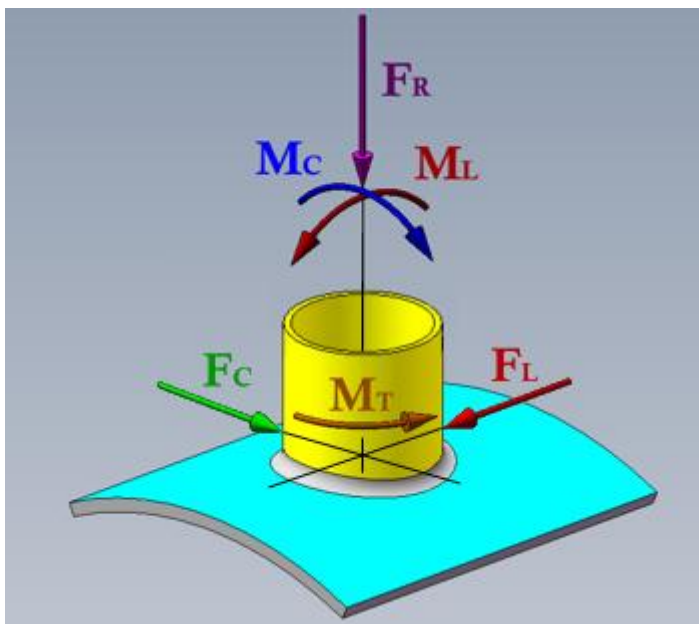
Допускаемое давление $[p] = 1.983 \text{ МПа}$

$$1.983 \text{ МПа} \geq 0.4 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
К-5.00.00.000 РР			
Лист			
144			

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



Радиальная нагрузка, F_R : (-4800) Н

Окружной момент, M_C : 2400 Н м

Продольный момент, M_L : 2400 Н м

Крутящий момент, M_T : 3400 Н м

Сдвиговая нагрузка, F_C : 3400 Н

Сдвиговая нагрузка, F_L : 3400 Н

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c + s_2 = 1800 + 18 + 6,8 + 12 = 1837 \text{ мм}$$

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D_c}{2} = 1837 / 2 = 918,4 \text{ мм}$$

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

$$s_3 = s + \min \left\{ s_2 \cdot \frac{l_2}{\sqrt{D_c \cdot (s + s_2)}}; s_2 \right\} \cdot \chi_2 - c = 18 + \min \{ 12 \cdot 80 / (1837 \cdot (18 + 12))^{1/2}; 12 \} \cdot 1 - 6,8 = 15,29 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_s = 146 + 11 + 7,65 = 164,6 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} = 164,6 / (1837 \cdot 15,29)^{1/2} = 0,9825$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 2368 \text{ мм}$$

Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |0,4 / 1,983| = 0,2017$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

0,2017 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

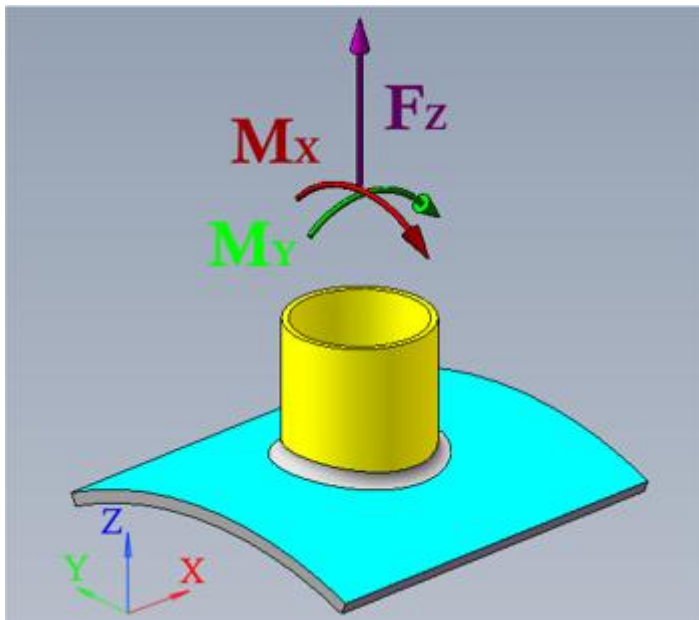
Расчетная схема по ГОСТ Р 52857.3-2007

Инов. № подл.	Подпись и дата
19744.4	
Изм.	Лист
№ докум.	Подп.
Дата	

К-5.00.00.000 PP

Лист

145



Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_z = -F_R = -(-4800) = 4800 \text{ Н}$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 0,9825 + 0,005196 \cdot 0,9825^2 + (-0,001406) \cdot 0,9825^3 + 0 \cdot 0,9825^4 = 1,54$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ($\lambda_c = 0,9825$):

$$[F_{z1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1,81\} = 160,3 \cdot (18 + 1 \cdot 12 - 6,8)^2 \cdot \max\{1,54; 1,81\} = 1,562 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Наружный диаметр накладного кольца:

$$D_2 = d + 2 \cdot s_1 + 2 \cdot l_2 = 146 + 2 \cdot 11 + 2 \cdot 80 = 328 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{D_2}{\sqrt{D_c \cdot (s - c)}} = 328 / (1837 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 2,287$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 2,287 + 0,005196 \cdot 2,287^2 + (-0,001406) \cdot 2,287^3 + 0 \cdot 2,287^4 = 2,788$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_c = 2,287$):

$$[F_{z2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1,81\} = 160,3 \cdot (18 - 6,8)^2 \cdot \max\{2,788; 1,81\} = 5,607 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при наличии накладного кольца:

$$[F_z] = \min\{[F_{z1}]; [F_{z2}]\} = \min\{1,562 \cdot 10^5; 5,607 \cdot 10^4\} = 5,607 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{[F_z]} \right| = |4800 / 5,607 \cdot 10^4| = 0,08561$$

Условие прочности: $\Phi_z \leq 1$

$0,08561 \leq 1,0$. **Условие прочности выполнено**

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_x = M_c = 2400 \text{ Н м}$$

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_y = M_L = 2400 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 0,9825 + 0,1589 \cdot 0,9825^2 + (-0,02142) \cdot 0,9825^3 + 0,001035 \cdot 0,9825^4 = 4,723$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ($\lambda_c = 0,9825$):

Инов. № подл.	Подпись и дата
19744.4	
Изм.	Лист
№ докум.	Подп.
Дата	

$$[M_{x1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^3 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 160,3 \cdot (18 + 1 \cdot 12 - 6,8)^2 \cdot 164,6 / 4 \cdot \max\{4,723; 4,9\} = 1,74 \cdot 10^4 \text{ H}_M$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 2,287 + 0,1589 \cdot 2,287^2 + (-0,02142) \cdot 2,287^3 + 0,001035 \cdot 2,287^4 = 5,276$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_c = 2,287$):

$$[M_{x2}] = [\sigma] \cdot (s \cdot c)^2 \cdot \frac{D_2}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 160,3 \cdot (18 - 6,8)^2 \cdot 328 / 4 \cdot \max\{5,276; 4.9\} = 8700 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

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

$$[M_x] = \min \{ [M_{x1}]; [M_{x2}] \} = \min \{ 1,74 \cdot 10^4; 8700 \} = 8700 \text{ H M}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)}} = 164,6 / (1837 \cdot (18 + 1 \cdot 12 - 6,8))^{1/2} = 0,7976$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 5,868$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ($\lambda_c = 0,7976$):

$$[M_{y1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 160,3 \cdot (18 + 1 \cdot 12 - 6,8)^2 \cdot 164,6 / 4 \cdot \max\{5,868; 4,9\} = 2,084 \cdot 10^4 \text{ H}_m$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 13$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_c = 2,287$):

$$[M_{y2}] = [\sigma] \cdot (s-c)^2 \cdot \frac{D_2}{4} \cdot \max\{C_3; 4,9\} = 160,3 * (18 - 6,8)^2 * 328 / 4 * \max\{13; 4,9\} = 2,144 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

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

$$|M_y| = \min\{|M_{y1}|; |M_{y2}|\} = \min\{2,084 \cdot 10^4; 2,144 \cdot 10^4\} = 2,084 \cdot 10^4 \text{ H}_m$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{M_{x,y}}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{M_{x,y}}\right)^2} = ((2400/8700)^2 + (2400/2,084 \cdot 10^4)^2)^{1/2} = 0,2989$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

$0,2989 \leq 1.0$. Условие прочности выполнено

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right|, \left|\Phi_z\right|, \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z\right|\right)^2 + \Phi_b^2} = (\max(|0,2017 / 1 + 0,08561|; |0,08561|; |0,2017 / 1 - 0.2 \cdot 0,08561|) / \sqrt{0,2989^2})^{1/2} = 0,4147$$

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

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

$0,4147 \leq 1.0$. Условие прочности выполнено

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_c)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_c)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_c)} = 0,4 \cdot (146 + 11) / (4 \cdot (11 - 7,65)) + 4 \cdot (2400^2 + 2400^2)^{1/2} / (3,142 \cdot (146 + 11)^2 \cdot (11 - 7,65)) + 4800 / (3,142 \cdot (146 + 11) \cdot (11 - 7,65)) = 59,93 \text{ MPa}$$

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

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

$59,93 \text{ МПа} \leq 144,4 \text{ МПа}$. Условие прочности выполнено

Инв. № подл.	19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p>Прочность от совместного действия нагрузок:</p> $\sqrt{\left[\max \left(\left \frac{\Phi_P}{C_4} + \Phi_z \right ; \left \Phi_z \right ; \left \frac{\Phi_P}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z \right \right) \right]^2 + \Phi_b^2} = ([\max(0,2017 / 1 + 0,08561 ; 0,08561 ; 0,2017 / 1 - 0.2 * 0,08561)]^2 + 0,2989^2)^{1/2} = 0,4147$ <p>Если $F_z < 0$, то знак Φ_z меняется на противоположный.</p> <p>Условие прочности: $\sqrt{\left[\max \left(\left \frac{\Phi_P}{C_4} + \Phi_z \right ; \left \Phi_z \right ; \left \frac{\Phi_P}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z \right \right) \right]^2 + \Phi_b^2} \leq 1$</p> <p>$0,4147 \leq 1.0$. Условие прочности выполнено</p> <p>Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:</p> $\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = 0,4 \cdot (146 + 11) / (4 \cdot (11 - 7,65)) + 4 \cdot (2400^2 + 2400^2)^{1/2} / (3,142 \cdot (146 + 11)^2 \cdot (11 - 7,65)) + 4800 / (3,142 \cdot (146 + 11) \cdot (11 - 7,65)) = 59,93 \text{ МПа}$ <p>Если F_z создает сжимающее напряжение, ее следует принять равной нулю.</p> <p>Условие прочности: $\sigma_1 \leq [\sigma]_1$</p> <p>$59,93 \text{ МПа} \leq 144,4 \text{ МПа}$. Условие прочности выполнено</p>
						<p>Изм. Лист № докум. Подп. Дата</p>

К-5.00.00.000 PP

Лист 147

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0,5,875 + (2400^2 + 2400^2)^{1/2} / 8273 + |0| / 2,269 \cdot 10^5 = 0,4103$$

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

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

0,4103 ≤ 1,0. **Условие устойчивости выполнено**

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения:

Расчётная температура, T : 180 °C

Расчётное наружное избыточное давление, p : 0,1000 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 180$ °C (расчётные условия (наружное давление), коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma] = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{251,1 / 1,6; 435,4 / 2,6\} = 156,9 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °C:

$$E = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 180$ °C (расчётные условия (наружное давление), коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma]_1 = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{225,6 / 1,6; 435,4 / 2,6\} = 141 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °C:

$$E_1 = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала кольца

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 180$ °C (расчётные условия (наружное давление), коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma]_2 = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{251,1 / 1,6; 435,4 / 2,6\} = 156,9 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °C:

$$E_2 = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_{\text{ш}} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 - p} = 0,1000 \cdot (146 + 2 \cdot 7,65) / (2 \cdot 141 - 0,1000) = 0,05722 \text{ мм}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$B_1 = \min \left\{ 1,0, 9,45 \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \sqrt{\frac{d}{100 \cdot (s_1 - c_s)}} \right\} = \min \{ 1,0, 9,45 \cdot 146 / 138 \cdot (146 / (100 \cdot (11 - 7,65)))^{1/2} \} = 1$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия устойчивости:

$$[p]_e = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E_1}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_1 - c_s)}{d} \right]^{2,5} = 20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 146 / (2,4 \cdot 1 \cdot 138) \cdot (100 \cdot (11 - 7,65) / 146)^{2,5} = 13,38 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия прочности:

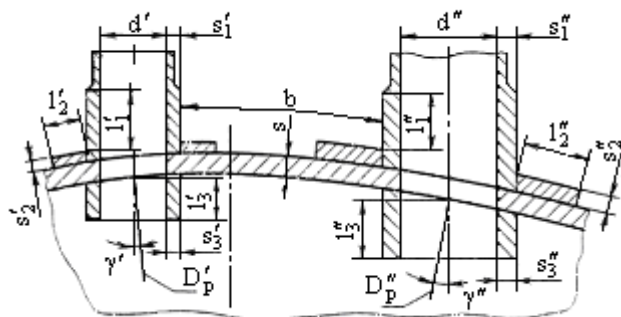
Изн.	Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
Изн.	19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
К-5.00.00.000 PP					Лист
					148

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (18 - 6,8) \cdot 156,9 \cdot 1 / [1800 + (18 - 6,8) \cdot 1] = 1,941 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление:

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_p}{[p]_E} \right)^2}} = 1,941 / (1 + (1,941 / 0,1633)^2)^{1/2} = 0,1627 \text{ МПа}$$

где $[P]_E$ – допускаемое наружное давление в пределах упругости для элемента, несущего штуцер (см. расчёт элемента “Обечайка цилиндрическая”)



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер А3 DN500 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} + (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 284 \text{ мм}$$

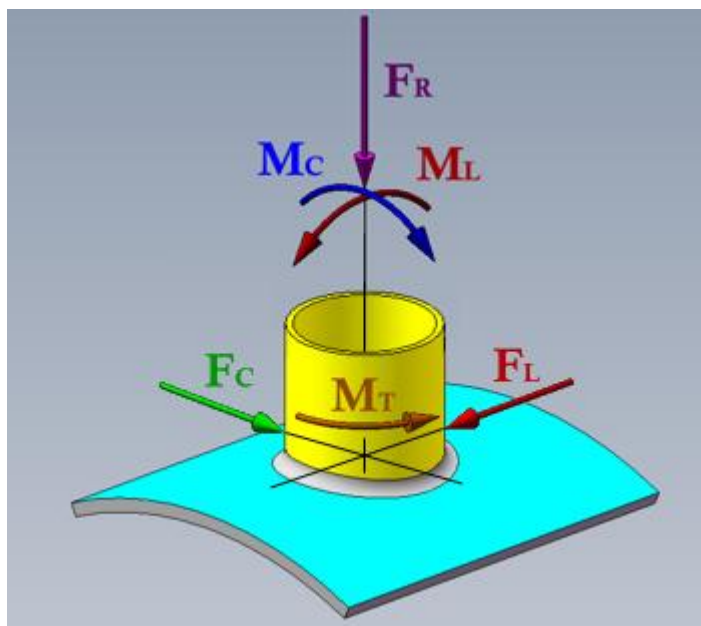
Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 0,1627 \text{ МПа}$

$0,1627 \text{ МПа} \geq 0,1000 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

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



Радиальная нагрузка, F_R : $(-4800) \text{ Н}$

Окружной момент, M_C : 2400 Н м

Инов. № подл.	Подпись и дата
19744.4	
Изм.	Лист
№ докум.	Подп.
Дата	

К-5.00.00.000 PP

Лист

150

Продольный момент, M_L : 2400 Н м

Крутящий момент, M_T : 3400 Н м

Сдвиговая нагрузка, F_C : 3400 Н

Сдвиговая нагрузка, F_L : 3400 Н

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c + s_2 = 1800 + 18 + 6,8 + 12 = 1837 \text{ мм}$$

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D_c}{2} = 1837 / 2 = 918,4 \text{ мм}$$

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

$$s_3 = s + \min \left\{ s_2 \cdot \frac{l_2}{\sqrt{D_c \cdot (s + s_2)}}; s_2 \right\} \cdot \chi_2 - c = 18 + \min \{ 12 \cdot 80 / (1837 \cdot (18 + 12))^{1/2}; 12 \} \cdot 1 - 6,8 = 15,29 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_s = 146 + 11 + 7,65 = 164,6 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} = 164,6 / (1837 \cdot 15,29)^{1/2} = 0,9825$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 2368 \text{ мм}$$

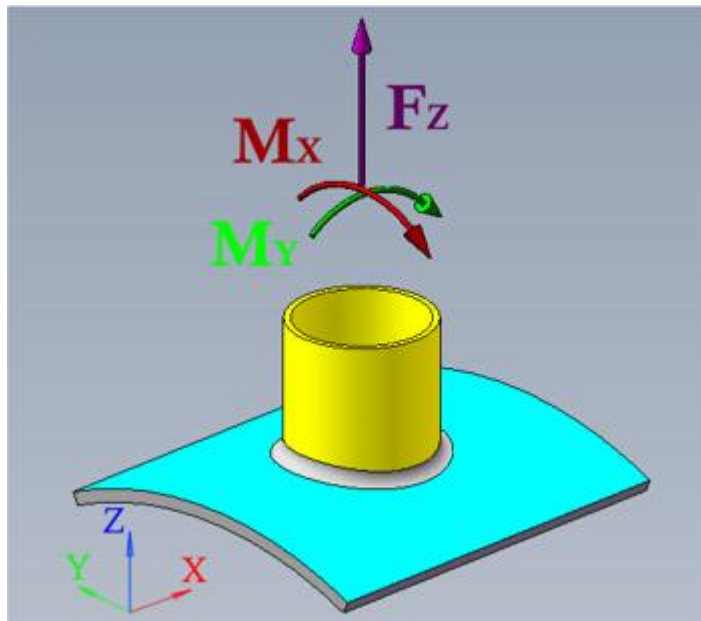
Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |(-0,1000) / 0,1627| = 0,6146$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

$0,6146 \leq 1,0$. Условие прочности выполнено

Расчетная схема по ГОСТ Р 52857.3-2007



Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_z = -F_R = -(-4800) = 4800 \text{ Н}$$

Инов. № подл. 19744.4

Инов. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

К-5.00.00.000 РР

Лист

151

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 0,9825 + 0,005196 \cdot 0,9825^2 + (-0,001406) \cdot 0,9825^3 + 0 \cdot 0,9825^4 = 1,54$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ($\lambda_c = 0,9825$):

$$[F_{x1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1,81\} = 156,9 \cdot (18 + 1 \cdot 12 - 6,8)^2 \cdot \max\{1,54; 1,81\} = 1,529 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Наружный диаметр накладного кольца:

$$D_2 = d + 2 \cdot s_1 + 2 \cdot l_2 = 146 + 2 \cdot 11 + 2 \cdot 80 = 328 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{D_2}{\sqrt{D_c \cdot (s - c)}} = 328 / (1837 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 2,287$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 2,287 + 0,005196 \cdot 2,287^2 + (-0,001406) \cdot 2,287^3 + 0 \cdot 2,287^4 = 2,788$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_c = 2,287$):

$$[F_{x2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1,81\} = 156,9 \cdot (18 - 6,8)^2 \cdot \max\{2,788; 1,81\} = 5,489 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при наличии накладного кольца:

$$[F_x] = \min\{[F_{x1}]; [F_{x2}]\} = \min\{1,529 \cdot 10^5; 5,489 \cdot 10^4\} = 5,489 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_x = \frac{F_x}{[F_x]} = 4800 / 5,489 \cdot 10^4 = 0,08745$$

Условие прочности: $\Phi_x \leq 1$

0,08745 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_x = M_c = 2400 \text{ Н м}$$

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_y = M_L = 2400 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 0,9825 + 0,1589 \cdot 0,9825^2 + (-0,02142) \cdot 0,9825^3 + 0,001035 \cdot 0,9825^4 = 4,723$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ($\lambda_c = 0,9825$):

$$[M_{x1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4,9\} = 156,9 \cdot (18 + 1 \cdot 12 - 6,8)^2 \cdot 164,6 / 4 \cdot \max\{4,723; 4,9\} = 1,704 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 2,287 + 0,1589 \cdot 2,287^2 + (-0,02142) \cdot 2,287^3 + 0,001035 \cdot 2,287^4 = 5,276$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_c = 2,287$):

$$[M_{x2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{D_2}{4} \cdot \max\{C_2; 4,9\} = 156,9 \cdot (18 - 6,8)^2 \cdot 328 / 4 \cdot \max\{5,276; 4,9\} = 8516 \text{ Н м}$$

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

$$[M_x] = \min\{[M_{x1}]; [M_{x2}]\} = \min\{1,704 \cdot 10^4; 8516\} = 8516 \text{ Н м}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)}} = 164,6 / (1837 \cdot (18 + 1 \cdot 12 - 6,8))^{1/2} = 0,7976$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 5,868$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ($\lambda_c = 0,7976$):

$$[M_{y1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4,9\} = 156,9 \cdot (18 + 1 \cdot 12 - 6,8)^2 \cdot 164,6 / 4 \cdot \max\{5,868; 4,9\} = 2,04 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 13$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Инов. № подл.
19744.4							
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 PP		
					Лист		
					152		

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_c = 2,287$):

$$[M_{y2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{D_2}{4} \cdot \max\{C_3; 4,9\} = 156,9 \cdot (18 - 6,8)^2 \cdot 328 / 4 \cdot \max\{13; 4,9\} = 2,099 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

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

$$[M_y] = \min\{[M_{y1}; M_{y2}\} = \min\{2,04 \cdot 10^4; 2,099 \cdot 10^4\} = 2,04 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((2400 / 8516)^2 + (2400 / 2,04 \cdot 10^4)^2)^{1/2} = 0,3054$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

$0,3054 \leq 1,0$. **Условие прочности выполнено**

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_x\right|; \left|\Phi_x\right|; \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0,2 \cdot \Phi_x\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} = (\max\{|0,6146 / 1 + 0,08745|; |0,08745|; |0,6146 / 1 - 0,2 \cdot 0,08745|\})^2 + 0,3054^2)^{1/2} = 0,7656$$

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

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

$0,7656 \leq 1,0$. **Условие прочности выполнено**

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = (-0,1000) \cdot (146 + 11) / (4 \cdot (11 - 7,65)) + 4 \cdot (2400^2 + 2400^2)^{1/2} / (3,142 \cdot (146 + 11)^2 \cdot (11 - 7,65)) + 4800 / (3,142 \cdot (146 + 11) \cdot (11 - 7,65)) = 54,07 \text{ МПа}$$

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

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

$54,07 \text{ МПа} \leq 141 \text{ МПа}$. **Условие прочности выполнено**

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0,1000 / 5,719 + (2400^2 + 2400^2)^{1/2} / 8080 + |0| / 2,216 \cdot 10^5 = 0,4376$$

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

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

$0,4376 \leq 1,0$. **Условие устойчивости выполнено**

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, T : 20 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, p : 0,6205 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 20$ °С (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]^{20} = \eta \cdot R_{e20} / n_T = 1 \cdot 300 / 1,1 = 272,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °С:

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 РР				Лист
				153

$E = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (условия гидроиспытаний):

$[\sigma]_{1=20}^{20} = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 280 / 1,1 = 254,5 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$:

$E_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала кольца

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (условия гидроиспытаний):

$[\sigma]_{2=20}^{20} = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 300 / 1,1 = 272,7 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$:

$E_2 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_{\text{ш}} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,6205 \cdot (146 + 2 \cdot 7,65) / (2 \cdot 254,5 \cdot 1 - 0,6205) = 0,1968 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 254,5 \cdot 1 \cdot (11 - 7,65) / (146 + 11 + 7,65) = 10,36 \text{ МПа}$$

$10,36 \text{ МПа} \geq 0,6205 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 1800 \text{ мм}$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$s_p = 2,05 \text{ мм}$

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

$d_p = d + 2 \cdot c_s = 146 + 2 \cdot 7,65 = 161,3 \text{ мм}$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((18 - 6,8) / 2,05 - 0,8) \cdot (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 1324 \text{ мм}$$

$d_p < d_0$: **Условие прочности выполнено**

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 106; 1,25 \cdot ((146 + 2 \cdot 7,65) \cdot (11 - 7,65))^{1/2} \} = 29,06 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 254,5 / 272,7 \} = 0,9333$$

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

$L_k = 5216 \text{ мм}$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 142 \text{ мм}$$

Расчётная ширина кольца:

Инов. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	К-5.00.00.000 PP					Лист
										154
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

$$l_{2p} = \min \left\{ l_2; \sqrt{D_p \cdot (s_2 + s - c)} \right\} = \min \{ 80; (1800 \cdot (12 + 18 - 6,8))^{1/2} \} = 80 \text{ мм}$$

Для накладного кольца:

$$\chi_2 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 272,7 / 272,7 \} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((146 + 2 \cdot 7,65) \cdot (11 - 7,65 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 142 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

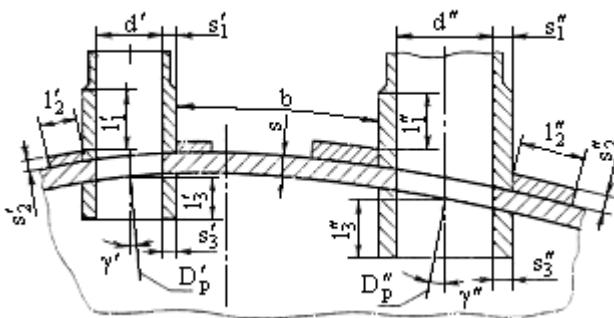
$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 56,79 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (29,06 \cdot (11 - 7,65) \cdot 0,9333 + 80 \cdot 12 \cdot 1 + 0 \cdot (11 - 7,65 - 0) \cdot 0,9333) / (142 \cdot (18 - 6,8))] / [1 + 0,5 \cdot (161,3 - 56,79) / 142 + 1 \cdot (146 + 2 \cdot 7,65) / 1800 \cdot 1 / 1 \cdot 29,06 / 142] \} = 1,198$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (18 - 6,8) \cdot 1 \cdot 272,7 \cdot 1 / [1800 + (18 - 6,8) \cdot 1] = 3,373 \text{ МПа}$$



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер АЗ DN500 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} + (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 284 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 3,373 \text{ МПа}$

$$3,373 \text{ МПа} \geq 0,6205 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5 \cdot (d_p - d_{0p}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (161,3 - 56,79) \cdot 2,05 = 0,1071 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

$$= 29,06 \cdot (11 - 0,1968 - 7,65) \cdot 0,9333 + 80 \cdot 12 \cdot 1 + 0 \cdot (11 - 7,65 - 0) \cdot 0,9333 + 142 \cdot (18 - 2,05 - 6,8)$$

$$= 0,002345 \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,1071 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \leq 0,002345 \text{ м}^2$$

Инов. № подл.	19744.4	Подпись и дата	
Взам. инв. №		Инов. № дубл.	
Подпись и дата		Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
К-5.00.00.000 PP			
Лист 155			

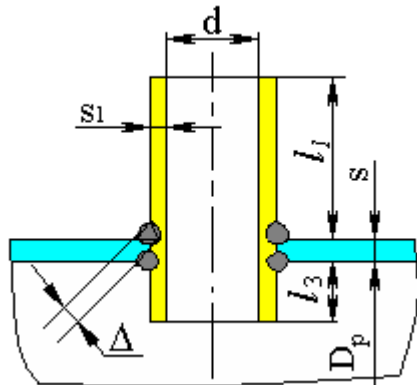
Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 РР				
Лист				
156				

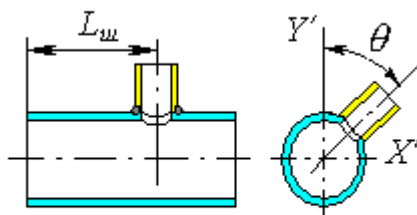
Штуцер Ж DN50

Исходные данные

Элемент: Штуцер Ж DN50
Условное обозначение (метка) Штуцер Ж
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 : 18 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, c : 6,8 мм
Материал штуцера: 09Г2С (КП245) Gr.
Внутренний диаметр штуцера, d : 48 мм
Толщина стенки штуцера, s_1 : 14 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c_s : 6 мм
Длина штуцера, l_1 : 160 мм



Смещение штуцера, $L_{ш}$: $1,319 \cdot 10^4$ мм
Угол поворота штуцера, θ : 150°
Длина внутр. части штуцера, l_3 : 0 мм
Прибавка на коррозию, c_{s1} : 0 мм
Минимальный размер сварного шва, Δ : 1 мм
Расчётные параметры размещения штуцера:
Ближайший штуцер

Подпись и дата

Инов. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

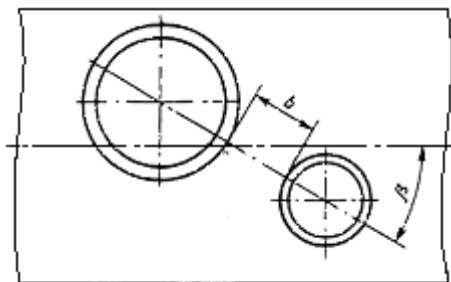
Инов. № подл.
19744.4

Лист

К-5.00.00.000 РР

157

Изм. Лист № докум. Подп. Дата



Название штуцера: Штуцер Л DN50

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 1126 мм

Угол β : 90 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$\varphi_1 = 1$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$\varphi = 1$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 1800 \text{ мм}$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 150 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,4 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 150 °C (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$[\sigma] = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min(256,5 / 1,6; 430 / 2,6) = 160,3 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °C:

$E = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 150 °C (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$[\sigma]_1 = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min(202,1 / 1,6; 430 / 2,6) = 126,3 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 150 °C:

$E_1 = 1,86 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_{\text{ш}} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,4 \cdot (48 + 2 \cdot 6) / (2 \cdot 126,3 \cdot 1 - 0,4) = 0,09515 \text{ мм}$$

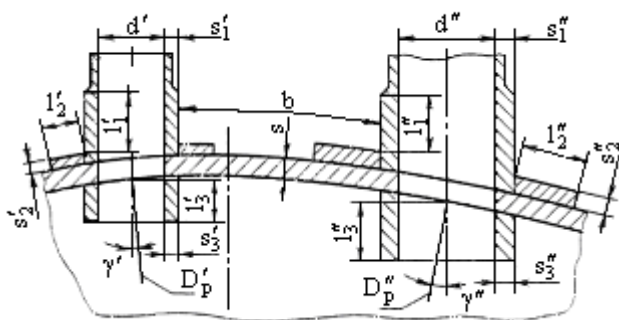
Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 126,3 \cdot 1 \cdot (14 - 6) / (48 + 14 + 6) = 29,72 \text{ МПа}$$

29,72 МПа \geq 0,4 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Расчёт внутреннего избыточного давления, р: 0,4 МПа					Лист
					Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007					
19744.4					Свойства материала элемента, несущего штуцер					158
					Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре Т = 150 °С (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):					
					[σ]= min(R _{e/t} / n _T ; R _{m/t} / n _B) = min{256,5 / 1,6; 430 / 2,6}= 160,3 МПа					
					Модуль продольной упругости при температуре 180 °С:					
					E = 1,83·10 ⁵ МПа					
					Свойства материала штуцера					
					Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре Т = 150 °С (расчётные условия, кор- розионная среда, группа аппарата III, IV):					
					[σ] ₁ = min(R _{e/t} / n _T ; R _{m/t} / n _B) = min{202,1 / 1,6; 430 / 2,6}= 126,3 МПа					
					Модуль продольной упругости при температуре 150 °С:					
					E ₁ = 1,86·10 ⁵ МПа					
					Расчётная толщина стенки штуцера:					
					$s_{ш} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,4 \cdot (48 + 2 \cdot 6) / (2 \cdot 126,3 \cdot 1 - 0,4) = 0,09515 \text{ мм}$					
					Допускаемое давление для патрубка штуцера:					
					$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 126,3 \cdot 1 \cdot (14 - 6) / (48 + 14 + 6) = 29,72 \text{ МПа}$					
					29,72 МПа ≥ 0,4 МПа					
					Заключение: Условие прочности и устойчивости выполнено					



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер Л DN50 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D'_p \cdot (s - c)} + \sqrt{D''_p \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} + (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 284 \text{ мм}$$

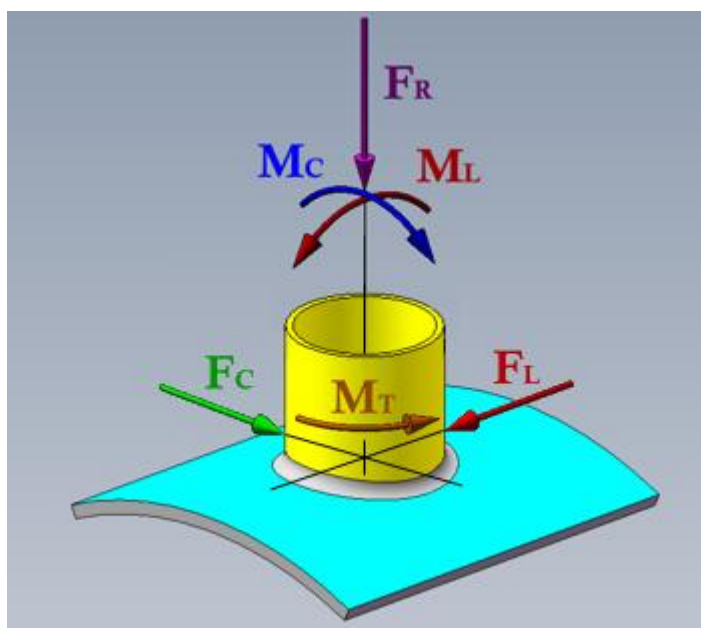
Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 1,983 \text{ МПа}$

$1,983 \text{ МПа} \geq 0,4 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости 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

Эквивалентная толщина обечайки около штуцера:

$$s_3 = s - c = 18 - 6,8 = 11,2 \text{ мм}$$

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c = 1800 + 18 + 6,8 = 1825 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

Инов. № подл.	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
К-5.00.00.000 PP			
Лист 160			

$$d_c = d + s_1 + c_s = 48 + 14 + 6 = 68 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} = 68 / (1825 \cdot 11,2)^{1/2} = 0,4757$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 652 \text{ мм}$$

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D_c}{2} = 1825 / 2 = 912,4 \text{ мм}$$

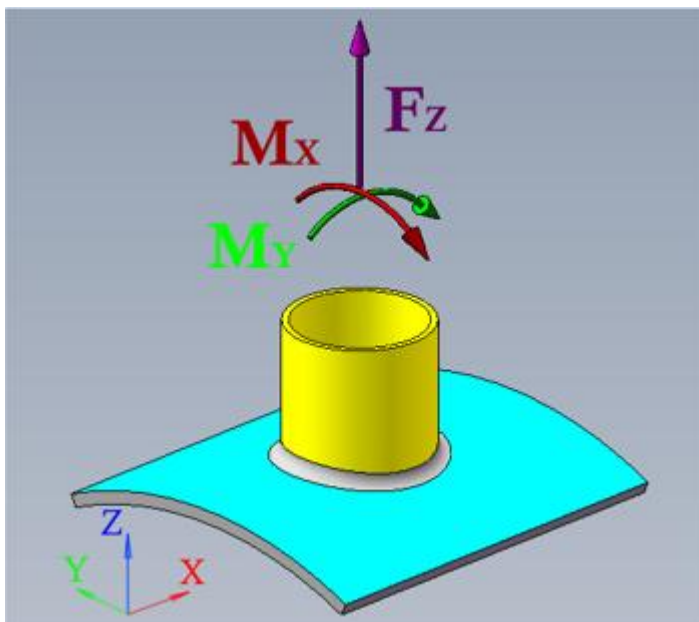
Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |0,4 / 1,983| = 0,2017$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

$0,2017 \leq 1,0$. Условие прочности выполнено

Расчетная схема по ГОСТ Р 52857.3-2007



Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_z = -F_R = -(-1500) = 1500 \text{ Н}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s - c)}} = 68 / (1825 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 0,4757$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 0,4757 + 0,005196 \cdot 0,4757^2 + (-0,001406) \cdot 0,4757^3 + 0 \cdot 0,4757^4 = 1,055$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4757$):

$$[F_z] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1,81\} = 160,3 \cdot (18 - 6,8)^2 \cdot \max\{1,055; 1,81\} = 3,64 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{[F_z]} \right| = |1500 / 3,64 \cdot 10^4| = 0,04121$$

Условие прочности: $\Phi_z \leq 1$

$0,04121 \leq 1,0$. Условие прочности выполнено

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
К-5.00.00.000 PP			
Лист 161			

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1, 0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1, 0; 123,3 / 156,9 \} = 0,7855$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((48 + 2 \cdot 6) \cdot (14 - 6 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 142 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 712 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 142 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 56,79 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (27,39 \cdot (14 - 6) \cdot 0,7855 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (0 - 2 \cdot 6) \cdot 0,7855) / (142 \cdot (18 - 6,8))] / [1 + 0,5 \cdot (60 - 56,79) / 142 + 1 \cdot (48 + 2 \cdot 6) / 1800 \cdot 27,39 / 142] = 1,089 \}$$

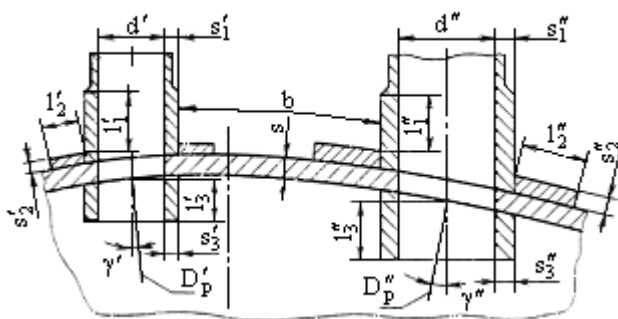
$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} = 2 \cdot 1 \cdot (18 - 6,8) \cdot 156,9 \cdot 1 / [1800 + (18 - 6,8) \cdot 1] = 1,941 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление:

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_p}{[p]_E} \right)^2}} = 1,941 / (1 + (1,941 / 0,1633)^2)^{1/2} = 0,1627 \text{ МПа}$$

где $[p]_E$ – допускаемое наружное давление в пределах упругости для элемента, несущего штуцер (см. расчёт элемента “Обечайка цилиндрическая”)



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер Л DN50 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} + (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 284 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Инов. № подл. 19744.4

Взам. инв. №

Инов. № дубл.

Подпись и дата

К-5.00.00.000 PP

Лист

164

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Заключение: Условие прочности и устойчивости выполнено

A diagram illustrating a mechanical system. A yellow cylinder is shown on a light blue curved surface. A vertical purple arrow labeled F_R points downwards from the top of the cylinder. Two curved arrows, one blue labeled M_C and one red labeled M_L , are shown around the vertical axis. A green arrow labeled F_C points horizontally to the right, tangent to the cylinder's surface. A red arrow labeled F_L points horizontally to the left, tangent to the cylinder's surface. A brown arrow labeled M_T points along the horizontal axis, indicating a torque.

Эквивалентная толщина обечайки около штуцера:

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} = 68 / (1825 \cdot 11,2)^{1/2} = 0,4757$$

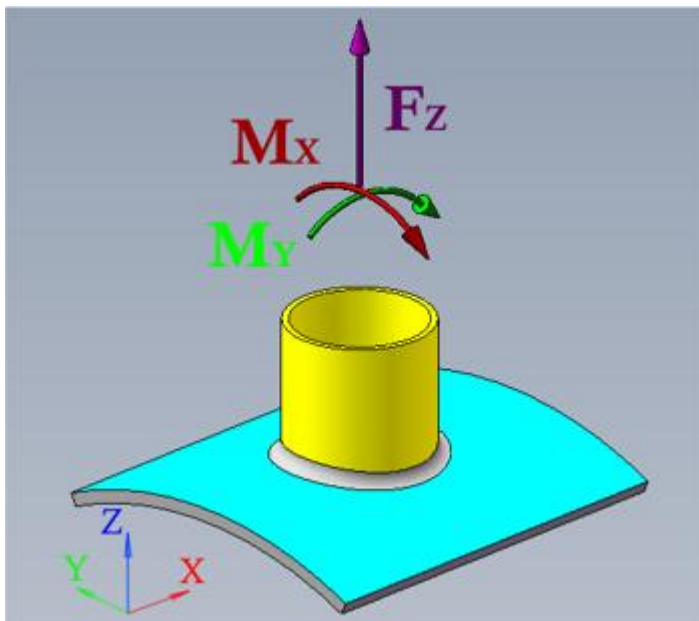
$$R_c = \frac{D_c}{2} = 1825 / 2 = 912,4 \text{ mm}$$
$$\Phi_p = \left| \frac{p}{p} \right| = |(-0,1000) / 0,1627| = 0,6146$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

Инв. № подл.	19744.4	Подпись и дата		Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p>Продольный момент, M_L: 200 Н м</p> <p>Крутящий момент, M_T: 300 Н м</p> <p>Сдвиговая нагрузка, F_C: 1100 Н</p> <p>Сдвиговая нагрузка, F_L: 1100 Н</p> <p>Эквивалентная толщина обечайки около штуцера:</p> $s_s = s - c = 18 - 6,8 = 11,2 \text{ мм}$ <p>Средний диаметр обечайки у отверстия:</p> $D_c = D_p + s + c = 1800 + 18 + 6,8 = 1825 \text{ мм}$ <p>Средний диаметр штуцера:</p> $d_c = d + s_1 + c_s = 48 + 14 + 6 = 68 \text{ мм}$ $\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_s}} = 68 / (1825 \cdot 11,2)^{1/2} = 0,4757$ <p>Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:</p> $b_p = 652 \text{ мм}$ <p>Средний радиус обечайки у отверстия:</p> $R_c = \frac{D_c}{2} = 1825 / 2 = 912,4 \text{ мм}$ <p>Прочность от действия давления:</p> $\Phi_p = \left \frac{p}{[p]} \right = (-0,1000) / 0,1627 = 0,6146$ <p>Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$</p>
							<p>Изм.</p> <p>Лист</p> <p>№ докум.</p> <p>Подп.</p> <p>Дата</p>

0,6146 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Расчетная схема по ГОСТ Р 52857.3-2007



Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_z = -F_R = -(-1500) = 1500 \text{ Н}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s - c)}} = 68 / (1825 \cdot (18 - 6,8)^{1/2}) = 0,4757$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 0,4757 + 0,005196 \cdot 0,4757^2 + (-0,001406) \cdot 0,4757^3 + 0 \cdot 0,4757^4 = 1,055$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4757$):

$$[F_z] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1,81\} = 156,9 \cdot (18 - 6,8)^2 \cdot \max\{1,055; 1,81\} = 3,563 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{[F_z]} \right| = |1500 / 3,563 \cdot 10^4| = 0,04210$$

Условие прочности: $\Phi_z \leq 1$

0,04210 ≤ 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:

$$M_y = M_L = 200 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 0,4757 + 0,1589 \cdot 0,4757^2 + (-0,02142) \cdot 0,4757^3 + 0,001035 \cdot 0,4757^4 = 4,59$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4757$):

$$[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4,9\} = 156,9 \cdot (18 - 6,8)^2 \cdot 68 / 4 \cdot \max\{4,59; 4,9\} = 1640 \text{ Н м}$$

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

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4757$):

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 PP				Лист
				166

$$[M_y] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 156,9 \cdot (18 - 6,8)^2 \cdot 68 / 4 \cdot \max\{5,511; 4.9\} = 1844 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((200 / 1640)^2 + (200 / 1844)^2)^{1/2} = 0,1632$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

$0,1632 \leq 1.0$. **Условие прочности выполнено**

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right|, \left|\Phi_z\right|, \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} = (\max(|0,6146 / 1 + 0,04210|; |0,04210|; |0,6146 / 1 - 0.2 \cdot 0,04210|)^2 + 0,1632^2)^{1/2} = 0,6767$$

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

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

$0,6767 \leq 1.0$. **Условие прочности выполнено**

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = (-0,1000) \cdot (48 + 14) / (4 \cdot (14 - 6)) + 4 \cdot (200^2 + 200^2)^{1/2} / (3,142 \cdot (48 + 14)^2 \cdot (14 - 6)) + 1500 / (3,142 \cdot (48 + 14) \cdot (14 - 6)) = 12,48 \text{ МПа}$$

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

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

$12,48 \text{ МПа} \leq 123,3 \text{ МПа}$. **Условие прочности выполнено**

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0,1000 / 35,19 + (200^2 + 200^2)^{1/2} / 2082 + |0| / 1,735 \cdot 10^5 = 0,1387$$

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

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

$0,1387 \leq 1.0$. **Условие устойчивости выполнено**

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, Т: 20 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,5754 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре Т = 20 °С (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]^{20} = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 300 / 1,1 = 272,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °С:

$$E = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре Т = 20 °С (условия гидроиспытаний):

Изн.	Изн. № подл.	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 РР				Лист
				167

$$[\sigma]_{10} = \eta \cdot R_{e20} / n_T = 1 \cdot 245 / 1,1 = 222,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °С:

$$E_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,5754 \cdot (48 + 2 \cdot 6) / (2 \cdot 222,7 \cdot 1 - 0,5754) = 0,07761 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 222,7 \cdot 1 \cdot (14 - 6) / (48 + 14 + 6) = 52,41 \text{ МПа}$$

$$52,41 \text{ МПа} \geq 0,5754 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 1800 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 1,901 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 48 + 2 \cdot 6 = 60 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((18 - 6,8) / 1,901 - 0,8) \cdot (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 1446 \text{ мм}$$

$d_p < d_0$: **Условие прочности выполнено**

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 160; 1,25 \cdot ((48 + 2 \cdot 6) \cdot (14 - 6))^{1/2} \} = 27,39 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 222,7 / 272,7 \} = 0,8167$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((48 + 2 \cdot 6) \cdot (14 - 6 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 142 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 712 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 142 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 56,79 \text{ мм}$$

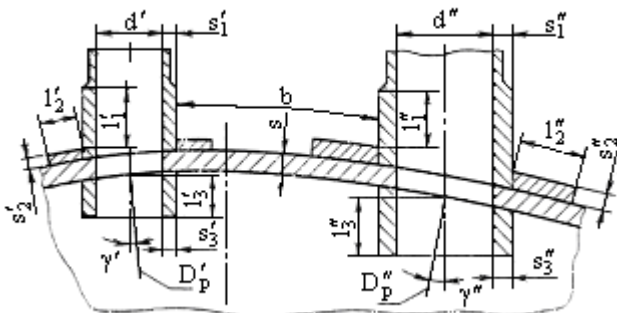
$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0,5 \cdot \frac{d_p - d_{0p}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}}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

Инов. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Отношения допускаемых напряжений					Лист 168
					Для внешней части штуцера:					
					$\chi_1 = \min \left\{ 1, 0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1, 0, 222,7 / 272,7 \} = 0,8167$					
					Расчётная длина внутренней части штуцера:					
					$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((48 + 2 \cdot 6) \cdot (14 - 6 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$					
Инов. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Ширина зоны укрепления:					Лист 168
					$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 142 \text{ мм}$					
					Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (Днище эллип- тическое (верхнее)):					
					$L_k = 712 \text{ мм}$					
					Расчётная ширина зоны укрепления:					
Инов. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	$l_p = L_0 = 142 \text{ мм}$					Лист 168
					Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:					
					$d_{op} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 56,79 \text{ мм}$					
					$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0,5 \cdot \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}} \right\}$					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 PP					Лист 168

$$= \min\{1; [1 + (27,39 * (14 - 6) * 0,8167 + 0 * 0 * 0 + 0 * (14 - 6 - 0) * 0,8167) / (142 * (18 - 6,8))] / [1 + 0,5 * (60 - 56,79) / 142 + 1 * (48 + 2 * 6) / 1800 * 1 / 1 * 27,39 / 142] = 1,093\}$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 * 1 * (18 - 6,8) * 1 * 272,7 * 1 / [1800 + (18 - 6,8) * 1] = 3,373 \text{ МПа}$$



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер Л DN50 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (1800 * (18 - 6,8))^{1/2} + (1800 * (18 - 6,8))^{1/2} = 284 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 3,373 \text{ МПа}$

$$3,373 \text{ МПа} \geq 0,5754 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5 \cdot (d_p - d_{0p}) \cdot s_p = 0,5 * (60 - 56,79) * 1,901 = 0,3047 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

$$= 27,39 * (14 - 0,07761 - 6) * 0,8167 + 0 * 0 * 0 + 0 * (14 - 6 - 0) * 0,8167 + 142 * (18 - 1,901 - 6,8)$$

$$= 0,001498 \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,3047 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \leq 0,001498 \text{ м}^2$$

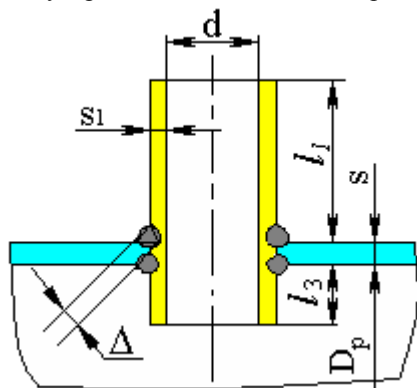
Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
К-5.00.00.000 РР			
Лист			
169			

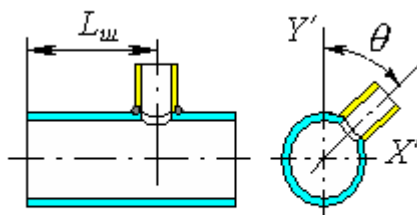
Штуцер И DN50

Исходные данные

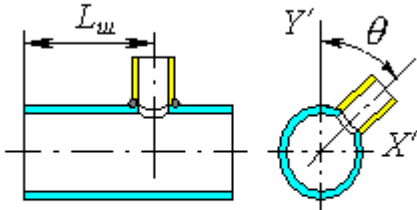
Элемент: Штуцер И DN50
Условное обозначение (метка) Штуцер И
Элемент, несущий штуцер: Обечайка цилиндрическая
Тип элемента, несущего штуцер: Обечайка цилиндрическая
Тип штуцера: Проходящий без укрепления

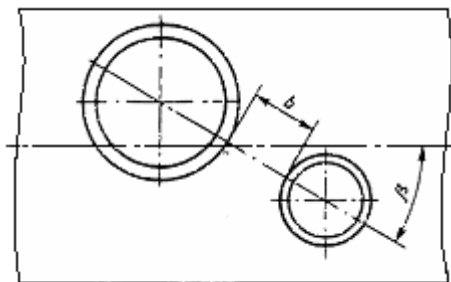


Материал несущего элемента: 09Г2С
Толщина стенки несущего элемента, s : 18 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, c : 6,8 мм
Материал штуцера: 09Г2С (КП245) Gr.
Внутренний диаметр штуцера, d : 48 мм
Толщина стенки штуцера, s_1 : 14 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c_s : 6 мм
Длина штуцера, l_1 : 160 мм



Смещение штуцера, $L_{ш}$: 140 мм
Угол поворота штуцера, θ : 195 °
Длина внутр. части штуцера, l_3 : 0 мм
Прибавка на коррозию, c_{s1} : 0 мм
Минимальный размер сварного шва, Δ : 1 мм
Расчётные параметры размещения штуцера:
Ближайший штуцер

Исх. № подл.	19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Материал штуцера:	09Г2С (КП245) Gr.	
						Внутренний диаметр штуцера, d:	48 мм	
						Толщина стенки штуцера, s ₁ :	14 мм	
						Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c _с :	6 мм	
						Длина штуцера, l ₁ :	160 мм	
<div></div>								
Исх. № подл.	19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Смещение штуцера, L _ш :	140 мм	
						Угол поворота штуцера, θ:	195 °	
						Длина внутр. части штуцера, l ₃ :	0 мм	
						Прибавка на коррозию, c _{s1} :	0 мм	
						Минимальный размер сварного шва, Δ: 1 мм		
Расчётные параметры размещения штуцера: Ближайший штуцер								
Исх. № подл.	19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	К-5.00.00.000 PP		Лист
								170
						Изм.	Лист	№ докум.



Название штуцера: Штуцер А5 DN500

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 1905 мм

Угол β : 58,36 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$\varphi_1 = 1$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$\varphi = 1$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 1800 \text{ мм}$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 150 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,4112 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 150 °C (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$[\sigma] = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min(256,5 / 1,6; 430 / 2,6) = 160,3 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °C:

$E = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 150 °C (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$[\sigma]_1 = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min(202,1 / 1,6; 430 / 2,6) = 126,3 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 150 °C:

$E_1 = 1,86 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_{\text{ш}} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,4112 \cdot (48 + 2 \cdot 6) / (2 \cdot 126,3 \cdot 1 - 0,4112) = 0,09783 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 126,3 \cdot 1 \cdot (14 - 6) / (48 + 14 + 6) = 29,72 \text{ МПа}$$

29,72 МПа \geq 0,4112 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 PP				Лист
				171

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 1800 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 2,361 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 48 + 2 \cdot 6 = 60 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((18 - 6,8) / 2,361 - 0,8) \cdot (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 1120 \text{ мм}$$

$d_p < d_0$: **Условие прочности выполнено**

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 160; 1,25 \cdot ((48 + 2 \cdot 6) \cdot (14 - 6))^{1/2} \} = 27,39 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_h}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0; 126,3 / 160,3 \} = 0,7879$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((48 + 2 \cdot 6) \cdot (14 - 6 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 142 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 162 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 142 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 56,79 \text{ мм}$$

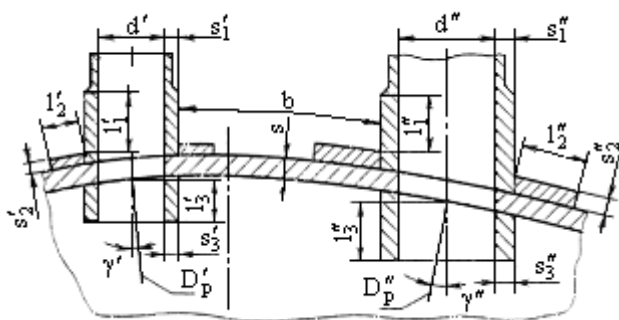
$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0,5 \cdot \frac{d_p - d_{0p}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}}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

$$= \min \{ 1; [1 + (27,39 \cdot (14 - 6) \cdot 0,7879 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (14 - 6 - 0) \cdot 0,7879) / (142 \cdot (18 - 6,8))] / [1 + 0,5 \cdot (60 - 56,79) / 142 + 1 \cdot (48 + 2 \cdot 6) / 1800 \cdot 1 / 1 \cdot 27,39 / 142] \} = 1,089$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (18 - 6,8) \cdot 1 \cdot 160,3 \cdot 1 / [1800 + (18 - 6,8) \cdot 1] = 1,983 \text{ МПа}$$

Инов. № подл.	19744.4	Подпись и дата	
Взам. инв. №		Подпись и дата	
Инов. № дубл.		Подпись и дата	
Инов. №		Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
К-5.00.00.000 PP			
Лист			
172			



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер А5 DN500 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} + (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 284 \text{ мм}$$

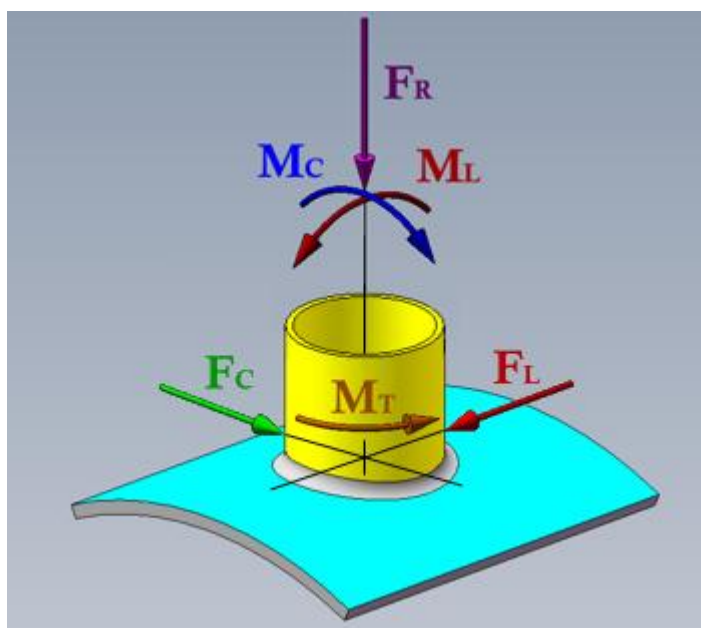
Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 1,983 \text{ МПа}$

$1,983 \text{ МПа} \geq 0,4112 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

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



Радиальная нагрузка, F_R : $(-1500) \text{ Н}$

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

Эквивалентная толщина обечайки около штуцера:

$$s_3 = s - c = 18 - 6,8 = 11,2 \text{ мм}$$

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c = 1800 + 18 + 6,8 = 1825 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
К-5.00.00.000 PP			
Лист 173			

$$d_c = d + s_1 + c_s = 48 + 14 + 6 = 68 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} = 68 / (1825 \cdot 11,2)^{1/2} = 0,4757$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 102 \text{ мм}$$

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D_c}{2} = 1825 / 2 = 912,4 \text{ мм}$$

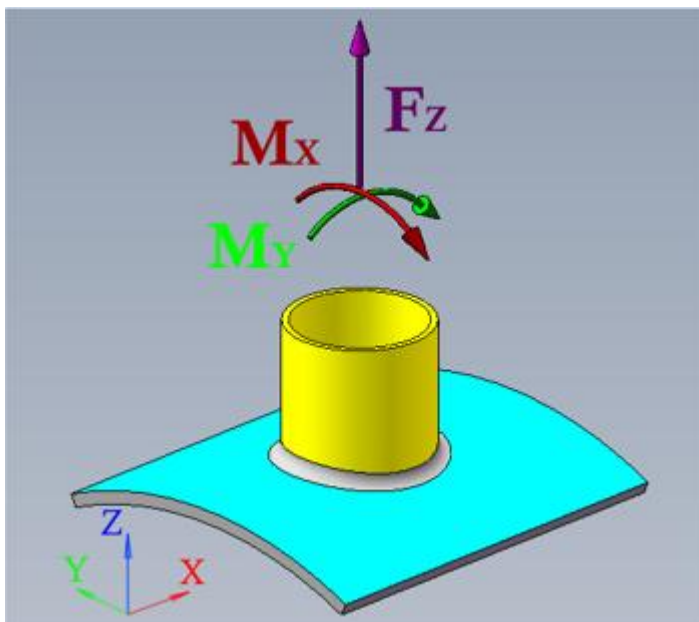
Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |0,4112 / 1,983| = 0,2074$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

0,2074 \leq 1,0. Условие прочности выполнено

Расчетная схема по ГОСТ Р 52857.3-2007



Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_z = -F_R = -(-1500) = 1500 \text{ Н}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s - c)}} = 68 / (1825 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 0,4757$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 0,4757 + 0,005196 \cdot 0,4757^2 + (-0,001406) \cdot 0,4757^3 + 0 \cdot 0,4757^4 = 1,055$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4757$):

$$[F_z] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1,81\} = 160,3 \cdot (18 - 6,8)^2 \cdot \max\{1,055; 1,81\} = 3,64 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{[F_z]} \right| = |1500 / 3,64 \cdot 10^4| = 0,04121$$

Условие прочности: $\Phi_z \leq 1$

0,04121 \leq 1,0. Условие прочности выполнено

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

Инов. № подл.	Инов. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата
19744.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
К-5.00.00.000 PP			Лист
			174

Расчётная температура, Т: 180 °С

Расчётное наружное избыточное давление, р: 0,1000 МПа

Свойства материала элемента, несущего штуцер

$[\sigma] = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{251,1 / 1,6; 435,4 / 2,6\} = 156,9 \text{ МПа}$
 Модуль продольной упругости при температуре 180 °C:
 $E = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётная толщина стенки штучера:

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия устойчивости:

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия прочности:

$$35,19 \text{ МПа} \geq 0,1000 \text{ МПа}$$

Заключение: Условие прочности и устойчивости выполнено

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 1800 \text{ mm}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 48 + 2 \cdot 6 = 60 \text{ mm}$$

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min[l_1; 1.25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)}] = \min[160; 1.25 \cdot ((48 + 2 \cdot 6) \cdot (14 - 6))^{1/2}] = 27,39 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
19744.4					$B_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{9,45}{1_1} \cdot \sqrt{100 \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 1,0; 9,45 \cdot 48 / 160 \cdot (48 / (100 \cdot (14 - 6)))^{1/2} \} = 0,6944$ <p>Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия устойчивости:</p> $[p]_e = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E_1}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_1 - c_s)}{d} \right]^{2,5} = 20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 48 / (2,4 \cdot 0,6944 \cdot 160) \cdot (100 \cdot (14 - 6) / 48)^{2,5} = 777 \text{ МПа}$ <p>Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия прочности:</p> $[p]_{\pi} = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + (s_1 - c_s)} = 2 \cdot 123,3 \cdot (14 - 6) / (48 + 14 - 6) = 35,22 \text{ МПа}$ $[p] = \frac{[p]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\pi}}{[p]_e} \right)^2}} = 35,22 / (1 + (35,22 / 777)^2)^{1/2} = 35,19 \text{ МПа}$ <p>35,19 МПа ≥ 0,1000 МПа</p> <p>Заключение: Условие прочности и устойчивости выполнено</p> <p>Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:</p> $D_p = D = 1800 \text{ мм}$ <p>Расчётный диаметр отверстия (ось штуцера совпадает с нормалью к поверхности в центре отверстия):</p> $d_p = d + 2 \cdot c_s = 48 + 2 \cdot 6 = 60 \text{ мм}$ <p>Расчётная длина внешней части штуцера:</p> $l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 160; 1,25 \cdot ((48 + 2 \cdot 6) \cdot (14 - 6))^{1/2} \} = 27,39 \text{ мм}$ <p style="text-align: center;">Отношения допускаемых напряжений</p>
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 PP

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1, 0; \frac{[\sigma]}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1, 0; 123,3 / 156,9 \} = 0,7855$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((48 + 2 \cdot 6) \cdot (14 - 6 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 142 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 162 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 142 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 56,79 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (27,39 \cdot (14 - 6) \cdot 0,7855 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (0 - 2 \cdot 6) \cdot 0,7855) / (142 \cdot (18 - 6,8))] / [1 + 0,5 \cdot (60 - 56,79) / 142 + 1 \cdot (48 + 2 \cdot 6) / 1800 \cdot 27,39 / 142] = 1,089 \}$$

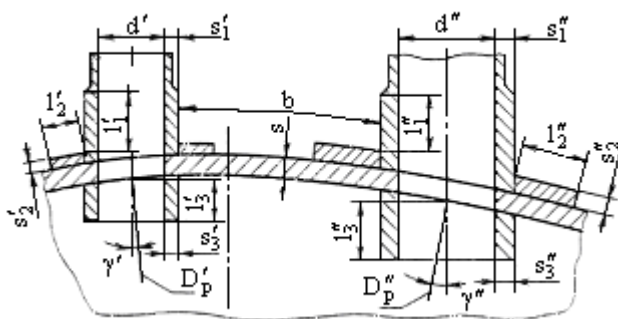
$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} = 2 \cdot 1 \cdot (18 - 6,8) \cdot 156,9 \cdot 1 / [1800 + (18 - 6,8) \cdot 1] = 1,941 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление:

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_p}{[p]_E} \right)^2}} = 1,941 / (1 + (1,941 / 0,1633)^2)^{1/2} = 0,1627 \text{ МПа}$$

где $[p]_E$ – допускаемое наружное давление в пределах упругости для элемента, несущего штуцер (см. расчёт элемента “Обечайка цилиндрическая”)



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер А5 DN500 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} + (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 284 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Инов. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 PP
					Лист
					177

Заключение: Условие прочности и устойчивости выполнено

A diagram illustrating a mechanical system. A yellow cylinder is shown on a light blue curved surface. A vertical purple arrow labeled F_R points downwards from the top of the cylinder. Two curved arrows, one blue labeled M_C and one red labeled M_L , are shown around the vertical axis. A green arrow labeled F_C points horizontally to the right, tangent to the cylinder's surface. A red arrow labeled F_L points horizontally to the left, tangent to the cylinder's surface. A brown arrow labeled M_T points horizontally to the right, along the cylinder's longitudinal axis.

Эквивалентная толщина обечайки около штуцера:

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} = 68 / (1825 \cdot 11,2)^{1/2} = 0,4757$$

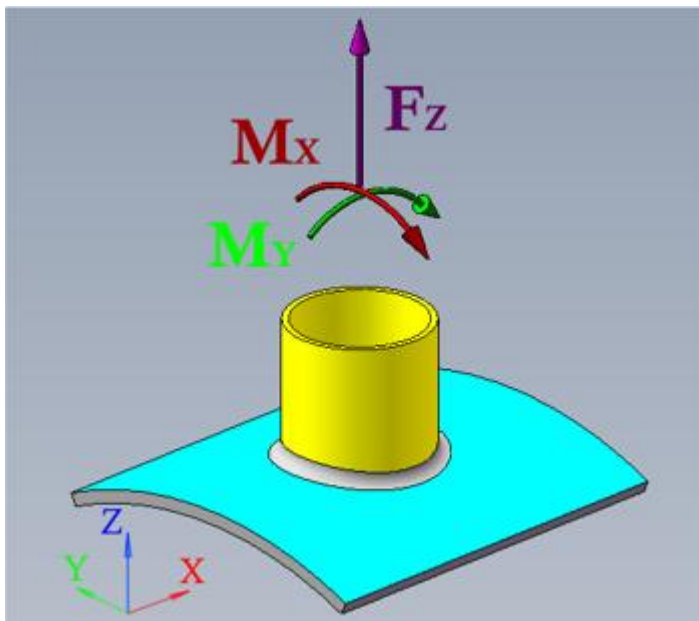
$$R_c = \frac{D_c}{2} = 1825 / 2 = 912,4 \text{ mm}$$
$$\Phi_p = \frac{p}{p} = |(-0,1000)/0,1627| = 0,6146$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

Инв. № подл.	19744.4	Подпись и дата		Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p>Продольный момент, M_L: 200 Н м</p> <p>Крутящий момент, M_T: 300 Н м</p> <p>Сдвиговая нагрузка, F_C: 1100 Н</p> <p>Сдвиговая нагрузка, F_L: 1100 Н</p> <p>Эквивалентная толщина обечайки около штуцера:</p> $s_s = s - c = 18 - 6,8 = 11,2 \text{ мм}$ <p>Средний диаметр обечайки у отверстия:</p> $D_c = D_p + s + c = 1800 + 18 + 6,8 = 1825 \text{ мм}$ <p>Средний диаметр штуцера:</p> $d_c = d + s_1 + c_s = 48 + 14 + 6 = 68 \text{ мм}$ $\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_s}} = 68 / (1825 \cdot 11,2)^{1/2} = 0,4757$ <p>Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:</p> $b_p = 102 \text{ мм}$ <p>Средний радиус обечайки у отверстия:</p> $R_c = \frac{D_c}{2} = 1825 / 2 = 912,4 \text{ мм}$ <p>Прочность от действия давления:</p> $\Phi_p = \left \frac{p}{[p]} \right = (-0,1000) / 0,1627 = 0,6146$ <p>Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$</p>
							<div> <div>Изм.</div> <div>Лист</div> <div>№ докум.</div> <div>Подп.</div> <div>Дата</div> </div> <div>К-5.00.00.000 PP</div> <div>Лист 178</div>

$0,6146 \leq 1.0$. Условие прочности выполнено

Расчетная схема по ГОСТ Р 52857.3-2007



Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$\mathbf{F_z} = -\mathbf{F_R} = -(-1500) = 1500 \text{ H}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s - c)}} = 68 / (1825 \cdot (18 - 6,8)^{1/2}) = 0,4757$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 0,4757 + 0,005196 \cdot 0,4757^2 + (-0,001406) \cdot 0,4757^3 + 0 \cdot 0,4757^4 = 1,055$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4757$):

$$[F_r] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1.81\} = 156,9 \cdot (18 - 6,8)^2 \cdot \max\{1,055; 1.81\} = 3,563 \cdot 10^4 \text{ H}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{F_x} \right| = |1500 / 3,563 \cdot 10^4| = 0,04210$$

Условие прочности: $\Phi_x \leq 1$

$0,04210 \leq 1.0$. Условие прочности выполнено

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_x = M_c = 200 \text{ H}_M$$

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_y = M_L = 200 \text{ H}_M$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 0,4757 + 0,1589 \cdot 0,4757^2 + (-0,02142) \cdot 0,4757^3 + 0,001035 \cdot 0,4757^4 = 4,59$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4757$):

$$[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 156,9 \cdot (18 - 6,8)^2 \cdot 68 / 4 \cdot \max\{4,59; 4,9\} = 1640 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

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

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4757$):

Инв. № подл.	19744.4	Подпись и дата		Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 0,4757 + 0,005196 \cdot 0,4757^2 + (-0,001406) \cdot 0,4757^3 + 0 \cdot 0,4757^4 = 1,055$ <p>Допускаемое осевое усилие на штуцер при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4757$):</p> $[F_z] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1,81\} = 156,9 \cdot (18 - 6,8)^2 \cdot \max\{1,055; 1,81\} = 3,563 \cdot 10^4 \text{ Н}$ <p>Прочность от действия осевой нагрузки:</p> $\Phi_z = \left \frac{F_z}{[F_z]} \right = 1500 / 3,563 \cdot 10^4 = 0,04210$ <p>Условие прочности: $\Phi_z \leq 1$</p> $0,04210 \leq 1,0. \text{ Условие прочности выполнено}$ <p>Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:</p> $M_x = M_c = 200 \text{ Н м}$ <p>Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:</p> $M_y = M_L = 200 \text{ Н м}$ $C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 0,4757 + 0,1589 \cdot 0,4757^2 + (-0,02142) \cdot 0,4757^3 + 0,001035 \cdot 0,4757^4 = 4,59$ <p>Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4757$):</p> $[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4,9\} = 156,9 \cdot (18 - 6,8)^2 \cdot 68 / 4 \cdot \max\{4,59; 4,9\} = 1640 \text{ Н м}$ $C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 5,511$ <p>Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4757$):</p>
							<div> <div>Изм.</div> <div>Лист</div> <div>№ докум.</div> <div>Подп.</div> <div>Дата</div> </div> <div>К-5.00.00.000 PP</div> <div>Лист 179</div>

$$[M_y] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 156,9 * (18 - 6,8)^2 * 68 / 4 * \max\{5,511; 4.9\} = 1844 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((200 / 1640)^2 + (200 / 1844)^2)^{1/2} = 0,1632$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

$0,1632 \leq 1.0$. **Условие прочности выполнено**

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right|, \left|\Phi_z\right|, \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} = (\max(|0,6146 / 1 + 0,04210|; |0,04210|; |0,6146 / 1 - 0.2 * 0,04210|)^2 + 0,1632^2)^{1/2} = 0,6767$$

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

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

$0,6767 \leq 1.0$. **Условие прочности выполнено**

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = (-0,1000) * (48 + 14) / (4 * (14 - 6)) + 4 * (200^2 + 200^2)^{1/2} / (3,142 * (48 + 14)^2 * (14 - 6)) + 1500 / (3,142 * (48 + 14) * (14 - 6)) = 12,48 \text{ МПа}$$

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

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

$12,48 \text{ МПа} \leq 123,3 \text{ МПа}$. **Условие прочности выполнено**

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0,1000 / 35,19 + (200^2 + 200^2)^{1/2} / 2082 + |0| / 1,735 \cdot 10^5 = 0,1387$$

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

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

$0,1387 \leq 1.0$. **Условие устойчивости выполнено**

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, Т: 20 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,7034 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре Т = 20 °С (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]^{20} = \eta * R_{e/20} / n_T = 1 * 300 / 1,1 = 272,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °С:

$$E = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

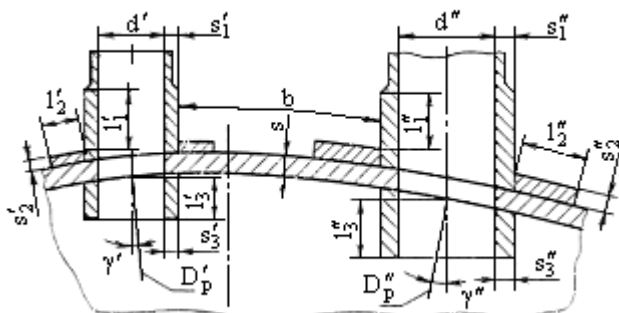
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре Т = 20 °С (условия гидроиспытаний):

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Инов. № подл.
19744.4							
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 РР		
					Лист		
					180		

$$= \min\{1; [1 + (27,39 * (14 - 6) * 0,8167 + 0 * 0 * 0 + 0 * (14 - 6 - 0) * 0,8167) / (142 * (18 - 6,8))] / [1 + 0,5 * (60 - 56,79) / 142 + 1 * (48 + 2 * 6) / 1800 * 1 / 1 * 27,39 / 142] = 1,093\}$$

= 1

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 * 1 * (18 - 6,8) * 1 * 272,7 * 1 / [1800 + (18 - 6,8) * 1] = 3,373 \text{ МПа}$$



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер A5 DN500 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (1800 * (18 - 6,8))^{1/2} + (1800 * (18 - 6,8))^{1/2} = 284 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 3,373 \text{ МПа}$

$3,373 \text{ МПа} \geq 0,7034 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0,5 * (60 - 56,79) * 2,324 = 0,3725 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

$$A_a = 1_p \cdot (s_1 - s_p - c_s) \cdot \chi_1 + 1_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + 1_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + 1_p \cdot (s - s_p - c) \\ = 27,39 * (14 - 0,09489 - 6) * 0,8167 + 0 * 0 * 0 + 0 * (14 - 6 - 0) * 0,8167 + 142 * (18 - 2,324 - 6,8) \\ = 0,001437 \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,3725 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \leq 0,001437 \text{ м}^2$$

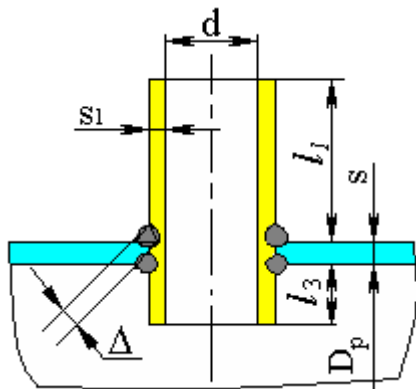
Заключение: **Условие прочности выполнено**

Штуцер К DN50

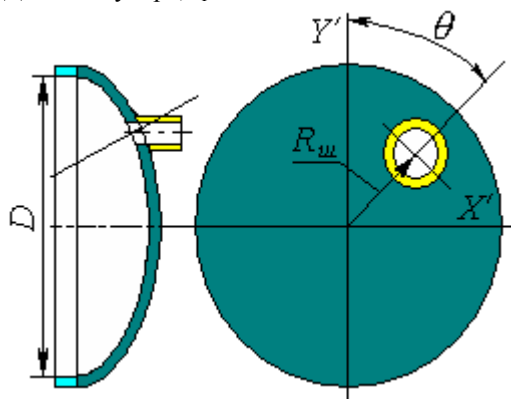
Исходные данные

Элемент: Штуцер К DN50
Условное обозначение (метка) Штуцер К
Элемент, несущий штуцер: Днище эллиптическое (верхнее)
Тип элемента, несущего штуцер: Днище эллиптическое
Тип штуцера: Проходящий без укрепления

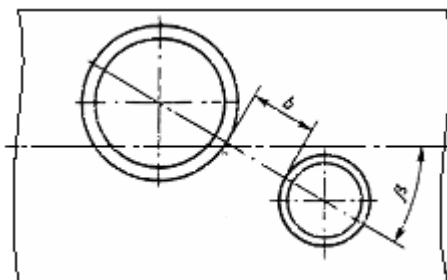
Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
К-5.00.00.000 PP			
Лист			
182			



Материал несущего элемента: 09Г2С
Толщина стенки несущего элемента, s : 18 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, c : 9,5 мм
Материал штуцера: 09Г2С (КП245) Gr.
Внутренний диаметр штуцера, d : 48 мм
Толщина стенки штуцера, s_1 : 14 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c_s : 6 мм
Длина штуцера, l_1 : 170 мм



Смещение штуцера, $R_{ш}$: 520 мм
Угол поворота штуцера, θ : 225 °
Полученный угол наклона штуцера, γ : (-19,31) °
Длина внутр. части штуцера, l_3 : 0 мм
Прибавка на коррозию, c_{s1} : 0 мм
Минимальный размер сварного шва, Δ : 1 мм
Расчётные параметры размещения штуцера:
Ближайший штуцер



Название штуцера: Штуцер В DN300
Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b : 322 мм

Инов. № подл.	Подпись и дата
19744.4	
Инов. № дубл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Подпись и дата
Инов. № подл.	Подпись и дата
19744.4	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

К-5.00.00.000 PP

Угол β : 0 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$$\varphi_1 = 1$$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$$\varphi = 1$$

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища:

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{ш}^2} = 1800^2 / (2 \cdot 450) \cdot (1 - 4 \cdot (1800^2 - 4 \cdot 450^2) \cdot 520^2 / 1800^4)^{1/2} = 3117 \text{ мм}$$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 150 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,4 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 150 °C (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma] = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{256,5 / 1,6; 430 / 2,6\} = 160,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 150 °C:

$$E = 1,86 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 150 °C (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma]_1 = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{202,1 / 1,6; 430 / 2,6\} = 126,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 150 °C:

$$E_1 = 1,86 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_{ш} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,4 \cdot (48 + 2 \cdot 6) / (2 \cdot 126,3 \cdot 1 - 0,4) = 0,09515 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 126,3 \cdot 1 \cdot (14 - 6) / (48 + 14 + 6) = 29,72 \text{ МПа}$$

$$29,72 \text{ МПа} \geq 0,4 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища:

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{ш}^2} = 1800^2 / (2 \cdot 450) \cdot (1 - 4 \cdot (1800^2 - 4 \cdot 450^2) \cdot 520^2 / 1800^4)^{1/2} = 3117 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 1,945 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия (смещённый штуцер на эллиптическом днище):

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 PP				Лист
				184

$$d_p = \frac{d + 2 \cdot c_s}{\sqrt{1 - \left(\frac{2 \cdot R_{\text{III}}}{D_p} \right)^2}} = (48 + 2 \cdot 6) / [1 - (2 \cdot 520 / 3117)^2]^{1/2} = 63,65 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((18 - 9,5) / 1,945 - 0,8) \cdot (3117 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 1162 \text{ мм}$$

$d_p < d_0$: **Условие прочности выполнено**

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 170; 1,25 \cdot ((48 + 2 \cdot 6) \cdot (14 - 6))^{1/2} \} = 27,39 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0; 126,3 / 160,3 \} = 0,7879$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((48 + 2 \cdot 6) \cdot (14 - 6 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3117 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 162,8 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 162,8 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

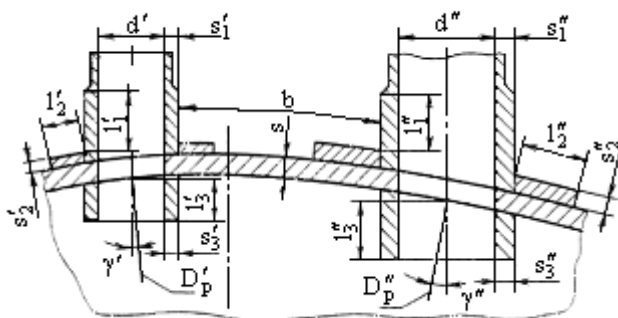
$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (3117 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 65,11 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (27,39 \cdot (14 - 6) \cdot 0,7879 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (14 - 6 - 0) \cdot 0,7879) / (162,8 \cdot (18 - 9,5))] / [1 + 0,5 \cdot (63,65 - 65,11) / 162,8 + 2 \cdot (48 + 2 \cdot 6) / 3117 \cdot 1 / 1 \cdot 27,39 / 162,8] \} = 1,123 \}$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 2 \cdot (18 - 9,5) \cdot 1 \cdot 160,3 \cdot 1 / [3117 + (18 - 9,5) \cdot 1] = 1,744 \text{ МПа}$$



Подпись и дата

Инов. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инов. № подл.
19744.4

К-5.00.00.000 PP

Лист

185

Изм. Лист № докум. Подп. Дата

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

Допускаемые напряжения в соответствии с ГОСТ Р 52857.1-2007 и ГОСТ Р 52857.10-2007

Уровень разбивки - 1

Коэффициент запаса, учитывающий уровень разбивки: $K_m = 1,3$

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые растягивающие напряжения при температуре 150 °С в условиях коррозионно-активной среды, группа аппарата III, IV:

$$[s]^s = \frac{1}{K_m} \cdot \eta \cdot \min \left\{ \frac{R_e}{1.6}; \frac{R_m}{2.6} \right\} = 1 / 1,3 * 1 * \min (256,5 / 1.6; 430 / 2.6) = 123,3 \text{ МПа}$$

Номинальные допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре 150 °С:

$$[s] = \frac{[\sigma]_s}{K_m} = 171 / 1,3 = 131,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 150 °С:

$$E = 1,86 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые растягивающие напряжения при температуре 150 °С в условиях коррозионно-активной среды, группа аппарата III, IV:

$$[s]_1^s = \frac{1}{K_m} \cdot \eta \cdot \min \left\{ \frac{R_e}{1.6}; \frac{R_m}{2.6} \right\} = 1 / 1,3 * 1 * \min (202,1 / 1.6; 430 / 2.6) = 97,16 \text{ МПа}$$

Номинальные допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре 150 °С:

$$[s]_1 = \frac{1}{K_m} \cdot \min \left\{ \frac{R_e}{1.5}; \frac{R_m}{2.4} \right\} = 1 / 1,3 * \min \{ 202,1 / 1.5; 430 / 2.4 \} = 103,6 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 150 °С:

$$E_1 = 1,86 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4						
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 РР	
					Лист	
					187	

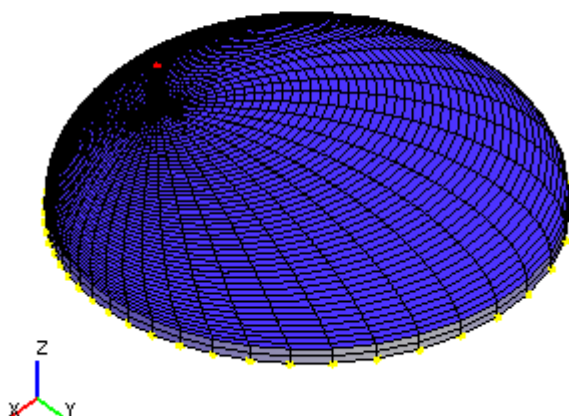


Рис. 1. Конечно-элементная модель узла врезки

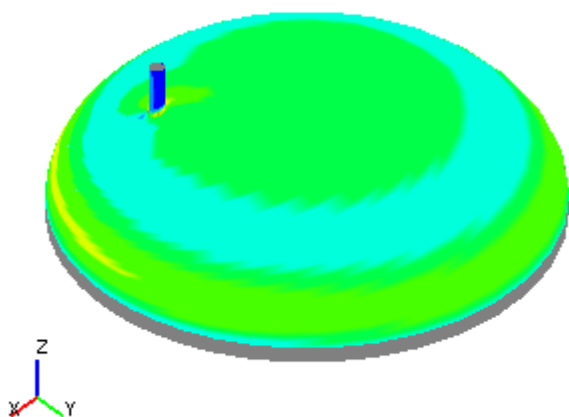
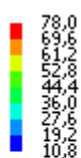


Рис. 2. Эквивалентные мембранные напряжения от совместного действия сил и давления, МПа.
Заключение:

Для несущего элемента $\sigma_{\text{мл max}} = 68,31 \text{ МПа} \leq 1,5[s] = 197,3 \text{ МПа}$.
Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Для штуцера $\sigma_{\text{мл max}} = 78,04 \text{ МПа} \leq 1,5[s]_1 = 155,5 \text{ МПа}$.
Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	К-5.00.00.000 РР					Лист
										188
19744.4					Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

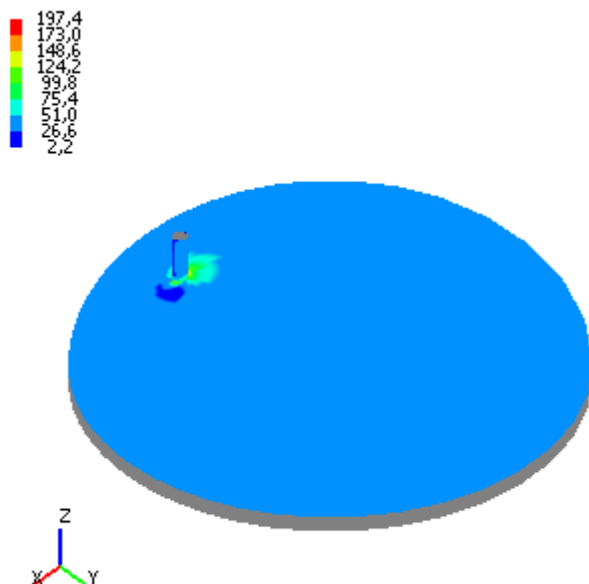


Рис. 3. Общие (мембранные и изгибные) напряжения на внешней поверхности, МПа.
Заключение:

Для несущего элемента $\sigma_{mb\ max} = 197,4\ \text{МПа} \leq 3[s] = 394,6\ \text{МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Для штуцера $\sigma_{mb\ max} = 160,8\ \text{МПа} \leq 3[s]_1 = 310,9\ \text{МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

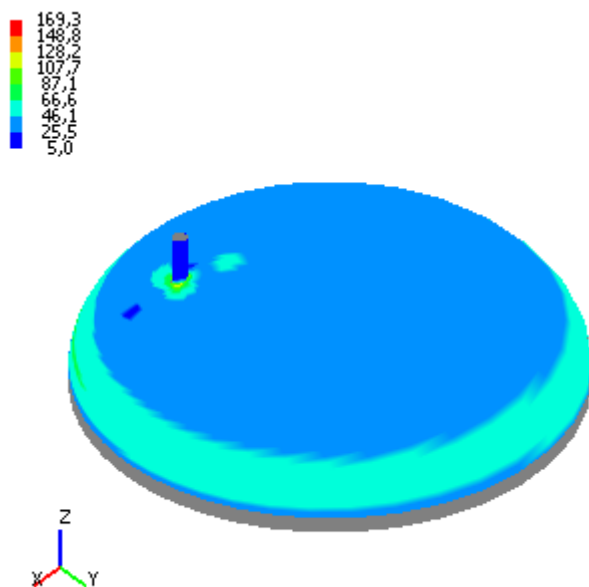


Рис. 4. Общие (мембранные и изгибные) напряжения на внутренней поверхности, МПа.
Заключение:

Для несущего элемента $\sigma_{mb\ max} = 137,9\ \text{МПа} \leq 3[s] = 394,6\ \text{МПа}$.

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 РР				Лист
				189

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Для штуцера $\sigma_{\text{mb max}} = 169,3 \text{ МПа} \leq 3[s]_1 = 310,9 \text{ МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

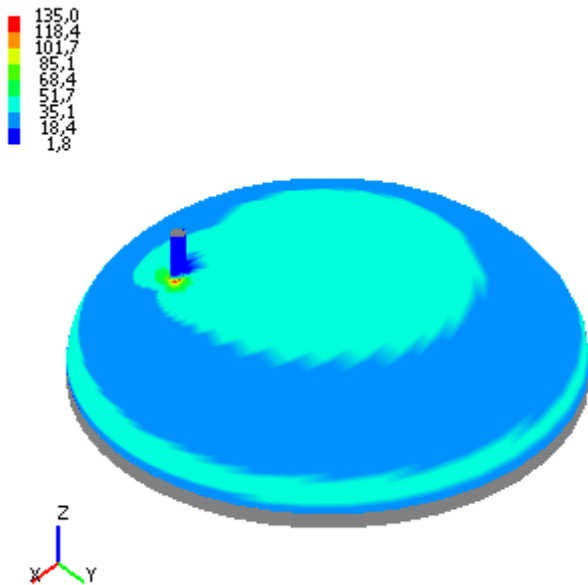


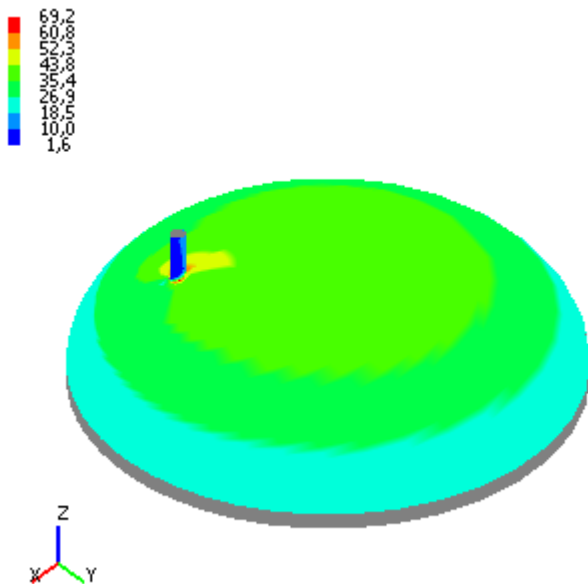
Рис. 5. Общие (мембранные и изгибные) растягивающие напряжения на внутренней поверхности, МПа.
Заключение:

Для несущего элемента $\sigma_{\text{in max}} = 135 \text{ МПа} \leq 3[s]^s = 370 \text{ МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Для штуцера $\sigma_{\text{in max}} = 106,5 \text{ МПа} \leq 3[s]_1^s = 291,5 \text{ МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.



Инов. № подл.		Подпись и дата		Инов. № дубл.		Подпись и дата	
19744.4							
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 РР		
					Лист		
					190		

Для несущего элемента $\sigma_{1\text{н. макс}} = 133 \text{ МПа} \leq 3[s]_1^s = 370 \text{ МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Для штуцера $\sigma_{1\text{н. макс}} = 106,5 \text{ МПа} \leq 3[s]_1^s = 291,5 \text{ МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

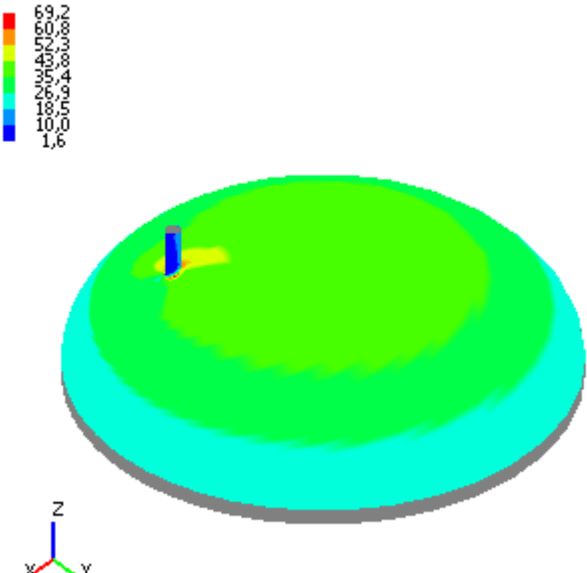


Рис. 6. Мембранные растягивающие напряжения от совместного действия сил и давления, МПа.
Заключение:

Для несущего элемента $\sigma_{\text{н. макс}} = 66,09 \text{ МПа} \leq 1.5[s]^s = 185 \text{ МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Для штуцера $\sigma_{\text{н. макс}} = 69,21 \text{ МПа} \leq 1.5[s]_1^s = 145,7 \text{ МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Общее заключение: **Условия прочности выполнены.**

Допускаемые индивидуальные нагрузки на штуцер при отсутствии действия остальных, включая давление*

$F_x, \text{ Н}$	$F_y, \text{ Н}$	$F_z, \text{ Н}$	$M_x, \text{ Н м}$	$M_y, \text{ Н м}$	$M_z, \text{ Н м}$	$p, \text{ МПа}$
$4,535 \cdot 10^4$	$4,535 \cdot 10^4$	$2,422 \cdot 10^4$	703,7	703,7	1646	1,291

* При превышении любого компонента требуется усиление врезки, либо уменьшение нагрузки

Допускаемые нагрузки на штуцер при расчетном давлении**

$F_x, \text{ Н}$	$F_y, \text{ Н}$	$F_z, \text{ Н}$	$M_x, \text{ Н м}$	$M_y, \text{ Н м}$	$M_z, \text{ Н м}$	$p, \text{ МПа}$
7826	7826	4180	121,4	121,4	284	0,4

** При превышении одного или нескольких компонентов необходим дополнительный расчёт на прочность

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения:

Расчётная температура, Т: 180 °С

Расчётное наружное избыточное давление, р: 0,1000 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре Т = 180 °С (расчётные условия (наружное давление), коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$[\sigma] = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{251,1 / 1,6; 435,4 / 2,6\} = 156,9 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °С:

$E = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре Т = 180 °С (расчётные условия (наружное давление), коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$[\sigma]_1 = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{197,2 / 1,6; 435,4 / 2,6\} = 123,3 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °С:

$E_1 = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_{\text{ш}} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 - p} = 0,1000 \cdot (48 + 2 \cdot 6) / (2 \cdot 123,3 - 0,1000) = 0,02435 \text{ мм}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	К-5.00.00.000 РР					Лист
19744.4										191
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

$$B_1 = \min \left\{ 1,0, 9,45 \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \sqrt{\frac{d}{100 \cdot (s_1 - c_s)}} \right\} = \min \{ 1,0, 9,45 \cdot 48 / 170 \cdot (48 / (100 \cdot (14 - 6)))^{1/2} \} = 0,6536$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия устойчивости:

$$[p]_e = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E_1}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_1 - c_s)}{d} \right]^{2,5} = 20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 48 / (2,4 \cdot 0,6536 \cdot 170) \cdot (100 \cdot (14 - 6) / 48)^{2,5} = 777 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия прочности:

$$[p]_n = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + (s_1 - c_s)} = 2 \cdot 123,3 \cdot (14 - 6) / (48 + 14 - 6) = 35,22 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_n}{[p]_e} \right)^2}} = 35,22 / (1 + (35,22 / 777)^2)^{1/2} = 35,19 \text{ МПа}$$

35,19 МПа ≥ 0,1000 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища:

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{ш}^2} = 1800^2 / (2 \cdot 450) \cdot (1 - 4 \cdot (1800^2 - 4 \cdot 450^2) \cdot 520^2 / 1800^4)^{1/2} = 3117 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия (смещённый штуцер на эллиптическом днище):

$$d_p = \frac{d + 2 \cdot c_s}{\sqrt{1 - \left(\frac{2 \cdot R_{ш}}{D_p} \right)^2}} = (48 + 2 \cdot 6) / [1 - (2 \cdot 520 / 3117)^2]^{1/2} = 63,65 \text{ мм}$$

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 170; 1,25 \cdot ((48 + 2 \cdot 6) \cdot (14 - 6))^{1/2} \} = 27,39 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 123,3 / 156,9 \} = 0,7855$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((48 + 2 \cdot 6) \cdot (14 - 6 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3117 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 162,8 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 162,8 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (3117 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 65,11 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (27,39 \cdot (14 - 6) \cdot 0,7855 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (0 - 2 \cdot 6) \cdot 0,7855) / (162,8 \cdot (18 - 9,5))] / [1 + 0,5 \cdot (63,65 - 65,11) / 162,8 + 2 \cdot (48 + 2 \cdot 6) / 3117] \}$$

Инв. № подл.	19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 PP
					Лист 192

$$6) / 3117 * 27,39 / 162,8] = 1,122\}$$

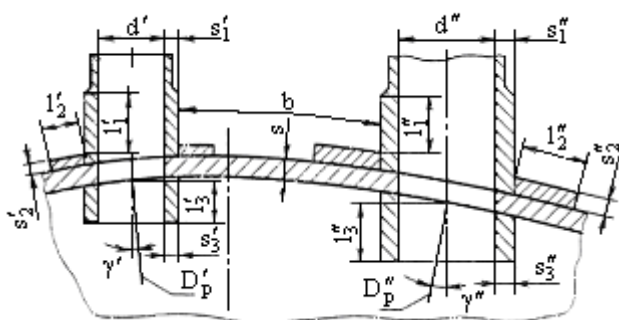
$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 * 2 * (18 - 9,5) * 156,9 * 1 / [3117 + (18 - 9,5) * 1] = 1,707 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление:

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_p}{[p]_E}\right)^2}} = 1,707 / (1 + (1,707 / 0,4813)^2)^{1/2} = 0,4632 \text{ МПа}$$

где $[P]_E$ – допускаемое наружное давление в пределах упругости для элемента, несущего штуцер (см. расчёт элемента “Днище эллиптическое (верхнее)”))



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер В DN300 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D'_p \cdot (s - c)} + \sqrt{D''_p \cdot (s - c)} = (3117 * (18 - 9,5))^{1/2} + (3600 * (18 - 9,5))^{1/2} = 337,7 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, требуется дополнительный расчёт укреплений.

$$K_3 = 1$$

$$V_1 = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l'_{1p} \cdot (s'_1 - c'_s) \cdot \chi'_1 + l'_{2p} \cdot s'_2 \cdot \chi'_2 + l'_{3p} \cdot (s'_3 - c'_s - c'_{s1}) \cdot \chi'_3 + l'_{1p} \cdot (s''_1 - c''_s - c''_{s1}) \cdot \chi''_1 + l'_{2p} \cdot s''_2 \cdot \chi''_2 + l'_{3p} \cdot (s''_3 - c''_s - c''_{s1}) \cdot \chi''_3}{b \cdot (s - c)}}{K_3 \left(0,8 + \frac{d'_p + d''_p}{2 \cdot b} \right) + K_1 \left(\frac{d' + 2 \cdot c'_s}{D'_p} \cdot \frac{l'_{1p}}{b} + \frac{d'' + 2 \cdot c''_s}{D''_p} \cdot \frac{l'_{1p}}{b} \right)} \right\}$$

$$= \min \{ 1; (1 + [(27,39 * (14 - 6) * 0,7855 + 0 * 0 * 0 + 0 * (14 - 6 - 0) * 0,7855 + 69,93 * (16 - 6) * 0,7855 + 80 * 12 * 1 + 0 * (16 - 6 - 0) * 0,7855) / (322 * (18 - 9,5))] / (1 * (0,8 + (63,65 + 313) / (2 * 322) + 2 * [(48 + 2 * 6) / 3117 * 27,39 / 322 + [(301 + 2 * 6) / 3600 * 69,93 / 322]])) = 1,132\}$$

$$= 1$$

$$[p]_E = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{0,5 \cdot (D'_p + D''_p) + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2 * 2 * (18 - 9,5) * 156,9 / [0,5 * (3117 + 3600) + (18 - 9,5) * 1] * 1 = 1,585 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_E}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_E}{[p]_E}\right)^2}} = 1,585 / (1 + (1,585 / 0,4813)^2)^{1/2} = 0,4605 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление $[p] = \min \{ 0,4632; 0,4605 \}$ МПа

0,4605 МПа \geq 0,1000 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Инов. № подл.	19744.4	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 PP				Лист
				193

Свойства материала штуцера

Допускаемые растягивающие напряжения при температуре 180 °С в условиях коррозионно-активной среды, группа аппарата III, IV:

$$[s]_1^s = \frac{1}{K_m} \cdot \eta \cdot \min \left\{ \frac{R_e}{1.6}; \frac{R_m}{2.6} \right\} = 1 / 1,3 * 1 * \min (197,2 / 1.6; 435,4 / 2.6) = 94,83 \text{ МПа}$$

Номинальные допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре 180 °С:

$$[s]_1 = \frac{1}{K_m} \cdot \min \left\{ \frac{R_e}{1.5}; \frac{R_m}{2.4} \right\} = 1 / 1,3 * \min \{197,2 / 1.5; 435,4 / 2.4\} = 101,1 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °С:

$$E_1 = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

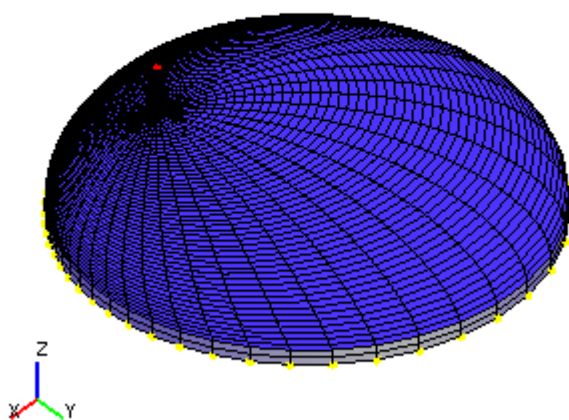
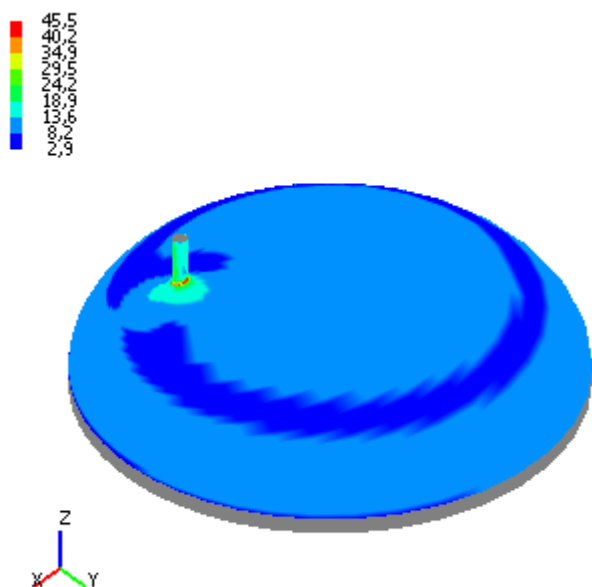


Рис. 1. Конечно-элементная модель узла врезки



Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 РР				Лист
				195

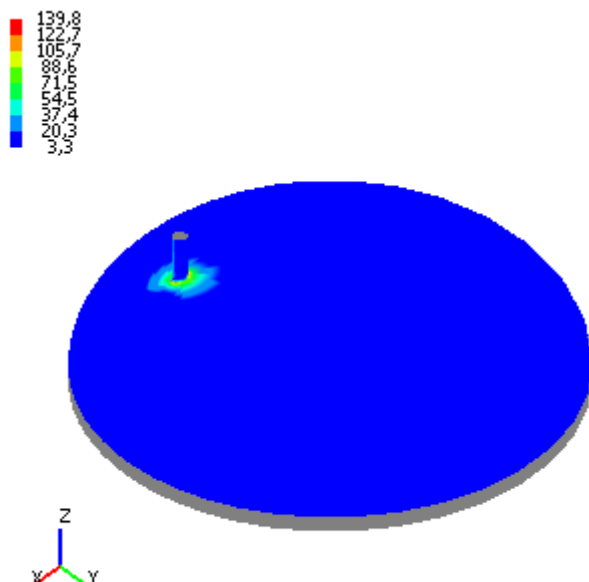


Рис. 4. Общие (мембранные и изгибные) напряжения на внутренней поверхности, МПа.
Заключение:

Для несущего элемента $\sigma_{mb\ max} = 134,7\ \text{МПа} \leq 3[s] = 386,3\ \text{МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Для штуцера $\sigma_{mb\ max} = 139,8\ \text{МПа} \leq 3[s]_1 = 303,4\ \text{МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

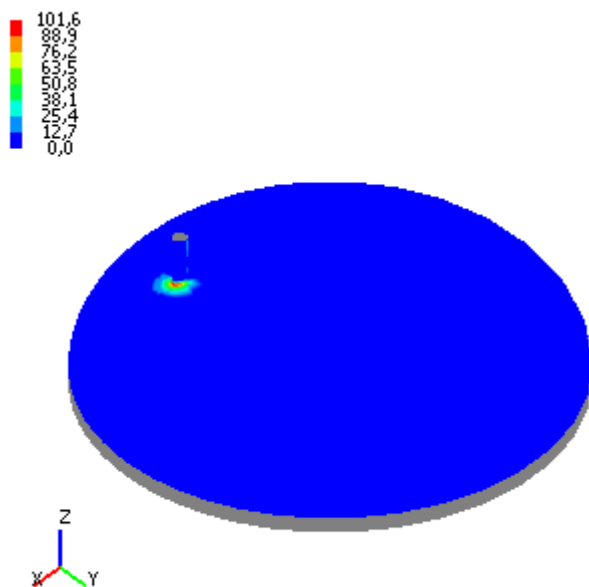


Рис. 5. Общие (мембранные и изгибные) растягивающие напряжения на внутренней поверхности, МПа.
Заключение:

Для несущего элемента $\sigma_{tr\ max} = 101,6\ \text{МПа} \leq 3[s]^s = 362,2\ \text{МПа}$.

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 РР				Лист
				197

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Для штуцера $\sigma_{\text{in max}} = 100,8 \text{ МПа} \leq 3[s]_1^s = 284,5 \text{ МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

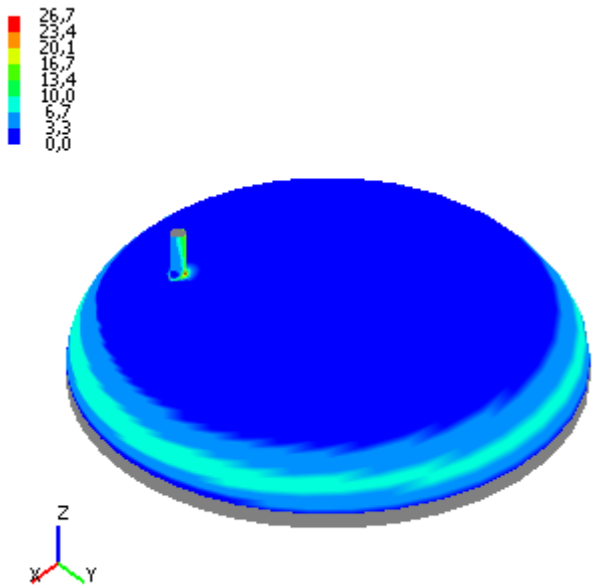


Рис. 6. Мембранные растягивающие напряжения от совместного действия сил и давления, МПа.
Заключение:

Для несущего элемента $\sigma_{\text{in max}} = 20,7 \text{ МПа} \leq 1.5[s]^s = 181,1 \text{ МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Для штуцера $\sigma_{\text{in max}} = 26,74 \text{ МПа} \leq 1.5[s]_1^s = 142,2 \text{ МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Общее заключение: Условия прочности выполнены.

Допускаемые индивидуальные нагрузки на штуцер при отсутствии действия остальных, включая давление *

$F_x, \text{ Н}$	$F_y, \text{ Н}$	$F_z, \text{ Н}$	$M_x, \text{ Н м}$	$M_y, \text{ Н м}$	$M_z, \text{ Н м}$	$p, \text{ МПа}$
$4,426 \cdot 10^4$	$4,426 \cdot 10^4$	$2,364 \cdot 10^4$	686,8	686,8	1606	(-1,306)

* При превышении любого компонента требуется усиление врезки, либо уменьшение нагрузки

Допускаемые нагрузки на штуцер при расчетном давлении **

$F_x, \text{ Н}$	$F_y, \text{ Н}$	$F_z, \text{ Н}$	$M_x, \text{ Н м}$	$M_y, \text{ Н м}$	$M_z, \text{ Н м}$	$p, \text{ МПа}$
$1,022 \cdot 10^4$	$1,022 \cdot 10^4$	5458	158,6	158,6	370,9	(-0,1000)

** При превышении одного или нескольких компонентов необходим дополнительный расчёт на прочность

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

Изн.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 РР	Лист
19744.4						198

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, T: 20 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,5642 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 20 °C (условия гидротестирования):

$$[\sigma]^{20} = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 300 / 1,1 = 272,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:

$$E = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 20 °C (условия гидротестирования):

$$[\sigma]^{20}_1 = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 245 / 1,1 = 222,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:

$$E_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \phi_1 - p} = 0,5642 \cdot (48 + 2 \cdot 6) / (2 \cdot 222,7 \cdot 1 - 0,5642) = 0,07608 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \phi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 222,7 \cdot 1 \cdot (14 - 6) / (48 + 14 + 6) = 52,41 \text{ МПа}$$

$$52,41 \text{ МПа} \geq 0,5642 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища:

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{ш}^2} = 1800^2 / (2 \cdot 450) \cdot (1 - 4 \cdot (1800^2 - 4 \cdot 450^2) \cdot 520^2 / 1800^4)^{1/2} = 3117 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 1,613 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия (смещённый штуцер на эллиптическом днище):

$$d_p = \frac{d + 2 \cdot c_s}{\sqrt{1 - \left(\frac{2 \cdot R_{ш}}{D_p} \right)^2}} = (48 + 2 \cdot 6) / [1 - (2 \cdot 520 / 3117)^2]^{1/2} = 63,65 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((18 - 9,5) / 1,613 - 0,8) \cdot (3117 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 1455 \text{ мм}$$

$d_p < d_0$: **Условие прочности выполнено**

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 170; 1,25 \cdot ((48 + 2 \cdot 6) \cdot (14 - 6))^{1/2} \} = 27,39 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 222,7 / 272,7 \} = 0,8167$$

Инов. № подл.	Подпись и дата
19744.4	
Изм.	Лист
№ докум.	Подп.
Дата	

K-5.00.00.000 PP

Лист

199

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \{ l_{3s}; 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \} = \min \{ 0; 0.5 \cdot ((48 + 2 \cdot 6) \cdot (14 - 6 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ mm}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3117 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 162,8 \text{ mm}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 162,8 \text{ mm}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

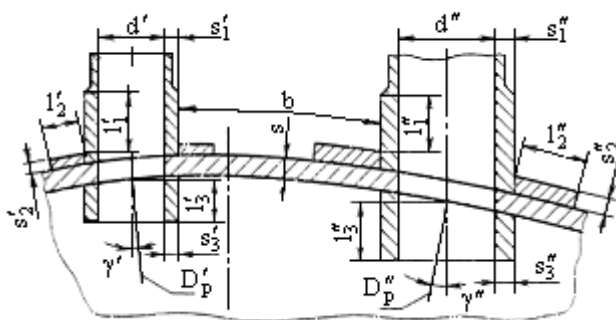
$$d_{op} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (3117 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 65,11 \text{ mm}$$

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

$$= \min\{1; [1 + (27,39 * (14 - 6) * 0,8167 + 0 * 0 * 0 + 0 * (14 - 6 - 0) * 0,8167) / (162,8 * (18 - 9,5))] / [1 + 0,5 * (63,65 - 65,11) / 162,8 + 2 * (48 + 2 * 6) / 3117 * 1 / 1 * 27,39 / 162,8]\} = \mathbf{1,127}$$

$$= \mathbf{1}$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 2 \cdot (18 - 9,5) \cdot 1 \cdot 272,7 \cdot 1 / [3117 + (18 - 9,5) \cdot 1] = 2,967 \text{ МПа}$$



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер В DN300 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_b' \cdot (s-c)} + \sqrt{D_b'' \cdot (s-c)} = (3117 \cdot (18-9,5))^{1/2} + (3600 \cdot (18-9,5))^{1/2} = 337,7 \text{ mm}$$

Условие не выполнено, требуется дополнительный расчёт укреплений.

$$\mathbf{K}_3 = \mathbf{1}$$

$$V_1 = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{1'_{1p} \cdot (s'_1 - c'_s) \cdot \chi'_1 + 1'_{2p} \cdot s'_2 \cdot \chi'_2 + 1'_{3p} \cdot (s'_3 - c'_s - c'_{s1}) \cdot \chi'_3 + 1''_{1p} \cdot (s''_1 - c_s) \cdot \chi''_1 + 1''_{2p} \cdot s''_2 \cdot \chi''_2 + 1''_{3p} \cdot (s''_3 - c_s - c'_{s1}) \cdot \chi''_3}{b \cdot (s - c)} \right.$$

$$= \min\{1; (1 + [(27,39 * (14 - 6) * 0,8167 + 0 * 0 * 0 + 0 * (14 - 6 - 0) * 0,8167 + 69,93 * (16 - 6) * 0,8167 + 80 * 12 * 1 + 0 * (16 - 6 - 0) * 0,8167) / (322 * (18 - 9,5))]) / (1 * (0,8 + (63,65 + 313) / (2 * 322) + 2 * [(48 + 2 * 6) / 3117 * 1 / 1 * 27,39 / 322 + [(301 + 2 * 6) / 3600 * 1 / 1 * 69,93 / 322] - 1))\} = \mathbf{1,139}$$

$$= \mathbf{1}$$

Интв. № подл.	19744.4	Подпись и дата		Подпись и дата	
Интв. № дубл.		Взам. интв. №		Интв. № дубл.	
Подпись и дата					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер В DN300 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (3117 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} + (3600 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 337,7 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, требуется дополнительный расчёт укреплений.

$K_3 = 1$

$$V_1 = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p}' \cdot (s_1' - c_s') \cdot \chi_1' + l_{2p}' \cdot s_2' \cdot \chi_2' + l_{3p}' \cdot (s_3' - c_s' - c_{s1}') \cdot \chi_3' + l_{1p}'' \cdot (s_1'' - c_s) \cdot \chi_{11}'' + l_{2p}'' \cdot s_2'' \cdot \chi_2'' + l_{3p}'' \cdot (s_3'' - c_s'' - c_{s1}'') \cdot \chi_3''}{b \cdot (s - c)}}{K_3 \left(0,8 + \frac{d_p' + d_p''}{2 \cdot b} \right) + K_1 \left(\frac{d' + 2 \cdot c_s'}{D_p'} \cdot \frac{\varphi'}{\varphi_1'} \cdot \frac{l_{1p}'}{b} + \frac{d'' + 2 \cdot c_s''}{D_p''} \cdot \frac{\varphi''}{\varphi_1''} \cdot \frac{l_{1p}''}{b} \right)} \right\}$$

$$= \min \{ 1; (1 + [(27,39 \cdot (14 - 6) \cdot 0,8167 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (14 - 6 - 0) \cdot 0,8167 + 69,93 \cdot (16 - 6) \cdot 0,8167 + 80 \cdot 12 \cdot 1 + 0 \cdot (16 - 6 - 0) \cdot 0,8167) / (322 \cdot (18 - 9,5))] / (1 \cdot (0,8 + (63,65 + 313) / (2 \cdot 322) + 2 \cdot [(48 + 2 \cdot 6) / 3117 \cdot 1 / 1 \cdot 27,39 / 322 + [(301 + 2 \cdot 6) / 3600 \cdot 1 / 1 \cdot 69,93 / 322]])) = 1,139) \}$$

$= 1$

Интв. № подл.

19744.4

К-5.00.00.000 PP

Лист

200

$$[p]_{\Sigma} = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{0.5 \cdot (D'_p + D''_p) + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2 \cdot 2 \cdot (18 - 9,5) \cdot 1 \cdot 272,7 / [0,5 \cdot (3117 + 3600) + (18 - 9,5) \cdot 1] \cdot 1 = 2,754 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление $[p] = \min\{ 2,967; 2,754\} \text{ МПа}$

$2,754 \text{ МПа} \geq 0,5642 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0.5(d_p - d_{0p}) \cdot s_p = 0.5 \cdot (63,65 - 65,11) \cdot 1,613 = (-0,1177 \cdot 10^{-5}) \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

$$= 27,39 \cdot (14 - 0,07608 - 6) \cdot 0,8167 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (14 - 6 - 0) \cdot 0,8167 + 162,8 \cdot (18 - 1,613 - 9,5)$$

$$= 0,001298 \text{ м}^2$$

$$A_r = (-0,1177 \cdot 10^{-5}) \text{ м}^2 \leq 0,001298 \text{ м}^2$$

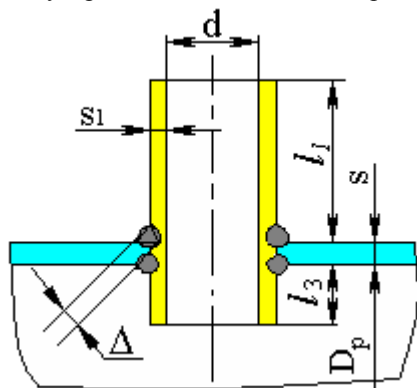
Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 РР				Лист
				201

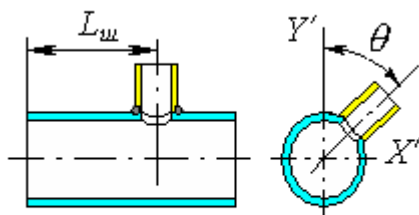
Штуцер Л DN50

Исходные данные

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

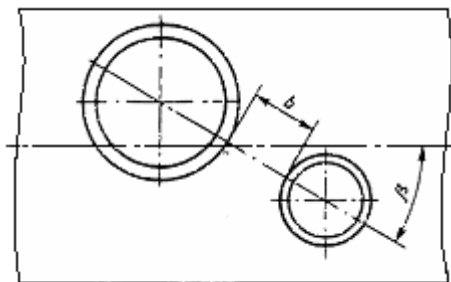


Материал несущего элемента: 09Г2С
Толщина стенки несущего элемента, s: 18 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, с: 6,8 мм
Материал штуцера: 09Г2С (КП245) Gr.
Внутренний диаметр штуцера, d: 48 мм
Толщина стенки штуцера, s₁: 14 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), с_s: 6 мм
Длина штуцера, l₁: 160 мм



Смещение штуцера, L_ш: 1,319·10⁴ мм
Угол поворота штуцера, θ: 225 °
Длина внутр. части штуцера, l₃: 0 мм
Прибавка на коррозию, с_{s1}: 0 мм
Минимальный размер сварного шва, Δ: 1 мм
Расчётные параметры размещения штуцера:
Ближайший штуцер

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	К-5.00.00.000 PP	Лист
19744.4						202
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		



Название штуцера: Штуцер Ж DN50

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 1126 мм

Угол β : 90 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$\varphi_1 = 1$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$\varphi = 1$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 1800 \text{ мм}$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 150 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,4 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 150 °C (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$[\sigma] = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min(256,5 / 1,6; 430 / 2,6) = 160,3 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °C:

$E = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 150 °C (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$[\sigma]_1 = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min(202,1 / 1,6; 430 / 2,6) = 126,3 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 150 °C:

$E_1 = 1,86 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_{1p} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,4 \cdot (48 + 2 \cdot 6) / (2 \cdot 126,3 \cdot 1 - 0,4) = 0,09515 \text{ мм}$$

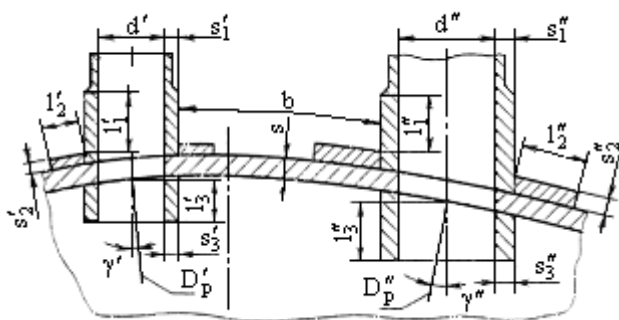
Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 126,3 \cdot 1 \cdot (14 - 6) / (48 + 14 + 6) = 29,72 \text{ МПа}$$

29,72 МПа \geq 0,4 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 PP				Лист
				203



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер Ж DN50 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} + (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 284 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 1,983 \text{ МПа}$

$1,983 \text{ МПа} \geq 0,4 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 180 °C

Расчётное наружное избыточное давление, p: 0,1000 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 180 °C (расчётные условия (наружное давление), коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma] = \min(R_{eT} / n_T; R_{mT} / n_B) = \min\{251,1 / 1,6; 435,4 / 2,6\} = 156,9 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °C:

$$E = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 180 °C (расчётные условия (наружное давление), коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma]_1 = \min(R_{eT} / n_T; R_{mT} / n_B) = \min\{197,2 / 1,6; 435,4 / 2,6\} = 123,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °C:

$$E_1 = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_{\text{ш}} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 - p} = 0,1000 \cdot (48 + 2 \cdot 6) / (2 \cdot 123,3 - 0,1000) = 0,02435 \text{ мм}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$B_1 = \min \left\{ 1,0, 9,45 \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \sqrt{\frac{d}{100 \cdot (s_1 - c_s)}} \right\} = \min\{1,0, 9,45 \cdot 48 / 160 \cdot (48 / (100 \cdot (14 - 6)))^{1/2}\} = 0,6944$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия устойчивости:

$$[p]_e = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E_1}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_1 - c_s)}{d} \right]^{2,5} = 20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 48 / (2,4 \cdot 0,6944 \cdot 160) \cdot (100 \cdot (14 - 6) / 48)^{2,5} = 777 \text{ МПа}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 PP				Лист
				205

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия прочности:

$$[p]_{\pi} = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + (s_1 - c_s)} = 2 * 123,3 * (14 - 6) / (48 + 14 - 6) = 35,22 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\pi}}{[p]_E} \right)^2}} = 35,22 / (1 + (35,22 / 777)^2)^{1/2} = 35,19 \text{ МПа}$$

35,19 МПа \geq 0,1000 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 1800 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 48 + 2 * 6 = 60 \text{ мм}$$

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1.25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 160; 1.25 * ((48 + 2 * 6) * (14 - 6))^{1/2} \} = 27,39 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 123,3 / 156,9 \} = 0,7855$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \{ l_3; 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \} = \min \{ 0; 0.5 * ((48 + 2 * 6) * (14 - 6 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (1800 * (18 - 6,8))^{1/2} = 142 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 712 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 142 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 * (1800 * (18 - 6,8))^{1/2} = 56,79 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (27,39 * (14 - 6) * 0,7855 + 0 * 0 * 0 + 0 * (0 - 2 * 6) * 0,7855) / (142 * (18 - 6,8))] / [1 + 0.5 * (60 - 56,79) / 142 + 1 * (48 + 2 * 6) / 1800 * 27,39 / 142] \} = 1,089$$

$$= 1$$

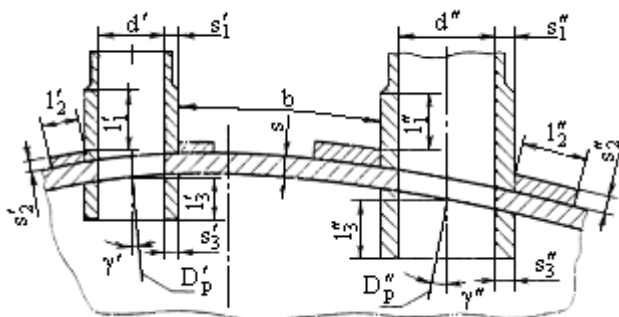
$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} = 2 * 1 * (18 - 6,8) * 156,9 * 1 / [1800 + (18 - 6,8) * 1] = 1,941 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление:

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
К-5.00.00.000 PP			
Лист 206			

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_p}{[p]_E}\right)^2}} = 1,941 / (1 + (1,941 / 0,1633)^2)^{1/2} = 0,1627 \text{ МПа}$$

где P_E – допускаемое наружное давление в пределах упругости для элемента, несущего штуцер (см. расчёт элемента “Обечайка цилиндрическая”)



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер Ж DN50 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s-c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s-c)} = (1800 * (18-6,8))^{1/2} + (1800 * (18-6,8))^{1/2} = 284 \text{ mm}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 0,1627 \text{ МПа}$

$$0,1627 \text{ МПа} \geq 0,1000 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, Т: 20 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,5754 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]^{20} = \eta^* R_{e/20} / n_T = 1 * 300 / 1,1 = 272,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °С:

$$E = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]_{1=20}^{20} = \eta^* R_{e/20} / n_T = 1 * 245 / 1,1 = 222,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °С:

$$E_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_1 - p} = 0,5754 \cdot (48 + 2 \cdot 6) / (2 \cdot 222,7 \cdot 1 - 0,5754) = 0,07761 \text{ mm}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Условия нагружения при испытаниях:					
					Расчётная температура, Т: 20 °С Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,5754 МПа					
Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007										
Свойства материала элемента, несущего штуцер										
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре Т = 20 °С (условия гидротестирования): $[\sigma]^{20} = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 300 / 1,1 = 272,7 \text{ МПа}$ Модуль продольной упругости при температуре 20 °С: $E = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$										
Свойства материала штуцера										
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре Т = 20 °С (условия гидротестирования): $[\sigma]^{20}_1 = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 245 / 1,1 = 222,7 \text{ МПа}$ Модуль продольной упругости при температуре 20 °С: $E_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ Расчётная толщина стенки штуцера: $s_{ш} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \phi_1 - p} = 0,5754 \cdot (48 + 2 \cdot 6) / (2 \cdot 222,7 \cdot 1 - 0,5754) = 0,07761 \text{ мм}$ Допускаемое давление для патрубка штуцера:										
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	К-5.00.00.000 РР					Лист
										207
19744.4					Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 222,7 \cdot 1 \cdot (14 - 6) / (48 + 14 + 6) = 52,41 \text{ МПа}$$

$$52,41 \text{ МПа} \geq 0,5754 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 1800 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 1,901 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 48 + 2 \cdot 6 = 60 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((18 - 6,8) / 1,901 - 0,8) \cdot (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 1446 \text{ мм}$$

$$d_p < d_0: \text{Условие прочности выполнено}$$

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 160; 1,25 \cdot ((48 + 2 \cdot 6) \cdot (14 - 6))^{1/2} \} = 27,39 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 222,7 / 272,7 \} = 0,8167$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((48 + 2 \cdot 6) \cdot (14 - 6 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 142 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 712 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 142 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 56,79 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (27,39 \cdot (14 - 6) \cdot 0,8167 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (14 - 6 - 0) \cdot 0,8167) / (142 \cdot (18 - 6,8))] / [1 + 0,5 \cdot (60 - 56,79) / 142 + 1 \cdot (48 + 2 \cdot 6) / 1800 \cdot 1 / 1 \cdot 27,39 / 142] = 1,093 \}$$

$$= 1$$

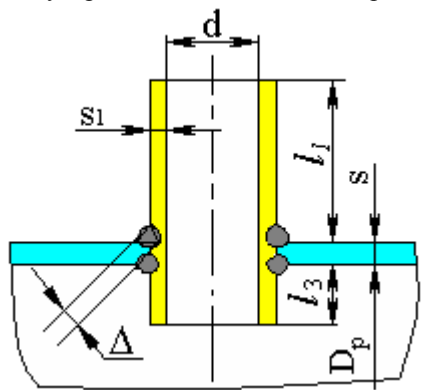
$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (18 - 6,8) \cdot 1 \cdot 272,7 \cdot 1 / [1800 + (18 - 6,8) \cdot 1] = 3,373 \text{ МПа}$$

Изн.	№ подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19744.4					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
К-5.00.00.000 РР					Лист
					208

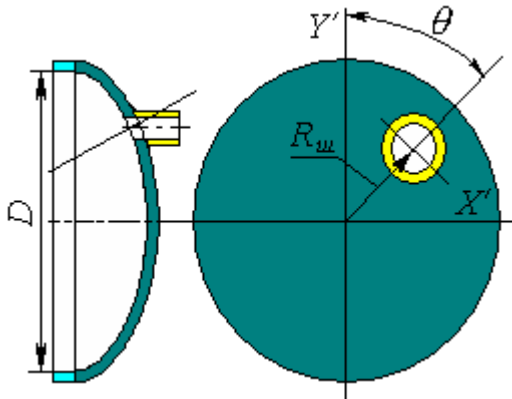
Штуцер М DN50

Исходные данные

Элемент: Штуцер М DN50
Условное обозначение (метка) Штуцер М
Элемент, несущий штуцер: Днище эллиптическое (верхнее)
Тип элемента, несущего штуцер: Днище эллиптическое
Тип штуцера: Проходящий без укрепления



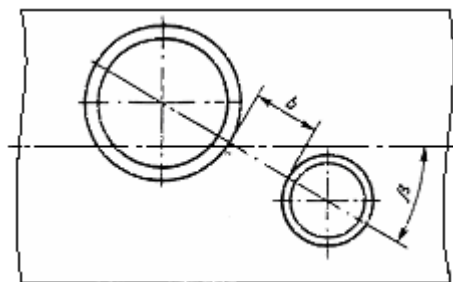
Материал несущего элемента: 09Г2С
Толщина стенки несущего элемента, s: 18 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, с: 9,5 мм
Материал штуцера: 09Г2С (КП245) Gr.
Внутренний диаметр штуцера, d: 48 мм
Толщина стенки штуцера, s₁: 14 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), с_s: 6 мм
Длина штуцера, l₁: 170 мм



Смещение штуцера, R_ш: 520 мм
Угол поворота штуцера, θ: 270 °
Полученный угол наклона штуцера, γ: (-19,31) °
Длина внутр. части штуцера, l₃: 0 мм
Прибавка на коррозию, с_{s1}: 0 мм
Минимальный размер сварного шва, Δ: 1 мм

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	К-5.00.00.000 PP	Лист
19744.4						210
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Расчётные параметры размещения штуцера:
Ближайший штуцер



Название штуцера: Штуцер В DN300

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 322 мм

Угол β : 0°

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$$\varphi_1 = 1$$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$$\wp = 1$$

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища:

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_w^2} = 1800^2 / (2 \cdot 450) \cdot (1 - 4 \cdot (1800^2 - 4 \cdot 450^2) \cdot 520^2 / 1800^4)^{1/2} = 3117 \text{ mm}$$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, Т: 150 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,4 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma] = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_R) = \min(256,5 / 1,6; 430 / 2,6) = 160,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 150 °С:

$$E = 1,86 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma]_1 = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{202,1 / 1,6; 430 / 2,6\} = 126,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 150 °С:

$$E_1 = 1,86 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot |\sigma_h \cdot \varphi_1 - p|} = 0,4 \cdot (48 + 2 \cdot 6) / (2 \cdot 126,3 \cdot 1 - 0,4) = 0,09515 \text{ mm}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

Инв. № подл.	19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Условия нагружения:
						Расчётная температура, Т: 150 °С Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,4 МПа
Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007						
Свойства материала элемента, несущего штуцер						
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре Т = 150 °С (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV): [σ]= min(R _{e/t} / n _T ; R _{m/t} / n _B) = min{256,5 / 1,6; 430 / 2,6}= 160,3 МПа Модуль продольной упругости при температуре 150 °С: E= 1,86·10 ⁵ МПа						
Свойства материала штуцера						
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре Т = 150 °С (расчётные условия, коррозийная среда, группа аппарата III, IV): [σ] _I = min(R _{e/t} / n _T ; R _{m/t} / n _B) = min{202,1 / 1,6; 430 / 2,6}= 126,3 МПа Модуль продольной упругости при температуре 150 °С: E _I = 1,86·10 ⁵ МПа Расчётная толщина стенки штуцера: $s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_1 - p} = 0,4 \cdot (48 + 2 \cdot 6) / (2 \cdot 126,3 \cdot 1 - 0,4) = 0,09515 \text{ мм}$ Допускаемое давление для патрубка штуцера:						
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 PP	
						Лист
						211

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 126,3 \cdot 1 \cdot (14 - 6) / (48 + 14 + 6) = 29,72 \text{ МПа}$$

29,72 МПа \geq 0,4 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища:

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{ш}^2} = 1800^2 / (2 \cdot 450) \cdot (1 - 4 \cdot (1800^2 - 4 \cdot 450^2) \cdot 520^2 / 1800^4)^{1/2} = 3117 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 1,945 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия (смещённый штуцер на эллиптическом днище):

$$d_p = \frac{d + 2 \cdot c_s}{\sqrt{1 - \left(\frac{2 \cdot R_{ш}}{D_p} \right)^2}} = (48 + 2 \cdot 6) / [1 - (2 \cdot 520 / 3117)^2]^{1/2} = 63,65 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((18 - 9,5) / 1,945 - 0,8) \cdot (3117 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 1162 \text{ мм}$$

$d_p < d_0$: **Условие прочности выполнено**

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 170; 1,25 \cdot ((48 + 2 \cdot 6) \cdot (14 - 6))^{1/2} \} = 27,39 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_h}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 126,3 / 160,3 \} = 0,7879$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((48 + 2 \cdot 6) \cdot (14 - 6 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3117 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 162,8 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 162,8 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (3117 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 65,11 \text{ мм}$$

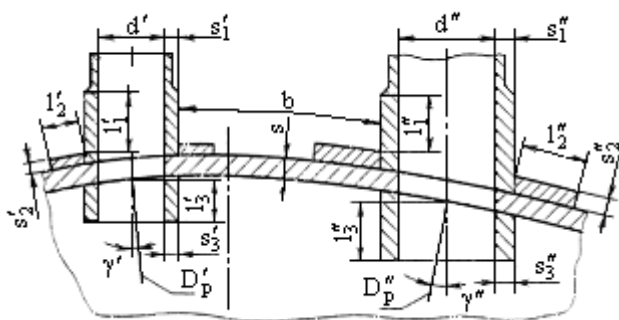
$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0,5 \cdot \frac{d_p - d_{0p}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}}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

$$= \min \{ 1; [1 + (27,39 \cdot (14 - 6) \cdot 0,7879 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (14 - 6 - 0) \cdot 0,7879) / (162,8 \cdot (18 - 9,5))] / [1 + 0,5 \cdot (63,65 - 65,11) / 162,8 + 2 \cdot (48 + 2 \cdot 6) / 3117 \cdot 1 / 1 \cdot 27,39 / 162,8] \} = 1,123 \}$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} = 2 \cdot 2 \cdot (18 - 9,5) \cdot 1 \cdot 160,3 \cdot 1 / [3117 + (18 - 9,5) \cdot 1] = 1,744 \text{ МПа}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 РР				Лист
				212



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер В DN300 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D'_{\text{п}} \cdot (s - c)} + \sqrt{D''_{\text{п}} \cdot (s - c)} = (3117 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} + (3600 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 337,7 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, требуется дополнительный расчёт укреплений.

$$K_3 = 1$$

$$V_1 = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l'_{\text{п}} \cdot (s'_1 - c'_s) \cdot \chi'_1 + l'_{2\text{п}} \cdot s'_2 \cdot \chi'_2 + l'_{3\text{п}} \cdot (s'_3 - c'_s - c'_{s1}) \cdot \chi'_3 + l''_{\text{п}} \cdot (s''_1 - c_s) \cdot \chi''_1 + l''_{2\text{п}} \cdot s''_2 \cdot \chi''_2 + l''_{3\text{п}} \cdot (s''_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi''_3}{b \cdot (s - c)}}{K_3 \left(0,8 + \frac{d'_p + d''_p}{2 \cdot b} \right) + K_1 \left(\frac{d' + 2 \cdot c'_s}{D'_p} \cdot \frac{\varphi'}{\varphi_1} \cdot \frac{l'_{\text{п}}}{b} + \frac{d'' + 2 \cdot c_s}{D''_p} \cdot \frac{\varphi''}{\varphi_1} \cdot \frac{l''_{\text{п}}}{b} \right)} \right\}$$

$$= \min \{ 1; (1 + [(27,39 \cdot (14 - 6) \cdot 0,7879 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (14 - 6 - 0) \cdot 0,7879 + 69,93 \cdot (16 - 6) \cdot 0,7879 + 80 \cdot 12 \cdot 1 + 0 \cdot (16 - 6 - 0) \cdot 0,7879) / (322 \cdot (18 - 9,5))] / (1 \cdot (0,8 + (63,65 + 313) / (2 \cdot 322)) + 2 \cdot [(48 + 2 \cdot 6) / 3117 \cdot 1 / 1 \cdot 27,39 / 322 + [(301 + 2 \cdot 6) / 3600 \cdot 1 / 1 \cdot 69,93 / 322])]) = 1,133 \}$$

$$= 1$$

$$[p]_{\text{в}} = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{0,5 \cdot (D'_p + D''_p) + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2 \cdot 2 \cdot (18 - 9,5) \cdot 1 \cdot 160,3 / [0,5 \cdot (3117 + 3600) + (18 - 9,5) \cdot 1] \cdot 1 = 1,619 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление $[p] = \min \{ 1,744; 1,619 \} \text{ МПа}$

$$1,619 \text{ МПа} \geq 0,4 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения:

Расчётная температура, Т: 180 °С

Расчётное наружное избыточное давление, р: 0,1000 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре Т = 180 °С (расчётные условия (наружное давление), коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma] = \min(R_{\sigma T} / n_T; R_{mT} / n_B) = \min[251,1 / 1,6; 435,4 / 2,6] = 156,9 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °С:

$$E = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 РР				Лист
				213

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия (наружное давление), коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma]_I = \min(R_{eH} / n_T; R_{mH} / n_B) = \min\{197,2 / 1,6; 435,4 / 2,6\} = 123,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре $180\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_I = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_{\text{ш}} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_I - p} = 0,1000 \cdot (48 + 2 \cdot 6) / (2 \cdot 123,3 - 0,1000) = 0,02435 \text{ мм}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$B_1 = \min\left\{1,0, 9,45 \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \sqrt{\frac{d}{100 \cdot (s_1 - c_s)}}\right\} = \min\{1,0, 9,45 \cdot 48 / 170 \cdot (48 / (100 \cdot (14 - 6)))^{1/2}\} = 0,6536$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия устойчивости:

$$[p]_E = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E_I}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_1 - c_s)}{d}\right]^{2,5} = 20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 48 / (2,4 \cdot 0,6536 \cdot 170) \cdot (100 \cdot (14 - 6) / 48)^{2,5} = 777 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия прочности:

$$[p]_{\text{п}} = \frac{2 \cdot [\sigma]_I \cdot (s_1 - c_s)}{d + (s_1 - c_s)} = 2 \cdot 123,3 \cdot (14 - 6) / (48 + 14 - 6) = 35,22 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\text{п}}}{[p]_E}\right)^2}} = 35,22 / (1 + (35,22 / 777)^2)^{1/2} = 35,19 \text{ МПа}$$

$$35,19 \text{ МПа} \geq 0,1000 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища:

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{\text{ш}}^2} = 1800^2 / (2 \cdot 450) \cdot (1 - 4 \cdot (1800^2 - 4 \cdot 450^2) \cdot 520^2 / 1800^4)^{1/2} = 3117 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия (смещённый штуцер на эллиптическом днище):

$$d_p = \frac{d + 2 \cdot c_s}{\sqrt{1 - \left(\frac{2 \cdot R_{\text{ш}}}{D_p}\right)^2}} = (48 + 2 \cdot 6) / [1 - (2 \cdot 520 / 3117)^2]^{1/2} = 63,65 \text{ мм}$$

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{\text{п}} = \min\{l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)}\} = \min\{170; 1,25 \cdot ((48 + 2 \cdot 6) \cdot (14 - 6))^{1/2}\} = 27,39 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min\left\{1,0; \frac{[\sigma]_{\text{ш}}}{[\sigma]}\right\} = \min\{1,0, 123,3 / 156,9\} = 0,7855$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{\text{зп}} = \min\{l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})}\} = \min\{0; 0,5 \cdot ((48 + 2 \cdot 6) \cdot (14 - 6 - 0))^{1/2}\} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3117 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 162,8 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 162,8 \text{ мм}$$

Инов. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	К-5.00.00.000 PP					Лист
										214
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{op} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (3117 \cdot (18 - 9.5))^{1/2} = 65,11 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{1; [1 + (27,39 \cdot (14 - 6) \cdot 0,7855 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (0 - 2 \cdot 6) \cdot 0,7855) / (162,8 \cdot (18 - 9,5))] / [1 + 0.5 \cdot (63,65 - 65,11) / 162,8 + 2 \cdot (48 + 2 \cdot 6) / 3117 \cdot 27,39 / 162,8] = 1,122\}$$

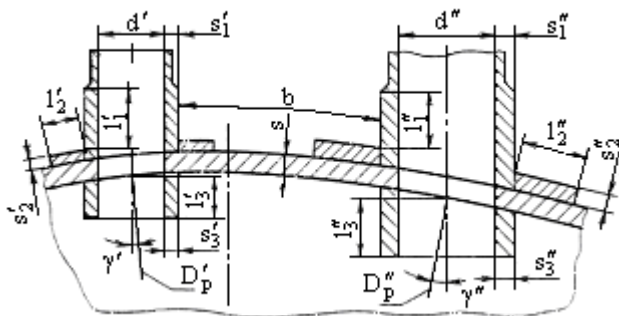
$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 2 \cdot (18 - 9,5) \cdot 156,9 \cdot 1 / [3117 + (18 - 9,5) \cdot 1] = 1,707 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление:

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_p}{[p]_E} \right)^2}} = 1,707 / (1 + (1,707 / 0,4813)^2)^{1/2} = 0,4632 \text{ МПа}$$

где $[p]_E$ – допускаемое наружное давление в пределах упругости для элемента, несущего штуцер (см. расчёт элемента “Днище эллиптическое (верхнее)”)



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер В DN300 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (3117 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} + (3600 \cdot (18 - 9,5))^{1/2} = 337,7 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, требуется дополнительный расчёт креплений.

$$K_3 = 1$$

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

$$= \min \{1; (1 + [(27,39 \cdot (14 - 6) \cdot 0,7855 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (14 - 6 - 0) \cdot 0,7855 + 69,93 \cdot (16 - 6) \cdot 0,7855 + 80 \cdot 12 \cdot 1 + 0 \cdot (16 - 6 - 0) \cdot 0,7855) / (322 \cdot (18 - 9,5))] / (1 \cdot (0.8 + (63,65 + 313) / (2 \cdot 322)) + 2 \cdot [(48 + 2 \cdot 6) / 3117 \cdot 27,39 / 322 + [(301 + 2 \cdot 6) / 3600 \cdot 69,93 / 322]])) = 1,132\}$$

$$= 1$$

Инов. № подл.	19744.4	Подпись и дата	
Взам. инв. №		Инов. № дубл.	
Подпись и дата		Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
К-5.00.00.000 PP			
Лист 215			

$$[p]_E = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{0.5 \cdot (D'_p + D''_p) + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2 \cdot 2 \cdot (18 - 9,5) \cdot 156,9 / [0,5 \cdot (3117 + 3600) + (18 - 9,5) \cdot 1] \cdot 1 = 1,585 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_E}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_E}{[p]_E}\right)^2}} = 1,585 / (1 + (1,585 / 0,4813)^2)^{1/2} = 0,4605 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление $[p] = \min\{0,4632; 0,4605\}$ МПа

$0,4605 \text{ МПа} \geq 0,1000 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, T: 20 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,5642 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 20 °C (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]^{20} = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 300 / 1,1 = 272,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:

$$E = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 20 °C (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]^{20}_1 = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 245 / 1,1 = 222,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:

$$E_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,5642 \cdot (48 + 2 \cdot 6) / (2 \cdot 222,7 \cdot 1 - 0,5642) = 0,07608 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 222,7 \cdot 1 \cdot (14 - 6) / (48 + 14 + 6) = 52,41 \text{ МПа}$$

$$52,41 \text{ МПа} \geq 0,5642 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища:

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{ш}^2} = 1800^2 / (2 \cdot 450) \cdot (1 - 4 \cdot (1800^2 - 4 \cdot 450^2) \cdot 520^2 / 1800^4)^{1/2} = 3117 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 1,613 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия (смещённый штуцер на эллиптическом днище):

$$d_p = \frac{d + 2 \cdot c_s}{\sqrt{1 - \left(\frac{2 \cdot R_{ш}}{D_p}\right)^2}} = (48 + 2 \cdot 6) / [1 - (2 \cdot 520 / 3117)^2]^{1/2} = 63,65 \text{ мм}$$

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 PP				Лист
				216

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s-c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = 2 \cdot ((18-9,5)/1,613 - 0,8) \cdot (3117 \cdot (18-9,5))^{1/2} = 1455 \text{ мм}$$

$d_p < d_0$: **Условие прочности выполнено**

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d+2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 170; 1,25 \cdot ((48+2 \cdot 6) \cdot (14-6))^{1/2} \} = 27,39 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_h}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0; 222,7 / 272,7 \} = 0,8167$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d+2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((48+2 \cdot 6) \cdot (14-6-0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = (3117 \cdot (18-9,5))^{1/2} = 162,8 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 162,8 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

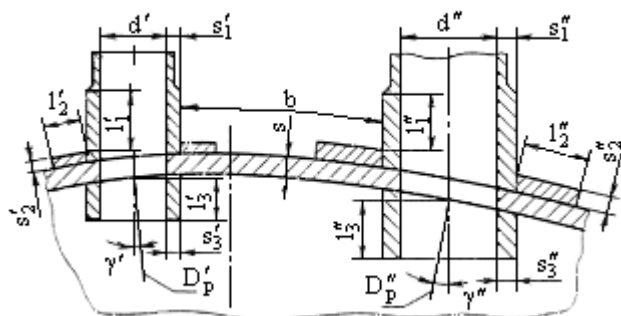
$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = 0,4 \cdot (3117 \cdot (18-9,5))^{1/2} = 65,11 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (27,39 \cdot (14-6) \cdot 0,8167 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (14-6-0) \cdot 0,8167) / (162,8 \cdot (18-9,5))] / [1 + 0,5 \cdot (63,65 - 65,11) / 162,8 + 2 \cdot (48+2 \cdot 6) / 3117 \cdot 1 / 1 \cdot 27,39 / 162,8] \} = 1,127$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s-c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s-c) \cdot V} = 2 \cdot 2 \cdot (18-9,5) \cdot 1 \cdot 272,7 \cdot 1 / [3117 + (18-9,5) \cdot 1] = 2,967 \text{ МПа}$$



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер В DN300 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D'_p \cdot (s-c)} + \sqrt{D''_p \cdot (s-c)} = (3117 \cdot (18-9,5))^{1/2} + (3600 \cdot (18-9,5))^{1/2} = 337,7 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, требуется дополнительный расчёт укреплений.

Подпись и дата

Инов. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инов. № подл.

19744.4

К-5.00.00.000 PP

Лист

217

Изм. Лист № докум. Подп. Дата

$$K_3 = 1$$

$$V_1 = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l'_{1p} \cdot (s'_1 - c'_s) \cdot \chi'_1 + l'_{2p} \cdot s'_2 \cdot \chi'_2 + l'_{3p} \cdot (s'_3 - c'_s - c'_{s1}) \cdot \chi'_3 + l'_{1p} \cdot (s''_1 - c_s) \cdot \chi''_1 + l'_{2p} \cdot s''_2 \cdot \chi''_2 + l'_{3p} \cdot (s''_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi''_3}{b \cdot (s - c)}}{K_3 \left(0.8 + \frac{d'_p + d''_p}{2 \cdot b} \right) + K_1 \left(\frac{d' + 2 \cdot c'_s}{D'_p} \cdot \frac{\varphi'}{\varphi'_1} \cdot \frac{l'_{1p}}{b} + \frac{d'' + 2 \cdot c''_s}{D''_p} \cdot \frac{\varphi''}{\varphi''_1} \cdot \frac{l''_{1p}}{b} \right)} \right\}$$

$$= \min \{ 1; (1 + [(27,39 \cdot (14 - 6) \cdot 0,8167 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (14 - 6 - 0) \cdot 0,8167 + 69,93 \cdot (16 - 6) \cdot 0,8167 + 80 \cdot 12 \cdot 1 + 0 \cdot (16 - 6 - 0) \cdot 0,8167) / (322 \cdot (18 - 9,5))] / (1 \cdot (0,8 + (63,65 + 313) / (2 \cdot 322)) + 2 \cdot [(48 + 2 \cdot 6) / 3117 \cdot 1 / 1 \cdot 27,39 / 322 + [(301 + 2 \cdot 6) / 3600 \cdot 1 / 1 \cdot 69,93 / 322]]) = 1,139 \}$$

$$= 1$$

$$[p]_{\Sigma} = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{0,5 \cdot (D'_p + D''_p) + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2 \cdot 2 \cdot (18 - 9,5) \cdot 1 \cdot 272,7 / [0,5 \cdot (3117 + 3600) + (18 - 9,5) \cdot 1] \cdot 1 = 2,754 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление $[p] = \min \{ 2,967; 2,754 \}$ МПа

2,754 МПа \geq 0,5642 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (63,65 - 65,11) \cdot 1,613 = (-0,1177 \cdot 10^{-5}) \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

$$= 27,39 \cdot (14 - 0,07608 - 6) \cdot 0,8167 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (14 - 6 - 0) \cdot 0,8167 + 162,8 \cdot (18 - 1,613 - 9,5)$$

$$= 0,001298 \text{ м}^2$$

$$A_r = (-0,1177 \cdot 10^{-5}) \text{ м}^2 \leq 0,001298 \text{ м}^2$$

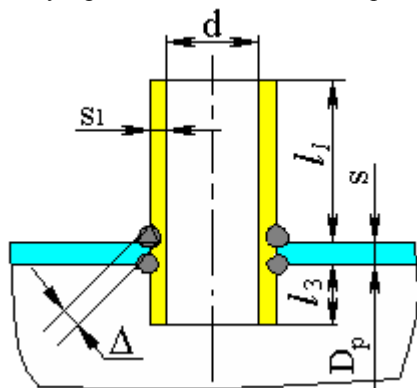
Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 РР				Лист
				218

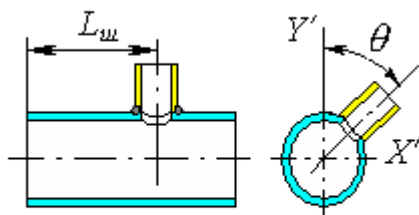
Штуцер П DN50

Исходные данные

Элемент: Штуцер П DN50
Условное обозначение (метка) Штуцер П
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 : 18 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, c : 6,8 мм
Материал штуцера: 09Г2С (КП245) Gr.
Внутренний диаметр штуцера, d : 48 мм
Толщина стенки штуцера, s_1 : 14 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c_s : 6 мм
Длина штуцера, l_1 : 160 мм



Смещение штуцера, $L_{ш}$: 2540 мм
Угол поворота штуцера, θ : 225 °
Длина внутр. части штуцера, l_3 : 0 мм
Прибавка на коррозию, c_{s1} : 0 мм
Минимальный размер сварного шва, Δ : 1 мм
Расчётные параметры размещения штуцера:
Ближайший штуцер

Подпись и дата

Инов. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

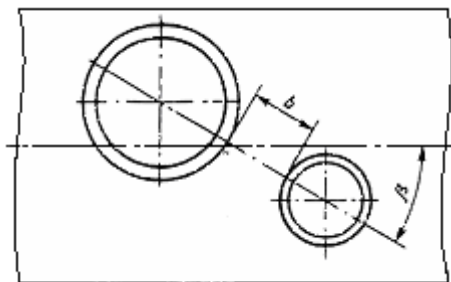
Инов. № подл.
19744.4

Лист

К-5.00.00.000 PP

219

Изм. Лист № докум. Подп. Дата



Название штуцера: Штуцер Б DN300

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 521,5 мм

Угол β : 98,76 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$\varphi_1 = 1$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$\varphi = 1$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 1800 \text{ мм}$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 150 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,4 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 150 °C (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$[\sigma] = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min(256,5 / 1,6; 430 / 2,6) = 160,3 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °C:

$E = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 150 °C (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$[\sigma]_1 = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min(202,1 / 1,6; 430 / 2,6) = 126,3 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 150 °C:

$E_1 = 1,86 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_{\text{ш}} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,4 \cdot (48 + 2 \cdot 6) / (2 \cdot 126,3 \cdot 1 - 0,4) = 0,09515 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 126,3 \cdot 1 \cdot (14 - 6) / (48 + 14 + 6) = 29,72 \text{ МПа}$$

29,72 МПа \geq 0,4 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 PP				Лист
				220

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 1800 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 2,297 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 48 + 2 \cdot 6 = 60 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((18 - 6,8) / 2,297 - 0,8) \cdot (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 1158 \text{ мм}$$

$d_p < d_0$: **Условие прочности выполнено**

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 160; 1,25 \cdot ((48 + 2 \cdot 6) \cdot (14 - 6))^{1/2} \} = 27,39 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_h}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0; 126,3 / 160,3 \} = 0,7879$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((48 + 2 \cdot 6) \cdot (14 - 6 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 142 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 2562 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 142 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 56,79 \text{ мм}$$

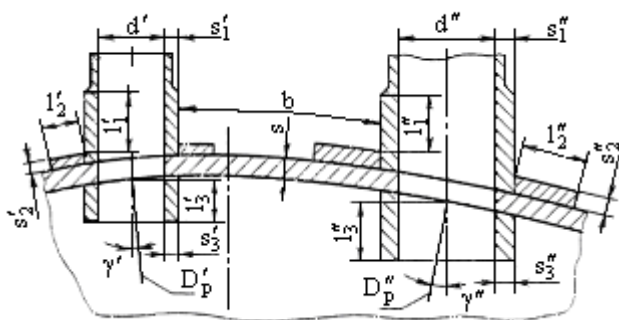
$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0,5 \cdot \frac{d_p - d_{0p}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}}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

$$= \min \{ 1; [1 + (27,39 \cdot (14 - 6) \cdot 0,7879 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (14 - 6 - 0) \cdot 0,7879) / (142 \cdot (18 - 6,8))] / [1 + 0,5 \cdot (60 - 56,79) / 142 + 1 \cdot (48 + 2 \cdot 6) / 1800 \cdot 1 / 1 \cdot 27,39 / 142] \} = 1,089$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (18 - 6,8) \cdot 1 \cdot 160,3 \cdot 1 / [1800 + (18 - 6,8) \cdot 1] = 1,983 \text{ МПа}$$

Инов. № подл.	19744.4	Подпись и дата	
Взам. инв. №		Подпись и дата	
Инов. № дубл.		Подпись и дата	
Инов. №		Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
К-5.00.00.000 PP			Лист
			221



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер Б DN300 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} + (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 284 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 1,983 \text{ МПа}$

$1,983 \text{ МПа} \geq 0,4 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 180 °C

Расчётное наружное избыточное давление, p: 0,1000 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 180 °C (расчётные условия (наружное давление), коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma] = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{251,1 / 1,6; 435,4 / 2,6\} = 156,9 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °C:

$$E = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 180 °C (расчётные условия (наружное давление), коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma]_1 = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{197,2 / 1,6; 435,4 / 2,6\} = 123,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °C:

$$E_1 = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_{\text{ш}} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 - p} = 0,1000 \cdot (48 + 2 \cdot 6) / (2 \cdot 123,3 - 0,1000) = 0,02435 \text{ мм}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$B_1 = \min \left\{ 1,0, 9,45 \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \sqrt{\frac{d}{100 \cdot (s_1 - c_s)}} \right\} = \min\{1,0, 9,45 \cdot 48 / 160 \cdot (48 / (100 \cdot (14 - 6)))^{1/2}\} = 0,6944$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия устойчивости:

$$[p]_e = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E_1}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_1 - c_s)}{d} \right]^{2,5} = 20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 48 / (2,4 \cdot 0,6944 \cdot 160) \cdot (100 \cdot (14 - 6) / 48)^{2,5} = 777 \text{ МПа}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 PP				Лист
				222

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия прочности:

$$[p]_{\pi} = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + (s_1 - c_s)} = 2 * 123,3 * (14 - 6) / (48 + 14 - 6) = 35,22 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\pi}}{[p]_E}\right)^2}} = 35,22 / (1 + (35,22 / 777)^2)^{1/2} = 35,19 \text{ МПа}$$

35,19 МПа \geq 0,1000 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 1800 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 48 + 2 * 6 = 60 \text{ мм}$$

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min\{l_1; 1.25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)}\} = \min\{160; 1.25 * ((48 + 2 * 6) * (14 - 6))^{1/2}\} = 27,39 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min\left\{1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]}\right\} = \min\{1,0, 123,3 / 156,9\} = 0,7855$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min\{l_3; 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})}\} = \min\{0; 0.5 * ((48 + 2 * 6) * (14 - 6 - 0))^{1/2}\} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (1800 * (18 - 6,8))^{1/2} = 142 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 2562 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 142 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 * (1800 * (18 - 6,8))^{1/2} = 56,79 \text{ мм}$$

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

$$= \min\{1; [1 + (27,39 * (14 - 6) * 0,7855 + 0 * 0 * 0 + 0 * (0 - 2 * 6) * 0,7855) / (142 * (18 - 6,8))] / [1 + 0.5 * (60 - 56,79) / 142 + 1 * (48 + 2 * 6) / 1800 * 27,39 / 142] = 1,089\}$$

$$= 1$$

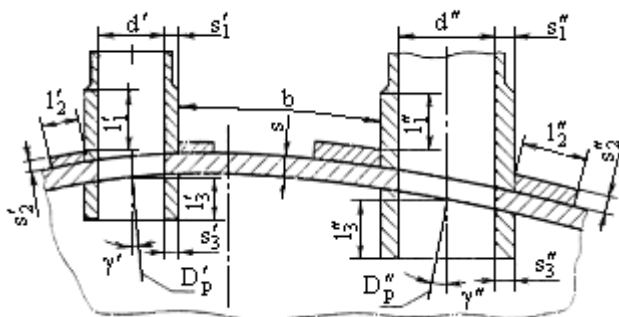
$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} = 2 * 1 * (18 - 6,8) * 156,9 * 1 / [1800 + (18 - 6,8) * 1] = 1,941 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление:

Инов. № подл.	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
			Дата
К-5.00.00.000 PP			
Лист			
223			

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_p}{[p]_E}\right)^2}} = 1,941 / (1 + (1,941 / 0,1633)^2)^{1/2} = 0,1627 \text{ МПа}$$

где $[P]_E$ – допускаемое наружное давление в пределах упругости для элемента, несущего штуцер (см. расчёт элемента “Обечайка цилиндрическая”)



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер Б DN300 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s-c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s-c)} = (1800 * (18-6,8))^{1/2} + (1800 * (18-6,8))^{1/2} = 284 \text{ mm}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 0,1627 \text{ МПа}$

$$0,1627 \text{ МПа} \geq 0,1000 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, Т: 20 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,6799 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]^{20} = \eta^* R_{e/20} / n_T = 1 * 300 / 1,1 = 272,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °С:

$$E = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]_{1=20}^{20} = \eta^* R_{e/20} / n_T = 1 * 245 / 1,1 = 222,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °С:

$$E_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штупера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_1 - p} = 0,6799 \cdot (48 + 2 \cdot 6) / (2 \cdot 222,7 \cdot 1 - 0,6799) = 0,09171 \text{ mm}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Условия нагружения при испытаниях:					
					Расчётная температура, Т: 20 °С Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,6799 МПа					
Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007										
Свойства материала элемента, несущего штуцер										
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре Т = 20 °С (условия гидротестирования): $[\sigma]^{20} = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 300 / 1,1 = 272,7 \text{ МПа}$ Модуль продольной упругости при температуре 20 °С: $E = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$										
Свойства материала штуцера										
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре Т = 20 °С (условия гидротестирования): $[\sigma]^{20}_1 = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 245 / 1,1 = 222,7 \text{ МПа}$ Модуль продольной упругости при температуре 20 °С: $E_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ Расчётная толщина стенки штуцера: $s_{ш} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \phi_1 - p} = 0,6799 \cdot (48 + 2 \cdot 6) / (2 \cdot 222,7 \cdot 1 - 0,6799) = 0,09171 \text{ мм}$ Допускаемое давление для патрубка штуцера:										
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	К-5.00.00.000 РР					Лист
										224
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 * 222,7 * 1 * (14 - 6) / (48 + 14 + 6) = 52,41 \text{ МПа}$$

$$52,41 \text{ МПа} \geq 0,6799 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 1800 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 2,246 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 48 + 2 * 6 = 60 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 * ((18 - 6,8) / 2,246 - 0,8) * (1800 * (18 - 6,8))^{1/2} = 1189 \text{ мм}$$

$$d_p < d_0: \text{Условие прочности выполнено}$$

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 160; 1,25 * ((48 + 2 * 6) * (14 - 6))^{1/2} \} = 27,39 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 222,7 / 272,7 \} = 0,8167$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 * ((48 + 2 * 6) * (14 - 6 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (1800 * (18 - 6,8))^{1/2} = 142 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 2562 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 142 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 * (1800 * (18 - 6,8))^{1/2} = 56,79 \text{ мм}$$

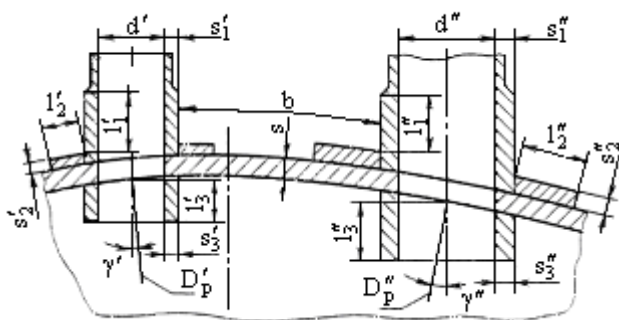
$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0,5 \cdot \frac{d_p - d_{0p}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}}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

$$= \min \{ 1; [1 + (27,39 * (14 - 6) * 0,8167 + 0 * 0 * 0 + 0 * (14 - 6 - 0) * 0,8167) / (142 * (18 - 6,8))] / [1 + 0,5 * (60 - 56,79) / 142 + 1 * (48 + 2 * 6) / 1800 * 1 / 1 * 27,39 / 142] \} = 1,093$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 * 1 * (18 - 6,8) * 1 * 272,7 * 1 / [1800 + (18 - 6,8) * 1] = 3,373 \text{ МПа}$$

Изн.	№ подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19744.4					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
К-5.00.00.000 РР					Лист
					225



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер Б DN300 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D'_p \cdot (s - c)} + \sqrt{D''_p \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} + (1800 \cdot (18 - 6,8))^{1/2} = 284 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 3,373 \text{ МПа}$

$3,373 \text{ МПа} \geq 0,6799 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5 \cdot (d_p - d_{0p}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (60 - 56,79) \cdot 2,246 = 0,3601 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

$$= 27,39 \cdot (14 - 0,09171 - 6) \cdot 0,8167 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (14 - 6 - 0) \cdot 0,8167 + 142 \cdot (18 - 2,246 - 6,8)$$

$$= 0,001448 \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,3601 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \leq 0,001448 \text{ м}^2$$

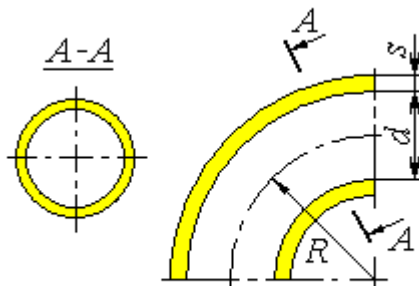
Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 РР				Лист
				226

Отвод DN150

Расчёт прочности отвода по СА 03-003-07

Исходные данные



Элемент:	Отвод DN150
Тип отвода:	Гнутый или крутоизогнутый отвод
Материал отвода:	09Г2С Gr.ГОСТ 19281
Внутренний диаметр отвода, d:	146 мм
Толщина стенки отвода, s:	11 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c ₁ :	6 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, c ₂ :	1,65 мм
Прибавка технологическая, c ₃ :	0 мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, c:	7,65 мм
Радиус отвода, R:	225 мм
Угол, γ:	270 °
Коэффициенты прочности сварных швов:	
Продольный шов:	

$$\varphi_y = 1$$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T:	150 °С
Расчётное внутреннее избыточное давление, p:	0,4196 МПа
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 150 °С (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):	

$$[\sigma] = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min(231 / 1,6; 430 / 2,6) = 144,4 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 150 °С:

$$E = 1,86 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

$$k_1 = 1,17 \text{ для соотношения } R / (d + s) = 1,433$$

Расчётная толщина стенки трубы (патрубка штуцера):

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c)}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_y - p} = (0,4196 \cdot (146 + 2 \cdot 7,65)) / (2 \cdot 144,4 \cdot 1 - 0,4196) = 0,2347 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки гнутых и крутоизогнутых отводов:

$$s_{p0} = k_1 \cdot s_p = 1,17 \cdot 0,2347 = 0,2747 \text{ мм}$$

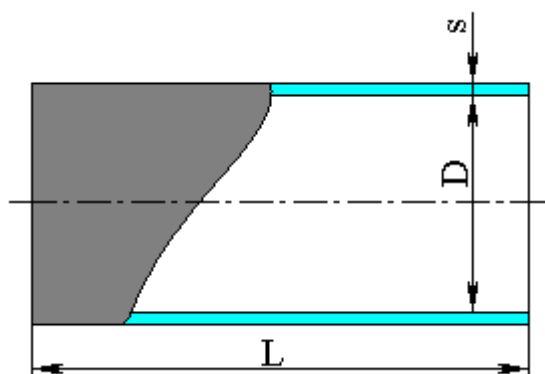
Изн. № подл.	Подпись и дата
19744.4	
Изм.	Лист
№ докум.	Подп.
Дата	

K-5.00.00.000 PP

Лист

227

Патрубок DN150



Исходные данные

Материал: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281
Внутр. диаметр, D: 146 мм
Толщина стенки, s: 11 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c_1 : 6 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, c_2 : 1,65 мм
Прибавка технологическая, c_3 : 0 мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, c : 7,65 мм
Длина обечайки, L: 915 мм
Коэффициенты прочности сварных швов:
Продольный шов:

$$\varphi_P = 1$$

Окружной шов:

$$\varphi_T = 1$$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 150 °C
Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,4196 МПа
Расчётный изгибающий момент, M: 229,3 Н м
Расчётное поперечное усилие, Q: 477 Н
Расчётное осевое растягивающее усилие, F: 0 Н

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 150 °C (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma] = \min(R_{eH} / n_T; R_{mH} / n_B) = \min\{231 / 1,6; 430 / 2,6\} = 144,4 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 150 °C:

$$E = 1,86 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

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

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

Изн.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 PP	Лист
19744.4						230

$$s_p + c = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} + c = (0,4196 \cdot 146) / (2 \cdot 144,4 \cdot 1 - 0,4196) + 7,65 = 7,862 \text{ мм}$$

$$7,862 \text{ мм} \leq 11 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие работоспособности выполнено**

Допускаемое давление:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 144,4 \cdot 1 \cdot (11 - 7,65) / (146 + 11 - 7,65) = 6,477 \text{ МПа}$$

$$6,477 \text{ МПа} \geq 0,4196 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Минимальное расстояние между "одиночными" штуцерами:

$$b_0 = 2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} = 2 \cdot (146 \cdot (11 - 7,65))^{1/2} = 44,23 \text{ мм}$$

Обечайка, нагруженная изгибающим моментом (п. 5.3.5)

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$[F]_{\pi} = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3,142 \cdot (146 + 11 - 7,65) \cdot (11 - 7,65) \cdot 144,4 = 2,269 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны сжатия:

$$[M]_{\pi} = \frac{D}{4} \cdot [F]_{\pi} = 146 / 4 \cdot 2,269 \cdot 10^5 = 8283 \text{ Н м}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:

$$[F]_{E1} = \frac{31 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2.5} = 310 \cdot 10^{-6} \cdot 1,86 \cdot 10^5 \cdot 146^2 / (2,4) \cdot (100 \cdot (11 - 7,65) / 146)^{2.5} = 4,084 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_{E} = \frac{D}{3.5} \cdot [F]_{E1} = 146 / 3.5 \cdot 4,084 \cdot 10^6 = 1,704 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \frac{[M]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\pi}}{[M]_{E}} \right)^2}} = 8283 / (1 + (8283 / 1,704 \cdot 10^5)^2)^{1/2} = 8273 \text{ Н м}$$

$$8273 \text{ Н м} \geq 229,3 \text{ Н м}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Обечайка, нагруженная поперечным усилием (п. 5.3.6)

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности:

$$[Q]_{\pi} = 0,25 \cdot \pi \cdot D \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 0,25 \cdot 3,142 \cdot 146 \cdot (11 - 7,65) \cdot 144,4 = 5,546 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$$l_p = 1140 \text{ мм}$$

Расчётная длина для расчёта от действия поперечной силы:

$$l_Q = 1140 \text{ мм}$$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

$$[Q]_{E} = \frac{2,4 \cdot E \cdot (s - c)^2}{n_y} \cdot \left[0,18 + 3,3 \cdot \frac{D(s - c)}{l^2} \right] = \frac{2,4 \cdot 1,86 \cdot 10^5 \cdot (11 - 7,65)^2}{2,4} \cdot (0,18 + 3,3 \cdot 146 \cdot (11 - 7,65) / 1140^2) = 3,783 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\pi}}{[Q]_{E}} \right)^2}} = 5,546 \cdot 10^4 / (1 + (5,546 \cdot 10^4 / 3,783 \cdot 10^5)^2)^{1/2} = 5,487 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

$$5,487 \cdot 10^4 \text{ Н} \geq 477 \text{ Н}$$

Изн. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	К-5.00.00.000 PP					Лист
										231
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

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.

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0/0 + 0/0 + 229,3/8273 + (477/5,487 \cdot 10^4)^2 = 0,02780 \leq 1$$

Закключение: **Условие устойчивости выполнено**

Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием (п. 5.3.3)

Допускаемое осевое растягивающее усилие:

$$[F] = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = 3,142 \cdot (146 + 11 - 7,65) \cdot (11 - 7,65) \cdot 144,4 \cdot 1 = 2,269 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны растяжения:

$$[M]_{\text{пр}} = \frac{D}{4} \cdot [F] = 146/4 \cdot 2,269 \cdot 10^5 = 8283 \text{ Н м}$$

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

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

$$\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{пр}}} = (0 + 0,4196 \cdot 3,142 \cdot 146^2/4) / 2,269 \cdot 10^5 + 229,3/8283 = 0,05864 \leq 1$$

Закключение: **Условие прочности выполнено**

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения:

- Расчётная температура, T: 180 °C
- Расчётное наружное избыточное давление, p: 0,1000 МПа
- Расчётный изгибающий момент, M: 174,6 Н м
- Расчётное поперечное усилие, Q: 363,1 Н
- Расчётное осевое растягивающее усилие, F: 0 Н

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 180 °C (расчётные условия (наружное давление), коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma] = \min(R_{eT} / n_T; R_{mT} / n_B) = \min(225,6 / 1,6; 435,4 / 2,6) = 141 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 180 °C:

$$E = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Гладкая обечайка, нагруженная наружным давлением (п. 5.3.2)

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	К-5.00.00.000 PP					Лист
19744.4										232
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

$$l_p = 1140 \text{ мм}$$

$$B = \max \left\{ 1; 0,47 \cdot \left(\frac{p}{10^{-5} \cdot E} \right)^{0,067} \cdot \left(\frac{1}{D} \right)^{0,4} \right\} = \max \{ 1; 0,47 \cdot (0,1000 / (10^{-5} \cdot 1,83 \cdot 10^5))^{0,067} \cdot (1140 / 146)^{0,4} \} = 1$$

Расчётная толщина стенки с учетом прибавок:

$$s_p + c = \max \left\{ 1,06 \cdot \frac{10^{-2} \cdot D}{B} \cdot \left(\frac{p}{10^{-5} \cdot E} \cdot \frac{1}{D} \right)^{0,4} ; \frac{1,2 \cdot p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] - p} \right\} = \max \{ 1,06 \cdot 10^{-2} \cdot 146 / 1 \cdot (0,1000 / (10^{-5} \cdot 1,83 \cdot 10^5)) \cdot 1140 / 146^{0,4} ; 1,2 \cdot 0,1000 \cdot 146 / (2 \cdot 141 - 0,1000) \} + 7,65 = 8,751 \text{ мм}$$

$$8,751 \text{ мм} \leq 11 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие работоспособности выполнено**

$$B_1 = \min \left\{ 1,0; 9,45 \cdot \frac{D}{1} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (s - c)}} \right\} = \min \{ 1,0; 9,45 \cdot 146 / 1140 \cdot (146 / (100 \cdot (11 - 7,65)))^{1/2} \} = 0,799$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости:

$$[p]_e = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D}{1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2,5} = 2,08 \cdot 10^{-5} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 146 / (2,4 \cdot 0,799 \cdot 1140) \cdot (100 \cdot (11 - 7,65) / 146)^{2,5} = 2,027 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$[p]_n = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 141 \cdot (11 - 7,65) / (146 + 11 - 7,65) = 6,325 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_n}{[p]_e} \right)^2}} = 6,325 / (1 + (6,325 / 2,027)^2)^{1/2} = 1,931 \text{ МПа}$$

$$1,931 \text{ МПа} \geq 0,1000 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Минимальное расстояние между "одиночными" штуцерами:

$$b_0 = 2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} = 2 \cdot (146 \cdot (11 - 7,65))^{1/2} = 44,23 \text{ мм}$$

Обечайка, нагруженная изгибающим моментом (п. 5.3.5)

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$[F]_n = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3,142 \cdot (146 + 11 - 7,65) \cdot (11 - 7,65) \cdot 141 = 2,216 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны сжатия:

$$[M]_n = \frac{D}{4} \cdot [F]_n = 146 / 4 \cdot 2,216 \cdot 10^5 = 8089 \text{ Н м}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:

$$[F]_{e1} = \frac{31 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2,5} = 310 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 146^2 / (2,4) \cdot (100 \cdot (11 - 7,65) / 146)^{2,5} = 4,018 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_e = \frac{D}{3,5} \cdot [F]_{e1} = 146 / 3,5 \cdot 4,018 \cdot 10^6 = 1,676 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \frac{[M]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_n}{[M]_e} \right)^2}} = 8089 / (1 + (8089 / 1,676 \cdot 10^5)^2)^{1/2} = 8080 \text{ Н м}$$

$$8080 \text{ Н м} \geq 174,6 \text{ Н м}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Инв. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	К-5.00.00.000 PP					Лист
										233
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				

$$[Q]_{\pi} = 0.25 \cdot \pi \cdot D \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 0.25 * 3,142 * 146 * (11 - 7,65) * 141 = 5.416 \cdot 10^4 \text{ H}$$
$$l_o = 1140 \text{ mm}$$
$$[Q]_E = \frac{2.4 \cdot E \cdot (s-c)^2}{n_v} \cdot \left[0.18 + 3.3 \cdot \frac{D(s-c)}{l^2} \right] = \frac{2.4 * 1,83 \cdot 10^5 * (11 - 7,65)^2 / 2,4 * (0.18 + 3.3 * 146 * (11 - 7,65) / 1140^2)}{H} = 3,722 \cdot 10^5$$
$$[Q] = \frac{[Q]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\Pi}}{[Q]_{\text{E}}}\right)^2}} = 5,416 \cdot 10^4 / (1 + (5,416 \cdot 10^4 / 3,722 \cdot 10^5)^2)^{1/2} = 5,36 \cdot 10^4 \text{ H}$$

Заключение: Условие прочности и устойчивости выполнено

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

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0,1000 / 1,931 + 0 / 0 + 174,6 / 8080 + (363,1 / 5,36 \cdot 10^4)^2 = 0,07344 \leq 1$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, T:	20 °C
Расчётное внутреннее избыточное давление (с учётом гидростатического), p:	0,7139 МПа
Расчётный изгибающий момент, M:	243,7 Н·м
Расчётное поперечное усилие, Q:	506,9 Н
Расчётное осевое растягивающее усилие, F:	0 Н

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (условия гидротестирования):

$$[\sigma]^{20} = \eta^* R_{e/20} / n_T = 1 * 280 / 1,1 = 254,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E^{20} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_p + c = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} + c = (0,7139 \cdot 146) / (2 \cdot 254,5 \cdot 1 - 0,7139) + 7,65 = 7,855 \text{ мм}$$

$$7,855 \text{ мм} \leq 11 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие работоспособности выполнено**

Допускаемое давление:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 254,5 \cdot 1 \cdot (11 - 7,65) / (146 + 11 - 7,65) = 11,42 \text{ МПа}$$

$$11,42 \text{ МПа} \geq 0,7139 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Минимальное расстояние между "одиночными" штуцерами:

$$b_0 = 2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} = 2 \cdot (146 \cdot (11 - 7,65))^{1/2} = 44,23 \text{ мм}$$

Обечайка, нагруженная изгибающим моментом (п. 5.3.5)

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$[F]_{\pi} = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3,142 \cdot (146 + 11 - 7,65) \cdot (11 - 7,65) \cdot 254,5 = 4,001 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны сжатия:

$$[M]_{\pi} = \frac{D}{4} \cdot [F]_{\pi} = 146 / 4 \cdot 4,001 \cdot 10^5 = 1,46 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:

$$[F]_{\text{Е1}} = \frac{31 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2.5} = 310 \cdot 10^{-6} \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot 146^2 / (1,8) \cdot (100 \cdot (11 - 7,65) / 146)^{2.5} = 5,826 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_{\text{Е}} = \frac{D}{3.5} \cdot [F]_{\text{Е1}} = 146 / 3.5 \cdot 5,826 \cdot 10^6 = 2,43 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \frac{[M]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\pi}}{[M]_{\text{Е}}} \right)^2}} = 1,46 \cdot 10^4 / (1 + (1,46 \cdot 10^4 / 2,43 \cdot 10^5)^2)^{1/2} = 1,458 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

$$1,458 \cdot 10^4 \text{ Н м} \geq 243,7 \text{ Н м}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Обечайка, нагруженная поперечным усилием (п. 5.3.6)

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности:

$$[Q]_{\pi} = 0,25 \cdot \pi \cdot D \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 0,25 \cdot 3,142 \cdot 146 \cdot (11 - 7,65) \cdot 254,5 = 9,778 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$$l_p = 1140 \text{ мм}$$

Расчётная длина для расчёта от действия поперечной силы:

$$l_Q = 1140 \text{ мм}$$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

$$[Q]_{\text{Е}} = \frac{2,4 \cdot E \cdot (s - c)^2}{n_y} \cdot \left[0,18 + 3,3 \cdot \frac{D(s - c)}{l^2} \right] = \frac{2,4 \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot (11 - 7,65)^2}{1140^2} / 1,8 \cdot (0,18 + 3,3 \cdot 146 \cdot (11 - 7,65) / 1140^2) = 5,397 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\pi}}{[Q]_{\text{Е}}} \right)^2}} = 9,778 \cdot 10^4 / (1 + (9,778 \cdot 10^4 / 5,397 \cdot 10^5)^2)^{1/2} = 9,621 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Инв. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 PP
					Лист
					235

$$9,621 \cdot 10^4 \text{ Н} \geq 506,9 \text{ Н}$$

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0 / 0 + 0 / 0 + 243,7 / 1,458 \cdot 10^4 + (506,9 / 9,621 \cdot 10^4)^2 = 0,01675 \leq 1$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием (п. 5.3.3)

Допускаемое осевое растягивающее усилие:

$$[F] = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = 3,142 \cdot (146 + 11 - 7,65) \cdot (11 - 7,65) \cdot 254,5 \cdot 1 = 4,001 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны растяжения:

$$[M]_{\text{пр}} = \frac{D}{4} \cdot [F] = 146 / 4 \cdot 4,001 \cdot 10^5 = 1,46 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

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

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

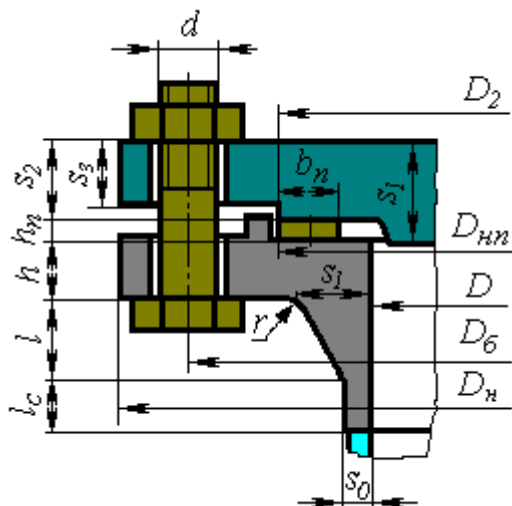
$$\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{пр}}} = (0 + 0,7139 \cdot 3,142 \cdot 146^2 / 4) / 4,001 \cdot 10^5 + 243,7 / 1,46 \cdot 10^4 = 0,04656 \leq 1$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Фланец DN500 с крышкой

Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.4-2007 и ГОСТ Р 52857.2-2007

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
			Дата
К-5.00.00.000 РР			
Лист			
236			



Исходные данные

Параметры крышки:

Материал:	09Г2С
Толщина стенки, s_1 :	37 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c_1 :	6 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, c_2 :	1,1 мм
Прибавка технологическая, c_3 :	0 мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, c :	7,1 мм
Толщина в месте прокладки, s_2 :	37 мм
Толщина вне уплотнения, s_3 :	31 мм
Наименьший диаметр наружной утоненной части, D_2 :	563 мм
Наружный диаметр крышки, D_n :	640 мм

Параметры фланца:

Тип фланца:	Приварные встык
Исполнение фланца:	Выступ-впадина
Диаметр болтовой окружности, D_6 :	600 мм
Материал фланца:	09Г2С (КП245) Gr.
Смежный элемент:	Штуцер А1 DN500
Материал смежного элемента:	09Г2С
Толщина стенки смежного элемента:	12 мм
Внутренний диаметр фланца, D :	500 мм
Наружный диаметр фланца, D_n :	640 мм
Толщина фланца, h :	40 мм
Сумма прибавок, c :	6 мм
Длина конической части втулки, l :	33 мм
Длина цилиндрической части втулки, l_c :	2 мм
Толщина цилиндрической части втулки, s_0 :	11 мм
Толщина конической части втулки, s_1 :	22 мм
Радиус перехода, r :	7 мм

Инов. № подл.	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 PP				Лист
				237

Материал:	35Х
Наружный диаметр, d:	20 мм
Количество, n:	28
Контроль затяжки:	Нет

Материал прокладки:	Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали
Толщина, h_n :	4,5 мм
Наружный диаметр, $D_{n.п.}$:	563 мм
Ширина, b_n :	12 мм
Коэффициент прочности сварного шва:	

$$\varphi_p = 1$$

Условия нагружения:

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,4 МПа

Свойства материала болтов (шпилек)

Температура болтов (шпилек), t_b : 127,5 °C
Номинальные допускаемые напряжения для материала 35Х при температуре $T = 127,5$ °C :

$$[\sigma]_6 = 228,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 35Х при температуре $T = 127,5\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_{\bar{\sigma}} = 2,131 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 35Х при температуре $T = 127,5^\circ\text{C}$:

$$\alpha_6 = 0,1337 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$$

Номинальные допускаемые напряжения для материала 35Х при температуре $T = 20^\circ\text{C}$:

$$[\sigma]_{\sigma=230}^{20} = 230 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 35Х при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_{\delta}^{20} = 2,18 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала смежного элемента фланца 2 Штуцер A1 DN500

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma]_{\text{ш}} = \min(R_{\text{е/т}} / n_{\text{т}}; R_{\text{м/т}} / n_{\text{в}}) = \min\{256,5 / 1,6; 430 / 2,6\} = 160,3 \text{ МПа}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma]_{\text{m}}^{20} = \min(R_{\text{e/t}} / n_{\text{T}}; R_{\text{m/t}} / n_{\text{B}}) = \min\{300 / 1,6; 470 / 2,6\} = 180,8 \text{ МПа}$$

Свойства материала фланца

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$$[\sigma]_{\Phi} = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{203 / 1,6; 424,6 / 2,6\} = 126,9 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_{\phi} = 1,866 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\alpha_{\text{th}} = 0,1248 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Инв. № подл.	19744.4	Подпись и дата		Взам. инв. №		Инв. № дубл.		Подпись и дата		$E_6 = 2,131 \cdot 10^5$ МПа Коэффициент линейного расширения для материала 35Х при температуре $T = 127,5$ °С: $\alpha_6 = 0,1337 \cdot 10^{-4}$ °С Номинальные допускаемые напряжения для материала 35Х при температуре $T = 20$ °С : $[\sigma]_{\sigma}^{20} = 230$ МПа Модуль продольной упругости для материала 35Х при температуре $T = 20$ °С: $E_{\sigma}^{20} = 2,18 \cdot 10^5$ МПа
										<p align="center">Свойства материала смежного элемента фланца 2 Штуцер А1 DN500</p> Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 150$ °С (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV): $[\sigma]_{ш} = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{256,5 / 1,6; 430 / 2,6\} = 160,3$ МПа Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 20$ °С (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV): $[\sigma]_{ш}^{20} = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{300 / 1,6; 470 / 2,6\} = 180,8$ МПа
Инв. № подл.	19744.4	Подпись и дата		Взам. инв. №		Инв. № дубл.		Подпись и дата		<p align="center">Свойства материала фланца</p> Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 144$ °С (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV): $[\sigma]_{ф} = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{203 / 1,6; 424,6 / 2,6\} = 126,9$ МПа Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 144$ °С: $E_{ф} = 1,866 \cdot 10^5$ МПа Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 144$ °С: $\alpha_{ф} = 0,1248 \cdot 10^{-4}$ °С
										<div> <div>Изм.</div> <div>Лист</div> <div>№ докум.</div> <div>Подп.</div> <div>Дата</div> </div> <div> <div>К-5.00.00.000 PP</div> <div>Лист</div> <div>238</div> </div>

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 20 °С (расчётные условия, коррозионная среда, группа аппарата III, IV):

$[\sigma]_{\phi}^{20} = \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B) = \min\{245 / 1,6; 440 / 2,6\} = 153,1 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 20 °С:

$E_{\phi}^{20} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Характеристики прокладки:

Тип и материал прокладки	Коэффициент m	Удельное давление обжатия $q_{обж}$, 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:

$b_0 = 12 \text{ мм}$

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:

$D_{np} = 563 \text{ мм}$

Средний эффективный диаметр прокладки:

$D_{ст} = D_{np} - b_0 = 563 - 12 = 551 \text{ мм}$

Для металлических и асбометаллических прокладок $y_n = 0$.

Расчётные параметры болтов (шпилек):

Рабочая длина болта (шпильки):

$L_{б0} = h + s_2 + h_{п} = 37 + 40 + 4,5 = 81,5 \text{ мм}$

Площадь сечения шпильки (по внутреннему диаметру резьбы):

$f_б = 0,225 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$

Эффективная длина шпильки:

$L_б = L_{б0} + 0,56 \cdot d = 81,5 + 0,56 \cdot 20 = 92,7 \text{ мм}$

Податливость шпилек:

$$y_б = \frac{L_б}{E_б^{20} \cdot f_б \cdot n} = \frac{92,7}{(2,18 \cdot 10^5 \cdot 0,225 \cdot 10^{-3} \cdot 28)} = 0,675 \cdot 10^{-7} \text{ мм/Н}$$

Расчётные параметры крышки:

$$K_{кр} = \frac{D_{к}}{D_{ст}} = 640 / 551 = 1,162$$

$$x_{кр} = \frac{0,67 \cdot [K_{кр}^2 \cdot (1 + 8,55 \cdot \lg K_{кр}) - 1]}{(K_{кр} - 1) \cdot [K_{кр}^2 - 1 + (1,857 \cdot K_{кр}^2 + 1) \cdot \left(\frac{s_1}{s_2}\right)^3]} = \frac{(0,67 \cdot (1,162^2 \cdot (1 + 8,55 \cdot \lg(1,162)) - 1)) / ((1,162 - 1) \cdot [1,162^2 - 1 + (1,857 \cdot 1,162^2 + 1) \cdot (37 / 37)^3])}{1} = 1,183$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре T = 20 °С:

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 PP				Лист
				239

$$e = 0.5 \cdot (D_{\text{сп}} - (D + 2 \cdot e) - s_3) = 0.5 \cdot (551 - (500 + 2 \cdot 0) - 15,1) = 17,95 \text{ мм}$$

Расчёт нагрузок:

Равнодействующая давления:

$$Q_d = 0.785 \cdot D_{\text{сп}}^2 \cdot p = 0.785 \cdot 551^2 \cdot 0,4 = 9,533 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Усилие на прокладке в расчётных условиях, необходимое для обеспечения герметичности:

$$R_{\pi} = \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_0 \cdot m \cdot |p| = 3,142 \cdot 551 \cdot 12 \cdot 3 \cdot |0,4| = 2,493 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке:

$$P_{\text{обж}} = 0.5 \cdot \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_0 \cdot q_{\text{обж}} = 0.5 \cdot 3,142 \cdot 551 \cdot 12 \cdot 69 = 7,166 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

$$\eta = y_{\pi} + y_e + y_{\phi}^I \cdot b^I + y_{\phi}^{II} \cdot b^{II} = 0 + 0,675 \cdot 10^{-7} + 0,6724 \cdot 10^{-5} \cdot 24,5^2 + 0,71 \cdot 10^{-5} \cdot 24,5^2 = 0,2123 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения с крышкой, нагруженного внутренним давлением:

$$\alpha = 1 - \frac{y_{\pi} - (y_{\phi}^I \cdot e + y_{\phi}^{II} \cdot b) \cdot b}{\eta} = 1 - (0 - (0,71 \cdot 10^{-5} \cdot 17,95 + 0,6724 \cdot 10^{-5} \cdot 24,5) \cdot 24,5) / 0,2123 \cdot 10^{-6} = 1,588$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в расчётных условиях:

$$P_{\text{б1}} = \alpha \cdot Q_d + R_{\pi} = 1,588 \cdot 9,533 \cdot 10^4 + 2,493 \cdot 10^4 = 1,764 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или сечению наименьшего диаметра:

$$A_{\text{б}} = n \cdot f_{\text{б}} = 28 \cdot 0,225 \cdot 10^{-3} = 0,006300 \text{ м}^2$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов:

$$P_{\text{б2}} = \max \{ P_{\text{обж}}; 0.4 \cdot A_{\text{б}} \cdot [\sigma]_{\text{б}}^{20} \} = \max \{ 7,166 \cdot 10^5; 0.4 \cdot 0,006300 \cdot 230 = 5,796 \cdot 10^5 \} = 7,166 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Расчёт без учета стесненности температурных деформаций

Расчёт болтов(шпилек):

Коэффициент увеличения допускаемых напряжений при затяжке: $\xi = 1,2$

Коэффициент условий работы: $K_{\text{уп}} = 1$

Коэффициент условий затяжки: $K_{\text{уз}} = 1$

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при затяжке:

$$[\sigma]_{\text{б}}^{\text{м}} = \xi \cdot K_{\text{уп}} \cdot K_{\text{уз}} \cdot K_{\text{ут}} \cdot [\sigma]_{\text{б}}^{20} = 1,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 276 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в условиях затяжки:

$$P_{\text{б}}^{\text{м}} = \max \{ P_{\text{б1}}; P_{\text{б2}} \} = \max \{ 1,764 \cdot 10^5; 7,166 \cdot 10^5 \} = 7,166 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{\text{б1}} = \frac{P_{\text{б}}^{\text{м}}}{A_{\text{б}}} \leq [\sigma]_{\text{б}}^{\text{м}}$$

$$\sigma_{\text{б1}} = \frac{P_{\text{б}}^{\text{м}}}{A_{\text{б}}} = 7,166 \cdot 10^5 / 0,006300 = 113,8 \text{ МПа}$$

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при $\sigma_{\text{б1}} < 120 \text{ МПа}$:

$$M_{\text{кр}} = 0.3 \cdot \frac{P_{\text{б}}^{\text{м}} \cdot d}{n} = 0.3 \cdot 7,166 \cdot 10^5 \cdot 20 / 28 = 153,6 \text{ Н м}$$

При наличии смазки величина $M_{\text{кр}}$ снижается на 25% и составляет $0.75 \cdot M_{\text{кр}} = 115,2 \text{ Н м}$

$113,8 \text{ МПа} \leq 276 \text{ МПа}$, **Условие прочности выполнено**

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при расчётных условиях:

Инов. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	К-5.00.00.000 PP					Лист
										241
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

$$[\sigma]_6^P = K_{\text{уп}} \cdot K_{\text{уз}} \cdot K_{\text{ут}} \cdot [\sigma]_6 = 1 * 1 * 1 * 228,5 = 228,5 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в расчётных условиях:

$$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot Q_{\text{д}} = 7,166 \cdot 10^5 + (1 - 1,588) * 9,533 \cdot 10^4 = 6,605 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности в расчётных условиях:

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} \leq [\sigma]_6^P$$

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} = 6,605 \cdot 10^5 / 0,006300 = 104,8 \text{ МПа}$$

104,8 МПа ≤ 228,5 МПа, **Условие прочности выполнено**

Болтовая нагрузка в условиях затяжки:

$$P_6^M = \max\{P_{b1}^M; P_{b2}^M\} = \max\{1,764 \cdot 10^5; 7,166 \cdot 10^5\} = 7,166 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} \leq [\sigma]_6^M$$

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} = 7,166 \cdot 10^5 / 0,006300 = 113,8 \text{ МПа}$$

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при $\sigma_{61} < 120 \text{ МПа}$:

$$M_{\text{кр}} = 0,3 \cdot \frac{P_6^M \cdot d}{n} = 0,3 * 7,166 \cdot 10^5 * 20 / 28 = 153,6 \text{ Н м}$$

При наличии смазки величина $M_{\text{кр}}$ снижается на 25% и составляет $0,75 * M_{\text{кр}} = 115,2 \text{ Н м}$

Расчёт ответного фланца:

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:

$$C_F = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_6}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0,5}}} \right\} = \max\{1; (3,142 * 600 / 28 / (2 * 20 + 6 * 40 / (3 + 0,5)))^{1/2}\} = 1$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке:

$$M^M = C_F \cdot P_6^M \cdot b = 1 * 7,166 \cdot 10^5 * 24,5 = 1,756 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

$$D^* = (D + 2 \cdot c) \text{ при } (D + 2 \cdot c) \geq 20 \cdot (s_1 - c) = 500 + 2 * 0 \text{ при } (500 + 2 * 0) \geq 20 * (22 - 0) = 500 \text{ мм}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении s_1 :

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 1,756 \cdot 10^4 / (1,002 * (22 - 6)^2 * 500) = 136,9 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_R^M = \frac{1,33 \cdot \beta_F \cdot h + 1,0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M^M = (1,33 * 0,8379 * 40 + 74,16) / (1,002 * 40^2 * 74,16 * 500) * 1,756 \cdot 10^4 = 35,06 \text{ МПа}$$

$$\beta_Y = \frac{1}{K - 1} \cdot \left(0,69 + 5,72 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (1,28 - 1) * (0,69 + 5,72 * 1,28^2 * \lg 1,28 / (1,28^2 - 1)) = 8,085$$

$$\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (1,28^2 + 1) / (1,28^2 - 1) = 4,133$$

Инов. № подл. 19744.4	Подпись и дата				
	Взам. инв. №				
	Инов. № дубл.				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 PP
					Лист 242

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{b^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 8,085 * 1,756 \cdot 10^4 / (40^2 * 500) - 4,133 * 35,06 = 32,54 \text{ МПа}$$
$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|, \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma_M]^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ |136,9 + 35,06|; |136,9 + 32,54| \} = 171,9 \text{ МПа}$$

$$[\sigma]_{\pi}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\phi}^{20} = 1.5 * 153,1 = 229,7 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_{\text{вр}}^{20} = 1 \cdot 229,7 = 229,7 \text{ МПа}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при расчётных условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \{ P_6^P \cdot b + Q_{\pi^+} \cdot e; |Q_{\pi^+}| \cdot e \} = 1 \cdot \max \{ 6,605 \cdot 10^5 \cdot 24,5 + 9,533 \cdot 10^4 \cdot 17,95; |9,533 \cdot 10^4| \cdot 17,95 \} = 1,789 \cdot 10^4 \text{ H m}$$

$$\sigma_1^p = \frac{M^p}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 1,789 \cdot 10^4 / (1,002 \cdot (22 - 6)^2 \cdot 500) = 139,5 \text{ МПа}$$
$$\sigma_R^p = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M^p = (1.33 \cdot 0.8379 \cdot 40 + 74.16) / (1.002 \cdot 40^2 \cdot 74.16 \cdot 500) \cdot 1.789 \cdot 10^4 = 35.74 \text{ МПа}$$
$$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 8,085 * 1,789 \cdot 10^4 / (40^2 * 500) - 4,133 * 35,74 = 33,16 \text{ МПа}$$
$$\sigma_{\text{mm}}^p = \frac{Q_{\pi}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = 9,533 \cdot 10^4 / (3,142 \cdot (500 + 22) \cdot (22 - 6)) = 3,633 \text{ МПа}$$
$$\max \left\{ \left| \sigma_1^p - \sigma_{\text{lim}}^p + \sigma_R^p \right|, \left| \sigma_1^p - \sigma_{\text{lim}}^p + \sigma_T^p \right|, \left| \sigma_1^p + \sigma_{\text{lim}}^p \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\text{br}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_I^P - \sigma_{\text{lim}}^P + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_I^P - \sigma_{\text{lim}}^P + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_I^P + \sigma_{\text{lim}}^P \right| \right\} = \max \{ |139,5 - 3,633 + 35,74|; |139,5 - 3,633 + 33,16|; |139,5 + 3,633| \} = 171,6 \text{ MPa}$$

$$[\sigma]_{\text{вк}} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 1.5 \cdot 126,9 = 190,4 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}} = 1 \cdot 190,4 = 190,4 \text{ МПа}$$

$$f = \max \left\{ \frac{C_{36}}{1+A}, 1.0 \right\} = \max \{ 2.855 / (1+1); 1.0 \} = 1.427$$
$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1,427 \cdot 136,9 = 195,3 \text{ МПа}$$
$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

					К-5.00.00.000 РР	Лист
						243
м.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

$$[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_F^{20} = 3 * 153,1 = 459,4 \text{ МПа}$$

$$1,3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1,3 * 459,4 = 597,2 \text{ МПа}$$

195,3 МПа ≤ 597,2 МПа, **Условие прочности выполнено**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в расчётных условиях в сечении s_0 :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1,427 * 139,5 = 199,1 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в расчётных условиях в сечении s_0 :

$$\sigma_{0mm}^P = \frac{Q_{\pi}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = 9,533 \cdot 10^4 / (3,142 * (500 + 11) * (11 - 6)) = 11,88 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в расчётных условиях в сечении s_0 :

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 0,4 * 500 / (2 * (11 - 6)) = 20 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в расчётных условиях в сечении s_0 :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^P \right|; \left| 0,3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0,7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^P - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1,3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^P \right|; \left| 0,3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0,7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^P - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \max\{|199,1 \pm 11,88|; |0,3 * 199,1 \pm 20|; |0,7 * 199,1 \pm (11,88 - 20)|\} = 211 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_F = 3 * 126,9 = 380,7 \text{ МПа}$$

$$1,3 \cdot [\sigma]_R = 1,3 * 380,7 = 494,9 \text{ МПа}$$

211 МПа ≤ 494,9 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие статической прочности в расчётных условиях в сечении s_0 :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} \leq [\sigma]_F$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} = \max\{|20|; |11,88|\} = 20 \text{ МПа}$$

20 МПа ≤ 126,9 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_F^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max\{|35,06|; |32,54|\} = 35,06 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_F^{20} = 1 * 153,1 = 153,1 \text{ МПа}$$

35,06 МПа ≤ 153,1 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие статической прочности в расчётных условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_F$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} = \max\{|35,74|; |33,16|\} = 35,74 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_F = 1 * 126,9 = 126,9 \text{ МПа}$$

35,74 МПа ≤ 126,9 МПа, **Условие прочности выполнено**

Жёсткость фланца:

Угол поворота фланца в расчётных условиях:

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. №	Подпись и дата	Инов. № подл.	19744.4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 РР			Лист
								244

Нагрузка от температурных деформаций:

$$Q_t = \gamma \cdot (\alpha'_{\Phi} \cdot h' \cdot (t_{\Phi 1} - 20^0 C) + \alpha'_{\Phi} \cdot h'' \cdot (t_{\Phi 2} - 20^0 C) - \alpha_{\Phi} \cdot (h' + h'') \cdot (t_{\Phi} - 20^0 C)) = \frac{4,474 \cdot 10^6 \cdot (0,1204 \cdot 10^{-4} \cdot 37 \cdot (144 - 20^0 C) + 0,1248 \cdot 10^{-4} \cdot 40 \cdot (144 - 20^0 C) - 0,1337 \cdot 10^{-4} \cdot (37 + 40) \cdot (127,5 - 20^0 C))}{2,886 \cdot 10^4} = 2,886 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в расчётных условиях:

$$P_{\Phi 1} = \max \left\{ \begin{array}{l} \alpha \cdot Q_{\Phi} + R_{\Pi} \\ \alpha \cdot Q_{\Phi} + R_{\Pi} - Q_t \end{array} \right\} = \max \{ 1,588 \cdot 9,533 \cdot 10^4 + 2,493 \cdot 10^4 = 1,764 \cdot 10^5; 1,588 \cdot 9,533 \cdot 10^4 + 2,493 \cdot 10^4 - 2,886 \cdot 10^4 = 1,475 \cdot 10^5 \} = 1,764 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Болтовая нагрузка в расчётных условиях:

$$P_{\Phi}^P = P_{\Phi}^M + (1 - \alpha) \cdot Q_{\Phi} + Q_t = \frac{7,166 \cdot 10^5}{2,886 \cdot 10^4} + (1 - 1,588) \cdot 9,533 \cdot 10^4 + 2,886 \cdot 10^4 = 6,894 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

$$\Psi = \frac{P_{\Phi}^P}{Q_{\Phi}} = \frac{6,894 \cdot 10^5}{9,538 \cdot 10^4} = 7,228$$

$$K_{\Phi} = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{1 + 3 \cdot \Psi \cdot \left(\frac{D_3}{D_{\text{с.п}}} - 1 \right)}{\frac{D_3}{D_{\text{с.п}}}}} = 0,41 \cdot \frac{(1 + 3 \cdot 7,228 \cdot (600 / 551 - 1))}{(600 / 551)^{1/2}} = 0,6723$$

Поправочный коэффициент для допускаемого давления $K_p = 1,0$

Допускаемое давление:

$$[p] = \left(\frac{s_1 - c}{K_0 \cdot K_{\Phi} \cdot D_p} \right)^2 \cdot [\sigma] \cdot \Phi \cdot K_p = ((37 - 7,1) / (1 \cdot 0,6723 \cdot 551))^2 \cdot 145,1 \cdot 1 \cdot 1 = 0,9449 \text{ МПа}$$

0,9449 МПа \geq 0,4 МПа

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Днища и крышки, нагруженные избыточным давлением

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_{\Phi} + c = K_{\Phi} \cdot K_0 \cdot D_p \cdot \sqrt{\frac{p}{\Phi \cdot [\sigma] \cdot K_p}} + c = 0,6723 \cdot 1 \cdot 551 \cdot (0,4 / (1 \cdot 145,1 \cdot 1))^{1/2} + 7,1 = 26,55 \text{ мм}$$

26,55 мм \leq 37 мм

Заключение: **Условие прочности выполнено**

$$K_{\gamma} = 0,8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_{\text{с.п}}} - 1} = 0,8 \cdot [600 / 551 - 1]^{1/2} = 0,2386$$

$$\Phi = \max \left\{ \frac{P_{\Phi}^P}{[\sigma]}; \frac{P_{\Phi}^M}{[\sigma]^{20}} \right\} = \max \{ 6,894 \cdot 10^5 / 145,1; 7,166 \cdot 10^5 / 169,2 \} = 0,004753 \text{ м}^2$$

Расчётная толщина крышки в месте уплотнения с учётом прибавок:

$$s_{2\Phi} + c = \max \left\{ K_{\gamma} \cdot \sqrt{\Phi}; \frac{0,6}{D_{\text{с.п}}} \cdot \Phi \right\} + c = \max \{ 0,2386 \cdot 0,004753^{1/2}; 0,6 \cdot 0,004753 / 551 \} + 7,1 = 23,55 \text{ мм}$$

23,55 мм \leq 37 мм

Заключение: **Условие прочности выполнено**

$$K'_{\gamma} = 0,8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_2} - 1} = 0,8 \cdot [600 / 563 - 1]^{1/2} = 0,2051$$

Расчётная толщина вне зоны уплотнения с учётом прибавок:

$$s_{3\Phi} + c = \max \left\{ K'_{\gamma} \cdot \sqrt{\Phi}; \frac{0,6}{D_2} \cdot \Phi \right\} + c = \max \{ 0,2051 \cdot 0,004753^{1/2}; 0,6 \cdot 0,004753 / 563 \} + 7,1 = 21,24 \text{ мм}$$

21,24 мм \leq 31 мм

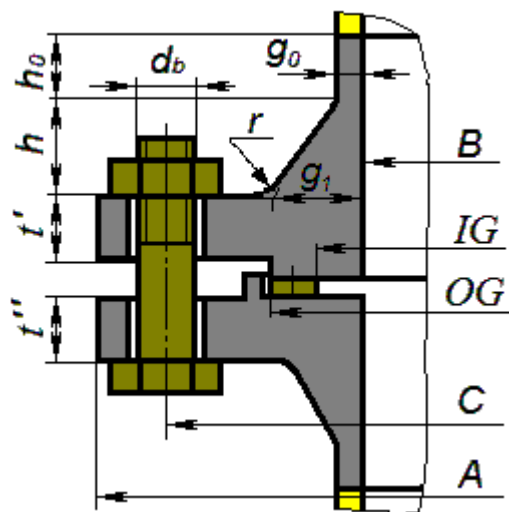
Инов. № подл.	19744.4	Подпись и дата	
Взам. инв. №		Инов. № дубл.	
Подпись и дата		Подпись и дата	
Инов. № подл.	19744.4	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
К-5.00.00.000 РР			
Лист 246			

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 РР				
Лист				
247				

Фланцевое соединение DN300

Расчёт на прочность и герметичность по ASME VIII-2



Исходные данные

Тип фланца: Приварные встык
Исполнение: Выступ-впадина
Теплоизоляция: Нет
Свободный/интегральный: -

Диаметр болтовой окружности, С: 450 мм

Данные первого фланца (кольца):

Смежный элемент: Штуцер В DN300
Материал смежного элемента: 09Г2С (КП245) Gr.
Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245) Gr.
Наружный диаметр фланца (кольца), А: 510 мм
Толщина фланца (кольца), t: 42 мм
Сумма прибавок, с: 6 мм
Внешняя коррозия фланца, c_f : 0 мм
Внутренний диаметр фланца, В: 301 мм
Длина конической части втулки, h: 47,5 мм
Длина цилиндрической части втулки, h_0 : 22,5 мм
Толщина цилиндрической части втулки, g_0 : 14,5 мм
Толщина конической части втулки, g_1 : 33,5 мм
Радиус перехода, r: 5 мм

Данные второго фланца (кольца):

Смежный элемент:
Материал смежного элемента: 09Г2С
Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245) Gr.
Наружный диаметр фланца (кольца), А: 510 мм
Толщина фланца (кольца), t: 42 мм

Инов. № подл. 19744.4	Подпись и дата				Инов. № дубл.	Подпись и дата			
	Взам. инв. №					Инов. №			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Свободный/интегральный.				
					Диаметр болтовой окружности, С: 450 мм				
					Данные первого фланца (кольца):				
					Смежный элемент:		Штуцер В DN300		
					Материал смежного элемента:		09Г2С (КП245) Gr.		
					Материал фланца (кольца):		09Г2С (КП245) Gr.		
					Наружный диаметр фланца (кольца), А:		510 мм		
					Толщина фланца (кольца), t:		42 мм		
					Сумма прибавок, с:		6 мм		
					Внешняя коррозия фланца, с _г :		0 мм		
Внутренний диаметр фланца, В:		301 мм							
Длина конической части втулки, h:		47,5 мм							
Длина цилиндрической части втулки, h ₀ :		22,5 мм							
Толщина цилиндрической части втулки, g ₀ :		14,5 мм							
Толщина конической части втулки, g ₁ :		33,5 мм							
Радиус перехода, г:		5 мм							
Данные второго фланца (кольца):					Смежный элемент:				
Материал смежного элемента:					09Г2С				
Материал фланца (кольца):					09Г2С (КП245) Gr.				
Наружный диаметр фланца (кольца), А:					510 мм				
Толщина фланца (кольца), t:					42 мм				
</									

Свойства материала смежного элемента фланца 2

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{но}2} = 171,7 \text{ МПа}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{нг}2} = 196 \text{ МПа}$$

Свойства материала фланца (кольца) 1

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{fo}1} = \min(R_{\text{e}t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{203 / 1,5; 440 / 2,4\} = 135,4 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_1 = 1,866 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\alpha_1 = 0,1248 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{g}1} = \min(R_{\text{e}t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{245 / 1,5; 440 / 2,4\} = 163,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E^{20}_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала фланца (кольца) 2

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{fo}2} = \min(R_{\text{e}t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{203 / 1,5; 440 / 2,4\} = 135,4 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_2 = 1,866 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\alpha_2 = 0,1248 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{g}2} = \min(R_{\text{e}t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{245 / 1,5; 440 / 2,4\} = 163,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E^{20}_2 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётные параметры первого фланца:

Внутренний диаметр фланца (с учетом коррозии):

$$B = B + 2 \cdot c = 301 + 2 \cdot 6 = 313 \text{ мм}$$

Диаметр втулки с учетом коррозии (для фланцев, приварных встык):

$$\xi_0 = \xi_0 - c = 14,5 - 6 = 8,5 \text{ мм}$$

Больший диаметр конической втулки с учетом коррозии:

$$\xi_1 = \xi_1 - c = 33,5 - 6 = 27,5 \text{ мм}$$

Толщина фланца, с учетом коррозии:

$$t = t - c_f = 42 - 0 = 42 \text{ мм}$$

Расчётные параметры второго фланца:

Внутренний диаметр фланца (с учетом коррозии):

$$B = B + 2 \cdot c = 301 + 2 \cdot 3 = 307 \text{ мм}$$

Диаметр втулки с учетом коррозии (для фланцев, приварных встык):

$$\xi_0 = \xi_0 - c = 14,5 - 3 = 11,5 \text{ мм}$$

Больший диаметр конической втулки с учетом коррозии:

$$\xi_1 = \xi_1 - c = 33,5 - 3 = 30,5 \text{ мм}$$

Толщина фланца, с учетом коррозии:

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 PP				Лист
				250

t = t - c_f = 42 - 0 = 42 мм

Характеристики прокладки:

Тип и материал прокладки	Прокладочный коэффициент, m	Давление обжатия, у, МПа	Допускаемое удельное давление [q], МПа	Коэффициент обжатия К	Условный модуль сжатия E _m , МПа
Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали	3	69	-	-	-

Ширина, используемая для определения базовой контактной ширины прокладки через b₀, на основании возможной контактной ширины прокладки:

N = (OG - IG) / 2 = (363 - 343) / 2 = 10 мм

Базовая контактная ширина прокладки:

b₀ = N / 2 = 10 / 2 = 5 мм

Диаметр окружности приложения реакции со стороны прокладки:
Если b₀ ≤ 6 мм, G равно среднему диаметру контактирующей поверхности прокладки.

G = (OG + max{B', B'', IG}) / 2 = (363 + max{301; 301; 343}) / 2 = 353 мм

Ширина, используемая для определения базовой контактной ширины прокладки через b₀, на основании возможной контактной ширины прокладки:

N = (OG - IG) / 2 = (363 - 343) / 2 = 10 мм

Базовая контактная ширина прокладки:

b₀ = N / 2 = 10 / 2 = 5 мм

Диаметр окружности приложения реакции со стороны прокладки:
Если b₀ ≤ 6 мм, G равно среднему диаметру контактирующей поверхности прокладки.

G = (OG + max{B', B'', IG}) / 2 = (363 + max{301; 301; 343}) / 2 = 353 мм

Эффективная контактная ширина прокладки:

b = { b₀ если b₀ ≤ 6 мм
 2.5 · √b₀ если b₀ > 6 мм } = 5 мм

Расчёт нагрузок

Проектная болтовая нагрузка для расчётных условий (для несамонуплотняющихся прокладок):

W₀ = 0.785 · G² · p + 2 · b · π · G · m · p = 0.785 · 353² · 0.4 + 2 · 5 · 3.142 · 353 · 3 · 0.4 = 5,244 · 10⁴ Н

Величина растягивающей внешней силы:

F_A = 1,09 · 10⁴ Н

Сжимающими нагрузками пренебрегают, и в этом случае F_A приравнивается нулю.
Внешний изгибающий момент:

M_E = 1,329 · 10⁴ Н м

W_с = π · b · G · y = 3.142 · 5 · 353 · 69 = 3,826 · 10⁵ Н

Общая расчетная площадь сечения болтов:

Инов. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата						Лист
					К-5.00.00.000 PP					251
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

$$A_m = \max \left[\frac{W_o + F_A + \frac{4 \cdot M_E}{G}}{S_{bo}}; \frac{W_{gs}}{S_{bg}} \right] = \max[(5,244 \cdot 10^4 + 1,09 \cdot 10^4 + 4 \cdot 1,329 \cdot 10^4 / 353) / 143; 3,826 \cdot 10^5 / 147,2] = 0,002599 \text{ м}^2$$

Диаметр сечения болта (шпильки) с учетом коррозии:

$$d_{bc} = 30 \text{ мм}$$

Площадь сечения болта (шпильки) (по внутреннему диаметру резьбы с учетом коррозии):

$$f_b = 0,52 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Площадь поперечного сечения болтов по внутреннему диаметру резьбы или минимальному диаметру стержня:

$$A_b = n \cdot f_b = 16 \cdot 0,52 \cdot 10^{-3} = 0,008320 \text{ м}^2$$

Расчёт болтов(шпилек):

Условие прочности болтов:

$$A_m \leq A_b$$

$$0,002599 \text{ м}^2 \leq 0,008320 \text{ м}^2$$

Условие прочности выполнено

Расчёт напряжений первого фланца:

Равнодействующая давления на внутренней поверхности фланца:

$$H_D = 0,785 \cdot B^2 \cdot p = 0,785 \cdot 313^2 \cdot 0,4 = 3,076 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Плечо момента для силы H_D (фланцы интегрального типа, или другие, рассчитываемые аналогично):

$$h_D = \frac{C - B - g_1}{2} = (450 - 313 - 27,5) / 2 = 54,75 \text{ мм}$$

Равнодействующая давления:

$$H = 0,785 \cdot G^2 \cdot p = 0,785 \cdot 353^2 \cdot 0,4 = 3,913 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Разница между общей равнодействующей давления и равнодействующей на внутренней поверхности фланца:

$$H_T = H - H_D = 3,913 \cdot 10^4 - 3,076 \cdot 10^4 = 8365 \text{ Н}$$

Радиальное расстояние от реакции прокладки до болтовой окружности:

$$h_G = \frac{C - G}{2} = (450 - 353) / 2 = 48,5 \text{ мм}$$

Плечо для нагрузки H_T (интегральные фланцы, а также иные, рассчитываемые аналогично):

$$h_T = \frac{1}{2} \left[\frac{C - B}{2} + h_G \right] = 1/2 \cdot [(450 - 313) / 2 + 48,5] = 58,5 \text{ мм}$$

Нагрузка на прокладку (разница между проектной болтовой нагрузкой и равнодействующей давления), в расчётах:

$$H_G = W_o - H = 5,244 \cdot 10^4 - 3,913 \cdot 10^4 = 1,331 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Болтовой интервал:

$$B_s = \frac{\pi \cdot C}{n} = 3,142 \cdot 450 / 16 = 88,36 \text{ мм}$$

Номинальный диаметр болта:

$$a = d_b = 30 \text{ мм}$$

Коэффициент болтового интервала:

$$B_{sc} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{B_s}{2 \cdot a + t}} \right\} = \max \{ 1; (88,36 / (2 \cdot 30 + 42))^{1/2} \} = 1$$

$$X_g = \frac{g_1}{g_0} = 27,5 / 8,5 = 3,235$$

Коэффициент

Инов. № подл.	Инов. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата
19744.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
К-5.00.00.000 PP			Лист
			252

$$h_o = \sqrt{B \cdot g_0} = (313 \cdot 8,5)^{1/2} = 51,58 \text{ мм}$$

$$X_h = \frac{h}{h_o} = 47,5 / 51,58 = 0,9209$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$F = 0,7049$$

Расчетные коэффициенты:

$$e = \frac{F}{h_o} = 0,7049 / 51,58 = 0,01367 \text{ 1/мм}$$

$$K = \frac{A}{B} = 510 / 313 = 1,629$$

$$T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg K) - 1}{(1,0472 + 1,9448 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (1,629^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg 1,629) - 1) / ((1,0472 + 1,9448 \cdot 1,629^2) \cdot (1,629 - 1)) = 1,655$$

$$U = \frac{K^2 (1 + 8,55246 \cdot \lg K) - 1}{1,36136 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (1,629^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg 1,629) - 1) / (1,36136 \cdot (1,629^2 - 1) \cdot (1,629 - 1)) = 4,562$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$V = 0,07960$$

Коэффициент d для интегральных фланцев:

$$d = \frac{U}{V} \cdot h_o \cdot g_0^2 = 4,562 / 0,07960 \cdot 51,58 \cdot 8,5^2 = 0,2136 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$L = \frac{t \cdot e + 1}{T} + \frac{t^3}{d} = (42 \cdot 0,01367 + 1) / 1,655 + 42^3 / 0,2136 \cdot 10^{-3} = 1,298$$

Момент инерции сечения фланца при изгибе (интегральные фланцы с втулкой):

$$I = \frac{0,0874 \cdot L \cdot g_0^2 \cdot h_o \cdot B}{V} = 0,0874 \cdot 1,298 \cdot 8,5^2 \cdot 51,58 \cdot 313 / 0,07960 = 0,1662 \cdot 10^{-5} \text{ м}^4$$

$$G_{\text{вг}} = 0,5 \cdot (g_0 + g_1) = 0,5 \cdot (8,5 + 27,5) = 18 \text{ мм}$$

$$A_R = 0,5 \cdot (A - B) = 0,5 \cdot (510 - 313) = 98,5 \text{ мм}$$

Так как $t \geq G_{\text{вг}}$,

$$A_A = A_R = 98,5 \text{ мм}$$

$$B_B = t = 42 \text{ мм}$$

$$K_{AB} = \left\{ A_A \cdot B_B^3 \right\} \cdot \left[\frac{1}{3} - 0,21 \cdot \left(\frac{B_B}{A_A} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{12} \cdot \left\{ \frac{B_B}{A_A} \right\}^4 \right) \right] = (98,5 \cdot 42^3) \cdot [1/3 - 0,21 \cdot (42 / 98,5) \cdot (1 - 1/12 \cdot (42 / 98,5)^4)] = 0,1781 \cdot 10^{-5} \text{ м}^4$$

$$C_C = h = 47,5 \text{ мм}$$

$$D_{DG} = G_{\text{вг}} = 18 \text{ мм}$$

$$K_{CD} = \left\{ C_C \cdot D_{DG}^3 \right\} \cdot \left[\frac{1}{3} - 1,05 \cdot \left(\frac{D_{DG}}{C_C} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{192} \cdot \left\{ \frac{D_{DG}}{C_C} \right\}^4 \right) \right] = (47,5 \cdot 18^3) \cdot [1/3 - 1,05 \cdot (18 / 47,5) \cdot (1 - 1/192 \cdot (18 / 47,5)^4)] = (-0,1787 \cdot 10^{-7}) \text{ м}^4$$

Полярный момент сечения фланца (интегральные фланцы, плоские фланцы с втулкой):

$$I_P = K_{AB} + K_{CD} = 0,1781 \cdot 10^{-5} + (-0,1787 \cdot 10^{-7}) = 0,1763 \cdot 10^{-5} \text{ м}^4$$

Компонент проектного момента на фланце, как результат действия внешнего изгибающего момента и/или осевой силы:

Инв. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	К-5.00.00.000 PP					Лист
										253
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

$$M_{oe} = 4 \cdot M_E \cdot \left[\frac{I}{0,3846 \cdot I_p + I} \right] \cdot \left[\frac{h_D}{C - 2 \cdot h_D} \right] + F_A \cdot h_D = 4 \cdot 1,329 \cdot 10^4 \cdot [0,1662 \cdot 10^{-5} / (0,3846 \cdot 0,1763 \cdot 10^{-5} + 0,1662 \cdot 10^{-5})] \cdot [54,75 / (450 - 2 \cdot 54,75)] + 1,09 \cdot 10^4 \cdot 54,75 = 6670 \text{ Н м}$$

Коэффициент момента для расчета свободных колец:

$$F_S = 1$$

Изгибающий момент в расчётных условиях (внутреннее давление):

$$M_o = [(H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G) \cdot B_{SC} + M_{oe}] \cdot F_S = [(3,076 \cdot 10^4 \cdot 54,75 + 8365 \cdot 58,5 + 1,331 \cdot 10^4 \cdot 48,5) \cdot 1 + 6670] \cdot 1 = 9489 \text{ Н м}$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$f = 1,095$$

Продольные напряжения во втулке, в расчётных условиях:

$$S_H = \frac{f \cdot M_o}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1,095 \cdot 9489 / (1,298 \cdot 27,5^2 \cdot 313) = 33,83 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min \{1,5 \cdot S_{\text{до}}; 2,5 \cdot S_{\text{но}}\}$$

$$\min \{1,5 \cdot S_{\text{до}}; 2,5 \cdot S_{\text{но}}\} = \min \{1,5 \cdot 135,4; 2,5 \cdot 134,7\} = 203 \text{ МПа}$$

33,83 МПа ≤ 203 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, расчётные условия:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_o}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 \cdot 42 \cdot 0,01367 + 1) \cdot 9489 / (1,298 \cdot 42^2 \cdot 313) = 23,35 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{\text{до}}$$

23,35 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left(0,66845 + 5,7169 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (1,629 - 1) \cdot (0,66845 + 5,7169 \cdot 1,629^2 \cdot \lg 1,629 / (1,629^2 - 1)) = 4,152$$

$$Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (1,629^2 + 1) / (1,629^2 - 1) = 2,209$$

Касательные напряжения во фланце, расчётные условия:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_o}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 4,152 \cdot 9489 / (42^2 \cdot 313) - 2,209 \cdot 23,35 = 19,78 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{\text{до}}$$

19,78 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (33,83 + 23,35) / 2 = 28,59 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\text{до}}$$

28,59 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (33,83 + 19,78) / 2 = 26,81 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\text{до}}$$

26,81 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

Болтовая нагрузка в условиях монтажа:

$$W_{\text{г}} = \left(\frac{A_m + A_b}{2} \right) \cdot S_{b\text{г}} = (0,002599 + 0,008320) / 2 \cdot 147,2 = 8,037 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
К-5.00.00.000 PP			
Лист 254			

Изгибающий момент в условиях монтажа (внутреннее давление):

$$M_{\xi} = \frac{W_{\xi} \cdot (C - G) \cdot B_{sc} \cdot F_s}{2} = 8,037 \cdot 10^5 \cdot (450 - 353) \cdot 1 \cdot 1/2 = 3,898 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

Продольные напряжения во втулке, в условиях монтажа:

$$S_H = \frac{f \cdot M_{\xi}}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1,095 \cdot 3,898 \cdot 10^4 / (1,298 \cdot 27,5^2 \cdot 313) = 139 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min\{1,5 \cdot S_{\xi g}; 2,5 \cdot S_{ng}\}$$

$$\min\{1,5 \cdot S_{\xi g}; 2,5 \cdot S_{ng}\} = \min\{1,5 \cdot 163,3; 2,5 \cdot 163,3\} = 245 \text{ МПа}$$

139 МПа ≤ 245 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_{\xi}}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 \cdot 42 \cdot 0,01367 + 1) \cdot 3,898 \cdot 10^4 / (1,298 \cdot 42^2 \cdot 313) = 95,91 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{\xi g}$$

95,91 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Касательные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_{\xi}}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 4,152 \cdot 3,898 \cdot 10^4 / (42^2 \cdot 313) - 2,209 \cdot 95,91 = 81,26 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{\xi g}$$

81,26 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (139 + 95,91) / 2 = 117,4 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\xi g}$$

117,4 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (139 + 81,26) / 2 = 110,1 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\xi g}$$

110,1 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие прочности выполнено

Жесткость фланца

- для расчётных условий:

Коэффициент жесткости для интегральных фланцев:

$$K_R = 0,3$$

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, расчётные условия):

$$J = \frac{52,14 \cdot V \cdot M_o}{L \cdot E_{yo} \cdot g_o^2 \cdot K_R \cdot h_o} = (52,14 \cdot 0,07960 \cdot 9489) / (1,298 \cdot 1,866 \cdot 10^5 \cdot 8,5^2 \cdot 0,3 \cdot 51,58) = 0,1455$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1,0$$

$$0,1455 \leq 1,0$$

Условие жёсткости выполнено

- для условий монтажа:

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, условия монтажа):

Инв. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	К-5.00.00.000 PP					Лист
										255
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

$$J = \frac{52.14 \cdot V \cdot M_{\varepsilon}}{L \cdot E_{\varepsilon} \cdot g_0^2 \cdot K_R \cdot h_0} = (52.14 \cdot 0,07960 \cdot 3,898 \cdot 10^4) / (1,298 \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot 8,5^2 \cdot 0,3 \cdot 51,58) = 0,5603$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1.0$$

$$0,5603 \leq 1.0$$

Условие жёсткости выполнено

Расчёт напряжений второго фланца:

Равнодействующая давления на внутренней поверхности фланца:

$$H_D = 0.785 \cdot B^2 \cdot p = 0.785 \cdot 307^2 \cdot 0,4 = 2,959 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Плечо момента для силы H_D (фланцы интегрального типа, или другие, рассчитываемые аналогично):

$$h_D = \frac{C - B - g_1}{2} = (450 - 307 - 30,5) / 2 = 56,25 \text{ мм}$$

Разница между общей равнодействующей давления и равнодействующей на внутренней поверхности фланца:

$$H_T = H - H_D = 3,913 \cdot 10^4 - 2,959 \cdot 10^4 = 9533 \text{ Н}$$

Плечо для нагрузки H_T (интегральные фланцы, а также иные, рассчитываемые аналогично):

$$h_T = \frac{1}{2} \left[\frac{C - B}{2} + h_G \right] = 1/2 \cdot [(450 - 307) / 2 + 48,5] = 60 \text{ мм}$$

Коэффициент болтового интервала:

$$B_{SC} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{B_S}{2 \cdot a + t}} \right\} = \max \{ 1; (88,36 / (2 \cdot 30 + 42))^{1/2} \} = 1$$

$$X_{\varepsilon} = \frac{g_1}{g_0} = 30,5 / 11,5 = 2,652$$

Коэффициент

$$h_0 = \sqrt{B \cdot g_0} = (307 \cdot 11,5)^{1/2} = 59,42 \text{ мм}$$

$$X_h = \frac{h}{h_0} = 47,5 / 59,42 = 0,7994$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$F = 0,743$$

Расчетные коэффициенты:

$$e = \frac{F}{h_0} = 0,743 / 59,42 = 0,01251 \text{ 1/мм}$$

$$K = \frac{A}{B} = 510 / 307 = 1,661$$

$$T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55246 \cdot \lg K) - 1}{(1.0472 + 1.9448 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (1,661^2 \cdot (1 + 8.55246 \cdot \lg 1,661) - 1) / ((1.0472 + 1.9448 \cdot 1,661^2) \cdot (1,661 - 1)) = 1,642$$

$$U = \frac{K^2 (1 + 8.55246 \cdot \lg K) - 1}{1.36136 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (1,661^2 \cdot (1 + 8.55246 \cdot \lg 1,661) - 1) / (1.36136 \cdot (1,661^2 - 1) \cdot (1,661 - 1)) = 4,395$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$V = 0,1169$$

Коэффициент d для интегральных фланцев:

$$d = \frac{U}{V} \cdot h_0 \cdot g_0^2 = 4,395 / 0,1169 \cdot 59,42 \cdot 11,5^2 = 0,2954 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

Инв. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	К-5.00.00.000 PP					Лист
										256
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

$$L = \frac{t \cdot e + 1}{T} + \frac{t^3}{d} = (42 \cdot 0,01251 + 1) / 1,642 + 42^3 / 0,2954 \cdot 10^{-3} = 1,18$$

Момент инерции сечения фланца при изгибе (интегральные фланцы с втулкой):

$$I = \frac{0,0874 \cdot L \cdot g^2 \cdot h_0 \cdot B}{W} = 0,0874 \cdot 1,18 \cdot 11,5 \cdot 59,42 \cdot 307 / 0,1169 = 0,2128 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$G_{\text{avg}} = 0.5 \cdot (g_0 + g_1) = 0.5 \cdot (11,5 + 30,5) = 21 \text{ MM}$$

$$A_p = 0.5 \cdot (A - B) = 0.5 \cdot (510 - 307) = 101,5 \text{ mm}$$

Так как $t \geq G_{avg}$,

$$A_A = A_R = 101,5 \text{ mm}$$

$$E_p = t = 42 \text{ mm}$$

$$K_{AB} = \left\{ A_A \cdot B_B^3 \right\} \cdot \left[\frac{1}{3} - 0.21 \cdot \left(\frac{B_B}{A_A} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{12} \cdot \left\{ \frac{B_B}{A_A} \right\}^4 \right) \right] = (101,5 * 42^3) * [1/3 - 0.21 * (42 / 101,5) * (1 - 1/12 * \{42 / 101,5\}^4)] = 0,1855 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$C_c = h = 47,5 \text{ mm}$$

$$D_{DG} = G_{\text{avg}} = 21 \text{ mm}$$

$$K_{CD} = \left(C_c \cdot D_{DG}^3 \right) \cdot \left[\frac{1}{3} - 1.05 \cdot \left(\frac{D_{DG}}{C_c} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{192} \cdot \left\{ \frac{D_{DG}}{C_c} \right\}^4 \right) \right] = (47,5 \cdot 21^3) \cdot [1/3 - 1.05 \cdot (21 / 47,5) \cdot (1 - 1/192 \cdot (21 / 47,5)^4)] = (-0,5753 \cdot 10^{-7}) \text{ M}^4$$

Полярный момент сечения фланца (интегральные фланцы, плоские фланцы с втулкой):

$$I_D = K_{AB} + K_{CD} = 0,1855 \cdot 10^{-5} + (-0,5753 \cdot 10^{-7}) = 0,1797 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

Компонент проектного момента на фланце, как результат действия внешнего изгибающего момента и/или осевой силы:

$$M_{oe} = 4 \cdot M_E \cdot \left[\frac{I}{0.3846 \cdot I_n + I} \right] \cdot \left[\frac{h_D}{C - 2 \cdot h_n} \right] + F_A \cdot h_D = 4 \cdot 1,329 \cdot 10^4 \cdot [0,2128 \cdot 10^{-5} / (0,3846 \cdot 0,1797 \cdot 10^{-5} + 0,2128 \cdot 10^{-5})] \cdot [56,25 / (450 - 2 \cdot 56,25)] + 1,09 \cdot 10^4 \cdot 56,25 = 7302 \text{ H}$$

Изгибающий момент в расчётных условиях (внутреннее давление):

$$M_o = |((H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G) \cdot B_{SC} + M_{oe}) \cdot F_S| = \frac{|(2,959 \cdot 10^4 \cdot 56,25 + 9533 \cdot 60 + 1,331 \cdot 10^4 \cdot 48,5) \cdot 1 + 7302 \cdot 1|}{M} = 1,018 \cdot 10^4 \text{ H}$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$f = 1$$

Продольные напряжения во втулке, в расчётных условиях:

$$S_H = \frac{f \cdot M_o}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 1,018 \cdot 10^4 / (1,18 \cdot 30,5^2 \cdot 307) = 30,22 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min \{1.5 \cdot S_{f_0}; 2.5 \cdot S_{n_0}\}$$

$$\min \{1.5 \cdot S_{f_0}; 2.5 \cdot S_{n_0}\} = \min \{1.5 \cdot 135,4; 2.5 \cdot 171,7\} = 203 \text{ МПа}$$

$$30,22 \text{ МПа} \leq 203 \text{ МПа, Условие прочности выполнено}$$

Радиальные напряжения во фланце, расчётные условия:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_o}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 \cdot 42 \cdot 0,01251 + 1) \cdot 1,018 \cdot 10^4 / (1,18 \cdot 42^2 \cdot 307) = 27,07 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{f0}$$

$$27,07 \text{ МПа} \leq 135,4 \text{ МПа, Условие прочности выполнено}$$

$$Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left(0.66845 + 5.7169 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (1,661 - 1) * (0.66845 + 5.7169 * 1,661^2 * \lg 1,661 / (1,661^2 - 1)) = 4$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
					К-5.00.00.000 PP	257

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
					К-5.00.00.000 PP	257

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
					К-5.00.00.000 PP	257

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
					К-5.00.00.000 PP	257

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
					К-5.00.00.000 PP	257

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
					К-5.00.00.000 PP	257

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
					К-5.00.00.000 PP	257

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
					К-5.00.00.000 PP	257

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
					К-5.00.00.000 PP	257

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
					К-5.00.00.000 PP	257

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
					К-5.00.00.000 PP	257

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
					К-5.00.00.000 PP	257

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
					К-5.00.00.000 PP	257

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
					К-5.00.00.000 PP	257

Изм.	Лист	№ докум.
------	------	----------

$$Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (1,661^2 + 1) / (1,661^2 - 1) = 2,137$$

Касательные напряжения во фланце, расчётные условия:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_o}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 4 * 1,018 \cdot 10^4 / (42^2 * 307) - 2,137 * 27,07 = 17,38 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{\text{до}}$$

17,38 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (30,22 + 27,07) / 2 = 28,65 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\text{до}}$$

28,65 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (30,22 + 17,38) / 2 = 23,8 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\text{до}}$$

23,8 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

Изгибающий момент в условиях монтажа (внутреннее давление):

$$M_{\text{г}} = \frac{W_{\text{г}} \cdot (C - G) \cdot B_{\text{sc}} \cdot F_s}{2} = 8,037 \cdot 10^5 * (450 - 353) * 1 * 1 / 2 = 3,898 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

Продольные напряжения во втулке, в условиях монтажа:

$$S_H = \frac{f \cdot M_{\text{г}}}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 * 3,898 \cdot 10^4 / (1,18 * 30,5^2 * 307) = 115,7 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min\{1,5 \cdot S_{\text{гг}}; 2,5 \cdot S_{\text{нг}}\}$$

$$\min\{1,5 \cdot S_{\text{гг}}; 2,5 \cdot S_{\text{нг}}\} = \min\{1,5 * 163,3; 2,5 * 196\} = 245 \text{ МПа}$$

115,7 МПа ≤ 245 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_{\text{г}}}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 * 42 * 0,01251 + 1) * 3,898 \cdot 10^4 / (1,18 * 42^2 * 307) = 103,6 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{\text{гг}}$$

103,6 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Касательные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_{\text{г}}}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 4 * 3,898 \cdot 10^4 / (42^2 * 307) - 2,137 * 103,6 = 66,51 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{\text{гг}}$$

66,51 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (115,7 + 103,6) / 2 = 109,6 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\text{гг}}$$

109,6 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл. 19744.4	Подпись и дата				
	Инов. № дубл.				
	Взам. инв. №				
	Подпись и дата				
Изм.					Лист
Лист					258
№ докум.					
Подп.					
Дата					
К-5.00.00.000 PP					

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (115,7 + 66,51) / 2 = 91,09 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\text{г}}$$

91,09 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие прочности выполнено

Жесткость фланца

- для расчётных условий:

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, расчётные условия):

$$J = \frac{52 \cdot 14 \cdot V \cdot M_o}{L \cdot E_{y0} \cdot g_0^2 \cdot K_R \cdot h_o} = (52 \cdot 14 \cdot 0,1169 \cdot 1,018 \cdot 10^4) / (1,18 \cdot 1,866 \cdot 10^5 \cdot 11,5^2 \cdot 0,3 \cdot 59,42) = 0,1196$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1,0$$

$$0,1196 \leq 1,0$$

Условие жёсткости выполнено

- для условий монтажа:

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, условия монтажа):

$$J = \frac{52 \cdot 14 \cdot V \cdot M_{\text{г}}}{L \cdot E_{y\text{г}} \cdot g_0^2 \cdot K_R \cdot h_o} = (52 \cdot 14 \cdot 0,1169 \cdot 3,898 \cdot 10^4) / (1,18 \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot 11,5^2 \cdot 0,3 \cdot 59,42) = 0,4293$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1,0$$

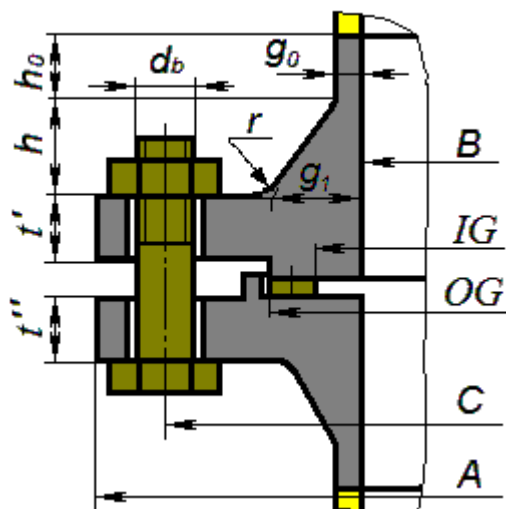
$$0,4293 \leq 1,0$$

Условие жёсткости выполнено

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 РР				Лист
				259

Фланцевое соединение DN150

Расчёт на прочность и герметичность по ASME VIII-2



Исходные данные

Тип фланца: Приварные встык

Исполнение: Выступ-впадина

Теплоизоляция: Нет

Свободный/интегральный: -

Диаметр болтовой окружности, С: 250 мм

Данные первого фланца (кольца):

Смежный элемент: Штуцер Г DN150

Материал смежного элемента: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281

Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245) Gr.

Наружный диаметр фланца (кольца), А: 300 мм

Толщина фланца (кольца), t: 27 мм

Сумма прибавок, с: 6 мм

Внешняя коррозия фланца, c_f : 0 мм

Внутренний диаметр фланца, В: 145 мм

Длина конической части втулки, h: 31,25 мм

Длина цилиндрической части втулки, h_0 : 9,75 мм

Толщина цилиндрической части втулки, g_0 : 8 мм

Толщина конической части втулки, g_1 : 20,5 мм

Радиус перехода, г: 5 мм

Данные второго фланца (кольца):

Смежный элемент:

Материал смежного элемента: 09Г2С

Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245) Gr.

Наружный диаметр фланца (кольца), А: 300 мм

Толщина фланца (кольца), t: 27 мм

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Свободный/интегральный: -
					<p>Диаметр болтовой окружности, С: 250 мм</p> <p>Данные первого фланца (кольца):</p> <p>Смежный элемент: Штуцер Г DN150</p> <p>Материал смежного элемента: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281</p> <p>Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245) Gr.</p> <p>Наружный диаметр фланца (кольца), А: 300 мм</p> <p>Толщина фланца (кольца), t: 27 мм</p> <p>Сумма прибавок, с: 6 мм</p> <p>Внешняя коррозия фланца, с_г: 0 мм</p> <p>Внутренний диаметр фланца, В: 145 мм</p> <p>Длина конической части втулки, h: 31,25 мм</p> <p>Длина цилиндрической части втулки, h₀: 9,75 мм</p> <p>Толщина цилиндрической части втулки, g₀: 8 мм</p> <p>Толщина конической части втулки, g₁: 20,5 мм</p> <p>Радиус перехода, г: 5 мм</p> <p>Данные второго фланца (кольца):</p> <p>Смежный элемент:</p> <p>Материал смежного элемента: 09Г2С</p> <p>Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245) Gr.</p> <p>Наружный диаметр фланца (кольца), А: 300 мм</p> <p>Толщина фланца (кольца), t: 27 мм</p>
19744.4					<div> <div>Изм.</div> <div>Лист</div> <div>№ докум.</div> <div>Подп.</div> <div>Дата</div> </div> <div>К-5.00.00.000 PP</div>
					<div>Лист</div> <div>260</div>

Сумма прибавок, с: 3 мм
Внешняя коррозия фланца, с_г: 0 мм
Внутренний диаметр фланца, В: 145 мм
Длина конической части втулки, h: 31,25 мм
Длина цилиндрической части втулки, h₀: 9,75 мм
Толщина цилиндрической части втулки, g₀: 8 мм
Толщина конической части втулки, g₁: 20,5 мм
Радиус перехода, г: 5 мм

Шпильки:

Материал: 35Х
Наружный диаметр, d_б: 24 мм
Количество, n: 8
Радиальная коррозия крепежа, с_б: 0 мм

Прокладка:

Материал прокладки: Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали
Толщина, h_п: 3,2 мм
Наружный диаметр, OG: 203 мм
Внутренний диаметр, IG: 183 мм

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётное осевое растягивающее усилие, F: 4800 Н
Расчётный изгибающий момент, M: 3394 Н м
Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,4 МПа
Расчётная температура элементов соединения:
Температура фланца (кольца), t_ф: 144 °С
Температура фланца (кольца), t_ф: 144 °С
Температура болтов (шпилек), t_б: 127,5 °С

Свойства материала болтов (шпилек)

Допускаемые напряжения для материала 35Х при температуре T = 127,5 °С (расчётные условия):

$S_b = \min\{R_e^{20} / n_{T20}; R_m^{20} / n_{B20}; R_e / n_T; R_m / n_B\} = \min(590 / 4; 736 / 5; 558 / 1,5; 715 / 5) = 143 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости для материала 35Х при температуре T = 127,5 °С:

$E_b = 2,083 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Коэффициент линейного расширения для материала 35Х при температуре T = 127,5 °С:

$\alpha_b = 0,1206 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$

Допускаемые напряжения для материала 35Х при температуре T = 20 °С (расчётные условия):

$S_a = \min\{R_e^{20} / n_{T20}; R_m^{20} / n_{B20}; R_e^{20} / n_T\} = \min(590 / 4; 736 / 5; 590 / 1,5) = 147,2 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости для материала 35Х при температуре T = 20 °С:

$E^{20}_b = 2,15 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала смежного элемента фланца 1 Штуцер Г DN150

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 150 °С (расчётные условия):

$S_{n01} = 154 \text{ МПа}$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 20 °С (расчётные условия):

$S_{ng1} = 183 \text{ МПа}$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Инов. № подл.	19744.4	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	K-5.00.00.000 PP	Лист	261
---------------	----------------	---------------	----------------	--------------	---------------	----------------	---------------	---------	------	------	----------	-------	------	------------------	------	-----

Свойства материала смежного элемента фланца 2

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{но}2} = 171,7\text{ МПа}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{нг}2} = 196\text{ МПа}$$

Свойства материала фланца (кольца) 1

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{fo}1} = \min(R_{\text{e}t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{203 / 1,5; 440 / 2,4\} = 135,4\text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_1 = 1,866 \cdot 10^5\text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\alpha_1 = 0,1248 \cdot 10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{g}1} = \min(R_{\text{e}t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{245 / 1,5; 440 / 2,4\} = 163,3\text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E^{20}_1 = 1,99 \cdot 10^5\text{ МПа}$$

Свойства материала фланца (кольца) 2

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{fo}2} = \min(R_{\text{e}t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{203 / 1,5; 440 / 2,4\} = 135,4\text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_2 = 1,866 \cdot 10^5\text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\alpha_2 = 0,1248 \cdot 10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{g}2} = \min(R_{\text{e}t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{245 / 1,5; 440 / 2,4\} = 163,3\text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E^{20}_2 = 1,99 \cdot 10^5\text{ МПа}$$

Расчётные параметры первого фланца:

Внутренний диаметр фланца (с учетом коррозии):

$$B = B + 2 \cdot c = 145 + 2 \cdot 6 = 157\text{ мм}$$

Диаметр втулки с учетом коррозии (для фланцев, приварных встык):

$$g_0 = g_0 - c = 8 - 6 = 2\text{ мм}$$

Больший диаметр конической втулки с учетом коррозии:

$$g_1 = g_1 - c = 20,5 - 6 = 14,5\text{ мм}$$

Толщина фланца, с учетом коррозии:

$$t = t - c_f = 27 - 0 = 27\text{ мм}$$

Расчётные параметры второго фланца:

Внутренний диаметр фланца (с учетом коррозии):

$$B = B + 2 \cdot c = 145 + 2 \cdot 3 = 151\text{ мм}$$

Диаметр втулки с учетом коррозии (для фланцев, приварных встык):

$$g_0 = g_0 - c = 8 - 3 = 5\text{ мм}$$

Больший диаметр конической втулки с учетом коррозии:

$$g_1 = g_1 - c = 20,5 - 3 = 17,5\text{ мм}$$

Толщина фланца, с учетом коррозии:

Подпись и дата		Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 PP	Лист
Изнв. № дубл.								262
Изнв. №								
Взам. инв. №								
Подпись и дата								
Изнв. № подл.	19744.4							

t = t - c_f = 27 - 0 = 27 мм

Характеристики прокладки:

Тип и материал прокладки	Прокладочный коэффициент, m	Давление обжатия, у, МПа	Допускаемое удельное давление [q], МПа	Коэффициент обжатия К	Условный модуль сжатия E _m , МПа
Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали	3	69	-	-	-

Ширина, используемая для определения базовой контактной ширины прокладки через b₀, на основании возможной контактной ширины прокладки:

N = (OG - IG) / 2 = (203 - 183) / 2 = 10 мм

Базовая контактная ширина прокладки:

b₀ = N / 2 = 10 / 2 = 5 мм

Диаметр окружности приложения реакции со стороны прокладки:
Если b₀ ≤ 6 мм, G равно среднему диаметру контактирующей поверхности прокладки.

G = (OG + max{B', B'', IG}) / 2 = (203 + max{145; 145; 183}) / 2 = 193 мм

Ширина, используемая для определения базовой контактной ширины прокладки через b₀, на основании возможной контактной ширины прокладки:

N = (OG - IG) / 2 = (203 - 183) / 2 = 10 мм

Базовая контактная ширина прокладки:

b₀ = N / 2 = 10 / 2 = 5 мм

Диаметр окружности приложения реакции со стороны прокладки:
Если b₀ ≤ 6 мм, G равно среднему диаметру контактирующей поверхности прокладки.

G = (OG + max{B', B'', IG}) / 2 = (203 + max{145; 145; 183}) / 2 = 193 мм

Эффективная контактная ширина прокладки:

b = { b₀ если b₀ ≤ 6 мм
 2.5 · √b₀ если b₀ > 6 мм } = 5 мм

Расчёт нагрузок

Проектная болтовая нагрузка для расчётных условий (для несамонуплотняющихся прокладок):

W₀ = 0.785 · G² · p + 2 · b · π · G · m · p = 0.785 · 193² · 0.4 + 2 · 5 · 3.142 · 193 · 3 · 0.4 = 1,897 · 10⁴ Н

Величина растягивающей внешней силы:

F_A = 4800 Н

Сжимающими нагрузками пренебрегают, и в этом случае F_A приравняется нулю.
Внешний изгибающий момент:

M_E = 3394 Н м

W_с = π · b · G · y = 3.142 · 5 · 193 · 69 = 2,092 · 10⁵ Н

Общая расчетная площадь сечения болтов:

Подпись и дата		Инов. № дубл.		Взам. инв. №		Подпись и дата		Инов. № подл.	19744.4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 PP				Лист
					263				

$$A_m = \max \left[\frac{W_o + F_A + \frac{4 \cdot M_E}{G}}{S_{bo}}; \frac{W_{gs}}{S_{bg}} \right] = \max[(1,897 \cdot 10^4 + 4800 + 4 \cdot 3394 / 193) / 143; 2,092 \cdot 10^5 / 147,2] = 0,001421 \text{ м}^2$$

Диаметр сечения болта (шпильки) с учетом коррозии:

$$d_{bc} = 24 \text{ мм}$$

Площадь сечения болта (шпильки) (по внутреннему диаметру резьбы с учетом коррозии):

$$f_b = 0,324 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Площадь поперечного сечения болтов по внутреннему диаметру резьбы или минимальному диаметру стержня:

$$A_b = n \cdot f_b = 8 \cdot 0,324 \cdot 10^{-3} = 0,002592 \text{ м}^2$$

Расчёт болтов(шпилек):

Условие прочности болтов:

$$A_m \leq A_b$$

$$0,001421 \text{ м}^2 \leq 0,002592 \text{ м}^2$$

Условие прочности выполнено

Расчёт напряжений первого фланца:

Равнодействующая давления на внутренней поверхности фланца:

$$H_D = 0,785 \cdot B^2 \cdot p = 0,785 \cdot 157^2 \cdot 0,4 = 7740 \text{ Н}$$

Плечо момента для силы H_D (фланцы интегрального типа, или другие, рассчитываемые аналогично):

$$h_D = \frac{C - B - g_1}{2} = (250 - 157 - 14,5) / 2 = 39,25 \text{ мм}$$

Равнодействующая давления:

$$H = 0,785 \cdot G^2 \cdot p = 0,785 \cdot 193^2 \cdot 0,4 = 1,17 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Разница между общей равнодействующей давления и равнодействующей на внутренней поверхности фланца:

$$H_T = H - H_D = 1,17 \cdot 10^4 - 7740 = 3956 \text{ Н}$$

Радиальное расстояние от реакции прокладки до болтовой окружности:

$$h_G = \frac{C - G}{2} = (250 - 193) / 2 = 28,5 \text{ мм}$$

Плечо для нагрузки H_T (интегральные фланцы, а также иные, рассчитываемые аналогично):

$$h_T = \frac{1}{2} \left[\frac{C - B}{2} + h_G \right] = 1/2 \cdot [(250 - 157) / 2 + 28,5] = 37,5 \text{ мм}$$

Нагрузка на прокладку (разница между проектной болтовой нагрузкой и равнодействующей давления), в расчётах:

$$H_G = W_o - H = 1,897 \cdot 10^4 - 1,17 \cdot 10^4 = 7276 \text{ Н}$$

Болтовой интервал:

$$B_s = \frac{\pi \cdot C}{n} = 3,142 \cdot 250 / 8 = 98,17 \text{ мм}$$

Номинальный диаметр болта:

$$a = d_b = 24 \text{ мм}$$

Коэффициент болтового интервала:

$$B_{sc} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{B_s}{2 \cdot a + t}} \right\} = \max \{ 1; (98,17 / (2 \cdot 24 + 27))^{1/2} \} = 1,144$$

$$X_g = \frac{g_1}{g_0} = 14,5 / 2 = 7,25$$

Коэффициент

Инов. № подл.	Инов. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата
19744.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
К-5.00.00.000 PP			Лист
			264

$$M_{oe} = 4 \cdot M_E \cdot \left[\frac{I}{0,3846 \cdot I_n + I} \right] \cdot \left[\frac{h_D}{C - 2 \cdot h_D} \right] + F_A \cdot h_D = 4 \cdot 3394 \cdot [0,1742 \cdot 10^{-6} / (0,3846 \cdot 0,3587 \cdot 10^{-6} + 0,1742 \cdot 10^{-6})] \cdot [39,25 / (250 - 2 \cdot 39,25)] + 4800 \cdot 39,25 = 1922 \text{ H}_M$$

Коэффициент момента для расчета свободных колец:

$$F_{\mathfrak{z}} = 1$$

Изгибающий момент в расчётных условиях (внутреннее давление):

$$M_o = \left[(H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G) \cdot B_{sc} + M_{oe} \right] \cdot F_s \quad / \quad \left[((7740 \cdot 39,25 + 3956 \cdot 37,5 + 7276 \cdot 28,5) \cdot 1,144 + 1922) \cdot 1 \right] = 2677 \text{ H m}$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$f = 1,288$$

Продольные напряжения во втулке, в расчётных условиях:

$$S_H = \frac{f \cdot M_o}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1,288 \cdot 2677 / (2,048 \cdot 14,5^2 \cdot 157) = 50,99 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min \{1.5 \cdot S_{fo}; 2.5 \cdot S_{no}\}$$

$$\min\{1.5 \cdot S_{\text{сн}}; 2.5 \cdot S_{\text{нч}}\} = \min\{1.5 * 135,4; 2.5 * 154\} = 203 \text{ МПа}$$

$50,99 \text{ МПа} \leq 203 \text{ МПа}$, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, расчётные условия:

$$S_R = \frac{(1.33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_o}{I_{\text{ст}} \cdot R} = (1.33 \cdot 27 \cdot 0,02771 + 1) \cdot 2677 / (2,048 \cdot 27^2 \cdot 157) = 22,79 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\Sigma_R \preceq \Sigma_{\text{fin}}$$

$$22,79 \text{ МПа} \leq 135,4 \text{ МПа}, \text{ Условие прочности выполнено}$$

$$Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left(0.66845 + 5.7169 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (1,911 - 1) * (0.66845 + 5.7169 * 1,911^2 * \lg 1,911 / (1,911^2 - 1)) = 3,165$$

$$Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (1,91I^2 + 1)/(1,91I^2 - 1) = 1,754$$

Касательные напряжения во фланце, расчётные условия:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_0}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 3,165 \cdot 2677 / (27^2 \cdot 157) - 1,754 \cdot 22,79 = 34,04 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{fo}$$

$$34,04 \text{ МПа} \leq 135,4 \text{ МПа, Условие прочности выполнено}$$

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (50,99 + 22,79) / 2 = 36,89 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{fo}$$

$$36,89 \text{ МПа} \leq 135,4 \text{ МПа}, \text{ Условие прочности выполнено}$$

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (50,99 + 34,04) / 2 = 42,52 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{f_0}$$

$42,52 \text{ МПа} \leq 135,4 \text{ МПа}$, **Условие прочности выполнено**

Болтовая нагрузка в условиях монтажа:

$$W_g = \left(\frac{A_m + A_b}{2} \right) \cdot S_{bg} = (0,001421 + 0,002592) / 2 \cdot 147,2 = 2,954 \cdot 10^5 \text{ H}$$

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (1,911^2 + 1) / (1,911^2 - 1) = 1,754$ <p>Касательные напряжения во фланце, расчётные условия:</p> $S_T = \frac{Y \cdot M_o}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 3,165 \cdot 2677 / (27^2 \cdot 157) - 1,754 \cdot 22,79 = 34,04 \text{ МПа}$ <p>Условие прочности:</p> $S_T \leq S_{\text{до}}$ $34,04 \text{ МПа} \leq 135,4 \text{ МПа, Условие прочности выполнено}$ $\frac{S_H + S_R}{2} = (50,99 + 22,79) / 2 = 36,89 \text{ МПа}$ <p>Условие прочности:</p> $\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\text{до}}$ $36,89 \text{ МПа} \leq 135,4 \text{ МПа, Условие прочности выполнено}$ $\frac{S_H + S_T}{2} = (50,99 + 34,04) / 2 = 42,52 \text{ МПа}$ <p>Условие прочности:</p> $\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\text{до}}$ $42,52 \text{ МПа} \leq 135,4 \text{ МПа, Условие прочности выполнено}$ <p>Болтовая нагрузка в условиях монтажа:</p> $W_{\text{г}} = \left(\frac{A_m + A_b}{2} \right) \cdot S_{\text{бг}} = (0,001421 + 0,002592) / 2 \cdot 147,2 = 2,954 \cdot 10^5 \text{ Н}$
					<div> <div>Инв. № подл.</div> <div>19744.4</div> </div> <div> <div>Изм.</div> <div>Лист</div> <div>№ докум.</div> <div>Подп.</div> <div>Дата</div> </div> <div> <div>К-5.00.00.000 PP</div> <div>Лист</div> <div>266</div> </div>

$$J = \frac{52.14 \cdot V \cdot M_{\varepsilon}}{L \cdot E_{\varepsilon} \cdot g_0^2 \cdot K_R \cdot h_0} = (52.14 * 0,01143 * 9631) / (2,048 * 1,99 \cdot 10^5 * 2^2 * 0,3 * 17,72) = 0,6626$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1.0$$

$$0,6626 \leq 1.0$$

Условие жёсткости выполнено

Расчёт напряжений второго фланца:

Равнодействующая давления на внутренней поверхности фланца:

$$H_D = 0.785 \cdot B^2 \cdot p = 0.785 * 151^2 * 0,4 = 7160 \text{ Н}$$

Плечо момента для силы H_D (фланцы интегрального типа, или другие, рассчитываемые аналогично):

$$h_D = \frac{C - B - g_1}{2} = (250 - 151 - 17,5) / 2 = 40,75 \text{ мм}$$

Разница между общей равнодействующей давления и равнодействующей на внутренней поверхности фланца:

$$H_T = H - H_D = 1,17 \cdot 10^4 - 7160 = 4537 \text{ Н}$$

Плечо для нагрузки H_T (интегральные фланцы, а также иные, рассчитываемые аналогично):

$$h_T = \frac{1}{2} \left[\frac{C - B}{2} + h_G \right] = 1/2 * [(250 - 151) / 2 + 28,5] = 39 \text{ мм}$$

Коэффициент болтового интервала:

$$B_{SC} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{B_S}{2 \cdot a + t}} \right\} = \max \{ 1; (98,17 / (2 * 24 + 27))^{1/2} \} = 1,144$$

$$X_{\varepsilon} = \frac{g_1}{g_0} = 17,5 / 5 = 3,5$$

Коэффициент

$$h_0 = \sqrt{B \cdot g_0} = (151 * 5)^{1/2} = 27,48 \text{ мм}$$

$$X_h = \frac{h}{h_0} = 31,25 / 27,48 = 1,137$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$F = 0,6592$$

Расчетные коэффициенты:

$$e = \frac{F}{h_0} = 0,6592 / 27,48 = 0,02399 \text{ 1/мм}$$

$$K = \frac{A}{B} = 300 / 151 = 1,987$$

$$T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55246 \cdot \lg K) - 1}{(1.0472 + 1.9448 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (1,987^2 * (1 + 8.55246 * \lg 1,987) - 1) / ((1.0472 + 1.9448 * 1,987^2) * (1,987 - 1)) = 1,512$$

$$U = \frac{K^2 (1 + 8.55246 \cdot \lg K) - 1}{1.36136 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (1,987^2 * (1 + 8.55246 * \lg 1,987) - 1) / (1.36136 * (1,987^2 - 1) * (1,987 - 1)) = 3,287$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$V = 0,05802$$

Коэффициент d для интегральных фланцев:

$$d = \frac{U}{V} \cdot h_0 \cdot g_0^2 = 3,287 / 0,05802 * 27,48 * 5^2 = 0,3891 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$$

Инв. № подл. 19744.4	Подпись и дата				Лист 268
	Инв. № дубл.				
Инв. № инв.	Взам. инв. №				Лист 268
	Подпись и дата				
<p>Коэффициент</p> $h_o = \sqrt{B \cdot g_0} = (151 \cdot 5)^{1/2} = 27,48 \text{ мм}$ $X_h = \frac{h}{h_o} = 31,25 / 27,48 = 1,137$ <p>Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):</p> <p>F = 0,6592</p> <p>Расчетные коэффициенты:</p> $e = \frac{F}{h_o} = 0,6592 / 27,48 = 0,02399 \text{ 1/мм}$ $K = \frac{A}{B} = 300 / 151 = 1,987$ $T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg K) - 1}{(1,0472 + 1,9448 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (1,987^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg 1,987) - 1) / ((1,0472 + 1,9448 \cdot 1,987^2) \cdot (1,987 - 1)) = 1,512$ $U = \frac{K^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg K) - 1}{1,36136 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (1,987^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg 1,987) - 1) / (1,36136 \cdot (1,987^2 - 1) \cdot (1,987 - 1)) = 3,287$ <p>Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):</p> <p>V = 0,05802</p> <p>Коэффициент d для интегральных фланцев:</p> $d = \frac{U}{V} \cdot h_o \cdot g_0^2 = 3,287 / 0,05802 \cdot 27,48 \cdot 5^2 = 0,3891 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$					
К-5.00.00.000 PP					Лист 268
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

$$L = \frac{t \cdot e + 1}{T} + \frac{t^3}{d} = (27 \cdot 0,02399 + 1) / 1,512 + 27^3 / 0,3891 \cdot 10^{-4} = 1,596$$

Момент инерции сечения фланца при изгибе (интегральные фланцы с втулкой):

$$I = \frac{0,0874 \cdot L \cdot g_0^2 \cdot h_0 \cdot B}{V} = 0,0874 \cdot 1,596 \cdot 5 \cdot 27,48 \cdot 151 / 0,05802 = 0,2494 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$$

$$G_{\text{вг}} = 0,5 \cdot (g_0 + g_1) = 0,5 \cdot (5 + 17,5) = 11,25 \text{ мм}$$

$$A_R = 0,5 \cdot (A - B) = 0,5 \cdot (300 - 151) = 74,5 \text{ мм}$$

Так как $t \geq G_{\text{вг}}$,

$$A_A = A_R = 74,5 \text{ мм}$$

$$B_B = t = 27 \text{ мм}$$

$$K_{AB} = \left\{ A_A \cdot B_B^3 \right\} \cdot \left[\frac{1}{3} - 0,21 \cdot \left(\frac{B_B}{A_A} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{12} \cdot \left\{ \frac{B_B}{A_A} \right\}^4 \right) \right] = (74,5 \cdot 27^3) \cdot [1/3 - 0,21 \cdot (27/74,5) \cdot (1 - 1/12 \cdot (27/74,5)^4)] = 0,3774 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$$

$$C_C = h = 31,25 \text{ мм}$$

$$D_{DG} = G_{\text{вг}} = 11,25 \text{ мм}$$

$$K_{CD} = \left\{ C_C \cdot D_{DG}^3 \right\} \cdot \left[\frac{1}{3} - 1,05 \cdot \left(\frac{D_{DG}}{C_C} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{192} \cdot \left\{ \frac{D_{DG}}{C_C} \right\}^4 \right) \right] = (31,25 \cdot 11,25^3) \cdot [1/3 - 1,05 \cdot (11,25/31,25) \cdot (1 - 1/192 \cdot (11,25/31,25)^4)] = (-0,1986 \cdot 10^{-8}) \text{ м}^4$$

Полярный момент сечения фланца (интегральные фланцы, плоские фланцы с втулкой):

$$I_P = K_{AB} + K_{CD} = 0,3774 \cdot 10^{-6} + (-0,1986 \cdot 10^{-8}) = 0,3754 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$$

Компонент проектного момента на фланце, как результат действия внешнего изгибающего момента и/или осевой силы:

$$M_{oe} = 4 \cdot M_E \cdot \left[\frac{I}{0,3846 \cdot I_P + I} \right] \cdot \left[\frac{h_D}{C - 2 \cdot h_D} \right] + F_A \cdot h_D = 4 \cdot 3394 \cdot [0,2494 \cdot 10^{-6} / (0,3846 \cdot 0,3754 \cdot 10^{-6} + 0,2494 \cdot 10^{-6})] \cdot [40,75 / (250 - 2 \cdot 40,75)] + 4800 \cdot 40,75 = 2275 \text{ Н м}$$

Изгибающий момент в расчётных условиях (внутреннее давление):

$$M_o = [(H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G) \cdot B_{SC} + M_{oe}] \cdot F_S = [(7160 \cdot 40,75 + 4537 \cdot 39 + 7276 \cdot 28,5) \cdot 1,144 + 2275] \cdot 1/ = 3049 \text{ Н м}$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$f = 1$$

Продольные напряжения во втулке, в расчётных условиях:

$$S_H = \frac{f \cdot M_o}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 3049 / (1,596 \cdot 17,5^2 \cdot 151) = 41,31 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min \{ 1,5 \cdot S_{fo}; 2,5 \cdot S_{no} \}$$

$$\min \{ 1,5 \cdot S_{fo}; 2,5 \cdot S_{no} \} = \min \{ 1,5 \cdot 135,4; 2,5 \cdot 171,7 \} = 203 \text{ МПа}$$

41,31 МПа ≤ 203 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, расчётные условия:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_o}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 \cdot 27 \cdot 0,02399 + 1) \cdot 3049 / (1,596 \cdot 27^2 \cdot 151) = 32,3 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{fo}$$

32,3 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left(0,66845 + 5,7169 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (1,987 - 1) \cdot (0,66845 + 5,7169 \cdot 1,987^2 \cdot \lg 1,987 / (1,987^2 - 1)) = 2,991$$

Инв. № подл.	19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 PP
					Лист
					269

$$Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (1,987^2 + 1) / (1,987^2 - 1) = 1,679$$

Касательные напряжения во фланце, расчётные условия:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_o}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 2,991 \cdot 3049 / (27^2 \cdot 151) - 1,679 \cdot 32,3 = 28,6 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{\text{до}}$$

28,6 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (41,31 + 32,3) / 2 = 36,8 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\text{до}}$$

36,8 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (41,31 + 28,6) / 2 = 34,96 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\text{до}}$$

34,96 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

Изгибающий момент в условиях монтажа (внутреннее давление):

$$M_{\text{г}} = \frac{W_{\text{г}} \cdot (C - G) \cdot B_{\text{sc}} \cdot F_s}{2} = 2,954 \cdot 10^5 \cdot (250 - 193) \cdot 1,144 \cdot 1 / 2 = 9631 \text{ Н м}$$

Продольные напряжения во втулке, в условиях монтажа:

$$S_H = \frac{f \cdot M_{\text{г}}}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 9631 / (1,596 \cdot 17,5^2 \cdot 151) = 130,5 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min\{1,5 \cdot S_{\text{гг}}; 2,5 \cdot S_{\text{нг}}\}$$

$$\min\{1,5 \cdot S_{\text{гг}}; 2,5 \cdot S_{\text{нг}}\} = \min\{1,5 \cdot 163,3; 2,5 \cdot 196\} = 245 \text{ МПа}$$

130,5 МПа ≤ 245 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_{\text{г}}}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 \cdot 27 \cdot 0,02399 + 1) \cdot 9631 / (1,596 \cdot 27^2 \cdot 151) = 102,1 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{\text{гг}}$$

102,1 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Касательные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_{\text{г}}}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 2,991 \cdot 9631 / (27^2 \cdot 151) - 1,679 \cdot 102,1 = 90,37 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{\text{гг}}$$

90,37 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (130,5 + 102,1) / 2 = 116,3 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\text{гг}}$$

116,3 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 PP
					Лист
					270

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (130,5 + 90,37) / 2 = 110,4 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\text{г}}$$

110,4 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие прочности выполнено

Жесткость фланца

- для расчётных условий:

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, расчётные условия):

$$J = \frac{52.14 \cdot V \cdot M_o}{L \cdot E_{y0} \cdot g_0^2 \cdot K_R \cdot h_o} = (52.14 \cdot 0,05802 \cdot 3049) / (1,596 \cdot 1,866 \cdot 10^5 \cdot 5^2 \cdot 0,3 \cdot 27,48) = 0,1503$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1.0$$

$$0,1503 \leq 1.0$$

Условие жёсткости выполнено

- для условий монтажа:

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, условия монтажа):

$$J = \frac{52.14 \cdot V \cdot M_g}{L \cdot E_{yg} \cdot g_0^2 \cdot K_R \cdot h_o} = (52.14 \cdot 0,05802 \cdot 9631) / (1,596 \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot 5^2 \cdot 0,3 \cdot 27,48) = 0,4452$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1.0$$

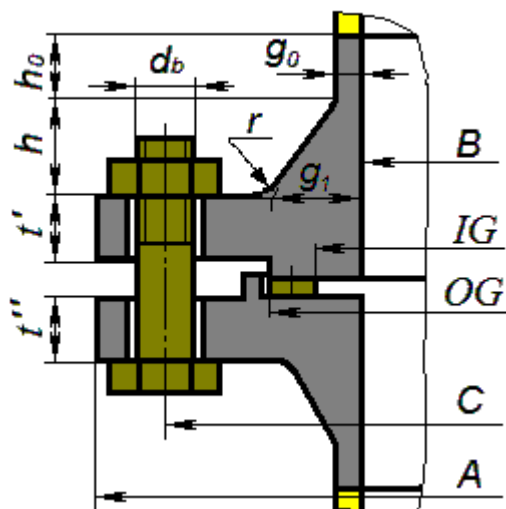
$$0,4452 \leq 1.0$$

Условие жёсткости выполнено

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 РР				Лист
				271

Фланцевое соединение DN50

Расчёт на прочность и герметичность по ASME VIII-2



Исходные данные

Тип фланца: Приварные встык

Исполнение: Выступ-впадина

Теплоизоляция: Нет

Свободный/интегральный: -

Диаметр болтовой окружности, С: 125 мм

Данные первого фланца (кольца):

Смежный элемент: Штуцер К DN50

Материал смежного элемента: 09Г2С (КП245) Gr.

Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245) Gr.

Наружный диаметр фланца (кольца), А: 160 мм

Толщина фланца (кольца), t: 20 мм

Сумма прибавок, с: 6 мм

Внешняя коррозия фланца, c_f : 0 мм

Внутренний диаметр фланца, В: 48 мм

Длина конической части втулки, h: 17 мм

Длина цилиндрической части втулки, h_0 : 0 мм

Толщина цилиндрической части втулки, g_0 : 14 мм

Толщина конической части втулки, g_1 : 14 мм

Радиус перехода, г: 5 мм

Данные второго фланца (кольца):

Смежный элемент:

Материал смежного элемента: 09Г2С

Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245) Gr.

Наружный диаметр фланца (кольца), А: 160 мм

Толщина фланца (кольца), t: 17 мм

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Свободный/интегральный: -
					Диаметр болтовой окружности, С: 125 мм Данные первого фланца (кольца): Смежный элемент: Штуцер К DN50 Материал смежного элемента: 09Г2С (КП245) Gr. Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245) Gr. Наружный диаметр фланца (кольца), А: 160 мм Толщина фланца (кольца), t: 20 мм Сумма прибавок, с: 6 мм Внешняя коррозия фланца, с _г : 0 мм Внутренний диаметр фланца, В: 48 мм Длина конической части втулки, h: 17 мм Длина цилиндрической части втулки, h ₀ : 0 мм Толщина цилиндрической части втулки, g ₀ : 14 мм Толщина конической части втулки, g ₁ : 14 мм Радиус перехода, г: 5 мм Данные второго фланца (кольца): Смежный элемент: Материал смежного элемента: 09Г2С Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245) Gr. Наружный диаметр фланца (кольца), А: 160 мм Толщина фланца (кольца), t: 17 мм
19744.4					<div> <div>Изм.</div> <div>Лист</div> <div>№ докум.</div> <div>Подп.</div> <div>Дата</div> </div> <div>К-5.00.00.000 PP</div>
					<div>Лист</div> <div>272</div>

Сумма прибавок, с: 3 мм
Внешняя коррозия фланца, с_г: 0 мм
Внутренний диаметр фланца, В: 48 мм
Длина конической части втулки, h: 22,5 мм
Длина цилиндрической части втулки, h₀: 5,5 мм
Толщина цилиндрической части втулки, g₀: 5 мм
Толщина конической части втулки, g₁: 14 мм
Радиус перехода, г: 5 мм

Шпильки:

Материал: 35Х
Наружный диаметр, d_б: 16 мм
Количество, n: 4
Радиальная коррозия крепежа, с_б: 0 мм

Прокладка:

Материал прокладки: Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали
Толщина, h_п: 3,2 мм
Наружный диаметр, OG: 87 мм
Внутренний диаметр, IG: 74 мм

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётное осевое растягивающее усилие, F: 1500 Н
Расчётный изгибающий момент, M: 282,8 Н м
Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,4 МПа
Расчётная температура элементов соединения:
Температура фланца (кольца), t_ф: 144 °С
Температура фланца (кольца), t_ф: 144 °С
Температура болтов (шпилек), t_б: 127,5 °С

Свойства материала болтов (шпилек)

Допускаемые напряжения для материала 35Х при температуре T = 127,5 °С (расчётные условия):

$S_b = \min\{R_e^{20} / n_{T20}; R_m^{20} / n_{B20}; R_e / n_T; R_m / n_B\} = \min(590 / 4; 736 / 5; 558 / 1,5; 715 / 5) = 143 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости для материала 35Х при температуре T = 127,5 °С:

$E_b = 2,083 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Коэффициент линейного расширения для материала 35Х при температуре T = 127,5 °С:

$\alpha_b = 0,1206 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$

Допускаемые напряжения для материала 35Х при температуре T = 20 °С (расчётные условия):

$S_a = \min\{R_e^{20} / n_{T20}; R_m^{20} / n_{B20}; R_e^{20} / n_T\} = \min(590 / 4; 736 / 5; 590 / 1,5) = 147,2 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости для материала 35Х при температуре T = 20 °С:

$E^{20}_b = 2,15 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала смежного элемента фланца 1 Штуцер К DN50

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 150 °С (расчётные условия):

$S_{n01} = \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min(202,1 / 1,5; 440 / 2,4) = 134,7 \text{ МПа}$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 20 °С (расчётные условия):

$S_{ng1} = \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min(245 / 1,5; 440 / 2,4) = 163,3 \text{ МПа}$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Инов. № подл.	19744.4	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	K-5.00.00.000 PP	Лист	273
---------------	----------------	---------------	----------------	--------------	---------------	----------------	---------------	---------	------	------	----------	-------	------	------------------	------	-----

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

$$A_m = \max \left[\frac{W_o + F_A + \frac{4 \cdot M_E}{G}}{S_{bo}}, \frac{W_{es}}{S_{bg}} \right] = \max[(4007 + 1500 + 4 \cdot 282,8 / 80,5) / 143; 5,671 \cdot 10^4 / 147,2] = 0,3853 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Диаметр сечения болта (шпильки) с учетом коррозии:

$$d_{bc} = 16 \text{ mm}$$

Площадь сечения болта (шпильки) (по внутреннему диаметру резьбы с учетом коррозии):

$$f_6 = 0,144 \cdot 10^{-3} \text{ M}^2$$

Площадь поперечного сечения болтов по внутреннему диаметру резьбы или минимальному диаметру стержня:

$$A_b = n \cdot f_b = 4 \cdot 0,144 \cdot 10^{-3} = 0,576 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Расчёт болтов(шпилек):

Условие прочности болтов:

$$A_{m_+} \leq A_b$$

$$0,3853 \cdot 10^{-3} \text{ M}^2 \leq 0,576 \cdot 10^{-3} \text{ M}^2$$

Условие прочности выполнено

Расчёт напряжений первого фланца:

Равнодействующая давления на внутренней поверхности фланца:

$$H_D = 0.785 \cdot B^2 \cdot p = 0.785 \cdot 60^2 \cdot 0,4 = 1130 \text{ H}$$

Плечо момента для силы H_D (фланцы интегрального типа, или другие, рассчитываемые аналогично):

$$h_D = \frac{C - B - g_1}{2} = (125 - 60 - 8) / 2 = 28,5 \text{ mm}$$

Равнодействующая давления:

$$H = 0.785 \cdot G^2 \cdot p = 0.785 * 80,5^2 * 0,4 = 2035 \text{ H}$$

Разница между общей равнодействующей давления и равнодействующей на внутренней поверхности фланца:

$$H_T = H - H_D = 2035 - 1130 = 904,4 \text{ H}$$

Радиальное расстояние от реакции прокладки до болтовой окружности:

$$h_G = \frac{C-G}{2} = (125 - 80,5) / 2 = 22,25 \text{ mm}$$

Плечо для нагрузки N_T (интегральные фланцы, а также иные, рассчитываемые аналогично):

$$h_T = \frac{1}{2} \left[\frac{C-B}{2} + h_G \right] = 1/2 * [(125-60)/2 + 22,25] = 27,38 \text{ mm}$$

Нагрузка на прокладку (разница между проектной болтовой нагрузкой и равнодействующей давления), в расчётах:

$$H_G = W_0 - H = 4007 - 2035 = 1973 \text{ H}$$

Болтовой интервал:

$$B_s = \frac{\pi \cdot C}{n} = 3,142 \cdot 125 / 4 = 98,17 \text{ mm}$$

Номинальный диаметр болта:

$$a = d_h = 16 \text{ mm}$$

Коэффициент болтового интервала:

$$B_{SC} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{B_s}{2 \cdot a + t}} \right\} = \max \{ 1; (98,17 / (2 \cdot 16 + 20))^{1/2} \} = 1,374$$

$$X_{\epsilon} = \frac{g_1}{g_0} = 8/8 = 1$$

Коэффициент

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p>Разница между общей равнодействующей давления и равнодействующей на внутренней поверхности фланца:</p> $H_T = H - H_D = 2035 - 1130 = 904,4 \text{ Н}$ <p>Радиальное расстояние от реакции прокладки до болтовой окружности:</p> $h_G = \frac{C - G}{2} = (125 - 80,5) / 2 = 22,25 \text{ мм}$ <p>Плечо для нагрузки H_T (интегральные фланцы, а также иные, рассчитываемые аналогично):</p> $h_T = \frac{1}{2} \left[\frac{C - B}{2} + h_G \right] = 1/2 * [(125 - 60) / 2 + 22,25] = 27,38 \text{ мм}$ <p>Нагрузка на прокладку (разница между проектной болтовой нагрузкой и равнодействующей давления), в расчётах:</p> $H_G = W_0 - H = 4007 - 2035 = 1973 \text{ Н}$ <p>Болтовой интервал:</p> $B_S = \frac{\pi \cdot C}{n} = 3,142 * 125 / 4 = 98,17 \text{ мм}$ <p>Номинальный диаметр болта:</p> $a = d_b = 16 \text{ мм}$ <p>Коэффициент болтового интервала:</p> $B_{SC} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{B_S}{2 \cdot a + t}} \right\} = \max \{ 1; (98,17 / (2 * 16 + 20))^{1/2} \} = 1,374$ $X_g = \frac{\xi_1}{\xi_0} = 8 / 8 = 1$ <p>Коэффициент</p>
					<p>19744.4</p>

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	К-5.00.00.000 PP	Лист
19744.4						276
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

$$M_{oe} = 4 \cdot M_E \cdot \left[\frac{I}{0,3846 \cdot I_p + I} \right] \cdot \left[\frac{h_D}{C - 2 \cdot h_D} \right] + F_A \cdot h_D = 4 \cdot 282,8 \cdot [0,3691 \cdot 10^{-7} / (0,3846 \cdot 0,9841 \cdot 10^{-7} + 0,3691 \cdot 10^{-7})] \cdot [28,5 / (125 - 2 \cdot 28,5)] + 1500 \cdot 28,5 = 276,9 \text{ Н м}$$

Коэффициент момента для расчета свободных колец:

$$F_S = 1$$

Изгибающий момент в расчётных условиях (внутреннее давление):

$$M_o = [(H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G) \cdot B_{SC} + M_{oe}] \cdot F_S = [(1130 \cdot 28,5 + 904,4 \cdot 27,38 + 1973 \cdot 22,25) \cdot 1,374 + 276,9] \cdot 1 = 415,5 \text{ Н м}$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$f = 1$$

Продольные напряжения во втулке, в расчётных условиях:

$$S_H = \frac{f \cdot M_o}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 415,5 / (2,774 \cdot 8^2 \cdot 60) = 39 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min \{1,5 \cdot S_{\text{до}}; 2,5 \cdot S_{\text{но}}\}$$

$$\min \{1,5 \cdot S_{\text{до}}; 2,5 \cdot S_{\text{но}}\} = \min \{1,5 \cdot 135,4; 2,5 \cdot 134,7\} = 203 \text{ МПа}$$

39 МПа ≤ 203 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, расчётные условия:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_o}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 \cdot 20 \cdot 0,04096 + 1) \cdot 415,5 / (2,774 \cdot 20^2 \cdot 60) = 13,04 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{\text{до}}$$

13,04 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left(0,66845 + 5,7169 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (2,667 - 1) \cdot (0,66845 + 5,7169 \cdot 2,667^2 \cdot \lg 2,667 / (2,667^2 - 1)) = 2,101$$

$$Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (2,667^2 + 1) / (2,667^2 - 1) = 1,327$$

Касательные напряжения во фланце, расчётные условия:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_o}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 2,101 \cdot 415,5 / (20^2 \cdot 60) - 1,327 \cdot 13,04 = 19,07 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{\text{до}}$$

19,07 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (39 + 13,04) / 2 = 26,02 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\text{до}}$$

26,02 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (39 + 19,07) / 2 = 29,03 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\text{до}}$$

29,03 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

Болтовая нагрузка в условиях монтажа:

$$W_g = \left(\frac{A_m + A_b}{2} \right) \cdot S_{bg} = (0,3853 \cdot 10^{-3} + 0,576 \cdot 10^{-3}) / 2 \cdot 147,2 = 7,075 \cdot 10^{-4} \text{ Н}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Инов. №	Взам. инв. №	Подпись и дата	Инов. № подл.	19744.4	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	K-5.00.00.000 PP	Лист	278
---------------	----------------	---------------	----------------	---------	--------------	----------------	---------------	---------	------	------	----------	-------	------	------------------	------	-----

$$J = \frac{52.14 \cdot V \cdot M_{\varepsilon}}{L \cdot E_{\varepsilon} \cdot g_0^2 \cdot K_R \cdot h_0} = (52.14 * 0.5527 * 2163) / (2.774 * 1.99 \cdot 10^5 * 8^2 * 0.3 * 21.91) = 0.2684$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1.0$$

$$0.2684 \leq 1.0$$

Условие жёсткости выполнено

Расчёт напряжений второго фланца:

Равнодействующая давления на внутренней поверхности фланца:

$$H_D = 0.785 \cdot B^2 \cdot p = 0.785 * 54^2 * 0.4 = 915.6 \text{ Н}$$

Плечо момента для силы H_D (фланцы интегрального типа, или другие, рассчитываемые аналогично):

$$h_D = \frac{C - B - g_1}{2} = (125 - 54 - 11) / 2 = 30 \text{ мм}$$

Разница между общей равнодействующей давления и равнодействующей на внутренней поверхности фланца:

$$H_T = H - H_D = 2035 - 915.6 = 1119 \text{ Н}$$

Плечо для нагрузки H_T (интегральные фланцы, а также иные, рассчитываемые аналогично):

$$h_T = \frac{1}{2} \left[\frac{C - B}{2} + h_G \right] = 1/2 * [(125 - 54) / 2 + 22.25] = 28.87 \text{ мм}$$

Коэффициент болтового интервала:

$$B_{SC} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{B_S}{2 \cdot a + t}} \right\} = \max \{ 1; (98.17 / (2 * 16 + 17))^{1/2} \} = 1.415$$

$$X_{\varepsilon} = \frac{g_1}{g_0} = 11 / 2 = 5.5$$

Коэффициент

$$h_0 = \sqrt{B \cdot g_0} = (54 * 2)^{1/2} = 10.39 \text{ мм}$$

$$X_h = \frac{h}{h_0} = 22.5 / 10.39 = 2.165$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$F = 0.4625$$

Расчетные коэффициенты:

$$e = \frac{F}{h_0} = 0.4625 / 10.39 = 0.04450 \text{ 1/мм}$$

$$K = \frac{A}{B} = 160 / 54 = 2.963$$

$$T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55246 \cdot \lg K) - 1}{(1.0472 + 1.9448 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (2.963^2 * (1 + 8.55246 * \lg 2.963) - 1) / ((1.0472 + 1.9448 * 2.963^2) * (2.963 - 1)) = 1.214$$

$$U = \frac{K^2 (1 + 8.55246 \cdot \lg K) - 1}{1.36136 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (2.963^2 * (1 + 8.55246 * \lg 2.963) - 1) / (1.36136 * (2.963^2 - 1) * (2.963 - 1)) = 2.078$$

Коэффициент d для интегральных фланцев:

$$d = \frac{U}{V} \cdot h_0 \cdot g_0^2 = 2.078 / 0.01481 * 10.39 * 2^2 = 0.5833 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$$

$$L = \frac{t \cdot e + 1}{T} + \frac{t^3}{d} = (17 * 0.04450 + 1) / 1.214 + 17^3 / 0.5833 \cdot 10^{-5} = 2.289$$

Момент инерции сечения фланца при изгибе (интегральные фланцы с втулкой):

Инв. № подл. 19744.4	Подпись и дата			
	Инв. № дубл.			
	Взам. инв. №			
	Подпись и дата			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 PP				Лист 280

$$I = \frac{0.0874 \cdot L \cdot g_0^2 \cdot h_0 \cdot B}{V} = 0.0874 \cdot 2,289 \cdot 2 \cdot 10,39 \cdot 54 / 0,01481 = 0,3032 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

$$G_{\text{вг}} = 0.5 \cdot (g_0 + g_1) = 0.5 \cdot (2 + 11) = 6,5 \text{ мм}$$

$$A_R = 0.5 \cdot (A - B) = 0.5 \cdot (160 - 54) = 53 \text{ мм}$$

Так как $t \geq G_{\text{вг}}$,

$$A_A = A_R = 53 \text{ мм}$$

$$B_B = t = 17 \text{ мм}$$

$$K_{AB} = \left(A_A \cdot B_B^3 \right) \cdot \left[\frac{1}{3} - 0.21 \cdot \left(\frac{B_B}{A_A} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{12} \cdot \left\{ \frac{B_B}{A_A} \right\}^4 \right) \right] = (53 \cdot 17^3) \cdot [1/3 - 0.21 \cdot (17/53) \cdot (1 - 1/12 \cdot (17/53)^4)] = 0,6927 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

$$C_c = h = 22,5 \text{ мм}$$

$$D_{DG} = G_{\text{вг}} = 6,5 \text{ мм}$$

$$K_{CD} = \left(C_c \cdot D_{DG}^3 \right) \cdot \left[\frac{1}{3} - 1.05 \cdot \left(\frac{D_{DG}}{C_c} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{192} \cdot \left\{ \frac{D_{DG}}{C_c} \right\}^4 \right) \right] = (22,5 \cdot 6,5^3) \cdot [1/3 - 1.05 \cdot (6,5/22,5) \cdot (1 - 1/192 \cdot (6,5/22,5)^4)] = 0,1854 \cdot 10^{-9} \text{ м}^4$$

Полярный момент сечения фланца (интегральные фланцы, плоские фланцы с втулкой):

$$I_P = K_{AB} + K_{CD} = 0,6927 \cdot 10^{-7} + 0,1854 \cdot 10^{-9} = 0,6946 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

Компонент проектного момента на фланце, как результат действия внешнего изгибающего момента и/или осевой силы:

$$M_{oe} = 4 \cdot M_E \cdot \left[\frac{I}{0.3846 \cdot I_P + I} \right] \cdot \left[\frac{h_D}{C - 2 \cdot h_D} \right] + F_A \cdot h_D = 4 \cdot 282,8 \cdot [0,3032 \cdot 10^{-7} / (0.3846 \cdot 0,6946 \cdot 10^{-7} + 0,3032 \cdot 10^{-7})] \cdot [30 / (125 - 2 \cdot 30)] + 1500 \cdot 30 = 322,6 \text{ Н м}$$

Изгибающий момент в расчётных условиях (внутреннее давление):

$$M_o = [(H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G) \cdot B_{SC} + M_{oe}] \cdot F_S = [(915,6 \cdot 30 + 1119 \cdot 28,87 + 1973 \cdot 22,25) \cdot 1,415 + 322,6] \cdot 1 = 469,3 \text{ Н м}$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$f = 1$$

Продольные напряжения во втулке, в расчётных условиях:

$$S_H = \frac{f \cdot M_o}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 469,3 / (2,289 \cdot 11^2 \cdot 54) = 31,38 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min \{ 1.5 \cdot S_{fo}; 2.5 \cdot S_{no} \}$$

$$\min \{ 1.5 \cdot S_{fo}; 2.5 \cdot S_{no} \} = \min \{ 1.5 \cdot 135,4; 2.5 \cdot 171,7 \} = 203 \text{ МПа}$$

31,38 МПа ≤ 203 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, расчётные условия:

$$S_R = \frac{(1.33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_o}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1.33 \cdot 17 \cdot 0,04450 + 1) \cdot 469,3 / (2,289 \cdot 17^2 \cdot 54) = 26,36 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{fo}$$

26,36 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left(0.66845 + 5.7169 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (2,963 - 1) \cdot (0.66845 + 5.7169 \cdot 2,963^2 \cdot \lg 2,963 / (2,963^2 - 1)) = 1,891$$

$$Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (2,963^2 + 1) / (2,963^2 - 1) = 1,257$$

Касательные напряжения во фланце, расчётные условия:

Инв. № подл.	19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 PP
					Лист
					281

$$S_T = \frac{Y \cdot M_o}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 1,891 \cdot 469,3 / (17^2 \cdot 54) - 1,257 \cdot 26,36 = 23,73 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{\text{до}}$$

23,73 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (31,38 + 26,36) / 2 = 28,87 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\text{до}}$$

28,87 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (31,38 + 23,73) / 2 = 27,56 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\text{до}}$$

27,56 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

Изгибающий момент в условиях монтажа (внутреннее давление):

$$M_{\xi} = \frac{W_{\xi} \cdot (C - G) \cdot B_{sc} \cdot F_s}{2} = 7,075 \cdot 10^4 \cdot (125 - 80,5) \cdot 1,415 \cdot 1 / 2 = 2228 \text{ Н м}$$

Продольные напряжения во втулке, в условиях монтажа:

$$S_H = \frac{f \cdot M_{\xi}}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 2228 / (2,289 \cdot 11^2 \cdot 54) = 149 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min\{1,5 \cdot S_{\text{до}}; 2,5 \cdot S_{\text{н}}\}$$

$$\min\{1,5 \cdot S_{\text{до}}; 2,5 \cdot S_{\text{н}}\} = \min\{1,5 \cdot 163,3; 2,5 \cdot 196\} = 245 \text{ МПа}$$

149 МПа ≤ 245 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_{\xi}}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 \cdot 17 \cdot 0,04450 + 1) \cdot 2228 / (2,289 \cdot 17^2 \cdot 54) = 125,2 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{\text{до}}$$

125,2 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Касательные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_{\xi}}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 1,891 \cdot 2228 / (17^2 \cdot 54) - 1,257 \cdot 125,2 = 112,7 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{\text{до}}$$

112,7 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (149 + 125,2) / 2 = 137,1 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\text{до}}$$

137,1 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (149 + 112,7) / 2 = 130,8 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

Инов. № подл. 19744.4	Подпись и дата				
	Инов. № дубл.				
	Взам. инв. №				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 PP
					Лист
					282

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\xi}$$

130,8 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие прочности выполнено

Жесткость фланца

- для расчётных условий:

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, расчётные условия):

$$J = \frac{52.14 \cdot V \cdot M_o}{L \cdot E_{yo} \cdot \xi_o^2 \cdot K_R \cdot h_o} = (52.14 \cdot 0.01481 \cdot 469.3) / (2.289 \cdot 1.866 \cdot 10^5 \cdot 2^2 \cdot 0.3 \cdot 10.39) = 0.06805$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1.0$$

$$0.06805 \leq 1.0$$

Условие жёсткости выполнено

- для условий монтажа:

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, условия монтажа):

$$J = \frac{52.14 \cdot V \cdot M_{\xi}}{L \cdot E_{y\xi} \cdot \xi_o^2 \cdot K_R \cdot h_o} = (52.14 \cdot 0.01481 \cdot 2228) / (2.289 \cdot 1.99 \cdot 10^5 \cdot 2^2 \cdot 0.3 \cdot 10.39) = 0.3029$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1.0$$

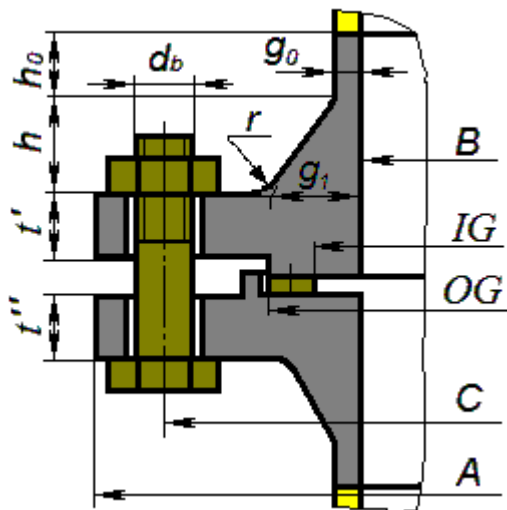
$$0.3029 \leq 1.0$$

Условие жёсткости выполнено

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 РР				Лист
				283

Фланцевое соединение DN50-M33x2

Расчёт на прочность и герметичность по ASME VIII-2



Исходные данные

Тип фланца: Приварные встык

Исполнение: Выступ-впадина

Теплоизоляция: Нет

Свободный/интегральный: -

Диаметр болтовой окружности, С: 125 мм

Данные первого фланца (кольца):

Смежный элемент: Штуцер Л DN50

Материал смежного элемента: 09Г2С (КП245) Gr.

Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245) Gr.

Наружный диаметр фланца (кольца), А: 160 мм

Толщина фланца (кольца), t: 20 мм

Сумма прибавок, с: 6 мм

Внешняя коррозия фланца, с_ф: 0 мм

Внутренний диаметр фланца, В: 48 мм

Длина конической части втулки, h: 17 мм

Длина цилиндрической части втулки, h_0 : 0 мм

Толщина цилиндрической части втулки, g_0 : 14 мм

Толщина конической части втулки, g_1 : 14 мм

Радиус перехода, г: 5 мм

Данные второго фланца (кольца):

Смежный элемент:

Материал смежного элемента: 09Г2С

Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245) Gr.

Наружный диаметр фланца (кольца), А: 160 мм

Толщина фланца (кольца), t: 21 мм

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	Свободный/интегральный:							
					-							
Изн. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	Диаметр болтовой окружности, С: 125 мм							
					Данные первого фланца (кольца):							
					Смежный элемент:	Штуцер Л DN50						
					Материал смежного элемента:	09Г2С (КП245) Gr.						
					Материал фланца (кольца):	09Г2С (КП245) Gr.						
					Наружный диаметр фланца (кольца), А:	160 мм						
					Толщина фланца (кольца), t:	20 мм						
					Сумма прибавок, с:	6 мм						
					Внешняя коррозия фланца, сг:	0 мм						
					Внутренний диаметр фланца, В:	48 мм						
					Длина конической части втулки, h:	17 мм						
					Длина цилиндрической части втулки, h ₀ :	0 мм						
					Толщина цилиндрической части втулки, g ₀ :	14 мм						
					Толщина конической части втулки, g ₁ :	14 мм						
					Радиус перехода, r:	5 мм						
					Данные второго фланца (кольца):							
					Смежный элемент:							
					Материал смежного элемента:	09Г2С						
					Материал фланца (кольца):	09Г2С (КП245) Gr.						
					Наружный диаметр фланца (кольца), А:	160 мм						
					Толщина фланца (кольца), t:	21 мм						
					Изн. № подл.	19744.4					К-5.00.00.000 PP	Лист
					Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	284		

Сумма прибавок, с: 6 мм
Внешняя коррозия фланца, с_г: 0 мм
Внутренний диаметр фланца, В: 33 мм
Длина конической части втулки, h: 22,5 мм
Длина цилиндрической части втулки, h₀: 1,5 мм
Толщина цилиндрической части втулки, g₀: 12,5 мм
Толщина конической части втулки, g₁: 21,5 мм
Радиус перехода, г: 5 мм

Шпильки:

Материал: 35Х
Наружный диаметр, d_б: 16 мм
Количество, n: 4
Радиальная коррозия крепежа, с_б: 0 мм

Прокладка:

Материал прокладки: Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали
Толщина, h_п: 3,2 мм
Наружный диаметр, OG: 87 мм
Внутренний диаметр, IG: 74 мм

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётное осевое сжимающее усилие, F: 0 Н
Расчётный изгибающий момент, M: 0 Н м
Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,4 МПа
Расчётная температура элементов соединения:
Температура фланца (кольца), t_ф: 144 °С
Температура фланца (кольца), t_ф: 144 °С
Температура болтов (шпилек), t_б: 127,5 °С

Свойства материала болтов (шпилек)

Допускаемые напряжения для материала 35Х при температуре T = 127,5 °С (расчётные условия):

$S_b = \min\{R_e^{20} / n_{T20}; R_m^{20} / n_{B20}; R_e / n_T; R_m / n_B\} = \min(590 / 4; 736 / 5; 558 / 1,5; 715 / 5) = 143 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости для материала 35Х при температуре T = 127,5 °С:

$E_b = 2,083 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Коэффициент линейного расширения для материала 35Х при температуре T = 127,5 °С:

$\alpha_b = 0,1206 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$

Допускаемые напряжения для материала 35Х при температуре T = 20 °С (расчётные условия):

$S_a = \min\{R_e^{20} / n_{T20}; R_m^{20} / n_{B20}; R_e^{20} / n_T\} = \min(590 / 4; 736 / 5; 590 / 1,5) = 147,2 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости для материала 35Х при температуре T = 20 °С:

$E^{20}_b = 2,15 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала смежного элемента фланца 1 Штуцер Л DN50

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 150 °С (расчётные условия):

$S_{n01} = \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min(202,1 / 1,5; 440 / 2,4) = 134,7 \text{ МПа}$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 20 °С (расчётные условия):

$S_{ng1} = \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min(245 / 1,5; 440 / 2,4) = 163,3 \text{ МПа}$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Инов. № подл.	19744.4	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	K-5.00.00.000 PP	Лист	285
---------------	----------------	---------------	----------------	--------------	---------------	----------------	---------------	---------	------	------	----------	-------	------	------------------	------	-----

Свойства материала смежного элемента фланца 2

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 144 °С (расчётные условия):

$S_{no2}= 171,7 \text{ МПа}$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 20 °С (расчётные условия):

$S_{ng2}= 196 \text{ МПа}$

Свойства материала фланца (кольца) 1

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 144 °С (расчётные условия):

$S_{fo1}= \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{203 / 1,5; 440 / 2,4\}= 135,4 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 144 °С:

$E_1= 1,866 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 144 °С:

$\alpha_1= 0,1248 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 20 °С (расчётные условия):

$S_{g1}= \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{245 / 1,5; 440 / 2,4\}= 163,3 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 20 °С:

$E^{20}_1= 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала фланца (кольца) 2

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 144 °С (расчётные условия):

$S_{fo2}= \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{203 / 1,5; 440 / 2,4\}= 135,4 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 144 °С:

$E_2= 1,866 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 144 °С:

$\alpha_2= 0,1248 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 20 °С (расчётные условия):

$S_{g2}= \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{245 / 1,5; 440 / 2,4\}= 163,3 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 20 °С:

$E^{20}_2= 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётные параметры первого фланца:

Внутренний диаметр фланца (с учетом коррозии):

$B = B + 2 \cdot c = 48 + 2 \cdot 6 = 60 \text{ мм}$

Диаметр втулки с учетом коррозии (для фланцев, приварных встык):

$\xi_0 = \xi_0 - c = 14 - 6 = 8 \text{ мм}$

Больший диаметр конической втулки с учетом коррозии:

$\xi_1 = \xi_1 - c = 14 - 6 = 8 \text{ мм}$

Толщина фланца, с учетом коррозии:

$t = t - c_f = 20 - 0 = 20 \text{ мм}$

Расчётные параметры второго фланца:

Внутренний диаметр фланца (с учетом коррозии):

$B = B + 2 \cdot c = 33 + 2 \cdot 6 = 45 \text{ мм}$

Диаметр втулки с учетом коррозии (для фланцев, приварных встык):

$\xi_0 = \xi_0 - c = 12,5 - 6 = 6,5 \text{ мм}$

Больший диаметр конической втулки с учетом коррозии:

$\xi_1 = \xi_1 - c = 21,5 - 6 = 15,5 \text{ мм}$

Толщина фланца, с учетом коррозии:

Подпись и дата		Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 PP		Лист
Изнв. № дубл.		Изнв. № дубл.		Изнв. № дубл.		Изнв. № дубл.			286
Взам. инв. №		Взам. инв. №		Взам. инв. №		Взам. инв. №	К-5.00.00.000 PP		Лист
Подпись и дата		Подпись и дата		Подпись и дата		Подпись и дата			286
Изнв. № подл.	19744.4	Изнв. № подл.		Изнв. № подл.		Изнв. № подл.	К-5.00.00.000 PP		Лист
Изнв. № подл.	19744.4	Изнв. № подл.		Изнв. № подл.		Изнв. № подл.			286

$$t = t - c_f = 21 - 0 = 21 \text{ мм}$$

Характеристики прокладки:

Тип и материал прокладки	Прокладочный коэффициент, m	Давление обжатия, у, МПа	Допускаемое удельное давление [q], МПа	Коэффициент обжатия К	Условный модуль сжатия E _m , МПа
Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали	3	69	—	—	—

Ширина, используемая для определения базовой контактной ширины прокладки через b₀, на основании возможной контактной ширины прокладки:

$$N = \frac{OG - IG}{2} = (87 - 74) / 2 = 6,5 \text{ мм}$$

Базовая контактная ширина прокладки:

$$b_0 = \frac{N}{2} = 6,5 / 2 = 3,25 \text{ мм}$$

Диаметр окружности приложения реакции со стороны прокладки:

Если b₀ ≤ 6 мм, G равно среднему диаметру контактирующей поверхности прокладки.

$$G = \frac{OG + \max\{B', B'', IG\}}{2} = (87 + \max\{48; 33; 74\}) / 2 = 80,5 \text{ мм}$$

Ширина, используемая для определения базовой контактной ширины прокладки через b₀, на основании возможной контактной ширины прокладки:

$$N = \frac{OG - IG}{2} = (87 - 74) / 2 = 6,5 \text{ мм}$$

Базовая контактная ширина прокладки:

$$b_0 = \frac{N}{2} = 6,5 / 2 = 3,25 \text{ мм}$$

Диаметр окружности приложения реакции со стороны прокладки:

Если b₀ ≤ 6 мм, G равно среднему диаметру контактирующей поверхности прокладки.

$$G = \frac{OG + \max\{B', B'', IG\}}{2} = (87 + \max\{48; 33; 74\}) / 2 = 80,5 \text{ мм}$$

Эффективная контактная ширина прокладки:

$$b = \begin{cases} b_0 & \text{если } b_0 \leq 6 \text{ мм} \\ 2,5 \cdot \sqrt{b_0} & \text{если } b_0 > 6 \text{ мм} \end{cases} = 3,25 \text{ мм}$$

Расчёт нагрузок

Проектная болтовая нагрузка для расчётных условий (для несамонуплотняющихся прокладок):

$$W_0 = 0,785 \cdot G^2 \cdot p + 2 \cdot b \cdot \pi \cdot G \cdot m \cdot p = 0,785 \cdot 80,5^2 \cdot 0,4 + 2 \cdot 3,25 \cdot 3,142 \cdot 80,5 \cdot 3 \cdot 0,4 = 4007 \text{ Н}$$

Величина растягивающей внешней силы:

$$F_A = 0 \text{ Н}$$

Сжимающими нагрузками пренебрегают, и в этом случае F_A приравнивается нулю.

Внешний изгибающий момент:

$$M_E = 0 \text{ Н м}$$

$$W_{\text{ср}} = \pi \cdot b \cdot G \cdot y = 3,142 \cdot 3,25 \cdot 80,5 \cdot 69 = 5,671 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Общая расчетная площадь сечения болтов:

Инов. № подл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Подпись и дата
Инов. № дубл.	Подпись и дата
Инов. №	Подпись и дата
Инов. № подл.	Подпись и дата
Инов. № подл.	Подпись и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

К-5.00.00.000 PP

Лист

287

$$h_o = \sqrt{B \cdot g_0} = (60 \cdot 8)^{1/2} = 21,91 \text{ мм}$$

$$X_h = \frac{h}{h_o} = 17 / 21,91 = 0,7759$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$F = 0,8974$$

Расчетные коэффициенты:

$$e = \frac{F}{h_o} = 0,8974 / 21,91 = 0,04096 \text{ 1/мм}$$

$$K = \frac{A}{B} = 160 / 60 = 2,667$$

$$T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg K) - 1}{(1,0472 + 1,9448 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (2,667^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg 2,667) - 1) / ((1,0472 + 1,9448 \cdot 2,667^2) \cdot (2,667 - 1)) = 1,291$$

$$U = \frac{K^2 (1 + 8,55246 \cdot \lg K) - 1}{1,36136 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (2,667^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg 2,667) - 1) / (1,36136 \cdot (2,667^2 - 1) \cdot (2,667 - 1)) = 2,309$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$V = 0,5527$$

Коэффициент d для интегральных фланцев:

$$d = \frac{U}{V} \cdot h_o \cdot g_0^2 = 2,309 / 0,5527 \cdot 21,91 \cdot 8^2 = 0,5858 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$$

$$L = \frac{t \cdot e + 1}{T} + \frac{t^3}{d} = (20 \cdot 0,04096 + 1) / 1,291 + 20^3 / 0,5858 \cdot 10^{-5} = 2,774$$

Момент инерции сечения фланца при изгибе (интегральные фланцы с втулкой):

$$I = \frac{0,0874 \cdot L \cdot g_0^2 \cdot h_o \cdot B}{V} = 0,0874 \cdot 2,774 \cdot 8^2 \cdot 21,91 \cdot 60 / 0,5527 = 0,3691 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

$$G_{wg} = 0,5 \cdot (g_0 + g_1) = 0,5 \cdot (8 + 8) = 8 \text{ мм}$$

$$A_R = 0,5 \cdot (A - B) = 0,5 \cdot (160 - 60) = 50 \text{ мм}$$

Так как $t \geq G_{wg}$,

$$A_A = A_R = 50 \text{ мм}$$

$$B_B = t = 20 \text{ мм}$$

$$K_{AB} = \left\{ A_A \cdot B_B^3 \right\} \cdot \left[\frac{1}{3} - 0,21 \cdot \left(\frac{B_B}{A_A} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{12} \cdot \left\{ \frac{B_B}{A_A} \right\}^4 \right) \right] = (50 \cdot 20^3) \cdot [1/3 - 0,21 \cdot (20/50) \cdot (1 - 1/12 \cdot (20/50)^4)] = 0,9981 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

$$C_c = h = 17 \text{ мм}$$

$$D_{DG} = G_{wg} = 8 \text{ мм}$$

$$K_{CD} = \left\{ C_c \cdot D_{DG}^3 \right\} \cdot \left[\frac{1}{3} - 1,05 \cdot \left(\frac{D_{DG}}{C_c} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{192} \cdot \left\{ \frac{D_{DG}}{C_c} \right\}^4 \right) \right] = (17 \cdot 8^3) \cdot [1/3 - 1,05 \cdot (8/17) \cdot (1 - 1/192 \cdot (8/17)^4)] = (-0,1398 \cdot 10^{-8}) \text{ м}^4$$

Полярный момент сечения фланца (интегральные фланцы, плоские фланцы с втулкой):

$$I_p = K_{AB} + K_{CD} = 0,9981 \cdot 10^{-7} + (-0,1398 \cdot 10^{-8}) = 0,9841 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

Компонент проектного момента на фланце, как результат действия внешнего изгибающего момента и/или осевой силы:

Инв. № подл.	19744.4	Подпись и дата			
		Инв. № дубл.			
		Взам. инв. №			
Инв. № подл.	19744.4	Подпись и дата			
		Инв. № дубл.			
		Взам. инв. №			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 PP

$$M_{oe} = 4 \cdot M_E \cdot \left[\frac{I}{0,3846 \cdot I_p + I} \right] \cdot \left[\frac{h_D}{C - 2 \cdot h_D} \right] + F_A \cdot h_D = 4 \cdot 0 \cdot [0,3691 \cdot 10^{-7} / (0,3846 \cdot 0,9841 \cdot 10^{-7} + 0,3691 \cdot 10^{-7})] \cdot [28,5 / (125 - 2 \cdot 28,5)] + 0 \cdot 28,5 = 0 \text{ Нм}$$

Коэффициент момента для расчета свободных колец:

$$F_S = 1$$

Изгибающий момент в расчётных условиях (внутреннее давление):

$$M_o = [(H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G) \cdot B_{SC} + M_{oe}] \cdot F_S = [(1130 \cdot 28,5 + 904,4 \cdot 27,38 + 1973 \cdot 22,25) \cdot 1,374 + 0] \cdot 1 = 138,6 \text{ Нм}$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$f = 1$$

Продольные напряжения во втулке, в расчётных условиях:

$$S_H = \frac{f \cdot M_o}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 138,6 / (2,774 \cdot 8^2 \cdot 60) = 13,01 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min \{1,5 \cdot S_{\text{до}}; 2,5 \cdot S_{\text{но}}\}$$

$$\min \{1,5 \cdot S_{\text{до}}; 2,5 \cdot S_{\text{но}}\} = \min \{1,5 \cdot 135,4; 2,5 \cdot 134,7\} = 203 \text{ МПа}$$

13,01 МПа ≤ 203 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, расчётные условия:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_o}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 \cdot 20 \cdot 0,04096 + 1) \cdot 138,6 / (2,774 \cdot 20^2 \cdot 60) = 4,349 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{\text{до}}$$

4,349 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left(0,66845 + 5,7169 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (2,667 - 1) \cdot (0,66845 + 5,7169 \cdot 2,667^2 \cdot \lg 2,667 / (2,667^2 - 1)) = 2,101$$

$$Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (2,667^2 + 1) / (2,667^2 - 1) = 1,327$$

Касательные напряжения во фланце, расчётные условия:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_o}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 2,101 \cdot 138,6 / (20^2 \cdot 60) - 1,327 \cdot 4,349 = 6,362 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{\text{до}}$$

6,362 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (13,01 + 4,349) / 2 = 8,679 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\text{до}}$$

8,679 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (13,01 + 6,362) / 2 = 9,685 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\text{до}}$$

9,685 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

Болтовая нагрузка в условиях монтажа:

$$W_{\text{г}} = \left(\frac{A_m + A_b}{2} \right) \cdot S_{b\text{г}} = (0,3853 \cdot 10^{-3} + 0,576 \cdot 10^{-3}) / 2 \cdot 147,2 = 7,075 \cdot 10^{-4} \text{ Н}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
К-5.00.00.000 PP			
Лист			
290			

Изгибающий момент в условиях монтажа (внутреннее давление):

$$M_{\xi} = \frac{W_{\xi} \cdot (C - G) \cdot B_{sc} \cdot F_s}{2} = 7,075 \cdot 10^4 \cdot (125 - 80,5) \cdot 1,374 \cdot 1 / 2 = 2163 \text{ Н м}$$

Продольные напряжения во втулке, в условиях монтажа:

$$S_H = \frac{f \cdot M_{\xi}}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 2163 / (2,774 \cdot 8^2 \cdot 60) = 203 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min\{1,5 \cdot S_{\xi g}; 2,5 \cdot S_{\xi g}\}$$

$$\min\{1,5 \cdot S_{\xi g}; 2,5 \cdot S_{\xi g}\} = \min\{1,5 \cdot 163,3; 2,5 \cdot 163,3\} = 245 \text{ МПа}$$

203 МПа ≤ 245 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_{\xi}}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 \cdot 20 \cdot 0,04096 + 1) \cdot 2163 / (2,774 \cdot 20^2 \cdot 60) = 67,87 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{\xi g}$$

67,87 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Касательные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_{\xi}}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 2,101 \cdot 2163 / (20^2 \cdot 60) - 1,327 \cdot 67,87 = 99,29 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{\xi g}$$

99,29 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (203 + 67,87) / 2 = 135,4 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\xi g}$$

135,4 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (203 + 99,29) / 2 = 151,2 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\xi g}$$

151,2 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие прочности выполнено

Жесткость фланца

- для расчётных условий:

Коэффициент жесткости для интегральных фланцев:

$$K_R = 0,3$$

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, расчётные условия):

$$J = \frac{52,14 \cdot V \cdot M_o}{L \cdot E_{yo} \cdot g_o^2 \cdot K_R \cdot h_o} = (52,14 \cdot 0,5527 \cdot 138,6) / (2,774 \cdot 1,866 \cdot 10^5 \cdot 8^2 \cdot 0,3 \cdot 21,91) = 0,01834$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1,0$$

$$0,01834 \leq 1,0$$

Условие жёсткости выполнено

- для условий монтажа:

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, условия монтажа):

Изн. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	$\frac{S_H + S_R}{2} = (153 + 87,37) / 2 = 153,4 \text{ МПа}$ <p>Условие прочности:</p> $\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\text{гг}}$ <p>135,4 МПа ≤ 163,3 МПа, Условие прочности выполнено</p> $\frac{S_H + S_T}{2} = (203 + 99,29) / 2 = 151,2 \text{ МПа}$ <p>Условие прочности:</p> $\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\text{гг}}$ <p>151,2 МПа ≤ 163,3 МПа, Условие прочности выполнено</p> <p>Условие прочности выполнено</p> <p>Жесткость фланца</p> <p>- для расчётных условий:</p> <p>Коэффициент жесткости для интегральных фланцев:</p> <p>$K_R = 0.3$</p> <p>Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, расчётные условия):</p> $J = \frac{52.14 \cdot V \cdot M_o}{L \cdot E_{yo} \cdot g_0^2 \cdot K_R \cdot h_o} = (52.14 * 0,5527 * 138,6) / (2,774 * 1,866 \cdot 10^5 * 8^2 * 0,3 * 21,91) = 0,01834$ <p>Условие жесткости:</p> <p>$J \leq 1.0$</p> <p>$0,01834 \leq 1.0$</p> <p>Условие жёсткости выполнено</p> <p>- для условий монтажа:</p> <p>Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, условия монтажа):</p>	
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	К-5.00.00.000 PP	Лист
19744.4						291
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

$$J = \frac{52.14 \cdot V \cdot M_g}{L \cdot E_{yg} \cdot g_0^2 \cdot K_R \cdot h_o} = (52.14 * 0.5527 * 2163) / (2.774 * 1.99 \cdot 10^5 * 8^2 * 0.3 * 21.91) = 0.2684$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1.0$$

$$0.2684 \leq 1.0$$

Условие жёсткости выполнено

Расчёт напряжений второго фланца:

Равнодействующая давления на внутренней поверхности фланца:

$$H_D = 0.785 \cdot B^2 \cdot p = 0.785 * 45^2 * 0.4 = 635.8 \text{ Н}$$

Плечо момента для силы H_D (фланцы интегрального типа, или другие, рассчитываемые аналогично):

$$h_D = \frac{C - B - g_1}{2} = (125 - 45 - 15.5) / 2 = 32.25 \text{ мм}$$

Разница между общей равнодействующей давления и равнодействующей на внутренней поверхности фланца:

$$H_T = H - H_D = 2035 - 635.8 = 1399 \text{ Н}$$

Плечо для нагрузки H_T (интегральные фланцы, а также иные, рассчитываемые аналогично):

$$h_T = \frac{1}{2} \left[\frac{C - B}{2} + h_G \right] = 1/2 * [(125 - 45) / 2 + 22.25] = 31.13 \text{ мм}$$

Коэффициент болтового интервала:

$$B_{SC} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{B_S}{2 \cdot a + t}} \right\} = \max \{ 1; (98.17 / (2 * 16 + 21))^{1/2} \} = 1.361$$

$$X_g = \frac{g_1}{g_0} = 15.5 / 6.5 = 2.385$$

Коэффициент

$$h_o = \sqrt{B \cdot g_0} = (45 * 6.5)^{1/2} = 17.1 \text{ мм}$$

$$X_h = \frac{h}{h_o} = 22.5 / 17.1 = 1.316$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$F = 0.6835$$

Расчетные коэффициенты:

$$e = \frac{F}{h_o} = 0.6835 / 17.1 = 0.03996 \text{ 1/мм}$$

$$K = \frac{A}{B} = 160 / 45 = 3.556$$

$$T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55246 \cdot \lg K) - 1}{(1.0472 + 1.9448 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (3.556^2 * (1 + 8.55246 * \lg 3.556) - 1) / ((1.0472 + 1.9448 * 3.556^2) * (3.556 - 1)) = 1.087$$

$$U = \frac{K^2 (1 + 8.55246 \cdot \lg K) - 1}{1.36136 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (3.556^2 * (1 + 8.55246 * \lg 3.556) - 1) / (1.36136 * (3.556^2 - 1) * (3.556 - 1)) = 1.758$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$V = 0.09831$$

Коэффициент d для интегральных фланцев:

$$d = \frac{U}{V} \cdot h_o \cdot g_0^2 = 1.758 / 0.09831 * 17.1 * 6.5^2 = 0.1292 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$$

Инв. № подл. 19744.4	Подпись и дата				Лист 292
	Инв. № дубл.				
	Взам. инв. №				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 PP

Коэффициент		
$h_o = \sqrt{B \cdot g_0} = (45 \cdot 6,5)^{1/2} = 17,1 \text{ мм}$		
$X_h = \frac{h}{h_o} = 22,5 / 17,1 = 1,316$		
Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):		
F = 0,6835		
Расчетные коэффициенты:		
$e = \frac{F}{h_o} = 0,6835 / 17,1 = 0,03996 \text{ 1/мм}$		
$K = \frac{A}{B} = 160 / 45 = 3,556$		
$T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg K) - 1}{(1,0472 + 1,9448 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (3,556^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg 3,556) - 1) / ((1,0472 + 1,9448 \cdot 3,556^2) \cdot (3,556 - 1)) = 1,087$		
$U = \frac{K^2 (1 + 8,55246 \cdot \lg K) - 1}{1,36136 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (3,556^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg 3,556) - 1) / (1,36136 \cdot (3,556^2 - 1) \cdot (3,556 - 1)) = 1,758$		
Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):		
V = 0,09831		
Коэффициент d для интегральных фланцев:		
$d = \frac{U}{V} \cdot h_o \cdot g_0^2 = 1,758 / 0,09831 \cdot 17,1 \cdot 6,5^2 = 0,1292 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$		

$$L = \frac{t \cdot e + 1}{T} + \frac{t^3}{d} = (21 \cdot 0,03996 + 1) / 1,087 + 21^3 / 0,1292 \cdot 10^{-4} = 2,409$$

Момент инерции сечения фланца при изгибе (интегральные фланцы с втулкой):

$$I = \frac{0,0874 \cdot L \cdot g_0^2 \cdot h_0 \cdot B}{V} = 0,0874 \cdot 2,409 \cdot 6,5 \cdot 17,1 \cdot 45 / 0,09831 = 0,6963 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

$$G_{\text{вг}} = 0,5 \cdot (g_0 + g_1) = 0,5 \cdot (6,5 + 15,5) = 11 \text{ мм}$$

$$A_R = 0,5 \cdot (A - B) = 0,5 \cdot (160 - 45) = 57,5 \text{ мм}$$

Так как $t \geq G_{\text{вг}}$,

$$A_A = A_R = 57,5 \text{ мм}$$

$$B_B = t = 21 \text{ мм}$$

$$K_{AB} = \left\{ A_A \cdot B_B^3 \cdot \left[\frac{1}{3} - 0,21 \cdot \left(\frac{B_B}{A_A} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{12} \cdot \left\{ \frac{B_B}{A_A} \right\}^4 \right) \right] \right\} = (57,5 \cdot 21^3) \cdot [1/3 - 0,21 \cdot (21/57,5) \cdot (1 - 1/12 \cdot (21/57,5)^4)] = 0,1367 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$$

$$C_C = h = 22,5 \text{ мм}$$

$$D_{DG} = G_{\text{вг}} = 11 \text{ мм}$$

$$K_{CD} = \left\{ C_C \cdot D_{DG}^3 \cdot \left[\frac{1}{3} - 1,05 \cdot \left(\frac{D_{DG}}{C_C} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{192} \cdot \left\{ \frac{D_{DG}}{C_C} \right\}^4 \right) \right] \right\} = (22,5 \cdot 11^3) \cdot [1/3 - 1,05 \cdot (11/22,5) \cdot (1 - 1/192 \cdot (11/22,5)^4)] = (-0,5386 \cdot 10^{-8}) \text{ м}^4$$

Полярный момент сечения фланца (интегральные фланцы, плоские фланцы с втулкой):

$$I_P = K_{AB} + K_{CD} = 0,1367 \cdot 10^{-6} + (-0,5386 \cdot 10^{-8}) = 0,1313 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$$

Компонент проектного момента на фланце, как результат действия внешнего изгибающего момента и/или осевой силы:

$$M_{oe} = 4 \cdot M_E \cdot \left[\frac{I}{0,3846 \cdot I_P + I} \right] \cdot \left[\frac{h_D}{C - 2 \cdot h_D} \right] + F_A \cdot h_D = 4 \cdot 0 \cdot [0,6963 \cdot 10^{-7} / (0,3846 \cdot 0,1313 \cdot 10^{-6} + 0,6963 \cdot 10^{-7})] \cdot [32,25 / (125 - 2 \cdot 32,25)] + 0 \cdot 32,25 = 0 \text{ Н м}$$

Изгибающий момент в расчётных условиях (внутреннее давление):

$$M_o = [(H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G) \cdot B_{sc} + M_{oe}] \cdot F_S = [(635,8 \cdot 32,25 + 1399 \cdot 31,13 + 1973 \cdot 22,25) \cdot 1,361 + 0] \cdot 1 = 146,9 \text{ Н м}$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$f = 1$$

Продольные напряжения во втулке, в расчётных условиях:

$$S_H = \frac{f \cdot M_o}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 146,9 / (2,409 \cdot 15,5^2 \cdot 45) = 5,641 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min \{ 1,5 \cdot S_{f0}; 2,5 \cdot S_{n0} \}$$

$$\min \{ 1,5 \cdot S_{f0}; 2,5 \cdot S_{n0} \} = \min \{ 1,5 \cdot 135,4; 2,5 \cdot 171,7 \} = 203 \text{ МПа}$$

5,641 МПа ≤ 203 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, расчётные условия:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_o}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 \cdot 21 \cdot 0,03996 + 1) \cdot 146,9 / (2,409 \cdot 21^2 \cdot 45) = 6,503 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{f0}$$

6,503 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left(0,66845 + 5,7169 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (3,556 - 1) \cdot (0,66845 + 5,7169 \cdot 3,556^2 \cdot \lg 3,556 / (3,556^2 - 1)) = 1,6$$

Инв. № подл.	19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 PP
					Лист
					293

$$Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (3,556^2 + 1) / (3,556^2 - 1) = 1,172$$

Касательные напряжения во фланце, расчётные условия:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_o}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 1,6 * 146,9 / (21^2 * 45) - 1,172 * 6,503 = 4,222 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{\text{до}}$$

4,222 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (5,641 + 6,503) / 2 = 6,072 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\text{до}}$$

6,072 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (5,641 + 4,222) / 2 = 4,932 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\text{до}}$$

4,932 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

Изгибающий момент в условиях монтажа (внутреннее давление):

$$M_{\xi} = \frac{W_{\xi} \cdot (C - G) \cdot B_{sc} \cdot F_s}{2} = 7,075 \cdot 10^4 * (125 - 80,5) * 1,361 * 1 / 2 = 2142 \text{ Н м}$$

Продольные напряжения во втулке, в условиях монтажа:

$$S_H = \frac{f \cdot M_{\xi}}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 * 2142 / (2,409 * 15,5^2 * 45) = 82,27 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min\{1,5 \cdot S_{\text{до}}; 2,5 \cdot S_{\text{нг}}\}$$

$$\min\{1,5 \cdot S_{\text{до}}; 2,5 \cdot S_{\text{нг}}\} = \min\{1,5 * 163,3; 2,5 * 196\} = 245 \text{ МПа}$$

82,27 МПа ≤ 245 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_{\xi}}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 * 21 * 0,03996 + 1) * 2142 / (2,409 * 21^2 * 45) = 94,85 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{\text{до}}$$

94,85 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Касательные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_{\xi}}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 1,6 * 2142 / (21^2 * 45) - 1,172 * 94,85 = 61,58 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{\text{до}}$$

61,58 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (82,27 + 94,85) / 2 = 88,56 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\text{до}}$$

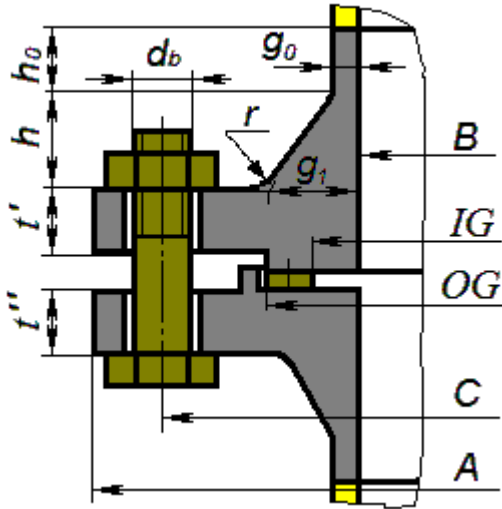
88,56 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
			Дата
К-5.00.00.000 PP			
Лист			
294			

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (82,27 + 61,58) / 2 = 71,93 \text{ МПа}$$

Фланцевое соединение DN50-Rc1/2

Расчёт на прочность и герметичность по ASME VIII-2



Исходные данные

Тип фланца: Приварные встык

Исполнение: Выступ-впадина

Теплоизоляция: Нет

Свободный/интегральный: -

Диаметр болтовой окружности, С: 125 мм

Данные первого фланца (кольца):

Смежный элемент: Штуцер П DN50

Материал смежного элемента: 09Г2С (КП245) Gr.

Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245) Gr.

Наружный диаметр фланца (кольца), А: 160 мм

Толщина фланца (кольца), t: 20 мм

Сумма прибавок, с: 6 мм

Внешняя коррозия фланца, c_f : 0 мм

Внутренний диаметр фланца, В: 48 мм

Длина конической части втулки, h: 17 мм

Длина цилиндрической части втулки, h_0 : 0 мм

Толщина цилиндрической части втулки, g_0 : 14 мм

Толщина конической части втулки, g_1 : 14 мм

Радиус перехода, г: 5 мм

Данные второго фланца (кольца):

Смежный элемент:

Материал смежного элемента: 09Г2С

Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245) Gr.

Наружный диаметр фланца (кольца), А: 160 мм

Толщина фланца (кольца), t: 21 мм

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	19744.4	Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Своободный интервалный: -
											Диаметр болтовой окружности, С: 125 мм
Данные первого фланца (кольца):											
Смежный элемент: Штуцер П DN50											
Материал смежного элемента: 09Г2С (КП245) Gr.											
Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245) Gr.											
Наружный диаметр фланца (кольца), А: 160 мм											
Толщина фланца (кольца), t: 20 мм											
Сумма прибавок, с: 6 мм											
Внешняя коррозия фланца, с _г : 0 мм											
Внутренний диаметр фланца, В: 48 мм											
Длина конической части втулки, h: 17 мм											
Длина цилиндрической части втулки, h ₀ : 0 мм											
Толщина цилиндрической части втулки, g ₀ : 14 мм											
Толщина конической части втулки, g ₁ : 14 мм											
Радиус перехода, r: 5 мм											
Данные второго фланца (кольца):											
Смежный элемент:											
Материал смежного элемента: 09Г2С											
Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245) Gr.											
Наружный диаметр фланца (кольца), А: 160 мм											
Толщина фланца (кольца), t: 21 мм											
К-5.00.00.000 PP											Лист
											296

Сумма прибавок, с: 6 мм
Внешняя коррозия фланца, с_г: 0 мм
Внутренний диаметр фланца, В: 21 мм
Длина конической части втулки, h: 22,5 мм
Длина цилиндрической части втулки, h₀: 1,5 мм
Толщина цилиндрической части втулки, g₀: 18,5 мм
Толщина конической части втулки, g₁: 27,5 мм
Радиус перехода, г: 5 мм

Шпильки:

Материал: 35Х
Наружный диаметр, d_б: 16 мм
Количество, n: 4
Радиальная коррозия крепежа, с_б: 0 мм

Прокладка:

Материал прокладки: Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали
Толщина, h_п: 3,2 мм
Наружный диаметр, OG: 87 мм
Внутренний диаметр, IG: 74 мм

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётное осевое сжимающее усилие, F: 0 Н
Расчётный изгибающий момент, M: 0 Н м
Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,4 МПа
Расчётная температура элементов соединения:
Температура фланца (кольца), t_ф: 144 °С
Температура фланца (кольца), t_ф: 144 °С
Температура болтов (шпилек), t_б: 127,5 °С

Свойства материала болтов (шпилек)

Допускаемые напряжения для материала 35Х при температуре T = 127,5 °С (расчётные условия):

$S_b = \min\{R_e^{20} / n_{T20}; R_m^{20} / n_{B20}; R_e / n_T; R_m / n_B\} = \min(590 / 4; 736 / 5; 558 / 1,5; 715 / 5) = 143 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости для материала 35Х при температуре T = 127,5 °С:

$E_b = 2,083 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Коэффициент линейного расширения для материала 35Х при температуре T = 127,5 °С:

$\alpha_b = 0,1206 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$

Допускаемые напряжения для материала 35Х при температуре T = 20 °С (расчётные условия):

$S_a = \min\{R_e^{20} / n_{T20}; R_m^{20} / n_{B20}; R_e^{20} / n_T\} = \min(590 / 4; 736 / 5; 590 / 1,5) = 147,2 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости для материала 35Х при температуре T = 20 °С:

$E^{20}_b = 2,15 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала смежного элемента фланца 1 Штуцер П DN50

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 150 °С (расчётные условия):

$S_{n01} = \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min(202,1 / 1,5; 440 / 2,4) = 134,7 \text{ МПа}$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 20 °С (расчётные условия):

$S_{ng1} = \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min(245 / 1,5; 440 / 2,4) = 163,3 \text{ МПа}$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Инов. № подл.	19744.4	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	K-5.00.00.000 PP	Лист	297
---------------	----------------	---------------	----------------	--------------	---------------	----------------	---------------	---------	------	------	----------	-------	------	------------------	------	-----

Свойства материала смежного элемента фланца 2

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{но}2} = 171,7 \text{ МПа}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{нг}2} = 196 \text{ МПа}$$

Свойства материала фланца (кольца) 1

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{fo}1} = \min(R_{\text{e}t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{203 / 1,5; 440 / 2,4\} = 135,4 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_1 = 1,866 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\alpha_1 = 0,1248 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{g}1} = \min(R_{\text{e}t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{245 / 1,5; 440 / 2,4\} = 163,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E^{20}_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала фланца (кольца) 2

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{fo}2} = \min(R_{\text{e}t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{203 / 1,5; 440 / 2,4\} = 135,4 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_2 = 1,866 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\alpha_2 = 0,1248 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{g}2} = \min(R_{\text{e}t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{245 / 1,5; 440 / 2,4\} = 163,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E^{20}_2 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётные параметры первого фланца:

Внутренний диаметр фланца (с учетом коррозии):

$$B = B + 2 \cdot c = 48 + 2 \cdot 6 = 60 \text{ мм}$$

Диаметр втулки с учетом коррозии (для фланцев, приварных встык):

$$\xi_0 = \xi_0 - c = 14 - 6 = 8 \text{ мм}$$

Больший диаметр конической втулки с учетом коррозии:

$$\xi_1 = \xi_1 - c = 14 - 6 = 8 \text{ мм}$$

Толщина фланца, с учетом коррозии:

$$t = t - c_f = 20 - 0 = 20 \text{ мм}$$

Расчётные параметры второго фланца:

Внутренний диаметр фланца (с учетом коррозии):

$$B = B + 2 \cdot c = 21 + 2 \cdot 6 = 33 \text{ мм}$$

Диаметр втулки с учетом коррозии (для фланцев, приварных встык):

$$\xi_0 = \xi_0 - c = 18,5 - 6 = 12,5 \text{ мм}$$

Больший диаметр конической втулки с учетом коррозии:

$$\xi_1 = \xi_1 - c = 27,5 - 6 = 21,5 \text{ мм}$$

Толщина фланца, с учетом коррозии:

Изн. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата						Лист 298
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 PP					

$$A_m = \max \left[\frac{W_o + F_A + \frac{4 \cdot M_E}{G}}{S_{bo}}; \frac{W_{gs}}{S_{bg}} \right] = \max[(4007 + 0 + 4 \cdot 0 / 80,5) / 143; 5,671 \cdot 10^4 / 147,2] = 0,3853 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Диаметр сечения болта (шпильки) с учетом коррозии:

$$d_{bc} = 16 \text{ мм}$$

Площадь сечения болта (шпильки) (по внутреннему диаметру резьбы с учетом коррозии):

$$f_o = 0,144 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Площадь поперечного сечения болтов по внутреннему диаметру резьбы или минимальному диаметру стержня:

$$A_b = n \cdot f_o = 4 \cdot 0,144 \cdot 10^{-3} = 0,576 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Расчёт болтов(шпилек):

Условие прочности болтов:

$$A_m \leq A_b$$

$$0,3853 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \leq 0,576 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Условие прочности выполнено

Расчёт напряжений первого фланца:

Равнодействующая давления на внутренней поверхности фланца:

$$H_D = 0,785 \cdot B^2 \cdot p = 0,785 \cdot 60^2 \cdot 0,4 = 1130 \text{ Н}$$

Плечо момента для силы H_D (фланцы интегрального типа, или другие, рассчитываемые аналогично):

$$h_D = \frac{C - B - g_1}{2} = (125 - 60 - 8) / 2 = 28,5 \text{ мм}$$

Равнодействующая давления:

$$H = 0,785 \cdot G^2 \cdot p = 0,785 \cdot 80,5^2 \cdot 0,4 = 2035 \text{ Н}$$

Разница между общей равнодействующей давления и равнодействующей на внутренней поверхности фланца:

$$H_T = H - H_D = 2035 - 1130 = 904,4 \text{ Н}$$

Радиальное расстояние от реакции прокладки до болтовой окружности:

$$h_G = \frac{C - G}{2} = (125 - 80,5) / 2 = 22,25 \text{ мм}$$

Плечо для нагрузки H_T (интегральные фланцы, а также иные, рассчитываемые аналогично):

$$h_T = \frac{1}{2} \left[\frac{C - B}{2} + h_G \right] = 1/2 \cdot [(125 - 60) / 2 + 22,25] = 27,38 \text{ мм}$$

Нагрузка на прокладку (разница между проектной болтовой нагрузкой и равнодействующей давления), в расчётах:

$$H_G = W_o - H = 4007 - 2035 = 1973 \text{ Н}$$

Болтовой интервал:

$$B_s = \frac{\pi \cdot C}{n} = 3,142 \cdot 125 / 4 = 98,17 \text{ мм}$$

Номинальный диаметр болта:

$$a = d_b = 16 \text{ мм}$$

Коэффициент болтового интервала:

$$B_{sc} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{B_s}{2 \cdot a + t}} \right\} = \max \{ 1; (98,17 / (2 \cdot 16 + 20))^{1/2} \} = 1,374$$

$$X_g = \frac{g_1}{g_0} = 8 / 8 = 1$$

Коэффициент

Инов. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Разница между общей равнодействующей давления и равнодействующей на внутренней поверхности фланца:	
					$H_T = H - H_D = 2035 - 1130 = 904,4 \text{ Н}$ Радиальное расстояние от реакции прокладки до болтовой окружности:	
					$h_G = \frac{C - G}{2} = (125 - 80,5) / 2 = 22,25 \text{ мм}$ Плечо для нагрузки H_T (интегральные фланцы, а также иные, рассчитываемые аналогично):	
					$h_T = \frac{1}{2} \left[\frac{C - B}{2} + h_G \right] = 1/2 * [(125 - 60) / 2 + 22,25] = 27,38 \text{ мм}$ Нагрузка на прокладку (разница между проектной болтовой нагрузкой и равнодействующей давления), в расчётах:	
					$H_G = W_0 - H = 4007 - 2035 = 1973 \text{ Н}$ Болтовой интервал:	
					$B_S = \frac{\pi \cdot C}{n} = 3,142 * 125 / 4 = 98,17 \text{ мм}$ Номинальный диаметр болта:	
					$a = d_b = 16 \text{ мм}$ Коэффициент болтового интервала:	
					$B_{SC} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{B_S}{2 \cdot a + t}} \right\} = \max \{ 1; (98,17 / (2 * 16 + 20))^{1/2} \} = 1,374$	
					$X_g = \frac{\xi_1}{\xi_0} = 8 / 8 = 1$ Коэффициент	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 PP	Лист
						300

$$h_o = \sqrt{B \cdot g_0} = (60 \cdot 8)^{1/2} = 21,91 \text{ мм}$$

$$X_h = \frac{h}{h_o} = 17 / 21,91 = 0,7759$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$F = 0,8974$$

Расчетные коэффициенты:

$$e = \frac{F}{h_o} = 0,8974 / 21,91 = 0,04096 \text{ 1/мм}$$

$$K = \frac{A}{B} = 160 / 60 = 2,667$$

$$T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg K) - 1}{(1,0472 + 1,9448 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (2,667^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg 2,667) - 1) / ((1,0472 + 1,9448 \cdot 2,667^2) \cdot (2,667 - 1)) = 1,291$$

$$U = \frac{K^2 (1 + 8,55246 \cdot \lg K) - 1}{1,36136 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (2,667^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg 2,667) - 1) / (1,36136 \cdot (2,667^2 - 1) \cdot (2,667 - 1)) = 2,309$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$V = 0,5527$$

Коэффициент d для интегральных фланцев:

$$d = \frac{U}{V} \cdot h_o \cdot g_0^2 = 2,309 / 0,5527 \cdot 21,91 \cdot 8^2 = 0,5858 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$$

$$L = \frac{t \cdot e + 1}{T} + \frac{t^3}{d} = (20 \cdot 0,04096 + 1) / 1,291 + 20^3 / 0,5858 \cdot 10^{-5} = 2,774$$

Момент инерции сечения фланца при изгибе (интегральные фланцы с втулкой):

$$I = \frac{0,0874 \cdot L \cdot g_0^2 \cdot h_o \cdot B}{V} = 0,0874 \cdot 2,774 \cdot 8 \cdot 21,91 \cdot 60 / 0,5527 = 0,3691 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

$$G_{wg} = 0,5 \cdot (g_0 + g_1) = 0,5 \cdot (8 + 8) = 8 \text{ мм}$$

$$A_R = 0,5 \cdot (A - B) = 0,5 \cdot (160 - 60) = 50 \text{ мм}$$

Так как $t \geq G_{wg}$,

$$A_A = A_R = 50 \text{ мм}$$

$$B_B = t = 20 \text{ мм}$$

$$K_{AB} = \left\{ A_A \cdot B_B^3 \right\} \cdot \left[\frac{1}{3} - 0,21 \cdot \left(\frac{B_B}{A_A} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{12} \cdot \left\{ \frac{B_B}{A_A} \right\}^4 \right) \right] = (50 \cdot 20^3) \cdot [1/3 - 0,21 \cdot (20/50) \cdot (1 - 1/12 \cdot (20/50)^4)] = 0,9981 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

$$C_c = h = 17 \text{ мм}$$

$$D_{DG} = G_{wg} = 8 \text{ мм}$$

$$K_{CD} = \left\{ C_c \cdot D_{DG}^3 \right\} \cdot \left[\frac{1}{3} - 1,05 \cdot \left(\frac{D_{DG}}{C_c} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{192} \cdot \left\{ \frac{D_{DG}}{C_c} \right\}^4 \right) \right] = (17 \cdot 8^3) \cdot [1/3 - 1,05 \cdot (8/17) \cdot (1 - 1/192 \cdot (8/17)^4)] = (-0,1398 \cdot 10^{-8}) \text{ м}^4$$

Полярный момент сечения фланца (интегральные фланцы, плоские фланцы с втулкой):

$$I_P = K_{AB} + K_{CD} = 0,9981 \cdot 10^{-7} + (-0,1398 \cdot 10^{-8}) = 0,9841 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

Компонент проектного момента на фланце, как результат действия внешнего изгибающего момента и/или осевой силы:

Инв. № подл.	19744.4	Подпись и дата			
		Инв. № дубл.			
		Взам. инв. №			
Инв. № подл.	19744.4	Подпись и дата			
		Инв. № дубл.			
		Взам. инв. №			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 PP

Лист

301

Изгибающий момент в условиях монтажа (внутреннее давление):

$$M_{\xi} = \frac{W_{\xi} \cdot (C - G) \cdot B_{sc} \cdot F_s}{2} = 7,075 \cdot 10^4 \cdot (125 - 80,5) \cdot 1,374 \cdot 1 / 2 = 2163 \text{ Н м}$$

Продольные напряжения во втулке, в условиях монтажа:

$$S_H = \frac{f \cdot M_{\xi}}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 2163 / (2,774 \cdot 8^2 \cdot 60) = 203 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min\{1,5 \cdot S_{\xi g}; 2,5 \cdot S_{\xi g}\}$$

$$\min\{1,5 \cdot S_{\xi g}; 2,5 \cdot S_{\xi g}\} = \min\{1,5 \cdot 163,3; 2,5 \cdot 163,3\} = 245 \text{ МПа}$$

203 МПа ≤ 245 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_{\xi}}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 \cdot 20 \cdot 0,04096 + 1) \cdot 2163 / (2,774 \cdot 20^2 \cdot 60) = 67,87 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{\xi g}$$

67,87 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Касательные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_{\xi}}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 2,101 \cdot 2163 / (20^2 \cdot 60) - 1,327 \cdot 67,87 = 99,29 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{\xi g}$$

99,29 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (203 + 67,87) / 2 = 135,4 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\xi g}$$

135,4 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (203 + 99,29) / 2 = 151,2 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\xi g}$$

151,2 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие прочности выполнено

Жесткость фланца

- для расчётных условий:

Коэффициент жесткости для интегральных фланцев:

$$K_R = 0,3$$

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, расчётные условия):

$$J = \frac{52,14 \cdot V \cdot M_o}{L \cdot E_{yo} \cdot g_o^2 \cdot K_R \cdot h_o} = (52,14 \cdot 0,5527 \cdot 138,6) / (2,774 \cdot 1,866 \cdot 10^5 \cdot 8^2 \cdot 0,3 \cdot 21,91) = 0,01834$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1,0$$

$$0,01834 \leq 1,0$$

Условие жёсткости выполнено

- для условий монтажа:

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, условия монтажа):

Изн. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{фг}$ <p>135,4 МПа ≤ 163,3 МПа, Условие прочности выполнено</p> $\frac{S_H + S_T}{2} = (203 + 99,29) / 2 = 151,2 \text{ МПа}$ <p>Условие прочности:</p> $\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{фг}$ <p>151,2 МПа ≤ 163,3 МПа, Условие прочности выполнено</p> <p>Условие прочности выполнено</p> <p>Жесткость фланца</p> <p>- для расчётных условий:</p> <p>Коэффициент жесткости для интегральных фланцев:</p> <p>$K_R = 0.3$</p> <p>Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, расчётные условия):</p> $J = \frac{52.14 \cdot V \cdot M_o}{L \cdot E_{yo} \cdot g_0^2 \cdot K_R \cdot h_o} = (52.14 \cdot 0.5527 \cdot 138,6) / (2,774 \cdot 1,866 \cdot 10^5 \cdot 8^2 \cdot 0,3 \cdot 21,91) = 0,01834$ <p>Условие жесткости:</p> <p>$J \leq 1.0$</p> <p>$0,01834 \leq 1.0$</p> <p>Условие жёсткости выполнено</p> <p>- для условий монтажа:</p> <p>Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, условия монтажа):</p>	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 PP	Лист
						303

$$J = \frac{52.14 \cdot V \cdot M_{\text{г}}}{L \cdot E_{\text{г}} \cdot g_0^2 \cdot K_R \cdot h_0} = (52.14 * 0.5527 * 2163) / (2.774 * 1.99 \cdot 10^5 * 8^2 * 0.3 * 21.91) = 0.2684$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1.0$$

$$0.2684 \leq 1.0$$

Условие жёсткости выполнено

Расчёт напряжений второго фланца:

Равнодействующая давления на внутренней поверхности фланца:

$$H_D = 0.785 \cdot B^2 \cdot p = 0.785 * 33^2 * 0.4 = 341.9 \text{ Н}$$

Плечо момента для силы H_D (фланцы интегрального типа, или другие, рассчитываемые аналогично):

$$h_D = \frac{C - B - g_1}{2} = (125 - 33 - 21.5) / 2 = 35.25 \text{ мм}$$

Разница между общей равнодействующей давления и равнодействующей на внутренней поверхности фланца:

$$H_T = H - H_D = 2035 - 341.9 = 1693 \text{ Н}$$

Плечо для нагрузки H_T (интегральные фланцы, а также иные, рассчитываемые аналогично):

$$h_T = \frac{1}{2} \left[\frac{C - B}{2} + h_G \right] = 1/2 * [(125 - 33) / 2 + 22.25] = 34.12 \text{ мм}$$

Коэффициент болтового интервала:

$$B_{SC} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{B_S}{2 \cdot a + t}} \right\} = \max \{ 1; (98.17 / (2 * 16 + 21))^{1/2} \} = 1.361$$

$$X_g = \frac{g_1}{g_0} = 21.5 / 12.5 = 1.72$$

Коэффициент

$$h_0 = \sqrt{B \cdot g_0} = (33 * 12.5)^{1/2} = 20.31 \text{ мм}$$

$$X_h = \frac{h}{h_0} = 22.5 / 20.31 = 1.108$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$F = 0.7613$$

Расчетные коэффициенты:

$$e = \frac{F}{h_0} = 0.7613 / 20.31 = 0.03748 \text{ 1/мм}$$

$$K = \frac{A}{B} = 160 / 33 = 4.848$$

$$T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55246 \cdot \lg K) - 1}{(1.0472 + 1.9448 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (4.848^2 * (1 + 8.55246 * \lg 4.848) - 1) / ((1.0472 + 1.9448 * 4.848^2) * (4.848 - 1)) = 0.8909$$

$$U = \frac{K^2 (1 + 8.55246 \cdot \lg K) - 1}{1.36136 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (4.848^2 * (1 + 8.55246 * \lg 4.848) - 1) / (1.36136 * (4.848^2 - 1) * (4.848 - 1)) = 1.36$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$V = 0.1914$$

Коэффициент d для интегральных фланцев:

$$d = \frac{U}{V} \cdot h_0 \cdot g_0^2 = 1.36 / 0.1914 * 20.31 * 12.5^2 = 0.2255 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$$

Инв. № подл. 19744.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 PP
					Лист
					304

$$L = \frac{t \cdot e + 1}{T} + \frac{t^3}{d} = (21 \cdot 0,03748 + 1) / 0,8909 + 21^3 / 0,2255 \cdot 10^{-4} = 2,417$$

Момент инерции сечения фланца при изгибе (интегральные фланцы с втулкой):

$$I = \frac{0,0874 \cdot L \cdot g_0^2 \cdot h_0 \cdot B}{V} = 0,0874 \cdot 2,417 \cdot 12,5 \cdot 20,31 \cdot 33 / 0,1914 = 0,1156 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$$

$$G_{\text{вг}} = 0,5 \cdot (g_0 + g_1) = 0,5 \cdot (12,5 + 21,5) = 17 \text{ мм}$$

$$A_R = 0,5 \cdot (A - B) = 0,5 \cdot (160 - 33) = 63,5 \text{ мм}$$

Так как $t \geq G_{\text{вг}}$,

$$A_A = A_R = 63,5 \text{ мм}$$

$$B_B = t = 21 \text{ мм}$$

$$K_{AB} = \left\{ A_A \cdot B_B^3 \right\} \cdot \left[\frac{1}{3} - 0,21 \cdot \left(\frac{B_B}{A_A} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{12} \cdot \left\{ \frac{B_B}{A_A} \right\}^4 \right) \right] = (63,5 \cdot 21^3) \cdot [1/3 - 0,21 \cdot (21/63,5) \cdot (1 - 1/12 \cdot (21/63,5)^4)] = 0,1552 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$$

$$C_C = h = 22,5 \text{ мм}$$

$$D_{DG} = G_{\text{вг}} = 17 \text{ мм}$$

$$K_{CD} = \left\{ C_C \cdot D_{DG}^3 \right\} \cdot \left[\frac{1}{3} - 1,05 \cdot \left(\frac{D_{DG}}{C_C} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{192} \cdot \left\{ \frac{D_{DG}}{C_C} \right\}^4 \right) \right] = (22,5 \cdot 17^3) \cdot [1/3 - 1,05 \cdot (17/22,5) \cdot (1 - 1/192 \cdot (17/22,5)^4)] = (-0,507 \cdot 10^{-7}) \text{ м}^4$$

Полярный момент сечения фланца (интегральные фланцы, плоские фланцы с втулкой):

$$I_P = K_{AB} + K_{CD} = 0,1552 \cdot 10^{-6} + (-0,507 \cdot 10^{-7}) = 0,1045 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$$

Компонент проектного момента на фланце, как результат действия внешнего изгибающего момента и/или осевой силы:

$$M_{oe} = 4 \cdot M_E \cdot \left[\frac{I}{0,3846 \cdot I_P + I} \right] \cdot \left[\frac{h_D}{C - 2 \cdot h_D} \right] + F_A \cdot h_D = 4 \cdot 0 \cdot [0,1156 \cdot 10^{-6} / (0,3846 \cdot 0,1045 \cdot 10^{-6} + 0,1156 \cdot 10^{-6})] \cdot [35,25 / (125 - 2 \cdot 35,25)] + 0 \cdot 35,25 = 0 \text{ Н м}$$

Изгибающий момент в расчётных условиях (внутреннее давление):

$$M_o = [(H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G) \cdot B_{SC} + M_{oe}] \cdot F_S / [(341,9 \cdot 35,25 + 1693 \cdot 34,12 + 1973 \cdot 22,25) \cdot 1,361 + 0] \cdot l = 154,8 \text{ Н м}$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$f = 1$$

Продольные напряжения во втулке, в расчётных условиях:

$$S_H = \frac{f \cdot M_o}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 154,8 / (2,417 \cdot 21,5^2 \cdot 33) = 4,198 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min \{ 1,5 \cdot S_{f0}; 2,5 \cdot S_{n0} \}$$

$$\min \{ 1,5 \cdot S_{f0}; 2,5 \cdot S_{n0} \} = \min \{ 1,5 \cdot 135,4; 2,5 \cdot 171,7 \} = 203 \text{ МПа}$$

4,198 МПа ≤ 203 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, расчётные условия:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_o}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 \cdot 21 \cdot 0,03748 + 1) \cdot 154,8 / (2,417 \cdot 21^2 \cdot 33) = 9,007 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{f0}$$

9,007 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left(0,66845 + 5,7169 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (4,848 - 1) \cdot (0,66845 + 5,7169 \cdot 4,848^2 \cdot \lg 4,848 / (4,848^2 - 1)) = 1,237$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
К-5.00.00.000 PP			
Лист			
305			

$$Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (4,848^2 + 1) / (4,848^2 - 1) = 1,089$$

Касательные напряжения во фланце, расчётные условия:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_0}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 1,237 \cdot 154,8 / (21^2 \cdot 33) - 1,089 \cdot 9,007 = 3,351 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{fo}$$

$$3,351 \text{ МПа} \leq 135,4 \text{ МПа, Условие прочности выполнено}$$

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (4,198 + 9,007) / 2 = 6,603 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{fo}$$

$$6,603 \text{ МПа} \leq 135,4 \text{ МПа, Условие прочности выполнено}$$

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (4,198 + 3,351) / 2 = 3,775 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{fo}$$

$$3,775 \text{ МПа} \leq 135,4 \text{ МПа, Условие прочности выполнено}$$

Изгибающий момент в условиях монтажа (внутреннее давление):

$$M_g = \frac{W_g \cdot (C - G) \cdot B_{sc} \cdot F_s}{2} = 7,075 \cdot 10^4 \cdot (125 - 80,5) \cdot 1,361 \cdot 1/2 = 2142 \text{ H M}$$

Продольные напряжения во втулке, в условиях монтажа:

$$S_H = \frac{f \cdot M_{\xi}}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 2142 / (2,417 \cdot 21,5^2 \cdot 33) = 58,12 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min\{1.5 \cdot S_{fg}; 2.5 \cdot S_{ng}\}$$

$$\min\{1.5 \cdot S_{\text{г}}; 2.5 \cdot S_{\text{нз}}\} = \min\{1.5 * 163,3; 2.5 * 196\} = 245 \text{ МПа}$$

$$58,12 \text{ МПа} \leq 245 \text{ МПа, Условие прочности выполнено}$$

Радиальные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_R = \frac{(1.33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_g}{L \cdot t^2 \cdot R} = (1.33 \cdot 21 \cdot 0,03748 + 1) \cdot 2142 / (2,417 \cdot 21^2 \cdot 33) = 124,7 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_E$$

$$124,7 \text{ МПа} \leq 163,3 \text{ МПа, Условие прочности выполнено}$$

Касательные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_{\xi}}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 1,237 \cdot 2142 / (21^2 \cdot 33) - 1,089 \cdot 124,7 = 46,4 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{\mathbb{R}}$$

$46,4 \text{ МПа} \leq 163,3 \text{ МПа}$, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (58,12 + 124,7) / 2 = 91,41 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{fg}$$

$91,41 \text{ МПа} \leq 163,3 \text{ МПа}$, **Условие прочности выполнено**

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$S_H = \frac{\sigma}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 2142 / (2,417 \cdot 21,5^2 \cdot 33) = 58,12 \text{ МПа}$ <p>Условие прочности:</p> $S_H \leq \min\{1,5 \cdot S_{fg}; 2,5 \cdot S_{ng}\}$ $\min\{1,5 \cdot S_{fg}; 2,5 \cdot S_{ng}\} = \min\{1,5 \cdot 163,3; 2,5 \cdot 196\} = 245 \text{ МПа}$ <p>58,12 МПа ≤ 245 МПа, Условие прочности выполнено</p> <p>Радиальные напряжения во фланце, условия монтажа:</p> $S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_{\xi}}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 \cdot 21 \cdot 0,03748 + 1) \cdot 2142 / (2,417 \cdot 21^2 \cdot 33) = 124,7 \text{ МПа}$ <p>Условие прочности:</p> $S_R \leq S_{fg}$ <p>124,7 МПа ≤ 163,3 МПа, Условие прочности выполнено</p> <p>Касательные напряжения во фланце, условия монтажа:</p> $S_T = \frac{Y \cdot M_{\xi}}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 1,237 \cdot 2142 / (21^2 \cdot 33) - 1,089 \cdot 124,7 = 46,4 \text{ МПа}$ <p>Условие прочности:</p> $S_T \leq S_{fg}$ <p>46,4 МПа ≤ 163,3 МПа, Условие прочности выполнено</p> $\frac{S_H + S_R}{2} = (58,12 + 124,7) / 2 = 91,41 \text{ МПа}$ <p>Условие прочности:</p> $\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{fg}$ <p>91,41 МПа ≤ 163,3 МПа, Условие прочности выполнено</p>
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	19744.4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
					К-5.00.00.000 PP
					Лист 306

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (58,12 + 46,4) / 2 = 52,26 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\text{г}}$$

52,26 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие прочности выполнено

Жесткость фланца

- для расчётных условий:

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, расчётные условия):

$$J = \frac{52.14 \cdot V \cdot M_o}{L \cdot E_{y0} \cdot g_0^2 \cdot K_R \cdot h_o} = (52.14 \cdot 0,1914 \cdot 154,8) / (2,417 \cdot 1,866 \cdot 10^5 \cdot 12,5^2 \cdot 0,3 \cdot 20,31) = 0,003597$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1.0$$

$$0,003597 \leq 1.0$$

Условие жёсткости выполнено

- для условий монтажа:

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, условия монтажа):

$$J = \frac{52.14 \cdot V \cdot M_g}{L \cdot E_{yg} \cdot g_0^2 \cdot K_R \cdot h_o} = (52.14 \cdot 0,1914 \cdot 2142) / (2,417 \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot 12,5^2 \cdot 0,3 \cdot 20,31) = 0,04670$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1.0$$

$$0,04670 \leq 1.0$$

Условие жёсткости выполнено

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19744.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
К-5.00.00.000 РР				Лист
				307

Список литературы

- 1) ГОСТ Р 52857.4-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений.
- 2) СА 03-003-07. Расчет на прочность и вибрацию стальных технологических трубопроводов. Стандарт ассоциации экспертных организаций техногенных объектов повышенной опасности "Ростехэкспертиза"
- 3) ГОСТ Р 51274-99. Сосуды и аппараты. Аппараты колонного типа. Нормы и методы расчета на прочность.
- 4) ASME VIII, Div 2, 2013.
- 5) 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 обечайек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер.
- 6) ГОСТ Р 52857.1-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования.
- 7) ГОСТ Р 52857.2-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечайек, выпуклых и плоских днищ и крышек.
- 8) ГОСТ Р 52630-2012. Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
19744.4									
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	К-5.00.00.000 РР				
					Лист				
					308				