

АО «ВНИИНЕФТЕМАШ»



ОАО "Славнефть-ЯНОС"
Установка Л-24/6. Титул 20/1
ЕМКОСТЬ
ЕД-2

Расчеты

ЕД-2.00.00.000 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
19756.4				

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	10
Расчет давления грунта на наружную поверхность сосуда.....	11
Исходные данные.....	11
Расчет давления грунта на основе СП 43.13330.2012	11
Расчет фундаментных болтов на прочность от действия осевой растягивающей силы.....	12
Исходные данные.....	12
Результаты расчета на прочность фундаментных болтов	12
Эпюры сил и моментов.....	13
Днище эллиптическое.....	18
Расчёт в расчётных условиях	18
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	19
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)	20
Обечайка цилиндрическая.....	21
Расчёт в расчётных условиях	21
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	24
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)	26
Опора седловая (неподвижная).....	30
Расчёт в расчётных условиях	30
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	33
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)	36
Опора седловая (подвижная)	39
Расчёт в расчётных условиях	39
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	42
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)	45
Штуцер МН DN800.....	48
Расчёт в расчётных условиях	49
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	54
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)	56
Штуцер А DN700	59
Расчёт в расчётных условиях	60
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	65
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)	67
Штуцер П DN150.....	70
Расчёт в расчётных условиях	71
Расчет на прочность по МКЭ в рабочих условиях.....	73
Штуцер LT1-LT2 DN100	77
Расчёт в расчётных условиях	78
Штуцер UC, O3 DN50	84
Расчёт в расчётных условиях	85
Штуцер V DN50	91
Расчёт в расчётных условиях	92
Штуцер PI DN50.....	98
Расчёт в расчётных условиях	99
Штуцер TW DN50	102
Расчёт в расчётных условиях	103
Штуцер HI1, HO1 DN25	109

ЕД-2.00.00.000 РР

Подпись							ЕД-2.00.00.000 РР							
		Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата								
Инв. № подл.	19756.4	Разраб.	Иванов	<i>Иванов</i>	05.2016	Емкость ЕД-2 Расчеты				Лит.	Лист		Листов	
		Пров.	Наумова	<i>Наумова</i>	05.2016					Т		2	202	
		Рук.												
		Н.контр.	Копчикова	<i>Копчикова</i>	05.2016					АО «ВНИИНЕФТЕМАШ»				
		Утв.												

АО «ВНИИНЕФТЕМАШ»

Расчёт в расчётных условиях	110
Отвод DN50	116
Расчёт прочности отвода по СА 03-003-07	116
Расчёт в расчётных условиях	116
Патрубок DN50	118
Расчёт в расчётных условиях	118
Фланец с крышкой DN800	120
Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.4-2007 и ГОСТ Р 52857.2-2007.....	120
Расчёт в расчётных условиях	121
Фланец с крышкой DN700	131
Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.4-2007 и ГОСТ Р 52857.2-2007.....	131
Расчёт в расчётных условиях	132
Фланец DN100.....	142
Расчёт на прочность и герметичность по ASME VIII-2.....	142
Расчёт в расчётных условиях	143
Крышка DN100.....	150
Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.4-2007 и ГОСТ Р 52857.2-2007.....	150
Расчёт в расчётных условиях	150
Фланцевое соединение DN50.....	154
Расчёт на прочность и герметичность по ASME VIII-2.....	154
Расчёт в расчётных условиях	155
Фланцевое соединение DN50-Rc1/2.....	166
Расчёт на прочность и герметичность по ASME VIII-2.....	166
Расчёт в расчётных условиях	167
Фланцевое соединение DN50-M33.....	178
Расчёт на прочность и герметичность по ASME VIII-2.....	178
Расчёт в расчётных условиях	179
Фланцевое соединение DN25 (H11, H01)	190
Расчёт на прочность и герметичность по ASME VIII-2.....	190
Расчёт в рабочих условиях	191
Список литературы	202

Инов. № подл. 19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР	Лист
											3

Расчёт на прочность сосуда

Наименование аппарата

Емкость ЕД-2

Название установки:

Установка Л-24/6. Титул 20/1

Наименование объекта:

ОАО "Славнефть-ЯНОС"

Сосуд, содержащий рабочую жидкость:

Да

Вид испытаний:

Гидроиспытания

Пробное давление:

0,5 МПа

Учёт сейсмических нагрузок:

Het

Инва. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 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	2000	16	576	7,2	1
Обечайка цилиндрическая	09Г2С	2000	16	3380	4	1

Результаты расчета

Расчётные условия

Элемент	Расчетная температура, °С	Расчетное давление, МПа	Допускаемые напряжения, МПа	Расчетная толщина с уч. прибавок, мм	Допускаемое давление, МПа	Условие прочности
Днище эллиптическое	200	0,3532	165	9,342	1,449	выполнено
Обечайка цилиндрическая	200	0,3532	165	6,143	1,968	выполнено

Расчётные условия (наружное давление)

Элемент	Расчетная температура, °С	Расчетное давление, МПа	Допускаемые напряжения, МПа	Расчетная толщина с уч. прибавок, мм	Условие прочности
Днище эллиптическое	200	(-0,15)	165	12,52	выполнено
Обечайка цилиндрическая	200	(-0,15)	165	14,16	выполнено

Условия испытаний

Элемент	Расчетное давление, МПа	Допускаемые напряжения, МПа	Расчетная толщина с уч. прибавок, мм	Условие прочности
Днище эллиптическое	0,5423	272,7	9,19	выполнено
Обечайка цилиндрическая	0,5423	272,7	5,991	выполнено

[illegible]

Штуцера

Исходные данные

Элемент	Метка	Тип	Материал	Диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Суммарная прибавка, мм
Штуцер МН DN800	Штуцер МН	Проходящий без укрепления	09Г2С	800	16	4
Штуцер V DN50	Штуцер V	Проходящий без укрепления	09Г2С (КП245) Gr.	48	14	4
Штуцер НI1, НO1 DN25	Штуцер НI1	Проходящий без укрепления	09Г2С (КП245) Gr.	25	10	2
Штуцер А DN700	Штуцер А	Проходящий без укрепления	09Г2С	700	16	4
Штуцер UC, O3 DN50	Штуцер UC	Проходящий без укрепления	09Г2С (КП245) Gr.	48	14	4
Штуцер PI DN50	Штуцер PI	Проходящий без укрепления	09Г2С (КП245) Gr.	45	11,5	4
Штуцер LT1-LT2 DN100	Штуцер LT2	Проходящий без укрепления	09Г2С Gr.ГОСТ 19281	97	12	5,8
Штуцер TW DN50	Штуцер TW	Проходящий без укрепления	09Г2С Gr.ГОСТ 19281	48	10	5,5
Штуцер I1 DN150	Штуцер I1	Проходящий с накладным кольцом	09Г2С Gr.ГОСТ 19281	144	12	5,8

Результаты расчета

Расчётные условия

Элемент	Расчетная температура, °С	Расчетное давление, МПа	Условие прочности
Штуцер МН DN800	200	0,34	выполнено
Штуцер V DN50	200	0,34	выполнено
Штуцер НI1, НO1 DN25	200	0,34	выполнено
Штуцер А DN700	200	0,34	выполнено
Штуцер UC, O3 DN50	200	0,34	выполнено
Штуцер PI DN50	200	0,34	выполнено
Штуцер LT1-LT2 DN100	200	0,34	выполнено
Штуцер TW DN50	200	0,34	выполнено
Штуцер I1 DN150	200	0,342	выполнено

Расчётные условия (наружное давление)

Элемент	Расчетная температура, °С	Расчетное давление, МПа	Условие прочности
---------	---------------------------	-------------------------	-------------------

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР	Лист
						6

Штуцер МН DN800	200	(-0,15)	выполнено
Штуцер А DN700	200	(-0,15)	выполнено

Условия испытаний

Элемент	Расчетное давление, МПа	Условие прочности
Штуцер МН DN800	0,5226	выполнено
Штуцер А DN700	0,5226	выполнено

Инов. № подл. 19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата						Лист
										7
					Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР

Определение давления испытания

Расчет давления испытания в соответствии с ГОСТ Р 52630-2012

Расчетные условия

Расчетное давление	$P_p =$	0,34	МПа
Материал элемента сосуда, работающий под давлением		09Г2С ГОСТ 5520	
Допускаемые напряжения для материала корпуса при температуре 20 °С	$[\sigma]^{20} =$	196	МПа
Допускаемые напряжения для материала корпуса при расчетной температуре	$[\sigma]^t =$	165	МПа
Расчетное условное давление	$P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t} =$	0,40	МПа

Материал элемента сосуда, работающий под давлением		09Г2С ГОСТ 19281	
Допускаемые напряжения для материала корпуса при температуре 20 °С	$[\sigma]^{20} =$	183	МПа
Допускаемые напряжения для материала корпуса при расчетной температуре	$[\sigma]^t =$	148	МПа
Расчетное условное давление	$P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t} =$	0,42	МПа

Материал элемента сосуда, работающий под давлением		09Г2С КП245	
Допускаемые напряжения для материала корпуса при температуре 20 °С	$[\sigma]^{20} =$	163	МПа
Допускаемые напряжения для материала корпуса при расчетной температуре	$[\sigma]^t =$	129	МПа
Расчетное условное давление	$P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t} =$	0,43	МПа

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

Расчетное давление гидроиспытания, вычисленное по ГОСТ Р 52630-2012 п.8.11.3	$P_{гн} = 1,25 \cdot P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t} =$	0,5	МПа
--	--	-----	-----

Изнв. № подл.	19756.4	Подпись и дата		Взам. инв. №		Изнв. № дубл.		Подпись и дата		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР					Лист 8

Расчетные условия (наружное давление)

Расчетное давление $P_p =$ 0,16 МПа

Материал элемента сосуда, работающий под давлением 09Г2С ГОСТ 5520

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

Допускаемые напряжения для материала корпуса при расчетной температуре $[\sigma]^t =$ 165 МПа

Расчетное условное давление $P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t} =$ 0,19 МПа

Материал элемента сосуда, работающий под давлением 09Г2С ГОСТ 19281

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

Допускаемые напряжения для материала корпуса при расчетной температуре $[\sigma]^t =$ 148 МПа

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

Материал элемента сосуда, работающий под давлением 09Г2С КП245

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

Допускаемые напряжения для материала корпуса при расчетной температуре $[\sigma]^t =$ 129 МПа

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

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

Расчетное давление гидроиспытания, вычисленное по ГОСТ Р 52630-2012 п.8.11.3 $P_{гн} = 1,25 \cdot P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t} =$ 0,25 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.

Изн.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
Изн.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР	9

Изн. № подл. 19756.4

Взам. инв. №

Изн. № дубл.

Подпись и дата

Изн. № подл. 19756.4

Взам. инв. №

Изн. № дубл.

Подпись и дата

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 $P_{И} = 0,5$ МПа

Гидростатическое давление при полном заполнении аппарата испытательной жидкостью $P_{см} = 0,041$ МПа

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

$P_{И} + P_{см} = 0,541$ МПа — давление испытания с учетом гидростатического давления жидкости

$$1,35 \cdot P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t} = 0,54 \text{ МПа}$$

0,541 МПа > 0,54 МПа

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

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
				10

Расчет давления грунта на наружную поверхность сосуда

Исходные данные

Горизонтальный цилиндрический сосуд, заглубленный в траншее.

Удельный вес грунта	$\gamma_0 =$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	Н/мм ³
Коэффициент Пуассона грунта	$\mu =$	0,33	
Теоретический собственный вес сосуда	$G =$	$7 \cdot 10^4$	Н
Высота уровня засыпки грунта от верхней образующей сосуда	$H =$	1185	мм
Внутренний диаметр сосуда	$D =$	2000	мм
Расчетная длина сосуда	$L =$	4500	мм

Расчет давления грунта на основе СП 43.13330.2012

Вертикальное давление грунта с учетом собственного веса сосуда

$$p_v = \gamma_0 \left[H + \frac{D}{2} \right] + \frac{G}{LD} = 0,047 \text{ МПа}$$

Горизонтальное давление грунта

$$p_h = \frac{\gamma_0 \left[H + \frac{D}{2} \right] \mu}{1 - \mu} = 0,019 \text{ МПа}$$

Коэффициент надежности по СП 20.13330.2011

$$\gamma_f = 1,15$$

Расчетное давление грунта

$$P = \gamma_f \max(p_v, p_h) = 0,054 \text{ МПа}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				
Лист				
11				

Расчет фундаментных болтов на прочность от действия осевой растягивающей силы

Расчет на прочность фундаментных болтов проводится на условия всплытия подземного горизонтального сосуда на седловых опорах на основании СП 16.13330.2011.

Исходные данные

Плотность грунтовых вод	$\gamma_B =$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	Н/мм ³
Теоретический собственный вес сосуда	$G =$	$7 \cdot 10^4$	Н
Внутренний диаметр аппарата	$D =$	2000	мм
Расчетная длина аппарат	$L =$	4500	мм

Параметры фундаментных болтов

Номинальный диаметр болтов	$d =$	24	мм
Материал болтов		09Г2С	
Количество болтов	$n =$	8	
Площадь сечения резьбовой части болта нетто (по СП 16.13330.2011 Таблица Г.9)	$A_{bn} =$	353	мм ²
Расчетное сопротивление болта (по СП 16.13330.2011 Таблица Г.7, Таблица Г.8)	$R_{bt} =$	245	Н/мм ²
Коэффициент условий работы	$\gamma_c =$	0,9	

Результаты расчета на прочность фундаментных болтов

Результирующая вертикальная нагрузка, вызванная всплытием подземного сосуда

$$N = 1,25 \gamma_B \frac{\pi D^2 L}{4} - 0,9 G = 1,137 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

При $N \leq 0$ проведение расчета на прочность фундаментных болтов на условия всплытия не требуется.

Расчетное усилие при растяжении, которое может быть воспринято одним болтом

$$N_{bt} = R_{bt} \cdot A_{bn} \cdot \gamma_c = 7,784 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Минимальное необходимое количество болтов

$$\frac{N}{N_{bt}} = 1,461$$

Условие прочности

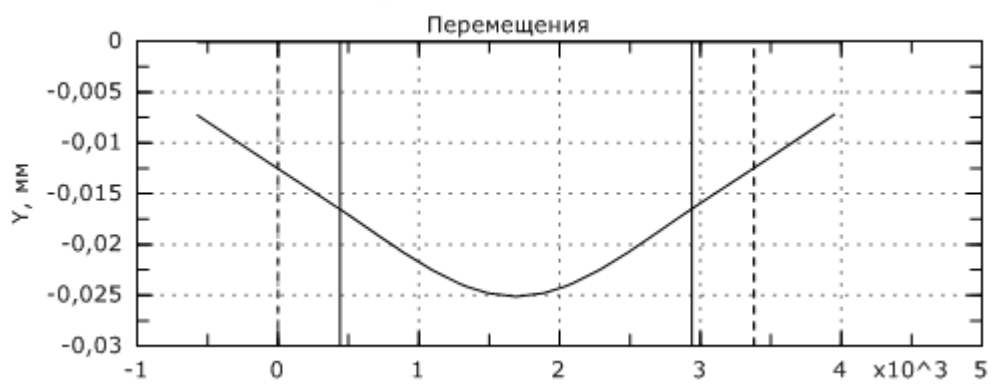
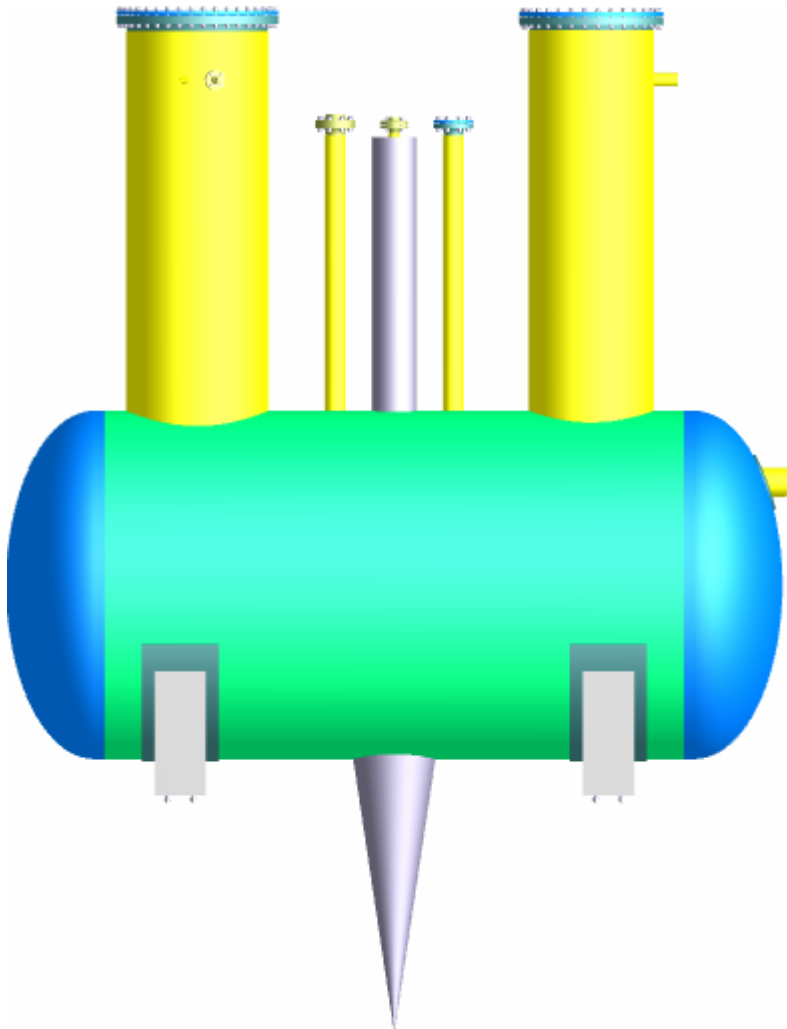
$$n \geq \frac{N}{N_{bt}} \quad \text{Выполнено}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	ЕД-2.00.00.000 РР					Лист
19756.4										12
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

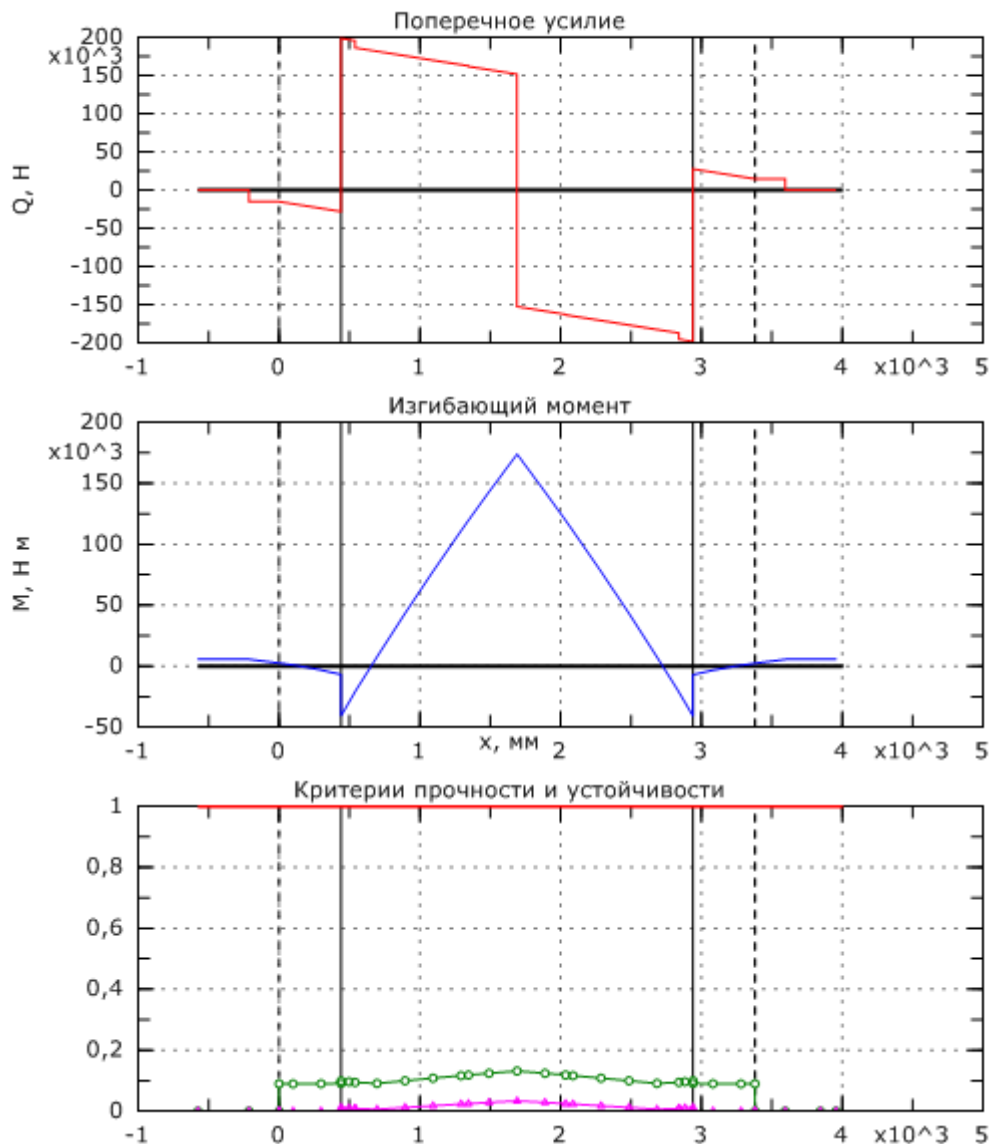
Эпюры сил и моментов

Расчёт в расчётных условиях

Результаты расчёта:



Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				
				Лист
				13



--o--o-- Критерий прочности

--Δ--Δ-- Критерий устойчивости

----- Предельное значение

Условие работоспособности выполнено

Общий вес с учетом веса продукта при его наличии и веса грунта над аппаратом:

$$\sum G_i = 4,52 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Дополнительные вертикальные нагрузки:

$$\sum F_{y_i} = 0 \text{ Н}$$

Опорные нагрузки:

№ опоры	Название опоры	Опорное усилие, F, Н	Поперечное усилие в сечении оболочки над опорой, Q, Н	Изгибающий момент в сечении оболочки над опорой, M, Н м
1	Опора седловая (подвижная)	$2,258 \cdot 10^5$	$1,979 \cdot 10^5$	$4,097 \cdot 10^4$
2	Опора седловая (неподвижная)	$2,266 \cdot 10^5$	$1,988 \cdot 10^5$	$4,068 \cdot 10^4$

Инов. № подл.	Подпись и дата
19756.4	
Взам. инв. №	Подпись и дата
Инов. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист
№ докум.	Подп.
Дата	

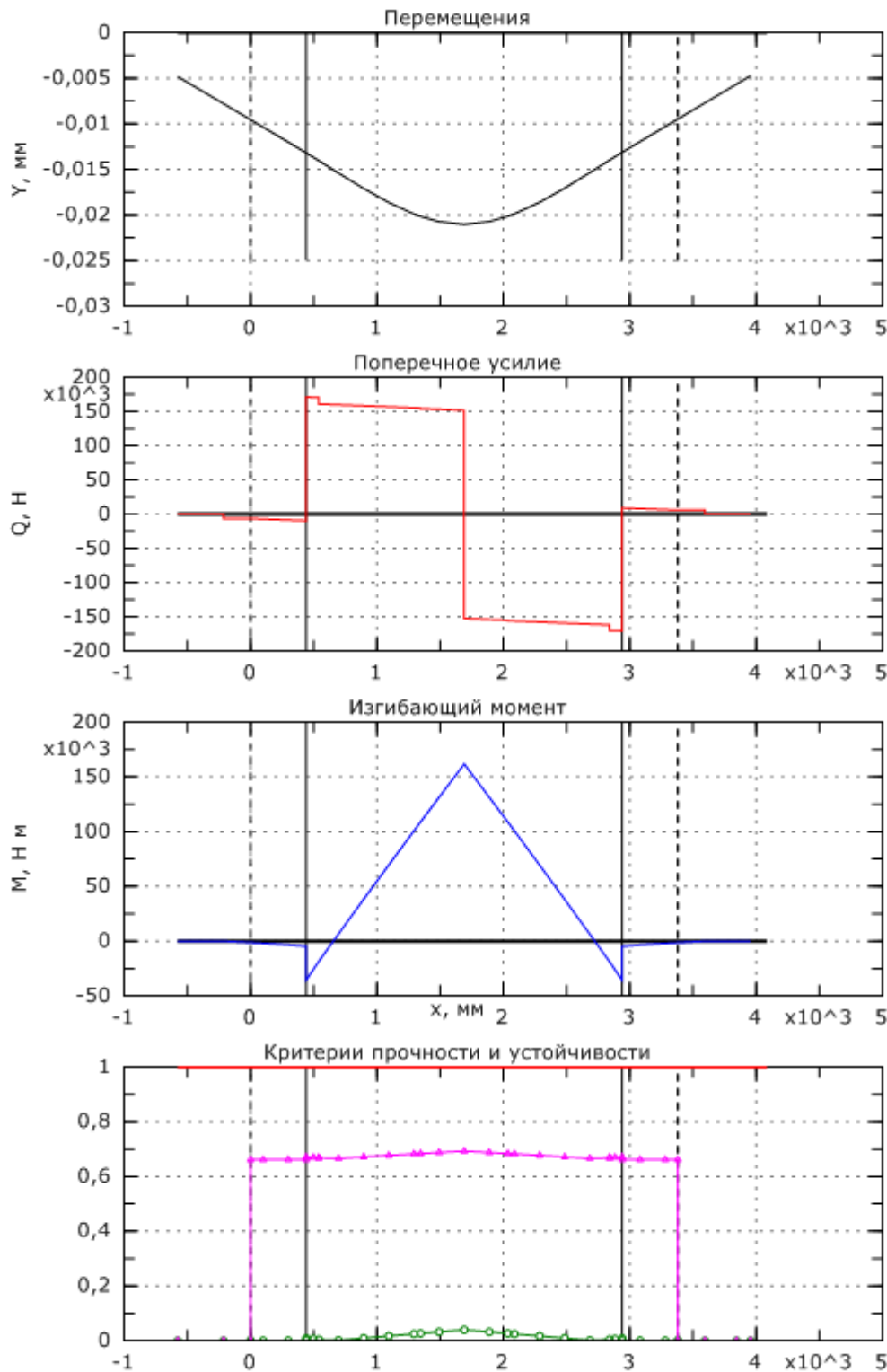
ЕД-2.00.00.000 РР

Лист

14

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Результаты расчёта:

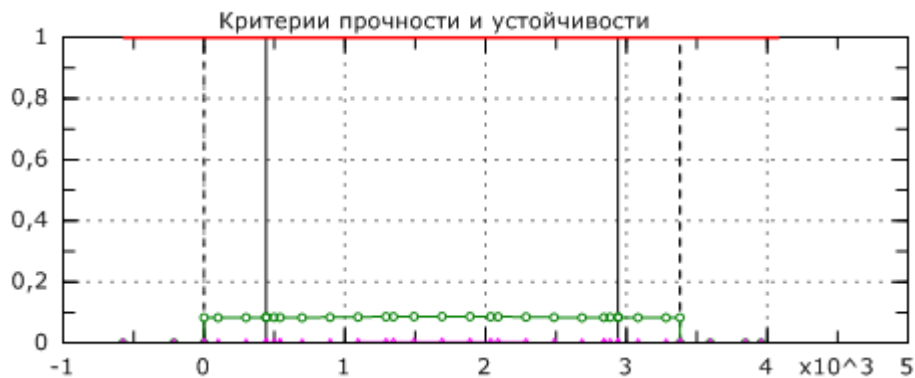


--o--o-- Критерий прочности
--Δ--Δ-- Критерий устойчивости
----- Предельное значение

Условие работоспособности выполнено

Общий вес с учетом веса грунта над аппаратом:

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата



--0---0-- Критерий прочности

--Δ---Δ-- Критерий устойчивости

----- Предельное значение

Условие работоспособности выполнено

Общий вес с учетом веса жидкости:

$$\sum G_i = 2,19 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Дополнительные вертикальные нагрузки:

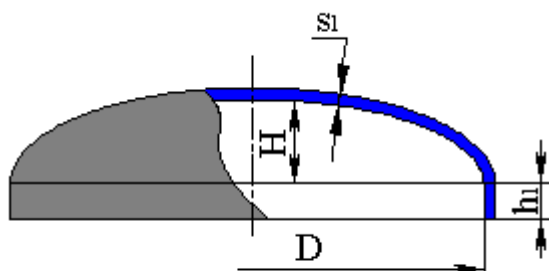
$$\sum F_{y_i} = 0 \text{ Н}$$

Опорные нагрузки:

№ опоры	Название опоры	Опорное усилие, F, Н	Поперечное усилие в сечении оболочки над опорой, Q, Н	Изгибающий момент в сечении оболочки над опорой, M, Н м
1	Опора седловая (подвижная)	$1,08 \cdot 10^5$	$7,295 \cdot 10^4$	$1,407 \cdot 10^4$
2	Опора седловая (неподвижная)	$1,112 \cdot 10^5$	$7,61 \cdot 10^4$	$1,352 \cdot 10^4$

Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР					Лист 17

Днище эллиптическое



Исходные данные

Материал: 09Г2С
 Внутр. диаметр, D: 2000 мм
 Толщина стенки днища, s_1 : 16 мм
 Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c_1 : 4 мм
 Прибавка для компенсации минусового допуска, c_2 : 0 мм
 Прибавка технологическая, c_3 : 3,2 мм
 Суммарная прибавка к толщине стенки, c : 7,2 мм
 Высота днища, H: 500 мм
 Длина отбортовки, h_1 : 60 мм
 Радиус кривизны в вершине днища:

$$R = \frac{D^2}{4 \cdot H} = 2000^2 / (4 \cdot 500) = 2000 \text{ мм}$$

Коэффициент прочности сварного шва:

$$\varphi = 1$$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 200 °С
 Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,3532 МПа

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 200 °С (расчётные условия):

$$[\sigma] = 165 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре T = 200 °С:

$$E = 1,81 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Днища, нагруженные внутренним избыточным давлением.

Радиус кривизны в вершине днища:

$$R = \frac{D^2}{4 \cdot H} = 2000^2 / (4 \cdot 500) = 2000 \text{ мм}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата
19756.4	
Инов. инв. №	Подпись и дата
Инов. № дубл.	Подпись и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ЕД-2.00.00.000 РР

$$[p] = \frac{[p]_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\text{п}}}{[p]_{\text{в}}}\right)^2}} = 1,449 / (1 + (1,449 / 0,411)^2)^{1/2} = 0,3954 \text{ МПа}$$

0,3954 МПа ≥ 0,15 МПа

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, Т: 20 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,5423 МПа

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения:

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

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

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

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

Днища, нагруженные внутренним избыточным давлением.

Радиус кривизны в вершине днища:

$$R = \frac{D^2}{4 \cdot H} = 2000^2 / (4 \cdot 500) = 2000 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_p + c = \frac{p \cdot R}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi - 0,5 \cdot p} + c = (0,5423 \cdot 2000) / (2 \cdot 272,7 \cdot 1 - 0,5 \cdot 0,5423) + 7,2 = 9,19 \text{ мм}$$

$$9,19 \text{ мм} \leq 16 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие работоспособности выполнено**

Допускаемое давление:

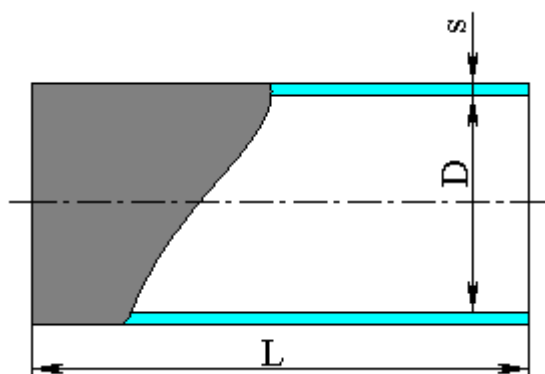
$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi \cdot (s_1 - c)}{R + 0,5 \cdot (s_1 - c)} = 2 \cdot 272,7 \cdot 1 \cdot (16 - 7,2) / (2000 + 0,5 \cdot (16 - 7,2)) = 2,395 \text{ МПа}$$

$$2,395 \text{ МПа} \geq 0,5423 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. №	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР	Лист
19756.4							20					20

Обечайка цилиндрическая



Исходные данные

Материал: 09Г2С
 Внутр. диаметр, D: 2000 мм
 Толщина стенки, s: 16 мм
 Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c_1 : 4 мм
 Прибавка для компенсации минусового допуска, c_2 : 0 мм
 Прибавка технологическая, c_3 : 0 мм
 Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, c : 4 мм
 Длина обечайки, L: 3380 мм
 Коэффициенты прочности сварных швов:
 Продольный шов:

$$\varphi_P = 1$$

Окружной шов:

$$\varphi_T = 1$$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 200 °С
 Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,3532 МПа
 Расчётный изгибающий момент, M: $1,739 \cdot 10^5$ Н м
 Расчётное поперечное усилие, Q: $1,98 \cdot 10^5$ Н
 Расчётное осевое растягивающее усилие, F: 0 Н

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 200 °С (расчётные условия):

$$[\sigma] = 165 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре T = 200 °С:

$$E = 1,81 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

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

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
				21

$$s_p + c = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} + c = (0,3532 \cdot 2000) / (2 \cdot 165 \cdot 1 - 0,3532) + 4 = 6,143 \text{ мм}$$

$$6,143 \text{ мм} \leq 16 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие работоспособности выполнено**

Допускаемое давление:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 165 \cdot 1 \cdot (16 - 4) / (2000 + 16 - 4) = 1,968 \text{ МПа}$$

$$1,968 \text{ МПа} \geq 0,3532 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Минимальное расстояние между "одиночными" штуцерами:

$$b_0 = 2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} = 2 \cdot (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 309,8 \text{ мм}$$

Обечайка, нагруженная изгибающим моментом (п. 5.3.5)

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$[F]_{\pi} = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3,142 \cdot (2000 + 16 - 4) \cdot (16 - 4) \cdot 165 = 1,252 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны сжатия:

$$[M]_{\pi} = \frac{D}{4} \cdot [F]_{\pi} = 2000 / 4 \cdot 1,252 \cdot 10^7 = 6,258 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:

$$[F]_{\text{Е1}} = \frac{31 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2,5} = 310 \cdot 10^6 \cdot 1,81 \cdot 10^5 \cdot 2000^2 / (2,4) \cdot (100 \cdot (16 - 4) / 2000)^{2,5} = 2,608 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_{\text{Е}} = \frac{D}{3,5} \cdot [F]_{\text{Е1}} = 2000 / 3,5 \cdot 2,608 \cdot 10^7 = 1,49 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \frac{[M]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\pi}}{[M]_{\text{Е}}} \right)^2}} = 6,258 \cdot 10^6 / (1 + (6,258 \cdot 10^6 / 1,49 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 5,77 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

$$5,77 \cdot 10^6 \text{ Н м} \geq 1,739 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Обечайка, нагруженная поперечным усилием (п. 5.3.6)

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности:

$$[Q]_{\pi} = 0,25 \cdot \pi \cdot D \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 0,25 \cdot 3,142 \cdot 2000 \cdot (16 - 4) \cdot 165 = 3,11 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$$l_p = 3833 \text{ мм}$$

Расчётная длина для расчёта от действия поперечной силы:

$$l_Q = 3833 \text{ мм}$$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

$$[Q]_{\text{Е}} = \frac{2,4 \cdot E \cdot (s - c)^2}{n_y} \cdot \left[0,18 + 3,3 \cdot \frac{D(s - c)}{l^2} \right] = 2,4 \cdot 1,81 \cdot 10^5 \cdot (16 - 4)^2 / 2,4 \cdot (0,18 + 3,3 \cdot 2000 \cdot (16 - 4) / 3833^2) = 4,832 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\pi}}{[Q]_{\text{Е}}} \right)^2}} = 3,11 \cdot 10^6 / (1 + (3,11 \cdot 10^6 / 4,832 \cdot 10^6)^2)^{1/2} = 2,615 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$2,615 \cdot 10^6 \text{ Н} \geq 1,98 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Инов. № подл. 19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР
					Лист 22

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0/0 + 0/0 + 1,739 \cdot 10^5 / 5,77 \cdot 10^6 + (1,98 \cdot 10^5 / 2,615 \cdot 10^6)^2 = 0,03587 \leq 1$$

Закключение: **Условие устойчивости выполнено**

Для расчёта обечайки от действия седловых опор:

$$B_1 = \min \left\{ 1,0; 9,45 \cdot \frac{D}{1} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (s-c)}} \right\} = \min \{ 1,0, 9,45 \cdot 2000 / 3833 \cdot (2000 / (100 \cdot (16-4)))^{1/2} \} = 1$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости:

$$[p]_y = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D}{1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s-c)}{D} \right]^{2,5} = 20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,81 \cdot 10^5 \cdot 2000 / (2,4 \cdot 1 \cdot 3833) \cdot (100 \cdot (16-4) / 2000)^{2,5} = 0,2282 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$[p]_n = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s-c)}{D + (s-c)} = 2 \cdot 165 \cdot (16-4) / (2000 + 16-4) = 1,968 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_n}{[p]_y} \right)^2}} = 1,968 / (1 + (1,968 / 0,2282)^2)^{1/2} = 0,2267 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление: $[p] = 0,2267 \text{ МПа}$

Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием (п. 2.3.4)

Допускаемое осевое сжимающее усилие:

$$[F] = \frac{[F]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_n}{[F]_{E1}} \right)^2}} = 1,252 \cdot 10^7 / (1 + (1,252 \cdot 10^7 / 2,608 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 1,128 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости:

$$[M]_{уст} = \frac{[M]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_n}{[M]_E} \right)^2}} = 6,258 \cdot 10^6 / (1 + (6,258 \cdot 10^6 / 1,49 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 5,77 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \min \{ M_{нп}, M_{уст} \} = \min \{ 6,258 \cdot 10^6, 5,77 \cdot 10^6 \} = 5,77 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Расчётная длина для расчёта седловых опор:

$l_s = 2500 \text{ мм}$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

$$[Q]_E = \frac{2,4 \cdot E \cdot (s-c)^2}{n_y} \cdot \left[0,18 + 3,3 \cdot \frac{D(s-c)}{l_s^2} \right] = 2,4 \cdot 1,81 \cdot 10^5 \cdot (16-4)^2 / 2,4 \cdot (0,18 + 3,3 \cdot 2000 \cdot (16-4) / 2500^2) = 5,022 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие:

Инов. № подл. 19756.4	Подпись и дата				
	Инов. № дубл.				
	Взам. инв. №				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР
					Лист
					23

$$[Q] = \frac{[Q]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\pi}}{[Q]_{\text{E}}}\right)^2}} = 3,11 \cdot 10^6 / (1 + (3,11 \cdot 10^6 / 5,022 \cdot 10^6)^2)^{1/2} = 2,644 \cdot 10^6 \text{ H}$$

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения:

Расчётная температура, T:	200 °C
Расчётное наружное избыточное давление, p:	0,15 МПа
Расчётный изгибающий момент, M:	$1,619 \cdot 10^5$ Н м
Расчётное поперечное усилие, Q:	$1,711 \cdot 10^5$ Н
Расчётное осевое растягивающее усилие, F:	0 Н

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия (наружное давление)):

$$[\sigma] = 165 \text{ MPa}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E = 1,81 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Гладкая обечайка, нагруженная наружным давлением (п. 5.3.2)

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$$l_p = 3833 \text{ mm}$$

$$B = \max \left\{ 1; 0.47 \cdot \left(\frac{p}{10^{-5} \cdot E} \right)^{0.067} \cdot \left(\frac{1}{D} \right)^{0.4} \right\} = \max \{ 1; 0.47 * (0.15 / (10^{-5} * 1.81 \cdot 10^5))^{0.067} * (3833 / 2000)^{0.4} \} = 1$$

Расчётная толщина стенки с учетом прибавок:

$$s_p + c = \max \left\{ 1,06 \cdot \frac{10^{-2} \cdot D}{B} \cdot \left(\frac{p}{10^{-5} \cdot E} \cdot \frac{1}{D} \right)^{0,4} ; \frac{1,2 \cdot p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] - p} \right\} = \max \{ 1,06 \cdot 10^{-2} \cdot 2000 / 1 \cdot (0,15 / (10^{-5} \cdot 1,81 \cdot 10^5))^0 \cdot 3833 / 2000 \}^{0,4} ; 1,2 \cdot 0,15 \cdot 2000 / (2 \cdot 165 - 0,15) \} + 4 = 14,16 \text{ mm}$$

$$14,16 \text{ mm} \leq 16 \text{ mm}$$

Заключение: **Условие работоспособности выполнено**

$$B_1 = \min \left\{ 1.0; 9.45 \cdot \frac{D}{1} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (s - c)}} \right\} = \min \{ 1.0; 9.45 \cdot 2000 / 3833 \cdot (2000 / (100 \cdot (16 - 4)))^{1/2} \} = 1$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости:

$$[p]_e = \frac{2.08 \cdot 10^{-5} E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D}{1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2.5} = 2.08 \cdot 10^{-5} \cdot 1,81 \cdot 10^5 \cdot 2000 / (2,4 \cdot 1 \cdot 3833) \cdot (100 \cdot (16 - 4) / 2000)^{2.5} = 0,2282 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$[p]_{\pi} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 165 \cdot (16 - 4) / (2000 + 16 - 4) = 1,968 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\pi}}{[p]_{\text{E}}}\right)^2}} = 1,968 / (1 + (1,968 / 0,2282)^2)^{1/2} = 0,2267 \text{ МПа}$$

$$0,2267 \text{ МПа} \geq 0,15 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Минимальное расстояние между “одинокими” штуцерами:

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p> $B = \max \left\{ 1; 0.47 \cdot \left(\frac{p}{10^{-5} \cdot E} \right)^{0.067} \cdot \left(\frac{1}{D} \right)^{0.4} \right\} = \max \{ 1; 0.47 \cdot (0.15 / (10^{-5} \cdot 1.81 \cdot 10^5))^{0.067} \cdot (3833 / 2000)^{0.4} \} = 1$ </p> <p>Расчётная толщина стенки с учетом прибавок:</p> $s_p + c = \max \left\{ 1.06 \cdot \frac{10^{-2} \cdot D}{B} \cdot \left(\frac{p}{10^{-5} \cdot E} \cdot \frac{1}{D} \right)^{0.4}; \frac{1.2 \cdot p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] - p} \right\} = \max \{ 1.06 \cdot 10^{-2} \cdot 2000 / 1 \cdot (0.15 / (10^{-5} \cdot 1.81 \cdot 10^5)) \cdot 3833 / 2000^{0.4}; 1.2 \cdot 0.15 \cdot 2000 / (2 \cdot 165 - 0.15) \} + 4 = 14,16 \text{ мм}$ <p>14,16 мм ≤ 16 мм</p> <p>Заключение: Условие работоспособности выполнено</p>
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p> $B_1 = \min \left\{ 1.0; 9.45 \cdot \frac{D}{1} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (s - c)}} \right\} = \min \{ 1.0; 9.45 \cdot 2000 / 3833 \cdot (2000 / (100 \cdot (16 - 4)))^{1/2} \} = 1$ </p> <p>Допускаемое наружное давление из условия устойчивости:</p> $[p]_e = \frac{2.08 \cdot 10^{-5} E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D}{1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2.5} = 2.08 \cdot 10^{-5} \cdot 1.81 \cdot 10^5 \cdot 2000 / (2.4 \cdot 1 \cdot 3833) \cdot (100 \cdot (16 - 4) / 2000)^{2.5} = 0,2282 \text{ МПа}$ <p>Допускаемое наружное давление из условия прочности:</p> $[p]_{\pi} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 165 \cdot (16 - 4) / (2000 + 16 - 4) = 1,968 \text{ МПа}$ $[p] = \frac{[p]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\pi}}{[p]_e} \right)^2}} = 1,968 / (1 + (1,968 / 0,2282)^2)^{1/2} = 0,2267 \text{ МПа}$ <p>0,2267 МПа ≥ 0,15 МПа</p> <p>Заключение: Условие прочности и устойчивости выполнено</p> <p>Минимальное расстояние между “одиночными” штуцерами:</p>

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				

ЕД-2.00.00.000 РР

Лист
24

$$b_0 = 2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} = 2 \cdot (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 309,8 \text{ мм}$$

Обечайка, нагруженная изгибающим моментом (п. 5.3.5)

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$[F]_{\pi} = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3,142 \cdot (2000 + 16 - 4) \cdot (16 - 4) \cdot 165 = 1,252 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны сжатия:

$$[M]_{\pi} = \frac{D}{4} \cdot [F]_{\pi} = 2000 / 4 \cdot 1,252 \cdot 10^7 = 6,258 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:

$$[F]_{E1} = \frac{31 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2.5} = 310 \cdot 10^6 \cdot 1,81 \cdot 10^5 \cdot 2000^2 / (2,4) \cdot (100 \cdot (16 - 4) / 2000)^{2.5} = 2,608 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_{E} = \frac{D}{3.5} \cdot [F]_{E1} = 2000 / 3.5 \cdot 2,608 \cdot 10^7 = 1,49 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \frac{[M]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\pi}}{[M]_{E}} \right)^2}} = 6,258 \cdot 10^6 / (1 + (6,258 \cdot 10^6 / 1,49 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 5,77 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

$$5,77 \cdot 10^6 \text{ Н м} \geq 1,619 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Обечайка, нагруженная поперечным усилием (п. 5.3.6)

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности:

$$[Q]_{\pi} = 0.25 \cdot \pi \cdot D \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 0.25 \cdot 3,142 \cdot 2000 \cdot (16 - 4) \cdot 165 = 3,11 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Расчётная длина для расчёта от действия поперечной силы:

$$l_Q = 3833 \text{ мм}$$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

$$[Q]_{E} = \frac{2.4 \cdot E \cdot (s - c)^2}{n_y} \cdot \left[0.18 + 3.3 \cdot \frac{D(s - c)}{l^2} \right] = 2.4 \cdot 1,81 \cdot 10^5 \cdot (16 - 4)^2 / 2.4 \cdot (0.18 + 3.3 \cdot 2000 \cdot (16 - 4) / 3833^2) = 4,832 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\pi}}{[Q]_{E}} \right)^2}} = 3,11 \cdot 10^6 / (1 + (3,11 \cdot 10^6 / 4,832 \cdot 10^6)^2)^{1/2} = 2,615 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$2,615 \cdot 10^6 \text{ Н} \geq 1,711 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

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

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

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0,15 / 0,2267 + 0 / 0 + 1,619 \cdot 10^5 / 5,77 \cdot 10^6 + (1,711 \cdot 10^5 / 2,615 \cdot 10^6)^2 = 0,694 \leq 1$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Изн.	№ подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19756.4					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
ЕД-2.00.00.000 РР					Лист
					25

Для расчёта обечайки от действия седловых опор:

$$B_1 = \min \left\{ 1.0; 9.45 \cdot \frac{D}{1} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (s-c)}} \right\} = \min \{ 1.0, 9.45 \cdot 2000 / 3833 \cdot (2000 / (100 \cdot (16-4)))^{1/2} \} = 1$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости:

$$[p]_e = \frac{2.08 \cdot 10^{-5} E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D}{1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s-c)}{D} \right]^{2.5} = 20.8 \cdot 10^{-6} \cdot 1.81 \cdot 10^5 \cdot 2000 / (2.4 \cdot 1 \cdot 3833) \cdot (100 \cdot (16-4) / 2000)^{2.5} = 0.2282 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_n}{[p]_e} \right)^2}} = 1.968 / (1 + (1.968 / 0.2282)^2)^{1/2} = 0.2267 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление: $[p] = 0.2267 \text{ МПа}$

Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием (п. 2.3.4)

Допускаемое осевое сжимающее усилие:

$$[F] = \frac{[F]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_n}{[F]_{e1}} \right)^2}} = 1.252 \cdot 10^7 / (1 + (1.252 \cdot 10^7 / 2.608 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 1.128 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием (п. 5.3.3)

Допускаемое осевое растягивающее усилие:

$$[F] = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = 3.142 \cdot (2000 + 16 - 4) \cdot (16 - 4) \cdot 165 \cdot 1 = 1.252 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны растяжения:

$$[M]_{np} = \frac{D}{4} \cdot [F] = 2000 / 4 \cdot 1.252 \cdot 10^7 = 6.258 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости:

$$[M]_{уст} = \frac{[M]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_n}{[M]_e} \right)^2}} = 6.258 \cdot 10^6 / (1 + (6.258 \cdot 10^6 / 1.49 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 5.77 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \min \{ [M]_{np}, [M]_{уст} \} = \min \{ 6.258 \cdot 10^6, 5.77 \cdot 10^6 \} = 5.77 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Расчётная длина для расчёта седловых опор:

$l_s = 2500 \text{ мм}$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

$$[Q]_e = \frac{2.4 \cdot E \cdot (s-c)^2}{n_y} \cdot \left[0.18 + 3.3 \cdot \frac{D(s-c)}{l_s^2} \right] = 2.4 \cdot 1.81 \cdot 10^5 \cdot (16-4)^2 / 2.4 \cdot (0.18 + 3.3 \cdot 2000 \cdot (16-4) / 2500^2) = 5.022 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_n}{[Q]_e} \right)^2}} = 3.11 \cdot 10^6 / (1 + (3.11 \cdot 10^6 / 5.022 \cdot 10^6)^2)^{1/2} = 2.644 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, Т:

20 °С

Изн.	№ подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19756.4					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
ЕД-2.00.00.000 РР					Лист
					26

Расчётное внутреннее избыточное давление (с учётом гидростатического), p : 0,5423 МПа
 Расчётный изгибающий момент, M : $2,772 \cdot 10^4$ Н м
 Расчётное поперечное усилие, Q : $7,501 \cdot 10^4$ Н
 Расчётное осевое растягивающее усилие, F : 0 Н

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 20$ °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:

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

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

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_p + c = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} + c = (0,5423 \cdot 2000) / (2 \cdot 272,7 \cdot 1 - 0,5423) + 4 = 5,991 \text{ мм}$$

$$5,991 \text{ мм} \leq 16 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие работоспособности выполнено**

Допускаемое давление:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 272,7 \cdot 1 \cdot (16 - 4) / (2000 + 16 - 4) = 3,253 \text{ МПа}$$

$$3,253 \text{ МПа} \geq 0,5423 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Минимальное расстояние между “одиночными” штуцерами:

$$b_0 = 2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} = 2 \cdot (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 309,8 \text{ мм}$$

Обечайка, нагруженная изгибающим моментом (п. 5.3.5)

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$[F]_{\pi} = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3,142 \cdot (2000 + 16 - 4) \cdot (16 - 4) \cdot 272,7 = 2,069 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны сжатия:

$$[M]_{\pi} = \frac{D}{4} \cdot [F]_{\pi} = 2000 / 4 \cdot 2,069 \cdot 10^7 = 1,034 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:

$$[F]_{E1} = \frac{31 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2,5} = 310 \cdot 10^{-6} \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot 2000^2 / (1,8) \cdot (100 \cdot (16 - 4) / 2000)^{2,5} = 3,823 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_E = \frac{D}{3,5} \cdot [F]_{E1} = 2000 / 3,5 \cdot 3,823 \cdot 10^7 = 2,184 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \frac{[M]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\pi}}{[M]_E} \right)^2}} = 1,034 \cdot 10^7 / (1 + (1,034 \cdot 10^7 / 2,184 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 9,348 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

$$9,348 \cdot 10^6 \text{ Н м} \geq 2,772 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Обечайка, нагруженная поперечным усилием (п. 5.3.6)

Изн.	Изн. № подл.	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
				27

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности:

$$[Q]_{\pi} = 0.25 \cdot \pi \cdot D \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 0.25 \cdot 3.142 \cdot 2000 \cdot (16 - 4) \cdot 272.7 = 5,141 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$$l_p = 3833 \text{ мм}$$

Расчётная длина для расчёта от действия поперечной силы:

$$l_Q = 3833 \text{ мм}$$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

$$[Q]_E = \frac{2.4 \cdot E \cdot (s - c)^2}{n_y} \cdot \left[0.18 + 3.3 \cdot \frac{D(s - c)}{l^2} \right] = 2.4 \cdot 1.99 \cdot 10^5 \cdot (16 - 4)^2 / 1.8 \cdot (0.18 + 3.3 \cdot 2000 \cdot (16 - 4) / 3833^2) = 7,083 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\pi}}{[Q]_E} \right)^2}} = 5,141 \cdot 10^6 / (1 + (5,141 \cdot 10^6 / 7,083 \cdot 10^6)^2)^{1/2} = 4,161 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$4,161 \cdot 10^6 \text{ Н} \geq 7,501 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0/0 + 0/0 + 2,772 \cdot 10^4 / 9,348 \cdot 10^6 + (7,501 \cdot 10^4 / 4,161 \cdot 10^6)^2 = 0,003291 \leq 1$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием (п. 5.3.3)

Допускаемое осевое растягивающее усилие:

$$[F] = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = 3,142 \cdot (2000 + 16 - 4) \cdot (16 - 4) \cdot 272.7 \cdot 1 = 2,069 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны растяжения:

$$[M]_{\pi p} = \frac{D}{4} \cdot [F] = 2000 / 4 \cdot 2,069 \cdot 10^7 = 1,034 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

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

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

$$\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\pi p}} = (0 + 0,5423 \cdot 3,142 \cdot 2000^2 / 4) / 2,069 \cdot 10^7 + 2,772 \cdot 10^4 / 1,034 \cdot 10^7 = 0,08504 \leq 1$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Для расчёта обечайки от действия седловых опор:

$$B_1 = \min \left\{ 1.0; 9.45 \cdot \frac{D}{1} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (s - c)}} \right\} = \min \{ 1.0, 9.45 \cdot 2000 / 3833 \cdot (2000 / (100 \cdot (16 - 4)))^{1/2} \} = 1$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
				28

$$[p]_e = \frac{2.08 \cdot 10^{-5} E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D}{1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2.5} = 20.8 \cdot 10^{-6} \cdot 1.99 \cdot 10^5 \cdot 2000 / (1.8 \cdot 1 \cdot 3833) \cdot (100 \cdot (16 - 4) / 2000)^{2.5} = 0.3346 \text{ МПа}$$
$$[p]_{\Pi} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 272,7 \cdot (16 - 4) / (2000 + 16 - 4) = 3,253 \text{ МПа}$$

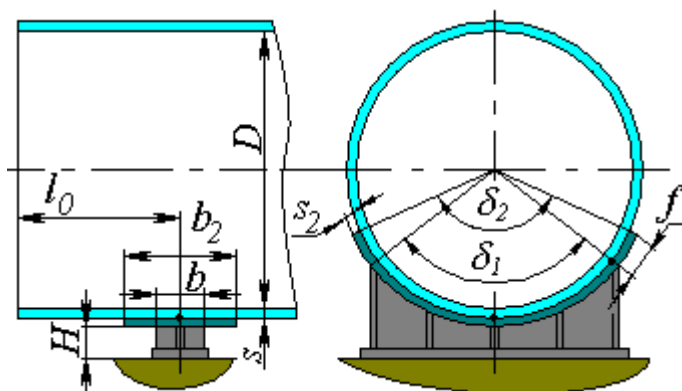
$$[p] = \frac{[p]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\pi}}{[p]_{\text{E}}}\right)^2}} = 3,253 / (1 + (3,253 / 0,3346)^2)^{1/2} = 0,3328 \text{ МПа}$$

Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием (п. 2.3.4)

$$[F] = \frac{[F]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\pi}}{[F]_{E1}} \right)^2}} = 2,069 \cdot 10^7 / (1 + (2,069 \cdot 10^7 / 3,823 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 1,819 \cdot 10^7 \text{ H}$$
$$[M]_{\text{yct}} = \frac{[M]_{\text{II}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\text{II}}}{[M]_{\text{E}}} \right)^2}} = 1,034 \cdot 10^7 / (1 + (1,034 \cdot 10^7 / 2,184 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 9,348 \cdot 10^6 \text{ H M}$$
$$[M] = \min \{M_{np}, M_{yct}\} = \min\{1,034 \cdot 10^7, 9,348 \cdot 10^6\} = 9,348 \cdot 10^6 \text{ H}_M$$
$$l_s = 2500 \text{ mm}$$
$$[Q]_E = \frac{2.4 \cdot E \cdot (s - c)^2}{n_y} \cdot \left[0.18 + 3.3 \frac{D(s - c)}{1_s^2} \right] = 2.4 \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot (16 - 4)^2 / 1,8 \cdot (0.18 + 3.3 \cdot 2000 \cdot (16 - 4) / 2500^2) = 7,362 \cdot 10^6 \text{ H}$$
$$[Q] = \frac{[Q]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\Pi}}{[Q]_{\text{E}}}\right)^2}} = 5,141 \cdot 10^6 / (1 + (5,141 \cdot 10^6 / 7,362 \cdot 10^6)^2)^{1/2} = 4,215 \cdot 10^6 \text{ H}$$

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$[M] = \min \{ M_{гр}, M_{уст} \} = \min \{ 1,034 \cdot 10^7, 9,348 \cdot 10^6 \} = 9,348 \cdot 10^6 \text{ Н м}$ Расчётная длина для расчёта седловых опор: $l_s = 2500 \text{ мм}$ Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости: $[Q]_E = \frac{2.4 \cdot E \cdot (s - c)^2}{n_y} \cdot \left[0.18 + 3.3 \frac{D(s - c)}{l_s^2} \right] = 2.4 \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot (16 - 4)^2 / 1,8 \cdot (0.18 + 3.3 \cdot 2000 \cdot (16 - 4) / 2500^2) = 7,362 \cdot 10^6 \text{ Н}$ Допускаемое поперечное усилие: $[Q] = \frac{[Q]_п}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_п}{[Q]_E} \right)^2}} = 5,141 \cdot 10^6 / (1 + (5,141 \cdot 10^6 / 7,362 \cdot 10^6)^2)^{1/2} = 4,215 \cdot 10^6 \text{ Н}$
					<div> <div> <div>Инв. № подл.</div> <div>19756.4</div> </div> <div> <div>Подпись и дата</div> <div></div> </div> <div> <div>Взам. инв. №</div> <div></div> </div> <div> <div>Инв. № дубл.</div> <div></div> </div> <div> <div>Подпись и дата</div> <div></div> </div> </div> <div> <div>Изм.</div> <div>Лист</div> <div>№ докум.</div> <div>Подп.</div> <div>Дата</div> </div> <div> <div>ЕД-2.00.00.000 РР</div> <div> <div>Лист</div> <div>29</div> </div> </div>

Опора седловая (неподвижная)



Исходные данные

Элемент, связанный с опорой:	Обечайка цилиндрическая
Внутренний диаметр обечайки, D:	2000 мм
Толщина стенки обечайки, s:	16 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c1:	4 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, c2:	0 мм
Прибавка технологическая, c3:	0 мм
Сумма прибавок к стенке обечайки, c:	4 мм
Ширина опоры, b:	300 мм
Угол охвата опоры, δ_1 :	120 °
Расстояние от края элемента, l0:	440 мм
Расстояние до днища, a:	500 мм
Высота опоры, H:	196 мм
Толщина листа, s2:	14 мм
Ширина листа, b2:	450 мм
Угол охвата листа, δ_2 :	140 °
Длина выступающей части листа, f:	179,8 мм

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения (см. Эпюры сил и моментов):

Расчётная температура, T:	200 °C
Коэффициент заполнения жидкостью, ξ :	0,951
Плотность жидкости, $\rho_{ж}$:	750 кг/м ³
Расчётное внутреннее избыточное давление, действующее в элементе над опорой, p:	0,3532 МПа
Изгибающий момент в сечении оболочки над опорой, M:	4,068·10 ⁴ Н м
Опорное усилие, F:	2,266·10 ⁵ Н

Инов. № подл.	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4			

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ЕД-2.00.00.000 РР

Поперечное усилие в сечении оболочки над опорой, Q: $1,988 \cdot 10^5$ Н

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

Допускаемое наружное давление, [p]: 0,2267 МПа

Допускаемый изгибающий момент, [M]_{уст}: $5,77 \cdot 10^6$ Н м

Допускаемая осевое сжимающее усилие, [F]: $1,128 \cdot 10^7$ Н

Допускаемая поперечное усилие, [Q]: $2,644 \cdot 10^6$ Н

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

Опора без подкладного листа

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

Параметр, определяемый расстоянием до днища:

$$\gamma = 2,83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s-c}{D}} = 2,83 \cdot 500 / 2000 \cdot ((16-4) / 2000)^{1/2} = 0,05480$$

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

$$K_{15} = \min \left\{ 1,0; \frac{0,8 \cdot \sqrt{\gamma + 6 \cdot \gamma}}{\delta_1} \right\} = \min \{ 1,0; (0,8 \cdot 0,05480^{1/2} + 6 \cdot 0,05480) / 2,094 \} = 0,2464$$

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

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

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta_1 = 0,91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s-c)}} = 0,91 \cdot 300 / (2000 \cdot (16-4))^{1/2} = 1,762$$

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

$$K_{10} = \max \left\{ \frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0,25 \right\} = \max \{ e^{-1,762} \cdot \sin(1,762) / 1,762; 0,25 \} = 0,25$$

$$\vartheta_1 = - \frac{0,23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0,23 \cdot 0,3464 \cdot 0,2464 / (0,9816 \cdot 0,25) = (-0,08001)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{\text{мк}} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s-c)} = 4 \cdot 4,068 \cdot 10^4 / (3,142 \cdot 2000^2 \cdot (16-4)) = 1,079 \text{ МПа}$$

$$\vartheta_{2,1} = - \bar{\sigma}_{\text{мк}} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = -1,079 / (1,25 \cdot 165) = (-0,005232)$$

$$\vartheta_{2,2} = \left(\frac{p \cdot D}{4 \cdot (s-c)} - \bar{\sigma}_{\text{мк}} \right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = [0,3532 \cdot 2000 / (4 \cdot (16-4)) - 1,079] / (1,2 \cdot 165) = 0,06888$$

Инов. № подл. 19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	ЕД-2.00.00.000 РР					Лист	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						31	

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

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 1,477 \quad \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{2,1}$$

$$= 1,496 \quad \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{2,2}$$

$$K_1 = \min\{1,477, 1,496\} = 1,477$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1,477 \cdot 1,25 \cdot 165 = 304,7 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0,7 \cdot [\sigma]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c) \cdot (s - c)}}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0,7 \cdot 304,7 \cdot (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} \cdot (16 - 4) / (0,25 \cdot 0,9816) = 1,616 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-1,762} \cdot \cos(1,762)) / 1,762 = 0,586$$

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

$$K_{16} = 1 - \frac{0,65}{1 + (6 \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0,65 / (1 + (6 \cdot 0,05480)^2) \cdot [3,142 / (3 \cdot 2,094)]^{1/2} = 0,5852$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0,6 \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{s - c} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1}} = 1 / [1 + 0,6 \cdot (2000 / (16 - 4))^{1/3} \cdot 300 / 2000 \cdot 2,094] = 0,4908$$

$$\vartheta_1 = -\frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 \cdot 0,586 / [0,6344 \cdot 0,5852 \cdot 0,4908 \cdot \sin(0,5 \cdot 2,094)] = (-1,968)$$

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

$$\vartheta_{2,2} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s - c) \cdot K_2 \cdot [\sigma]} = 0,3532 \cdot 2000 / (2 \cdot (16 - 4)) \cdot 1 / (1,25 \cdot 165) = 0,1427$$

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

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 0,4293 \quad \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{2,1}$$

$$= 0,4896 \quad \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{2,2}$$

$$K_1 = \min\{0,4293, 0,4896\} = 0,4293$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_3 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,4293 \cdot 1,25 \cdot 165 = 88,54 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0,9 \cdot [\sigma]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c) \cdot (s - c)}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0,9 \cdot 88,54 \cdot (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} \cdot (16 - 4) / (0,6344 \cdot 0,5852 \cdot 0,4908) = 8,13 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности:

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

Изнв. № подл.	Подпись и дата	Изнв. № дубл.	Подпись и дата
19756.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
ЕД-2.00.00.000 РР			
Лист			
32			

$$[F] = \min \{ [F]_2, [F]_B \} = 8,13 \cdot 10^5$$

$$2,266 \cdot 10^5 \text{ Н} \leq 8,13 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Проверка условия устойчивости

Эффективное осевое усилие от местных мембранных напряжений:

$$F_e = F \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{D}{(s-c)}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} = 2,266 \cdot 10^5 * 3,142 / 4 * (2000 / (16 - 4))^{1/2} * 0,3464 * 0,2464 = 1,961 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

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

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

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{F_e}{[F]} + \frac{M}{[M]_{уст}} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0 / 0,2267 + 1,961 \cdot 10^5 / 1,128 \cdot 10^7 + 4,068 \cdot 10^4 / 5,77 \cdot 10^6 + (1,988 \cdot 10^5 / 2,644 \cdot 10^6)^2 = 0,03009$$

$$0,03009 \leq 1,0$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения (см. Эпюры сил и моментов):

Расчётная температура, T: 200 °C

Коэффициент заполнения жидкостью, ξ : 0

Плотность жидкости, ρ_j : 0 кг/м³

Расчётное наружное избыточное давление, действующее в элементе над опорой, p: 0,15 МПа

Изгибающий момент в сечении оболочки над опорой, M: $3,55 \cdot 10^4$ Н м

Опорное усилие, F: $1,807 \cdot 10^5$ Н

Поперечное усилие в сечении оболочки над опорой, Q: $1,714 \cdot 10^5$ Н

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

Допускаемое наружное давление, [p]: 0,2267 МПа

Допускаемый изгибающий момент, $[M]_{уст}$: $5,77 \cdot 10^6$ Н м

Допускаемая осевое сжимающее усилие, [F]: $1,128 \cdot 10^7$ Н

Допускаемая поперечное усилие, [Q]: $2,644 \cdot 10^6$ Н

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

Опора без подкладного листа

Инов. № подл. 19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	ЕД-2.00.00.000 РР					Лист
										33
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

$$K_{13} = \frac{\max\left\{1.7 - \frac{2.1 \cdot \delta_1}{\pi}; 0\right\}}{\sin(0.5 \cdot \delta_1)} = \max\{1.7 - 2.1 * 2.094 / 3.142; 0\} / \sin(0.5 * 2.094) = 0.3464$$

Параметр, определяемый расстоянием до днища:

$$\gamma = 2.83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s-c}{D}} = 2.83 * 500 / 2000 * ((16-4) / 2000)^{1/2} = 0.05480$$

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

$$K_{15} = \min\left\{1.0; \frac{0.8 \cdot \sqrt{\gamma + 6 \cdot \gamma}}{\delta_1}\right\} = \min\{1.0; (0.8 * 0.05480^{1/2} + 6 * 0.05480) / 2.094\} = 0.2464$$

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

$$K_{12} = \frac{1.15 - 0.1432 \cdot \delta_1}{\sin(0.5 \cdot \delta_1)} = (1.15 - 0.1432 * 2.094) / \sin(0.5 * 2.094) = 0.9816$$

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta_1 = 0.91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s-c)}} = 0.91 * 300 / (2000 * (16-4))^{1/2} = 1.762$$

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

$$K_{10} = \max\left\{\frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0.25\right\} = \max\{e^{-1.762} \cdot \sin(1.762) / 1.762; 0.25\} = 0.25$$

$$\vartheta_1 = -\frac{0.23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0.23 * 0.3464 * 0.2464 / (0.9816 * 0.25) = (-0.08001)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{\max} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s-c)} = 4 * 3.55 \cdot 10^4 / (3.142 * 2000^2 * (16-4)) = 0.9417 \text{ МПа}$$

$$\vartheta_{21} = -\bar{\sigma}_{\max} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = -0.9417 / (1.25 * 165) = (-0.004566)$$

$$\vartheta_{22} = \left(\frac{p \cdot D}{4 \cdot (s-c)} - \bar{\sigma}_{\max}\right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = [(-0.15) * 2000 / (4 * (16-4)) - 0.9417] / (1.2 * 165) = (-0.03632)$$

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

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 1.477 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{22} \end{array} \right|$$

$$= 1.465$$

$$K_1 = \min\{1.477, 1.465\} = 1.465$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1.465 * 1.25 * 165 = 302.1 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0.7 \cdot [\sigma]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s-c)} \cdot (s-c)}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0.7 * 302.1 * (2000 * (16-4))^{1/2} * (16-4) / (0.25 * 0.9816) = 1.602 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР
					Лист 34

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-1,762} * \cos(1,762)) / 1,762 = 0,586$$

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

$$K_{16} = 1 - \frac{0.65}{1 + (6 \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0.65 / (1 + (6 \cdot 0,05480)^2) \cdot [3,142 / (3 \cdot 2,094)]^{1/2} = 0,5852$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0.6 \cdot 3 \sqrt{\frac{D}{s-c}} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1} = 1 / [1 + 0.6 \cdot (2000 / (16 - 4))^{1/3} \cdot 300 / 2000 \cdot 2,094] = 0,4908$$

$$g_1 = -\frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 \cdot 0,586 / [0,6344 \cdot 0,5852 \cdot 0,4908 \cdot \sin(0,5 \cdot 2,094)] = (-1,968)$$

$$g_{21} = 0$$

$$g_{2,2} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s - c)} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = (-0,15) \cdot 2000 / (2 \cdot (16 - 4)) \cdot 1 / (1,25 \cdot 165) = (-0,06061)$$

Примечание: при $g_{2i} < 0$ в расчёте K_1 знаки g_1 и g_2 меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - g_2^2}{\left(\frac{1}{3} + g_1 \cdot g_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + g_1 \cdot g_2\right)^2 + (1 - g_2^2) \cdot g_1}} = 0,4293 \quad \text{при } g_2 = g_{2,1}$$

$$= 0,4036 \quad \text{при } g_2 = g_{2,2}$$

$$K_1 = \min\{ 0,4293, 0,4036 \} = 0,4036$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma_i]_3 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,4036 * 1,25 * 165 = 83,25 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0.9 \cdot [\sigma_i]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s-c)} \cdot (s-c)}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0.9 \cdot 83,25 \cdot (2000 \cdot (16-4))^{1/2} \cdot (16-4) / (0,6344 \cdot 0,5852 \cdot 0,4908) = 7,643 \cdot 10^5 \text{ H}$$

Условие прочности:

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

$$[F] = \min \{ [F]_2, [F]_B \} = 7.643 \cdot 10^5$$

$$1,807 \cdot 10^5 \text{ H} \leq 7,643 \cdot 10^5 \text{ H}$$

Заключение: Условие прочности и устойчивости выполнено

Проверка условия устойчивости

Эффективное осевое усилие от местных мембранных напряжений:

$$F_e = F \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\sqrt{D}}{\sqrt{(s-c)}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} = 1,807 \cdot 10^5 * 3,142 / 4 * (2000 / (16 - 4))^{1/2} * 0,3464 * 0,2464 = 1,564 \cdot 10^5 \text{ H}$$

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

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$= 0,4036$
					при $\vartheta_2 = \vartheta_{2,2}$
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$K_1 = \min\{ 0,4293 , 0,4036 \} = 0,4036$
					Расчёт в точке 3:
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Предельное напряжение изгиба:
					$[\sigma]_B = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,4036 * 1,25 * 165 = 83,25 \text{ МПа}$
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:
					$[F]_3 = \frac{0,9 \cdot [\sigma]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} \cdot (s - c)}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0,9 * 83,25 * (2000 * (16 - 4))^{1/2} * (16 - 4) / (0,6344 * 0,5852 * 0,4908) = 7,643 \cdot 10^5 \text{ Н}$
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Условие прочности:
					$F \leq [F] = \min\{[F]_2, [F]_3\}$
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$[F] = \min\{[F]_2, [F]_3\} = 7,643 \cdot 10^5$
					$1,807 \cdot 10^5 \text{ Н} \leq 7,643 \cdot 10^5 \text{ Н}$
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Заключение: Условие прочности и устойчивости выполнено
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Проверка условия устойчивости
					Эффективное осевое усилие от местных мембранных напряжений:
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$F_e = F \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{D}{(s - c)}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} = 1,807 \cdot 10^5 * 3,142 / 4 * (2000 / (16 - 4))^{1/2} * 0,3464 * 0,2464 = 1,564 \cdot 10^5 \text{ Н}$
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Условие устойчивости: $\frac{ P }{[P]} + \frac{F_e}{[F]} + \frac{M}{[M]_{уст}} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 \leq 1$
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	

$$\beta_1 = 0.91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s - c)}} = 0.91 \cdot 300 / (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 1,762$$
$$K_{10} = \max \left\{ \frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0.25 \right\} = \max \{ e^{-1.762} * \sin(1.762) / 1.762; 0.25 \} = 0.25$$

$$g_1 = -\frac{0,23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{13} \cdot K_{10}} = -0,23 * 0,3464 * 0,2464 / (0,9816 * 0,25) = (-0,08001)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = 4 * 1,352 \cdot 10^4 / (3,142 * 2000^2 * (16 - 4)) = 0,3585 \text{ MPa}$$

$$g_{21} = -\sigma_{\max} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot |\sigma|} = -0,3585 / (1,05 \cdot 272,7) = (-0,001252)$$

$$S_{2,2} = \left(\frac{p \cdot D}{4 \cdot (s - c)} - \bar{\sigma}_{\max} \right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot |\sigma|} = [0,5423 \cdot 2000 / (4 \cdot (16 - 4)) - 0,3585] / (1 \cdot 272,7) = 0,08154$$

$K_1 = \frac{1 - g_2^2}{\left(\frac{1}{3} + g_1 \cdot g_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + g_1 \cdot g_2\right)^2 + (1 - g_2^2) \cdot g_1}}$	$= 1,479$	при $g_2 = g_{21}$
$= 1,498$	при $g_2 = g_{2,2}$	

$$[\sigma_i]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1,479 \cdot 1,05 \cdot 272,7 = 423,4 \text{ МПа}$$

$$[F]_2 = \frac{0.7 \cdot [\sigma_i]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s-c) \cdot (s-c)}}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0.7 * 423,4 * (2000 * (16-4))^{1/2} * (16-4) / (0,25 * 0,9816) = 2,245 \cdot 10^6 \text{ H}$$

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-1,762} * \cos(1,762)) / 1,762 = 0,586$$

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

$$K_{16} = 1 - \frac{0.65}{1 + (6 \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0.65 / (1 + (6 \cdot 0,05480)^2) \cdot [3,142 / (3 \cdot 2,094)]^{1/2} = 0,5852$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0.6 \cdot 3 \cdot \sqrt{\frac{D}{s-c}} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1} = 1 / [1 + 0.6 \cdot (2000 / (16 - 4))^{1/3} \cdot 300 / 2000 \cdot 2,094] = 0,4908$$

$$g_1 = -\frac{0.53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0.5 \cdot 2.094)} = -0.53 \cdot 0.586 / [0.6344 \cdot 0.5852 \cdot 0.4908 \cdot \sin(0.5 \cdot 2.094)] = (-1.968)$$

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p> $K_1 = \min\{1,479, 1,498\} = 1,479$ Расчёт в точке 2: Предельное напряжение изгиба: $[\sigma]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1,479 \cdot 1,05 \cdot 272,7 = 423,4 \text{ МПа}$ Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении: $[F]_2 = \frac{0,7 \cdot [\sigma]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s-c)} \cdot (s-c)}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0,7 \cdot 423,4 \cdot (2000 \cdot (16-4))^{1/2} \cdot (16-4) / (0,25 \cdot 0,9816) = 2,245 \cdot 10^6 \text{ Н}$ $K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-1,762} \cdot \cos(1,762)) / 1,762 = 0,586$ $K_{14} = \frac{1,45 - 0,43 \cdot \delta_1}{\sin(0,5 \cdot \delta_1)} = (1,45 - 0,43 \cdot 2,094) / \sin(0,5 \cdot 2,094) = 0,6344$ $K_{16} = 1 - \frac{0,65}{1 + (6 \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0,65 / (1 + (6 \cdot 0,05480)^2) \cdot [3,142 / (3 \cdot 2,094)]^{1/2} = 0,5852$ $K_{17} = \frac{1}{1 + 0,6 \cdot 3 \cdot \sqrt{\frac{D}{s-c}} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1} = 1 / [1 + 0,6 \cdot (2000 / (16-4))^{1/3} \cdot 300 / 2000 \cdot 2,094] = 0,4908$ $\vartheta_1 = -\frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 \cdot 0,586 / [0,6344 \cdot 0,5852 \cdot 0,4908 \cdot \sin(0,5 \cdot 2,094)] = (-1,968)$ $\vartheta_{21} = 0$ </p>
					<p> ЕД-2.00.00.000 РР </p>
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p> Изм. Лист № докум. Подп. Дата </p>

$$\vartheta_{2,2} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s - c)} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = 0,5423 \cdot 2000 / (2 \cdot (16 - 4)) \cdot 1 / (1,05 \cdot 272,7) = 0,1578$$

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

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 0,4293 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{2,1} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{2,2} \end{array} \right|$$

$$= 0,4959$$

$$K_1 = \min\{0,4293, 0,4959\} = 0,4293$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_B = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,4293 \cdot 1,05 \cdot 272,7 = 122,9 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0,9 \cdot [\sigma]_B \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} \cdot (s - c)}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0,9 \cdot 122,9 \cdot (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} \cdot (16 - 4) / (0,6344 \cdot 0,5852 \cdot 0,4908) = 1,129 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Условие прочности:

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

$$[F] = \min\{[F]_2, [F]_B\} = 1,129 \cdot 10^6$$

$$1,112 \cdot 10^5 \text{ Н} \leq 1,129 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Проверка условия устойчивости

Эффективное осевое усилие от местных мембранных напряжений:

$$F_e = F \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{D}{\sqrt{(s - c)}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} = 1,112 \cdot 10^5 \cdot 3,142 / 4 \cdot (2000 / (16 - 4))^{1/2} \cdot 0,3464 \cdot 0,2464 = 9,621 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

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

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

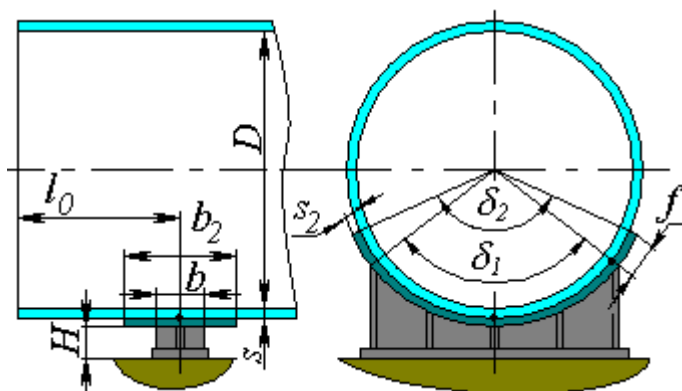
$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{F_e}{[F]} + \frac{M}{[M]_{уст}} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 = 0 / 0,3328 + 9,621 \cdot 10^4 / 1,819 \cdot 10^7 + 1,352 \cdot 10^4 / 9,348 \cdot 10^6 + (7,61 \cdot 10^4 / 4,215 \cdot 10^6)^2 = 0,007060$$

$$0,007060 \leq 1,0$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Инов. № подл. 19756.4	Подпись и дата					Инов. № дубл.	Подпись и дата				
$F_e = F \cdot \frac{1}{4} \cdot \sqrt{\frac{1}{(s-c)}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} = 1,112 \cdot 10^3 \cdot 3,142 / 4 \cdot (2000 / (16-4))^{1/2} \cdot 0,3464 \cdot 0,2464 = 9,621 \cdot 10^4 \text{ Н}$ <p>Сосуд работает под внутренним давлением, при проверке устойчивости принимают p=0.</p> <p>Условие устойчивости: $\frac{ p }{[p]} + \frac{F_e}{[F]} + \frac{M}{[M]_{уст}} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 \leq 1$</p> $\frac{ p }{[p]} + \frac{F_e}{[F]} + \frac{M}{[M]_{уст}} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 = 0 / 0,3328 + 9,621 \cdot 10^4 / 1,819 \cdot 10^7 + 1,352 \cdot 10^4 / 9,348 \cdot 10^6 + (7,61 \cdot 10^4 / 4,215 \cdot 10^6)^2 = 0,007060$ <p>0,007060 ≤ 1.0</p> <p>Заключение: Условие устойчивости выполнено</p>											
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР						Лист
											38

Опора седловая (подвижная)



Исходные данные

Элемент, связанный с опорой:	Обечайка цилиндрическая
Внутренний диаметр обечайки, D:	2000 мм
Толщина стенки обечайки, s:	16 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c ₁ :	4 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, c ₂ :	0 мм
Прибавка технологическая, c ₃ :	0 мм
Сумма прибавок к стенке обечайки, c:	4 мм
Ширина опоры, b:	300 мм
Угол охвата опоры, δ_1 :	120 °
Расстояние от края элемента, l ₀ :	2940 мм
Расстояние до днища, a:	500 мм
Высота опоры, H:	196 мм
Толщина листа, s ₂ :	14 мм
Ширина листа, b ₂ :	450 мм
Угол охвата листа, δ_2 :	140 °
Длина выступающей части листа, f:	179,8 мм

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения (см. Эпюры сил и моментов):

Расчётная температура, T:	200 °C
Коэффициент заполнения жидкостью, ξ :	0,951
Плотность жидкости, $\rho_{ж}$:	750 кг/м ³
Расчётное внутреннее избыточное давление, действующее в элементе над опорой, p:	0,3532 МПа
Изгибающий момент в сечении оболочки над опорой, M: 4,097·10 ⁴ Н м	

Инов. № подл.	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4			

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ЕД-2.00.00.000 РР

Опорное усилие, F: 2,258·10⁵ Н

Поперечное усилие в сечении оболочки над опорой, Q: 1,979·10⁵ Н

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

Допускаемое наружное давление, [p]: 0,2267 МПа

Допускаемый изгибающий момент, [M]_{уст}: 5,77·10⁶ Н м

Допускаемая осевое сжимающее усилие, [F]: 1,128·10⁷ Н

Допускаемая поперечное усилие, [Q]: 2,644·10⁶ Н

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

Опора без подкладного листа

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

Параметр, определяемый расстоянием до днища:

$$\gamma = 2.83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s-c}{D}} = 2.83 \cdot 500 / 2000 \cdot ((16-4) / 2000)^{1/2} = 0,05480$$

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

$$K_{15} = \min \left\{ 1.0; \frac{0.8 \cdot \sqrt{\gamma + 6 \cdot \gamma}}{\delta_1} \right\} = \min \{ 1.0; (0.8 \cdot 0,05480^{1/2} + 6 \cdot 0,05480) / 2,094 \} = 0,2464$$

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

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

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta_1 = 0.91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s-c)}} = 0.91 \cdot 300 / (2000 \cdot (16-4))^{1/2} = 1,762$$

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

$$K_{10} = \max \left\{ \frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0.25 \right\} = \max \{ e^{-1,762} \cdot \sin(1,762) / 1,762; 0.25 \} = 0,25$$

$$\Phi_1 = - \frac{0.23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0.23 \cdot 0,3464 \cdot 0,2464 / (0,9816 \cdot 0,25) = (-0,08001)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\sigma_{\max} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s-c)} = 4 \cdot 4,097 \cdot 10^4 / (3,142 \cdot 2000^2 \cdot (16-4)) = 1,087 \text{ МПа}$$

$$\Phi_{21} = - \sigma_{\max} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = -1,087 / (1,25 \cdot 165) = (-0,005269)$$

Подпись и дата		Инов. № дубл.		Взам. инв. №		Подпись и дата		Инов. № подл.	19756.4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
									40

$$\vartheta_{2,2} = \left(\frac{p \cdot D}{4 \cdot (s - c)} - \bar{\sigma}_{\text{мк}} \right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = [0,3532 \cdot 2000 / (4 \cdot (16 - 4)) - 1,087] / (1,2 \cdot 165) = 0,06885$$

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

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 1,477 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{2,1} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{2,2} \end{array} \right|$$

$$= 1,496$$

$$K_1 = \min\{1,477, 1,496\} = 1,477$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma_i]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1,477 \cdot 1,25 \cdot 165 = 304,7 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0,7 \cdot [\sigma_i]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c) \cdot (s - c)}}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0,7 \cdot 304,7 \cdot (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} \cdot (16 - 4) / (0,25 \cdot 0,9816) = 1,616 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-1,762} \cdot \cos(1,762)) / 1,762 = 0,586$$

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

$$K_{16} = 1 - \frac{0,65}{1 + (\delta \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0,65 / (1 + (6 \cdot 0,05480)^2) \cdot [3,142 / (3 \cdot 2,094)]^{1/2} = 0,5852$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0,6 \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{s - c} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1}} = 1 / [1 + 0,6 \cdot (2000 / (16 - 4))^{1/3} \cdot 300 / 2000 \cdot 2,094] = 0,4908$$

$$\vartheta_1 = - \frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 \cdot 0,586 / [0,6344 \cdot 0,5852 \cdot 0,4908 \cdot \sin(0,5 \cdot 2,094)] = (-1,968)$$

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

$$\vartheta_{2,2} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s - c)} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = 0,3532 \cdot 2000 / (2 \cdot (16 - 4)) \cdot 1 / (1,25 \cdot 165) = 0,1427$$

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

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 0,4293 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{2,1} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{2,2} \end{array} \right|$$

$$= 0,4896$$

$$K_1 = \min\{0,4293, 0,4896\} = 0,4293$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma_i]_3 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,4293 \cdot 1,25 \cdot 165 = 88,54 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата		Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР	
						Лист
						41

$$[F]_3 = \frac{0.9 \cdot [\sigma_i]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} \cdot (s - c)}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0.9 \cdot 88.54 \cdot (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} \cdot (16 - 4) / (0.6344 \cdot 0.5852 \cdot 0.4908) = 8.13 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности:

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

$$[F] = \min \{ [F]_2, [F]_3 \} = 8.13 \cdot 10^5$$

$$2.258 \cdot 10^5 \text{ Н} \leq 8.13 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Проверка условия устойчивости

Эффективное осевое усилие от местных мембранных напряжений:

$$F_e = F \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{D}{(s - c)}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} = 2.258 \cdot 10^5 \cdot 3.142 / 4 \cdot (2000 / (16 - 4))^{1/2} \cdot 0.3464 \cdot 0.2464 = 1.954 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

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

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

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{F_e}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{уст}}} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0 / 0.2267 + 1.954 \cdot 10^5 / 1.128 \cdot 10^7 + 4.097 \cdot 10^4 / 5.77 \cdot 10^6 + (1.979 \cdot 10^5 / 2.644 \cdot 10^6)^2 = 0.03002$$

$$0.03002 \leq 1.0$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения (см. Эпюры сил и моментов):

Расчётная температура, T: 200 °C

Коэффициент заполнения жидкостью, ξ : 0

Плотность жидкости, $\rho_{\text{ж}}$: 0 кг/м³

Расчётное наружное избыточное давление, действующее в элементе над опорой, p: 0,15 МПа

Изгибающий момент в сечении оболочки над опорой, M: $3.572 \cdot 10^4$ Н м

Опорное усилие, F: $1.798 \cdot 10^5$ Н

Поперечное усилие в сечении оболочки над опорой, Q: $1.704 \cdot 10^5$ Н

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

Допускаемое наружное давление, [p]: 0,2267 МПа

Допускаемый изгибающий момент, $[M]_{\text{уст}}$: $5.77 \cdot 10^6$ Н м

Допускаемая осевое сжимающее усилие, [F]: $1.128 \cdot 10^7$ Н

Допускаемая поперечное усилие, [Q]: $2.644 \cdot 10^6$ Н

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
				42

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

Опора без подкладного листа

$$K_{13} = \frac{\max \left\{ 1.7 - \frac{2.1 \cdot \delta_1}{\pi}; 0 \right\}}{\sin(0.5 \cdot \delta_1)} = \max \{ 1.7 - 2.1 \cdot 2.094 / 3.142; 0 \} / \sin(0.5 \cdot 2.094) = 0.3464$$

Параметр, определяемый расстоянием до днища:

$$\gamma = 2.83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s-c}{D}} = 2.83 \cdot 500 / 2000 \cdot ((16-4) / 2000)^{1/2} = 0.05480$$

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

$$K_{15} = \min \left\{ 1.0; \frac{0.8 \cdot \sqrt{\gamma} + 6 \cdot \gamma}{\delta_1} \right\} = \min \{ 1.0; (0.8 \cdot 0.05480^{1/2} + 6 \cdot 0.05480) / 2.094 \} = 0.2464$$

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

$$K_{12} = \frac{1.15 - 0.1432 \cdot \delta_1}{\sin(0.5 \cdot \delta_1)} = (1.15 - 0.1432 \cdot 2.094) / \sin(0.5 \cdot 2.094) = 0.9816$$

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta_1 = 0.91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s-c)}} = 0.91 \cdot 300 / (2000 \cdot (16-4))^{1/2} = 1.762$$

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

$$K_{10} = \max \left\{ \frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0.25 \right\} = \max \{ e^{-1.762} \cdot \sin(1.762) / 1.762; 0.25 \} = 0.25$$

$$\vartheta_1 = - \frac{0.23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0.23 \cdot 0.3464 \cdot 0.2464 / (0.9816 \cdot 0.25) = (-0.08001)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{\text{мк}} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s-c)} = 4 \cdot 3.572 \cdot 10^4 / (3.142 \cdot 2000^2 \cdot (16-4)) = 0.9476 \text{ МПа}$$

$$\vartheta_{21} = - \bar{\sigma}_{\text{мк}} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = -0.9476 / (1.25 \cdot 165) = (-0.004594)$$

$$\vartheta_{22} = \left(\frac{p \cdot D}{4 \cdot (s-c)} - \bar{\sigma}_{\text{мк}} \right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = [(-0.15) \cdot 2000 / (4 \cdot (16-4)) - 0.9476] / (1.2 \cdot 165) = (-0.03635)$$

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

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 1.477 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{22} \end{array} \right|$$

$$= 1.465$$

$$K_1 = \min \{ 1.477, 1.465 \} = 1.465$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1.465 \cdot 1.25 \cdot 165 = 302.1 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата		Подпись и дата	
Взам. инв. №		Инов. № дубл.		Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
ЕД-2.00.00.000 РР					Лист
					43

$$[F]_2 = \frac{0.7 \cdot [\sigma_i]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s-c) \cdot (s-c)}}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0.7 \cdot 302,1 \cdot (2000 \cdot (16-4))^{1/2} \cdot (16-4) / (0,25 \cdot 0,9816) = 1,602 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-1,762} \cdot \cos(1,762)) / 1,762 = 0,586$$

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

$$K_{16} = 1 - \frac{0,65}{1 + (6 \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0,65 / (1 + (6 \cdot 0,05480)^2) \cdot [3,142 / (3 \cdot 2,094)]^{1/2} = 0,5852$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0,6 \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{s-c} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1}} = 1 / [1 + 0,6 \cdot (2000 / (16-4))^{1/3} \cdot 300 / 2000 \cdot 2,094] = 0,4908$$

$$\vartheta_1 = - \frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 \cdot 0,586 / [0,6344 \cdot 0,5852 \cdot 0,4908 \cdot \sin(0,5 \cdot 2,094)] = (-1,968)$$

$$\vartheta_{21} = 0$$

$$\vartheta_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s-c)} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = (-0,15) \cdot 2000 / (2 \cdot (16-4)) \cdot 1 / (1,25 \cdot 165) = (-0,06061)$$

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

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 0,4293 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{2,2} \end{array} \right|$$

$$= 0,4036$$

$$K_1 = \min\{0,4293, 0,4036\} = 0,4036$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_B = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,4036 \cdot 1,25 \cdot 165 = 83,25 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0,9 \cdot [\sigma_i]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s-c) \cdot (s-c)}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0,9 \cdot 83,25 \cdot (2000 \cdot (16-4))^{1/2} \cdot (16-4) / (0,6344 \cdot 0,5852 \cdot 0,4908) = 7,643 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности:

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

$$[F] = \min\{[F]_2, [F]_3\} = 7,643 \cdot 10^5$$

$$1,798 \cdot 10^5 \text{ Н} \leq 7,643 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Проверка условия устойчивости

Эффективное осевое усилие от местных мембранных напряжений:

$$F_e = F \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{D}{(s-c)}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} = 1,798 \cdot 10^5 \cdot 3,142 / 4 \cdot (2000 / (16-4))^{1/2} \cdot 0,3464 \cdot 0,2464 = 1,556 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Инов. № подл.	19756.4	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист 44

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

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{F_e}{[F]} + \frac{M}{[M]_{уст}} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 = 0,15 / 0,2267 + 1,556 \cdot 10^5 / 1,128 \cdot 10^7 + 3,572 \cdot 10^4 / 5,77 \cdot 10^6 + (1,704 \cdot 10^5 / 2,644 \cdot 10^6)^2 = 0,6858$$

0,6858 ≤ 1.0

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

Условия нагружения при испытаниях (см. Эпюры сил и моментов):

Расчётная температура, T: 20 °C
Коэффициент заполнения жидкостью, ξ : 1
Плотность жидкости, $\rho_{ж}$: $1 \cdot 10^3$ кг/м³
Расчётное внутреннее избыточное давление, действующее в элементе над опорой, p: 0,5423 МПа

Изгибающий момент над опорой, M: $1,407 \cdot 10^4$ Н м
Опорное усилие, F: $1,08 \cdot 10^5$ Н
Поперечное усилие в сечении оболочки над опорой, Q: $7,295 \cdot 10^4$ Н

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

Допускаемое наружное давление, [p]: 0,3328 МПа
Допускаемый изгибающий момент, $[M]_{уст}$: $9,348 \cdot 10^6$ Н м
Допускаемая осевое сжимающее усилие, [F]: $1,819 \cdot 10^7$ Н
Допускаемая поперечное усилие, [Q]: $4,215 \cdot 10^6$ Н

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

Опора без подкладного листа

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

Параметр, определяемый расстоянием до днища:

$$\gamma = 2,83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s-c}{D}} = 2,83 \cdot 500 / 2000 \cdot ((16-4) / 2000)^{1/2} = 0,05480$$

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

$$K_{15} = \min \left\{ 1,0; \frac{0,8 \cdot \sqrt{\gamma + 6 \cdot \gamma}}{\delta_1} \right\} = \min \{ 1,0; (0,8 \cdot 0,05480^{1/2} + 6 \cdot 0,05480) / 2,094 \} = 0,2464$$

Подпись и дата		Изн. № дубл.		Взам. инв. №		Подпись и дата		Изн. № подл.	19756.4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
					45				

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

$$K_{12} = \frac{1.15 - 0.1432 \cdot \delta_1}{\sin(0.5 \cdot \delta_1)} = (1.15 - 0.1432 \cdot 2.094) / \sin(0.5 \cdot 2.094) = 0.9816$$

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta_1 = 0.91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s - c)}} = 0.91 \cdot 300 / (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 1.762$$

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

$$K_{10} = \max \left\{ \frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0.25 \right\} = \max \{ e^{-1.762} \cdot \sin(1.762) / 1.762; 0.25 \} = 0.25$$

$$\vartheta_1 = - \frac{0.23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0.23 \cdot 0.3464 \cdot 0.2464 / (0.9816 \cdot 0.25) = (-0.08001)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{\max} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = 4 \cdot 1.407 \cdot 10^4 / (3.142 \cdot 2000^2 \cdot (16 - 4)) = 0.3733 \text{ МПа}$$

$$\vartheta_{21} = - \bar{\sigma}_{\max} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = -0.3733 / (1.05 \cdot 272.7) = (-0.001304)$$

$$\vartheta_{22} = \left(\frac{p \cdot D}{4 \cdot (s - c)} - \bar{\sigma}_{\max} \right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = [0.5423 \cdot 2000 / (4 \cdot (16 - 4)) - 0.3733] / (1 \cdot 272.7) = 0.08149$$

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

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 1.479 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{22} \end{array} \right|$$

$$= 1.498$$

$$K_1 = \min \{ 1.479, 1.498 \} = 1.479$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma_i]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1.479 \cdot 1.05 \cdot 272.7 = 423.4 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0.7 \cdot [\sigma_i]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} \cdot (s - c)}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0.7 \cdot 423.4 \cdot (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} \cdot (16 - 4) / (0.25 \cdot 0.9816) = 2.245 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-1.762} \cdot \cos(1.762)) / 1.762 = 0.586$$

$$K_{14} = \frac{1.45 - 0.43 \cdot \delta_1}{\sin(0.5 \cdot \delta_1)} = (1.45 - 0.43 \cdot 2.094) / \sin(0.5 \cdot 2.094) = 0.6344$$

$$K_{16} = 1 - \frac{0.65}{1 + (6 \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0.65 / (1 + (6 \cdot 0.05480)^2) \cdot [3.142 / (3 \cdot 2.094)]^{1/2} = 0.5852$$

Инв. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right)^2 + \left(1 - \vartheta_2^2\right) \cdot \vartheta_1} = 1,479$ <div>при $\vartheta_2 = \vartheta_{2,2}$</div>
						$= 1,498$
$K_1 = \min\{ 1,479 , 1,498 \} = 1,479$						
Расчёт в точке 2:						
Предельное напряжение изгиба:						
$[\sigma_i]_2 = K_{i1} \cdot K_{i2} \cdot [\sigma] = 1,479 * 1,05 * 272,7 = 423,4 \text{ МПа}$						
Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:						
$[F]_2 = \frac{0,7 \cdot [\sigma_i]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c) \cdot (s - c)}}{K_{i0} \cdot K_{i2}} = 0,7 * 423,4 * (2000 * (16 - 4))^{1/2} * (16 - 4) / (0,25 * 0,9816) = 2,245 \cdot 10^6 \text{ Н}$						
$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-1,762} * \cos(1,762)) / 1,762 = 0,586$						
$K_{14} = \frac{1,45 - 0,43 \cdot \delta_1}{\sin(0,5 \cdot \delta_1)} = (1,45 - 0,43 * 2,094) / \sin(0,5 * 2,094) = 0,6344$						
$K_{16} = 1 - \frac{0,65}{1 + (6 \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0,65 / (1 + (6 * 0,05480)^2) * [3,142 / (3 * 2,094)]^{1/2} = 0,5852$						
Инв. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<div>ЕД-2.00.00.000 РР</div>
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
						46

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0.6 \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{s-c} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1}} = 1 / [1 + 0.6 \cdot (2000 / (16 - 4))^{1/3} \cdot 300 / 2000 \cdot 2.094] = 0.4908$$

$$\vartheta_1 = -\frac{0.53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0.5 \cdot \delta_1)} = -0.53 \cdot 0.586 / [0.6344 \cdot 0.5852 \cdot 0.4908 \cdot \sin(0.5 \cdot 2.094)] = (-1.968)$$

$$\vartheta_{21} = 0$$

$$\vartheta_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s-c) \cdot K_2 \cdot [\sigma]} = 0.5423 \cdot 2000 / (2 \cdot (16 - 4)) \cdot 1 / (1.05 \cdot 272.7) = 0.1578$$

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

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 0.4293 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{22} \end{array} \right|$$

$$= 0.4959$$

$$K_1 = \min\{0.4293, 0.4959\} = 0.4293$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_B = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0.4293 \cdot 1.05 \cdot 272.7 = 122.9 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0.9 \cdot [\sigma]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s-c) \cdot (s-c)}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0.9 \cdot 122.9 \cdot (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} \cdot (16 - 4) / (0.6344 \cdot 0.5852 \cdot 0.4908) = 1.129 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Условие прочности:

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

$$[F] = \min\{[F]_2, [F]_B\} = 1.129 \cdot 10^6$$

$$1.08 \cdot 10^5 \text{ Н} \leq 1.129 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Проверка условия устойчивости

Эффективное осевое усилие от местных мембранных напряжений:

$$F_e = F \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{D}{s-c}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} = 1.08 \cdot 10^5 \cdot 3.142 / 4 \cdot (2000 / (16 - 4))^{1/2} \cdot 0.3464 \cdot 0.2464 = 9.345 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

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

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

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{F_e}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{уст}}} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 = 0 / 0.3328 + 9.345 \cdot 10^4 / 1.819 \cdot 10^7 + 1.407 \cdot 10^4 / 9.348 \cdot 10^6 + (7.295 \cdot 10^4 / 4.215 \cdot 10^6)^2 = 0.006941$$

$$0.006941 \leq 1.0$$

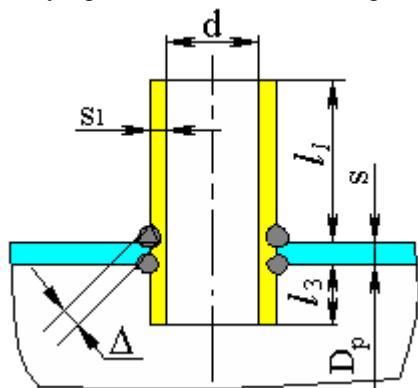
Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Инов. № подл. 19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	ЕД-2.00.00.000 РР					Лист
										47
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

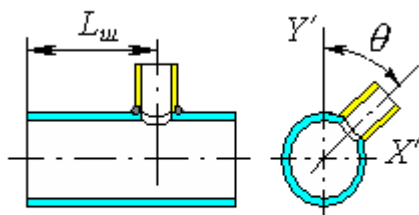
Штуцер МН DN800

Исходные данные

Элемент: Штуцер МН DN800
Условное обозначение (метка) Штуцер МН
Элемент, несущий штуцер: Обечайка цилиндрическая
Тип элемента, несущего штуцер: Обечайка цилиндрическая
Тип штуцера: Проходящий без укрепления

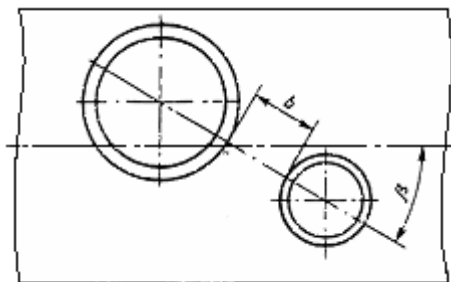


Материал несущего элемента: 09Г2С
Толщина стенки несущего элемента, s: 16 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, с: 4 мм
Материал штуцера: 09Г2С
Внутренний диаметр штуцера, d: 800 мм
Толщина стенки штуцера, s₁: 16 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), с_s: 4 мм
Длина штуцера, l₁: 2045 мм



Смещение штуцера, L_ш: 540 мм
Угол поворота штуцера, θ: 0 °
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

Исх. № подл.	Исх. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата
19756.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
ЕД-2.00.00.000 РР			Лист 48



Название штуцера: Штуцер LT1-LT2 DN100

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 328,5 мм

Угол β : 0°

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$\varphi_1 = 1$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$\varphi = 1$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 2000 \text{ мм}$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 200°C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: $0,34 \text{ МПа}$

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 200^\circ\text{C}$ (расчётные условия):

$[\sigma] = 165 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 200°C :

$E = 1,81 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 200^\circ\text{C}$ (расчётные условия):

$[\sigma]_1 = 165 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 200°C :

$E_1 = 1,81 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = \frac{0,34 \cdot (800 + 2 \cdot 4)}{2 \cdot 165 \cdot 1 - 0,34} = 0,8333 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = \frac{2 \cdot 165 \cdot 1 \cdot (16 - 4)}{800 + 16 + 4} = 4,829 \text{ МПа}$$

$4,829 \text{ МПа} \geq 0,34 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
				49

$$D_p = D = 2000 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 2,063 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 800 + 2 \cdot 4 = 808 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((16 - 4) / 2,063 - 0,8) \cdot (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 1555 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 2045; 1,25 \cdot ((800 + 2 \cdot 4) \cdot (16 - 4))^{1/2} \} = 123,1 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_h}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 165 / 165 \} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((800 + 2 \cdot 4) \cdot (16 - 4 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 154,9 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 184 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 154,9 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 61,97 \text{ мм}$$

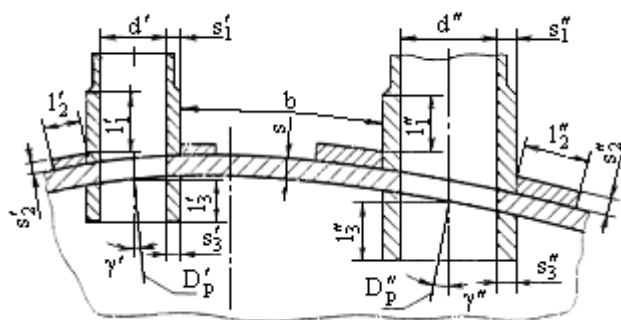
$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0,5 \cdot \frac{d_p - d_{0p}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}}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

$$= \min \{ 1; [1 + (123,1 \cdot (16 - 4) \cdot 1 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (16 - 4 - 0) \cdot 1) / (154,9 \cdot (16 - 4))] / [1 + 0,5 \cdot (808 - 61,97) / 154,9 + 1 \cdot (800 + 2 \cdot 4) / 2000 \cdot 1 / 1 \cdot 123,1 / 154,9] \} = 0,4813$$

$$= 0,4813$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (16 - 4) \cdot 1 \cdot 165 \cdot 0,4813 / [2000 + (16 - 4) \cdot 0,4813] = 0,9501 \text{ МПа}$$

Инов. № подл. 19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР				
									Лист
									50



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер LT1-LT2 DN100 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (2000 * (16 - 4))^{1/2} + (2000 * (16 - 4))^{1/2} = 309,8 \text{ mm}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 0,9501 \text{ МПа}$

$$0,9501 \text{ МПа} \geq 0,34 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0.5(d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0.5 \cdot (808 - 61,97) \cdot 2,063 = 0,7694 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

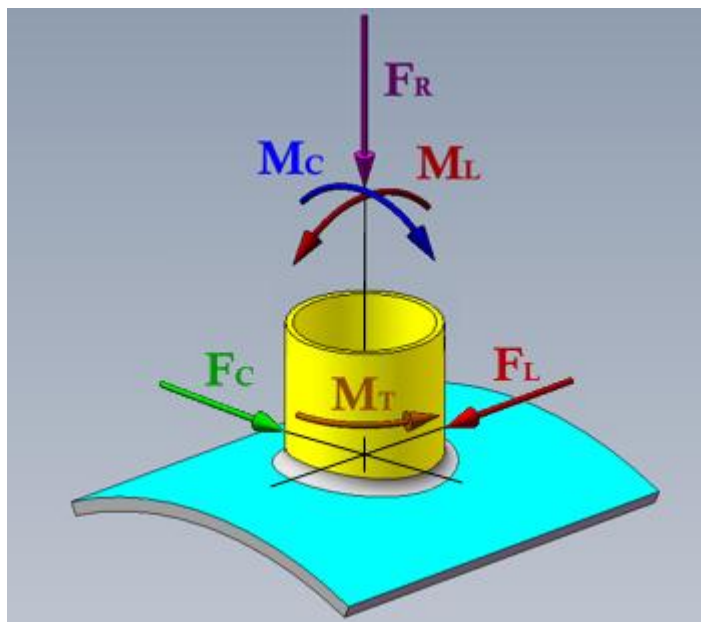
$$= 123,1 * (16 - 0,8333 - 4) * 1 + 0 * 0 * 0 + 0 * (16 - 4 - 0) * 1 + 154,9 * (16 - 2,063 - 4)$$

$$= 0,002914 \text{ m}^2$$

$$A_r = 0,7694 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \leq 0,002914 \text{ m}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

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



Радиальная нагрузка, F_R : 9378 Н

Окружной момент, M_c : 0 Н м

Продольный момент, M_L : 0 Н·м

Крутящий момент, M_T : 0 Н м

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

Радиальная нагрузка, F_R : 9378 Н

Окружной момент, M_C : 0 Н м

Продольный момент, M_L : 0 Н м

Крутящий момент, M_T : 0 Н м

ЕД-2.00.00.000 РР

Лист

51

Сдвиговая нагрузка, F_C : 0 Н

Сдвиговая нагрузка, F_L : 0 Н

Эквивалентная толщина обечайки около штуцера:

$$s_3 = s - c = 16 - 4 = 12 \text{ мм}$$

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c = 2000 + 16 + 4 = 2020 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_s = 800 + 16 + 4 = 820 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} = 820 / (2020 \cdot 12)^{1/2} = 5,267$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 124 \text{ мм}$$

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D_c}{2} = 2020 / 2 = 1010 \text{ мм}$$

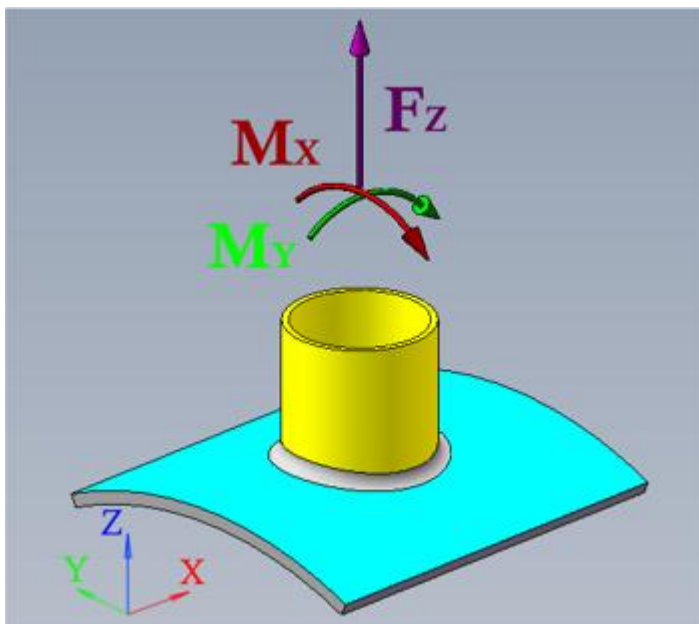
Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |0,34 / 0,9501| = 0,3578$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

$0,3578 \leq 1,0$. Условие прочности выполнено

Расчетная схема по ГОСТ Р 52857.3-2007



Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_z = -F_R = -9378 \text{ Н}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s - c)}} = 820 / (2020 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 5,267$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 5,267 + 0,005196 \cdot 5,267^2 + (-0,001406) \cdot 5,267^3 + 0 \cdot 5,267^4 = 5,553$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 5,267$):

Инов. № подл.	19756.4	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР	Лист	52
Инов. № подл.		Изм.		№ докум.		Дата			
Взам. инв. №		Инов. № дубл.		Инов. № дубл.					
Подпись и дата		Подпись и дата		Подпись и дата					

$$[F_z] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1.81\} = 165 \cdot (16 - 4)^2 \cdot \max\{5,553; 1.81\} = 1,319 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \frac{|F_z|}{[F_z]} = |(-9378) / 1,319 \cdot 10^5| = 0,07107$$

Условие прочности: $\Phi_z \leq 1$

0,07107 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_x = M_c + F_c \cdot l_1 = 0 + 0 \cdot 2215 = 0 \text{ Н м}$$

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_y = M_L + F_L \cdot l_1 = 0 + 0 \cdot 2215 = 0 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 5,267 + 0,1589 \cdot 5,267^2 + (-0,02142) \cdot 5,267^3 + 0,001035 \cdot 5,267^4 = 6,938$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 5,267$):

$$[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 165 \cdot (16 - 4)^2 \cdot 820 / 4 \cdot \max\{6,938; 4.9\} = 3,379 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 29,87$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 5,267$):

$$[M_y] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 165 \cdot (16 - 4)^2 \cdot 820 / 4 \cdot \max\{29,87; 4.9\} = 1,455 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((0 / 3,379 \cdot 10^4)^2 + (0 / 1,455 \cdot 10^5)^2)^{1/2} = 0$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

0 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right|; \left|\Phi_z\right|; \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} = ([\max(|0,3578 / 1 + (-0,07107)|; |(-0,07107)|; |0,3578 / 1 - 0.2 \cdot (-0,07107)|)]^2 + 0^2)^{1/2} = 0,3721$$

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

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

0,3721 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = 0,34 \cdot (800 + 16) / (4 \cdot (16 - 4)) + 4 \cdot (0^2 + 0^2)^{1/2} / (3,142 \cdot (800 + 16)^2 \cdot (16 - 4)) + 0 / (3,142 \cdot (800 + 16) \cdot (16 - 4)) = 5,78 \text{ МПа}$$

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

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

5,78 МПа ≤ 165 МПа. **Условие прочности выполнено**

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0 / 4,829 + (0^2 + 0^2)^{1/2} / 1,004 \cdot 10^6 + |(-9378)| / 4,925 \cdot 10^6 = 0,001904$$

Инов. № подл. 19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	ЕД-2.00.00.000 РР					Лист
										53
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

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

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

0,001904 ≤ 1.0. **Условие устойчивости выполнено**

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения:

Расчётная температура, Т: 200 °С

Расчётное наружное избыточное давление, р: 0,15 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре Т = 200 °С (расчётные условия (наружное давление)):

$[\sigma] = 165$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 200 °С:

$E = 1,81 \cdot 10^5$ МПа

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре Т = 200 °С (расчётные условия (наружное давление)):

$[\sigma]_1 = 165$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 200 °С:

$E_1 = 1,81 \cdot 10^5$ МПа

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_{\text{ш}} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 - p} = 0,15 \cdot (800 + 2 \cdot 4) / (2 \cdot 165 - 0,15) = 0,3674 \text{ мм}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$B_1 = \min \left\{ 1.0, 9.45 \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \sqrt{\frac{d}{100 \cdot (s_1 - c_s)}} \right\} = \min \{ 1.0, 9.45 \cdot 800 / 2215 \cdot (800 / (100 \cdot (16 - 4)))^{1/2} \} = 1$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия устойчивости:

$$[p]_e = \frac{20.8 \cdot 10^{-6} E_1}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_1 - c_s)}{d} \right]^{2.5} = 20.8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,81 \cdot 10^5 \cdot 800 / (2,4 \cdot 1 \cdot 2215) \cdot (100 \cdot (16 - 4) / 800)^{2.5} = 1,561 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия прочности:

$$[p]_{\text{п}} = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + (s_1 - c_s)} = 2 \cdot 165 \cdot (16 - 4) / (800 + 16 - 4) = 4,877 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\text{п}}}{[p]_e} \right)^2}} = 4,877 / (1 + (4,877 / 1,561)^2)^{1/2} = 1,487 \text{ МПа}$$

1,487 МПа ≥ 0,15 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 2000$ мм

Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР
					Лист
					54

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 800 + 2 \cdot 4 = 808 \text{ мм}$$

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1.25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 2045; 1.25 \cdot ((800 + 2 \cdot 4) \cdot (16 - 4))^{1/2} \} = 123,1 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 165 / 165 \} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((800 + 2 \cdot 4) \cdot (16 - 4 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 154,9 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 184 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 154,9 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 61,97 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (123,1 \cdot (16 - 4) \cdot 1 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (0 - 2 \cdot 4) \cdot 1) / (154,9 \cdot (16 - 4))] / [1 + 0,5 \cdot (808 - 61,97) / 154,9 + 1 \cdot (800 + 2 \cdot 4) / 2000 \cdot 123,1 / 154,9] \} = 0,4813$$

$$= 0,4813$$

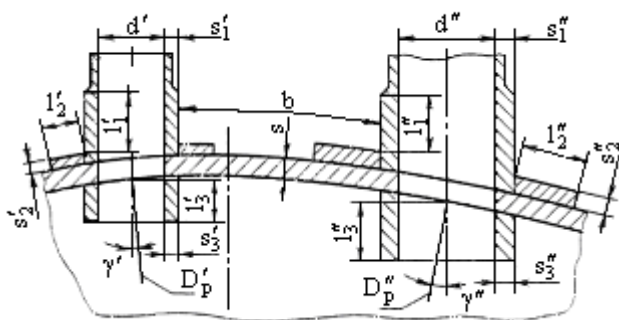
$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (16 - 4) \cdot 165 \cdot 0,4813 / [2000 + (16 - 4) \cdot 0,4813] = 0,9501 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление:

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_p}{[p]_E} \right)^2}} = 0,9501 / (1 + (0,9501 / 0,2282)^2)^{1/2} = 0,2219 \text{ МПа}$$

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

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. №	Подпись и дата	Инов. № подл.	19756.4	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР	Лист	55
---------------	----------------	---------------	----------------	--------------	---------	----------------	---------------	---------	------	------	----------	-------	------	-------------------	------	----



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер LT1-LT2 DN100 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (2000 * (16 - 4))^{1/2} + (2000 * (16 - 4))^{1/2} = 309,8 \text{ mm}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 0,2219 \text{ МПа}$

$$0,2219 \text{ МПа} \geq 0,15 \text{ МПа}$$

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: 0,5226 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 при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (условия гидроиспытаний):

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

Модуль продольной упругости при температуре 20 °С:

$$E_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_1 - p} = 0,5226 \cdot (800 + 2 \cdot 4) / (2 \cdot 272,7 \cdot 1 - 0,5226) = 0,7748 \text{ mm}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 * 272,7 * 1 * (16 - 4) / (800 + 16 + 4) = 7,982 \text{ МПа}$$

$$7,982 \text{ МПа} \geq 0,5226 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 2000 \text{ mm}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$S_p = 1,918 \text{ MM}$$

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p align="center">Свойства материала элемента, несущего штуцер</p> <p>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 20 °С (условия гидротестирования):</p> <p>$[\sigma]^{20} = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 300 / 1,1 = 272,7 \text{ МПа}$</p> <p>Модуль продольной упругости при температуре 20 °С:</p> <p>$E = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$</p>
					<p align="center">Свойства материала штуцера</p> <p>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 20 °С (условия гидротестирования):</p> <p>$[\sigma]^{20}_1 = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 300 / 1,1 = 272,7 \text{ МПа}$</p> <p>Модуль продольной упругости при температуре 20 °С:</p> <p>$E_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$</p> <p>Расчётная толщина стенки штуцера:</p> $s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \phi_1 - p} = 0,5226 \cdot (800 + 2 \cdot 4) / (2 \cdot 272,7 \cdot 1 - 0,5226) = 0,7748 \text{ мм}$ <p>Допускаемое давление для патрубка штуцера:</p> $[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \phi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 272,7 \cdot 1 \cdot (16 - 4) / (800 + 16 + 4) = 7,982 \text{ МПа}$ <p>7,982 МПа ≥ 0,5226 МПа</p> <p>Заключение: Условие прочности и устойчивости выполнено</p> <p>Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:</p> <p>$D_p = D = 2000 \text{ мм}$</p> <p>Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:</p> <p>$s_p = 1,918 \text{ мм}$</p>
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<div> <div> <div>Изм.</div> <div>Лист</div> <div>№ докум.</div> <div>Подп.</div> <div>Дата</div> </div> <div> <div>ЕД-2.00.00.000 РР</div> <div>56</div> </div> </div>

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 800 + 2 \cdot 4 = 808 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s-c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = 2 \cdot ((16-4)/1,918 - 0,8) \cdot (2000 \cdot (16-4))^{1/2} = 1691 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d+2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 2045; 1,25 \cdot ((800+2 \cdot 4) \cdot (16-4))^{1/2} \} = 123,1 \text{ мм}$$

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:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d+2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((800+2 \cdot 4) \cdot (16-4-0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = (2000 \cdot (16-4))^{1/2} = 154,9 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 184 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 154,9 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

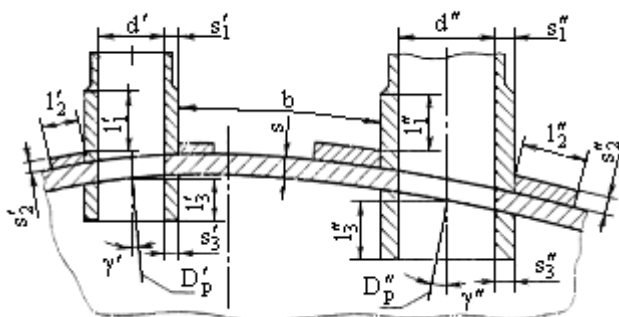
$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = 0,4 \cdot (2000 \cdot (16-4))^{1/2} = 61,97 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (123,1 \cdot (16-4) \cdot 1 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (16-4-0) \cdot 1) / (154,9 \cdot (16-4))] / [1 + 0,5 \cdot (808 - 61,97) / 154,9 + 1 \cdot (800 + 2 \cdot 4) / 2000 \cdot 1 / 1 \cdot 123,1 / 154,9] \} = 0,4813$$

$$= 0,4813$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s-c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s-c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (16-4) \cdot 1 \cdot 272,7 \cdot 0,4813 / [2000 + (16-4) \cdot 0,4813] = 1,57 \text{ МПа}$$



Подпись и дата

Инов. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инов. № подл.

19756.4

ЕД-2.00.00.000 РР

Лист

57

Изм. Лист № докум. Подп. Дата

Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер LT1-LT2 DN100 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} + (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 309,8 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 1,57 \text{ МПа}$

$1,57 \text{ МПа} \geq 0,5226 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0.5 \{d_p - d_{op}\} \cdot s_p = 0.5 \cdot (808 - 61,97) \cdot 1,918 = 0,7154 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

$$A_a = 1_p \cdot \{s_1 - s_p - c_s\} \cdot \chi_1 + 1_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + 1_{3p} \cdot \{s_3 - c_s - c_{s1}\} \cdot \chi_3 + 1_p \cdot \{s - s_p - c\}$$

$$= 123,1 \cdot (16 - 0,7748 - 4) \cdot 1 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (16 - 4 - 0) \cdot 1 + 154,9 \cdot (16 - 1,918 - 4)$$

$$= 0,002944 \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,7154 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \leq 0,002944 \text{ м}^2$$

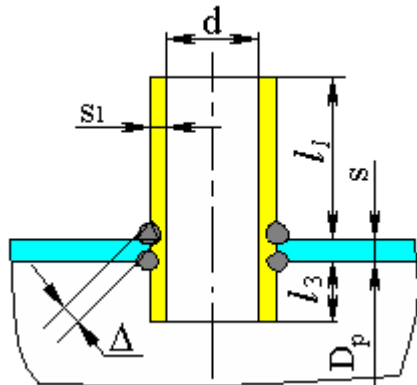
Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
				58

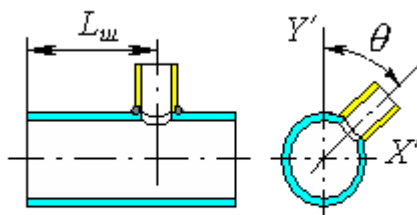
Штуцер А DN700

Исходные данные

Элемент: Штуцер А DN700
 Условное обозначение (метка) Штуцер А
 Элемент, несущий штуцер: Обечайка цилиндрическая
 Тип элемента, несущего штуцер: Обечайка цилиндрическая
 Тип штуцера: Проходящий без укрепления

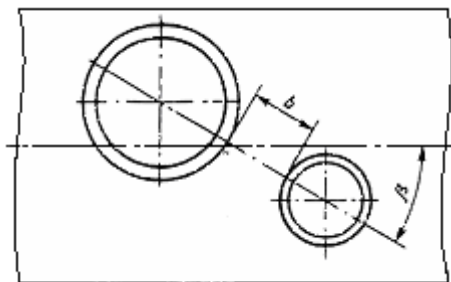


Материал несущего элемента: 09Г2С
 Толщина стенки несущего элемента, s : 16 мм
 Сумма прибавок к стенке несущего элемента, c : 4 мм
 Материал штуцера: 09Г2С
 Внутренний диаметр штуцера, d : 700 мм
 Толщина стенки штуцера, s_1 : 16 мм
 Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c_s : 4 мм
 Длина штуцера, l_1 : 2050 мм



Смещение штуцера, $L_{ш}$: 2840 мм
 Угол поворота штуцера, θ : 0 °
 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

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
				59



Название штуцера: - Штуцер LT1 DN100

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 378,5 мм

Угол β : 180 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$\varphi_1 = 1$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$\varphi = 1$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 2000 \text{ мм}$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 200 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,34 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 200 °C (расчётные условия):

$[\sigma] = 165 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 200 °C:

$E = 1,81 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 200 °C (расчётные условия):

$[\sigma]_1 = 165 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 200 °C:

$E_1 = 1,81 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,34 \cdot (700 + 2 \cdot 4) / (2 \cdot 165 \cdot 1 - 0,34) = 0,7302 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

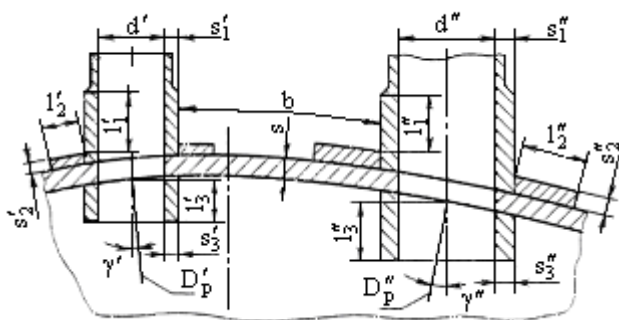
$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 165 \cdot 1 \cdot (16 - 4) / (700 + 16 + 4) = 5,5 \text{ МПа}$$

5,5 МПа \geq 0,34 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
				60



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие - Штуцер LT1 DN100 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} + (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 309,8 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 1,028 \text{ МПа}$

$1,028 \text{ МПа} \geq 0,34 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (708 - 61,97) \cdot 2,063 = 0,6663 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

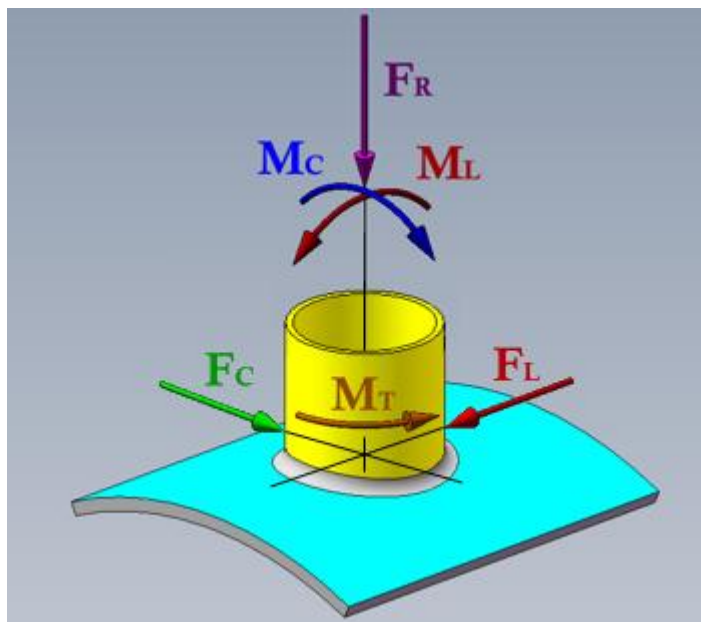
$$= 115,2 \cdot (16 - 0,7302 - 4) \cdot 1 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (16 - 4 - 0) \cdot 1 + 154,9 \cdot (16 - 2,063 - 4)$$

$$= 0,002838 \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,6663 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \leq 0,002838 \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

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



Радиальная нагрузка, F_R : 8110 Н

Окружной момент, M_C : 0 Н м

Продольный момент, M_L : 0 Н м

Крутящий момент, M_T : 0 Н м

Инов. № подл.	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
ЕД-2.00.00.000 РР			
Лист 62			

Сдвиговая нагрузка, F_C : 0 Н

Сдвиговая нагрузка, F_L : 0 Н

Эквивалентная толщина обечайки около штуцера:

$$s_3 = s - c = 16 - 4 = 12 \text{ мм}$$

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c = 2000 + 16 + 4 = 2020 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_s = 700 + 16 + 4 = 720 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} = 720 / (2020 \cdot 12)^{1/2} = 4,625$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 174 \text{ мм}$$

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D_c}{2} = 2020 / 2 = 1010 \text{ мм}$$

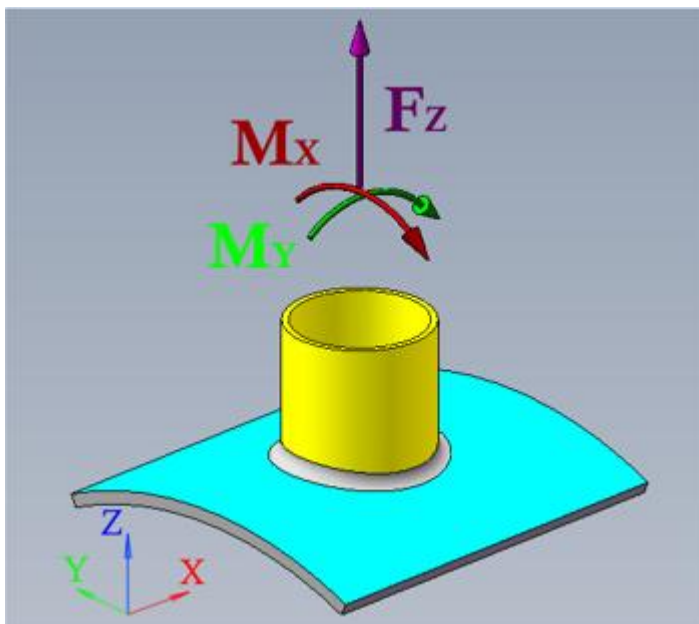
Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |0,34 / 1,028| = 0,3308$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

$0,3308 \leq 1,0$. Условие прочности выполнено

Расчетная схема по ГОСТ Р 52857.3-2007



Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_z = -F_R = -8110 \quad = (-8110) \text{ Н}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s - c)}} = 720 / (2020 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 4,625$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 4,625 + 0,005196 \cdot 4,625^2 + (-0,001406) \cdot 4,625^3 + 0 \cdot 4,625^4 = 4,975$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 4,625$):

Инов. № подл.	19756.4	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР	Лист	63
Подпись и дата		Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					

$$[F_x] = [\sigma] \cdot (s-c)^2 \cdot \max\{C_1; 1.81\} = 165 \cdot (16-4)^2 \cdot \max\{4,975; 1.81\} = 1,182 \cdot 10^5 \text{ H}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_x = \left| \frac{F_x}{F_y} \right| = |(-8110) / 1,182 \cdot 10^5| = 0,06860$$

Условие прочности: $\Phi_x \leq 1$

$0,06860 \leq 1.0$. Условие прочности выполнено

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_x = M_c + F_c \cdot l_1 = 0 + 0 \cdot 2220 = 0 \text{ H m}$$

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_y = M_L + F_L \cdot l_1 = 0 + 0 \cdot 2220 = 0 \text{ H}_M$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 4,625 + 0,1589 \cdot 4,625^2 + (-0,02142) \cdot 4,625^3 + 0,001035 \cdot 4,625^4 = 6,575$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 4,625$):

$$[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 165 \cdot (16 - 4)^2 \cdot 720 / 4 \cdot \max\{6,575; 4.9\} = 2,812 \cdot 10^4 \text{ H M}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 26,94$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 4,625$):

$$[M_y] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 165 \cdot (16 - 4)^2 \cdot 720 / 4 \cdot \max\{26.94; 4.9\} = 1,152 \cdot 10^5 \text{ H m}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((0/2,812 \cdot 10^4)^2 + (0/1,152 \cdot 10^5)^2)^{1/2} = 0$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

$0 \leq 1.0$. Условие прочности выполнено

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right|, \left|\Phi_z\right|, \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} = \left(\max(|0,3308/1 + (-0,06860)|; |(-0,06860)|; |0,3308/1 - 0.2 * (-0,06860)|)\right)^2 + 0^2)^{1/2} = 0,3445$$

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

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

$0,3445 \leq 1.0$. Условие прочности выполнено

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = 0,34 \cdot (700 + 16) / (4 \cdot (16 - 4)) + 4 \cdot (0^2 + 0^2)^{1/2} / (3,142 \cdot (700 + 16)^2 \cdot (16 - 4)) + 0 / (3,142 \cdot (700 + 16) \cdot (16 - 4)) = 5,072 \text{ МПа}$$

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

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

$$5,072 \text{ МПа} \leq 165 \text{ МПа. Условие прочности выполнено}$$

$$\frac{|p|}{|p|} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{|M|} + \frac{|F_z|}{|F|} = 0/5,5 + (0^2 + 0^2)^{1/2} / 7,721 \cdot 10^5 + |(-8110)| / 4,248 \cdot 10^6 = 0,001909$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 700 + 2 \cdot 4 = 708 \text{ мм}$$

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1.25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 2050; 1.25 \cdot ((700 + 2 \cdot 4) \cdot (16 - 4))^{1/2} \} = 115,2 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_h}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 165 / 165 \} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((700 + 2 \cdot 4) \cdot (16 - 4 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 154,9 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 234 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 154,9 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 61,97 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (115,2 \cdot (16 - 4) \cdot 1 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (0 - 2 \cdot 4) \cdot 1) / (154,9 \cdot (16 - 4))] / [1 + 0,5 \cdot (708 - 61,97) / 154,9 + 1 \cdot (700 + 2 \cdot 4) / 2000 \cdot 115,2 / 154,9] \} = 0,5208$$

$$= 0,5208$$

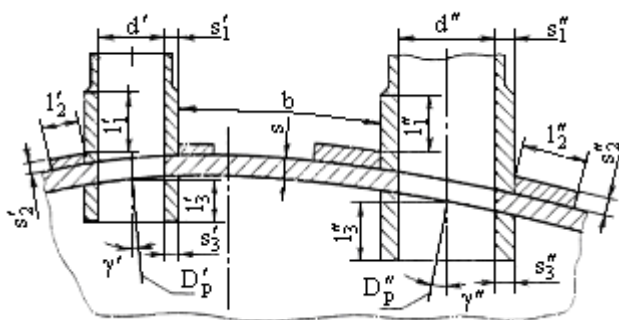
$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (16 - 4) \cdot 165 \cdot 0,5208 / [2000 + (16 - 4) \cdot 0,5208] = 1,028 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление:

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_p}{[p]_E} \right)^2}} = 1,028 / (1 + (1,028 / 0,2282)^2)^{1/2} = 0,2228 \text{ МПа}$$

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

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. №	Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № подл.	19756.4	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР	Лист	66
---------------	----------------	---------------	----------------	--------------	---------	---------------	----------------	---------------	---------	------	------	----------	-------	------	-------------------	------	----



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие - Штуцер LT1 DN100 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} + (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 309,8 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 0,2228 \text{ МПа}$

$0,2228 \text{ МПа} \geq 0,15 \text{ МПа}$

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: 0,5226 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:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \phi_1 - p} = 0,5226 \cdot (700 + 2 \cdot 4) / (2 \cdot 272,7 \cdot 1 - 0,5226) = 0,6789 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \phi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 272,7 \cdot 1 \cdot (16 - 4) / (700 + 16 + 4) = 9,091 \text{ МПа}$$

$$9,091 \text{ МПа} \geq 0,5226 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 2000 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 1,918 \text{ мм}$$

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

Инов. № подл. 19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	ЕД-2.00.00.000 РР					Лист 67
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 700 + 2 \cdot 4 = 708 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s-c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = 2 \cdot ((16-4) / 1,918 - 0,8) \cdot (2000 \cdot (16-4))^{1/2} = 1691 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d+2 \cdot c_s) \cdot (s_1-c_s)} \right\} = \min \{ 2050; 1,25 \cdot ((700+2 \cdot 4) \cdot (16-4))^{1/2} \} = 115,2 \text{ мм}$$

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:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d+2 \cdot c_s) \cdot (s_3-c_s-c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((700+2 \cdot 4) \cdot (16-4-0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = (2000 \cdot (16-4))^{1/2} = 154,9 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 234 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 154,9 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

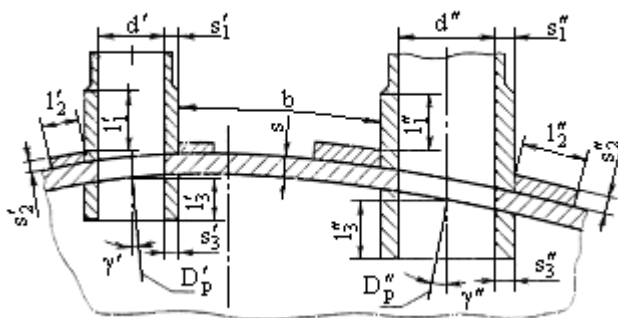
$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = 0,4 \cdot (2000 \cdot (16-4))^{1/2} = 61,97 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (115,2 \cdot (16-4) \cdot 1 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (16-4-0) \cdot 1) / (154,9 \cdot (16-4))] / [1 + 0,5 \cdot (708-61,97) / 154,9 + 1 \cdot (700+2 \cdot 4) / 2000 \cdot 1 / 1 \cdot 115,2 / 154,9] \} = 0,5208$$

$$= 0,5208$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s-c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s-c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (16-4) \cdot 1 \cdot 272,7 \cdot 0,5208 / [2000 + (16-4) \cdot 0,5208] = 1,699 \text{ МПа}$$



Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. №	Подпись и дата
19756.4						
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР	
					Лист 68	

Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие - Штуцер LT1 DN100 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} + (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 309,8 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 1,699 \text{ МПа}$

$1,699 \text{ МПа} \geq 0,5226 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0.5 \{d_p - d_{op}\} \cdot s_p = 0.5 \cdot (708 - 61,97) \cdot 1,918 = 0,6195 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

$$A_a = 1_p \cdot \{s_1 - s_p - c_s\} \cdot \chi_1 + 1_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + 1_{3p} \cdot \{s_3 - c_s - c_{s1}\} \cdot \chi_3 + 1_p \cdot \{s - s_p - c\}$$

$$= 115,2 \cdot (16 - 0,6789 - 4) \cdot 1 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (16 - 4 - 0) \cdot 1 + 154,9 \cdot (16 - 1,918 - 4)$$

$$= 0,002866 \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,6195 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \leq 0,002866 \text{ м}^2$$

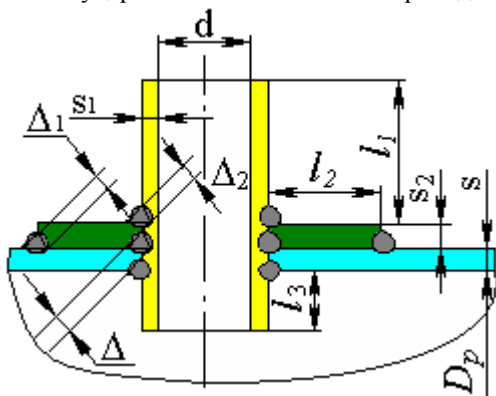
Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
				69

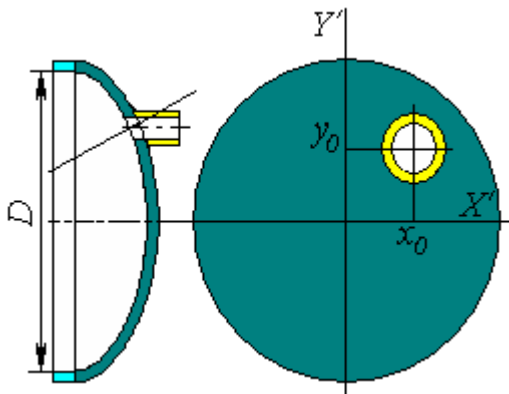
Штуцер I1 DN150

Исходные данные

Элемент: Штуцер I1 DN150
Условное обозначение (метка) Штуцер I1
Элемент, несущий штуцер: Днище эллиптическое (левое)
Тип элемента, несущего штуцер: Днище эллиптическое
Тип штуцера: Проходящий с накладным кольцом



Материал несущего элемента: 09Г2С
Толщина стенки несущего элемента, s: 16 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, с: 7,2 мм
Материал штуцера: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281
Внутренний диаметр штуцера, d: 144 мм
Толщина стенки штуцера, s₁: 12 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), с_s: 5,8 мм
Длина штуцера, l₁: 120 мм



Смещение штуцера, X₀: 0 мм
Смещение штуцера, Y₀: 600 мм
Смещение штуцера, R_ш: 600 мм
Угол поворота штуцера, θ: 0 °
Полученный угол наклона штуцера, γ: (-20,39) °
Длина внутр. части штуцера, l₃: 0 мм

Исх. № подл.	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР	Лист
19756.4							70

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 : 12 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:

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{ш}^2} = 2000^2 / (2 \cdot 500) \cdot (1 - 4 \cdot (2000^2 - 4 \cdot 500^2) \cdot 600^2 / 2000^4)^{1/2} = 3418 \text{ мм}$$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T : 200 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, p : 0,342 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 200$ °С (расчётные условия):

$[\sigma] = 165$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 200 °С:

$E = 1,81 \cdot 10^5$ МПа

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 200$ °С (расчётные условия):

$[\sigma]_1 = 148$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 200 °С:

$E_1 = 1,81 \cdot 10^5$ МПа

Свойства материала кольца

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 200$ °С (расчётные условия):

$[\sigma]_2 = 165$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 200 °С:

$E_2 = 1,81 \cdot 10^5$ МПа

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,342 \cdot (144 + 2 \cdot 5,8) / (2 \cdot 148 \cdot 1 - 0,342) = 0,18 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 148 \cdot 1 \cdot (12 - 5,8) / (144 + 12 + 5,8) = 11,34 \text{ МПа}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
				71

11,34 МПа \geq 0,342 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища:

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{ш}^2} = 2000^2 / (2 \cdot 500) \cdot (1 - 4 \cdot (2000^2 - 4 \cdot 500^2) \cdot 600^2 / 2000^4)^{1/2} = 3418 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 1,772 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия (смещённый штуцер на эллиптическом днище):

$$d_p = \frac{d + 2 \cdot c_s}{\sqrt{1 - \left(\frac{2 \cdot R_{ш}}{D_p} \right)^2}} = (144 + 2 \cdot 5,8) / [1 - (2 \cdot 600 / 3418)^2]^{1/2} = 166,2 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((16 - 7,2) / 1,772 - 0,8) \cdot (3418 \cdot (16 - 7,2))^{1/2} = 1445 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 120; 1,25 \cdot ((144 + 2 \cdot 5,8) \cdot (12 - 5,8))^{1/2} \} = 38,82 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_h}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 148 / 165 \} = 0,897$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3418 \cdot (16 - 7,2))^{1/2} = 173,4 \text{ мм}$$

Расчётная ширина кольца:

$$l_{2p} = \min \{ l_2; \sqrt{D_p \cdot (s_2 + s - c)} \} = \min \{ 80; (3418 \cdot (12 + 16 - 7,2))^{1/2} \} = 80 \text{ мм}$$

Для накладного кольца:

$$\chi_2 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 165 / 165 \} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((144 + 2 \cdot 5,8) \cdot (12 - 5,8 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 173,4 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (3418 \cdot (16 - 7,2))^{1/2} = 69,37 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (38,82 \cdot (12 - 5,8) \cdot 0,897 + 80 \cdot 12 \cdot 1 + 0 \cdot (12 - 5,8 - 0) \cdot 0,897) / (173,4 \cdot (16 - 7,2))] / [1 + 0,5 \cdot (166,2 - 69,37) / 173,4 + 2 \cdot (144 + 2 \cdot 5,8) / 3418 \cdot 1 / 1 \cdot 38,82 / 173,4] \} = 1,362$$

$$= 1$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Инов. № подл.	19756.4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР			Лист
								72

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 2 \cdot (16 - 7,2) \cdot 1 \cdot 165 \cdot 1 / [3418 + (16 - 7,2) \cdot 1] = 1,695 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление $[p] = 1,695 \text{ МПа}$

$$1,695 \text{ МПа} \geq 0,342 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0.5(d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0.5 \cdot (166,2 - 69,37) \cdot 1,772 = 0,8577 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

$$= 38,82 * (12 - 0,18 - 5,8) * 0,897 + 80 * 12 * 1 + 0 * (12 - 5,8 - 0) * 0,897 + 173,4 * (16 - 1,772 - 7,2)$$

$$= 0,002388 \text{ m}^2$$

$$A_r = 0,8577 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \leq 0,002388 \text{ m}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

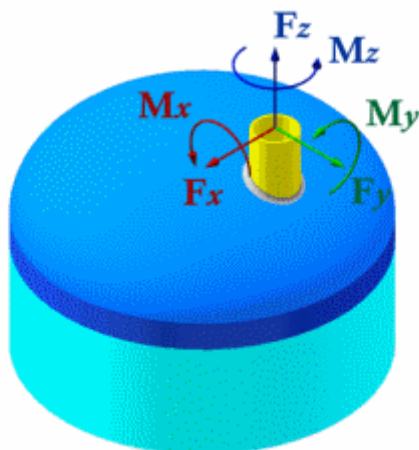
Расчет на прочность по МКЭ в рабочих условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, Т: 200 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,34 МПа

Нагрузки на штуцер (в системе координат аппарата):



F_x, H	F_y, H	F_z, H	M_x, H_M	M_y, H_M	M_z, H_M
3400	3400	4800	2400	2400	3400

Допускаемые напряжения в соответствии с ГОСТ Р 52857.1-2007

Уровень разбивки - 1

Коэффициент запаса, учитывающий уровень разбивки: $K_m = 1,3$

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Номинальные допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре 200 °С:

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Лист
					ЕД-2.00.00.000 РР	73

Изм. инв. № 19756.4

Подпись и дата

Взам. инв. №

Инв. № дубл.

Подпись и дата

Допускаемые напряжения в соответствии с ГОСТ Р 52857.1-2007

Уровень разбивки - 1

Коэффициент запаса, учитывающий уровень разбивки: $K_m = 1,3$

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Номинальные допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре 200 °С:

$F_x, Н$	$F_y, Н$	$F_z, Н$	$M_x, Н\cdot м$	$M_y, Н\cdot м$	$M_z, Н\cdot м$
3400	3400	4800	2400	2400	3400



$$[s] = \frac{[\sigma]_s}{K_m} = 165 / 1,3 = 126,9 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 200 °С:

$$E = 1,81 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала итуцера

Номинальные допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре 200 °С:

$$[s]_1 = \frac{[\sigma]_s}{K_m} = 148 / 1,3 = 113,8 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 200 °С:

$$E_1 = 1,81 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

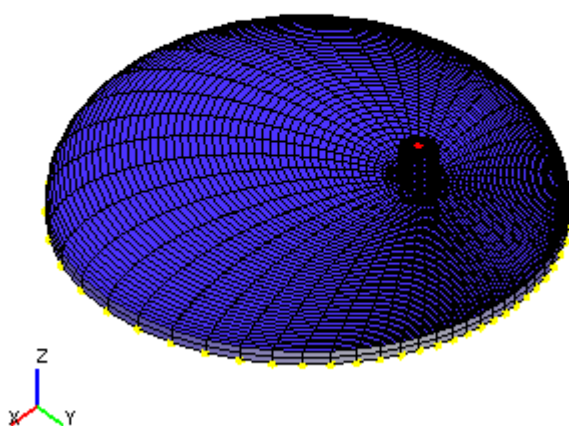


Рис. 1. Конечно-элементная модель узла врезки

Инв. № подл. 19756.4	Подпись и дата				Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
									74

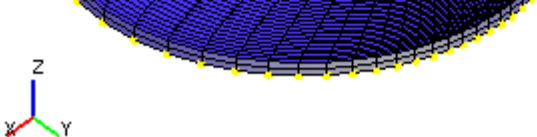


Рис. 1. Конечно-элементная модель узла врезки

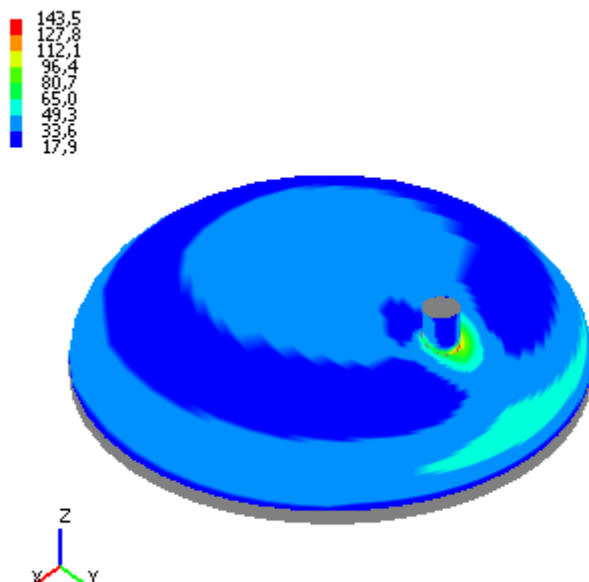


Рис. 2. Эквивалентные мембранные напряжения от совместного действия сил и давления, МПа.
Заключение:

Для несущего элемента $\sigma_{m1\max} = 106,3 \text{ МПа} \leq 1,5[s] = 190,4 \text{ МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Для штуцера $\sigma_{m1\max} = 143,5 \text{ МПа} \leq 1,5[s]_1 = 170,8 \text{ МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

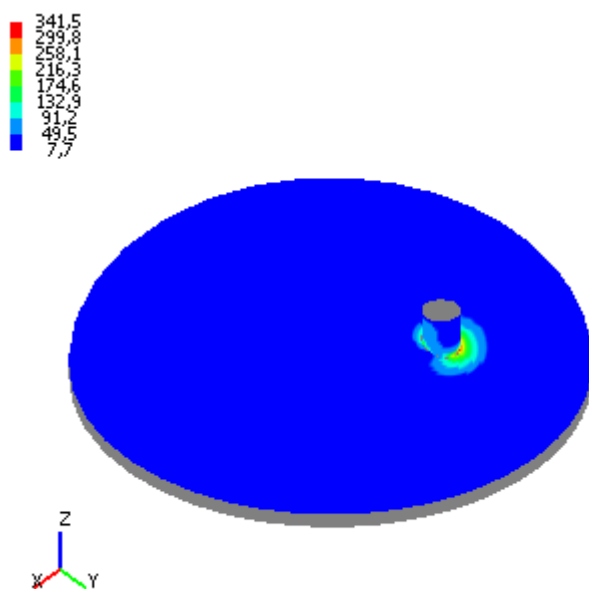


Рис. 3. Общие (мембранные и изгибные) напряжения на внешней поверхности, МПа.
Заключение:

Для несущего элемента $\sigma_{mb\max} = 261,3 \text{ МПа} \leq 3[s] = 380,8 \text{ МПа}$.

Инов. № подл. 19756.4	Подпись и дата					Инов. № дубл.	Подпись и дата				
	Взам. инв. №						Взам. инв. №				
	Подпись и дата						Подпись и дата				
	Инов. № подл.						Инов. № подл.				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР						
					Лист					75	

<

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Для штуцера $\sigma_{mb \max} = 341,5 \text{ МПа} \leq 3[s]_1 = 341,5 \text{ МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

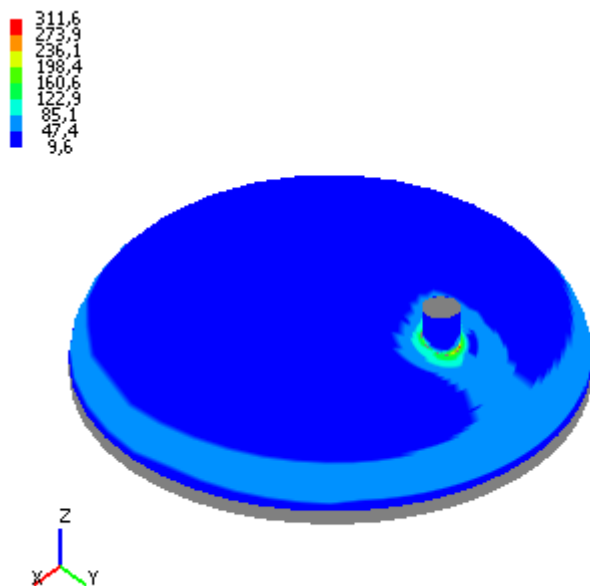


Рис. 4. Общие (мембранные и изгибные) напряжения на внутренней поверхности, МПа.

Заключение:

Для несущего элемента $\sigma_{mb \max} = 178,2 \text{ МПа} \leq 3[s] = 380,8 \text{ МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Для штуцера $\sigma_{mb \max} = 311,6 \text{ МПа} \leq 3[s]_1 = 341,5 \text{ МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Общее заключение: Условия прочности выполнены.

Допускаемые индивидуальные нагрузки на штуцер при отсутствии действия остальных, включая давление *

$F_x, \text{ Н}$	$F_y, \text{ Н}$	$F_z, \text{ Н}$	$M_x, \text{ Н м}$	$M_y, \text{ Н м}$	$M_z, \text{ Н м}$	$p, \text{ МПа}$
$1,362 \cdot 10^5$	$4,21 \cdot 10^4$	$3,891 \cdot 10^4$	1631	5025	6518	0,9767

* При превышении любого компонента требуется усиление врезки, либо уменьшение нагрузки

Допускаемые нагрузки на штуцер при расчетном давлении **

$F_x, \text{ Н}$	$F_y, \text{ Н}$	$F_z, \text{ Н}$	$M_x, \text{ Н м}$	$M_y, \text{ Н м}$	$M_z, \text{ Н м}$	$p, \text{ МПа}$
$2,22 \cdot 10^4$	6862	6341	265,8	818,9	1062	0,34

** При превышении одного или нескольких компонентов необходим дополнительный расчёт на прочность

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				

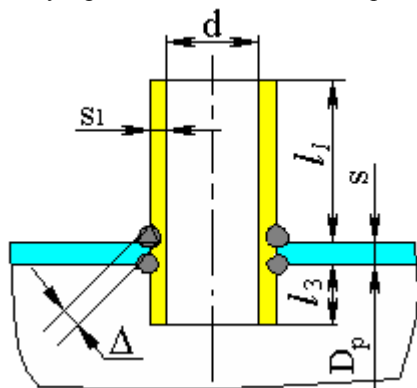
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ЕД-2.00.00.000 РР

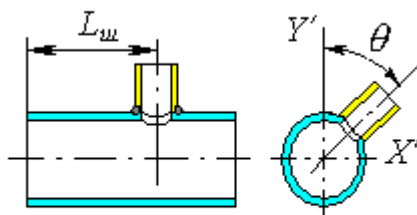
Штуцер LT1-LT2 DN100

Исходные данные

Элемент: Штуцер LT1-LT2 DN100
Условное обозначение (метка) Штуцер LT2
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 : 16 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, c : 4 мм
Материал штуцера: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281
Внутренний диаметр штуцера, d : 97 мм
Толщина стенки штуцера, s_1 : 12 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c_s : 5,8 мм
Длина штуцера, l_1 : 1610 мм



Смещение штуцера, $L_{ш}$: 1345 мм
Угол поворота штуцера, θ : 0 °
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

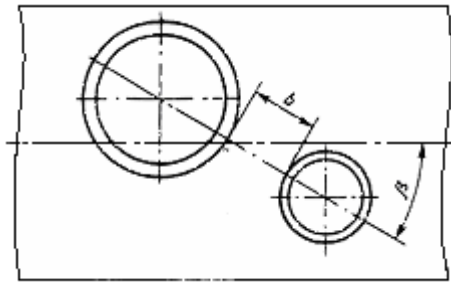
Инов. № подл.
19756.4

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

ЕД-2.00.00.000 РР

Лист

77



Название штуцера: Штуцер TW DN50

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 250,5 мм

Угол β : 0 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$\varphi_1 = 1$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$\varphi = 1$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 2000 \text{ мм}$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 200 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,34 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 200 °C (расчётные условия):

$[\sigma] = 165 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 200 °C:

$E = 1,81 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 200 °C (расчётные условия):

$[\sigma]_1 = 148 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 200 °C:

$E_1 = 1,81 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,34 \cdot (97 + 2 \cdot 5,8) / (2 \cdot 148 \cdot 1 - 0,34) = 0,1249 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

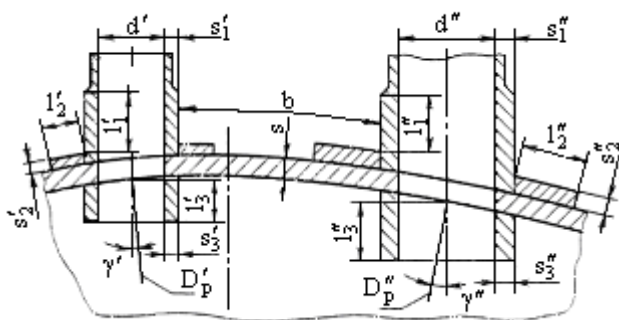
$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 148 \cdot 1 \cdot (12 - 5,8) / (97 + 12 + 5,8) = 15,99 \text{ МПа}$$

15,99 МПа \geq 0,34 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
				78



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

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} + (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 309,8 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, требуется дополнительный расчёт укреплений.

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

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

$$= \min \{ 1; (1 + [(32,44 \cdot (12 - 5,8) \cdot 0,897 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (12 - 5,8 - 0) \cdot 0,897 + 20,37 \cdot (10 - 5,5) \cdot 0,897 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 5,5 - 0) \cdot 0,897) / (250,5 \cdot (16 - 4))] / (1 \cdot (0,8 + (108,6 + 59) / (2 \cdot 250,5)) + 1 \cdot [(97 + 2 \cdot 5,8) / 2000 \cdot 1 / 1 \cdot 32,44 / 250,5 + [(48 + 2 \cdot 5,5) / 2000 \cdot 1 / 1 \cdot 20,37 / 250,5])]) \} = 0,9505$$

$$= 0,9505$$

$$[p]_{\Sigma} = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{0,5 \cdot (D_p' + D_p'') + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2 \cdot 1 \cdot (16 - 4) \cdot 1 \cdot 165 / [0,5 \cdot (2000 + 2000) + (16 - 4) \cdot 0,9505] \cdot 0,9505 = 1,871 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление $[p] = \min \{ 1,859; 1,871 \} \text{ МПа}$

$$1,859 \text{ МПа} \geq 0,34 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (108,6 - 61,97) \cdot 2,063 = 0,4809 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

$$= 32,44 \cdot (12 - 0,1249 - 5,8) \cdot 0,897 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (12 - 5,8 - 0) \cdot 0,897 + 154,9 \cdot (16 - 2,063 - 4)$$

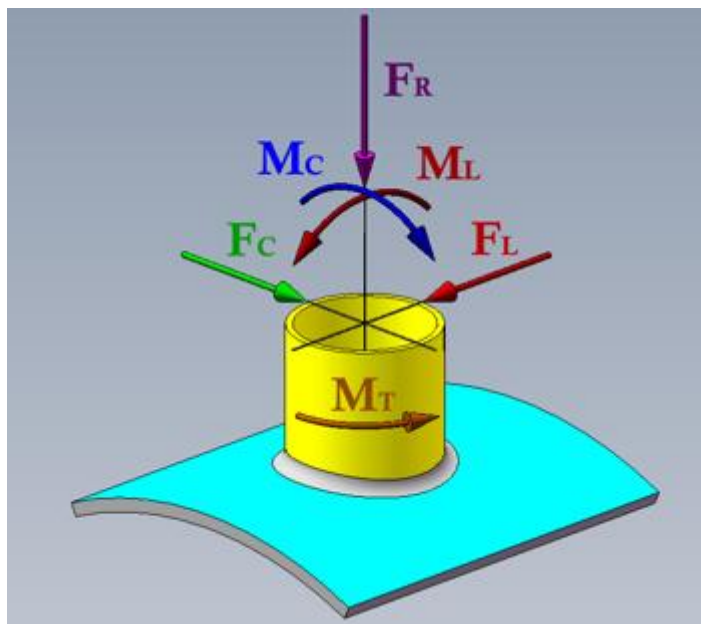
$$= 0,001716 \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,4809 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \leq 0,001716 \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	19756.4	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист 80

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



Радиальная нагрузка, F_R : 651,5 Н

Окружной момент, M_C : 0 Н м

Продольный момент, M_L : 0 Н м

Крутящий момент, M_T : 0 Н м

Сдвиговая нагрузка, F_C : 0 Н

Сдвиговая нагрузка, F_L : 0 Н

Эквивалентная толщина обечайки около штуцера:

$$s_3 = s - c = 16 - 4 = 12 \text{ мм}$$

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c = 2000 + 16 + 4 = 2020 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_s = 97 + 12 + 5,8 = 114,8 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} = 114,8 / (2020 \cdot 12)^{1/2} = 0,7374$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 250,5 \text{ мм}$$

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D_c}{2} = 2020 / 2 = 1010 \text{ мм}$$

Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |0,34 / 1,859| = 0,1829$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

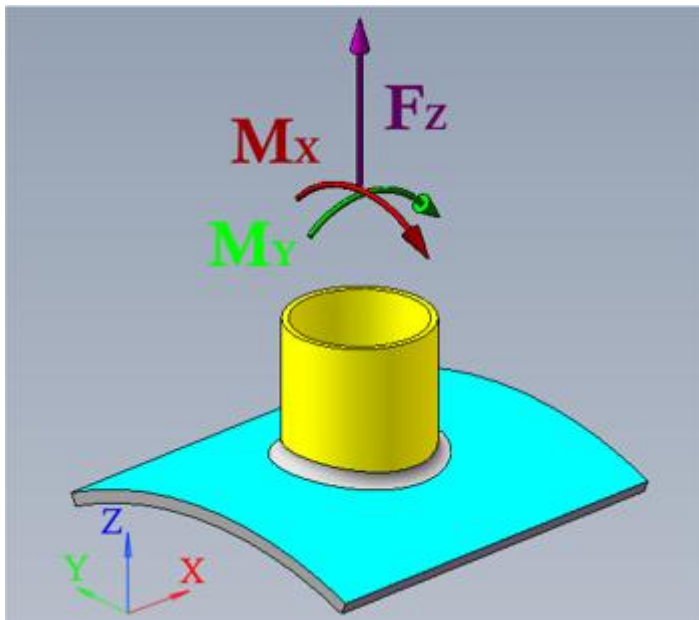
0,1829 ≤ 1.0. Условие прочности выполнено

Расчетная схема по ГОСТ Р 52857.3-2007

Инов. № подл.	Подпись и дата
19756.4	
Инов. № дубл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Подпись и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ЕД-2.00.00.000 РР



Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_z = -F_R = -651,5 \quad = (-651,5) \text{ Н}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s-c)}} = 114,8 / (2020 \cdot (16-4))^{1/2} = 0,7374$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 0,7374 + 0,005196 \cdot 0,7374^2 + (-0,001406) \cdot 0,7374^3 + 0 \cdot 0,7374^4 = 1,305$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,7374$):

$$[F_z] = [\sigma] \cdot (s-c)^2 \cdot \max\{C_1; 1,81\} = 165 \cdot (16-4)^2 \cdot \max\{1,305; 1,81\} = 4,301 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{[F_z]} \right| = |(-651,5) / 4,301 \cdot 10^4| = 0,01515$$

Условие прочности: $\Phi_z \leq 1$

0,01515 \leq 1,0. **Условие прочности выполнено**

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_x = M_c + F_c \cdot l_1 = 0 + 0 \cdot 1610 = 0 \text{ Н м}$$

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_y = M_L + F_L \cdot l_1 = 0 + 0 \cdot 1610 = 0 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 0,7374 + 0,1589 \cdot 0,7374^2 + (-0,02142) \cdot 0,7374^3 + 0,001035 \cdot 0,7374^4 = 4,652$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,7374$):

$$[M_x] = [\sigma] \cdot (s-c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4,9\} = 165 \cdot (16-4)^2 \cdot 114,8 / 4 \cdot \max\{4,652; 4,9\} = 3341 \text{ Н м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 5,754$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,7374$):

$$[M_y] = [\sigma] \cdot (s-c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4,9\} = 165 \cdot (16-4)^2 \cdot 114,8 / 4 \cdot \max\{5,754; 4,9\} = 3924 \text{ Н м}$$

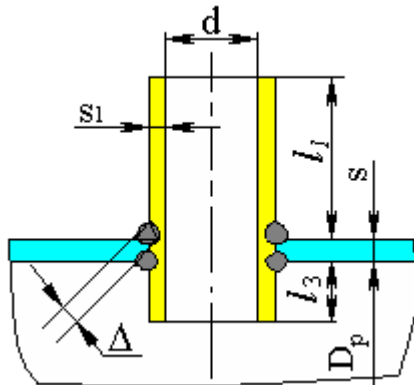
Прочность от действия изгибающих моментов:

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата	Инов. № подл.
19756.4					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР
					Лист 82

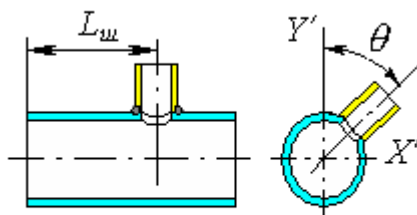
Штуцер UC, O3 DN50

Исходные данные

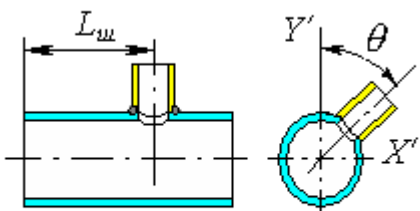
Элемент: Штуцер UC, O3 DN50
 Условное обозначение (метка) Штуцер UC
 Элемент, несущий штуцер: Штуцер А DN700
 Тип элемента, несущего штуцер: Штуцер
 Тип штуцера: Проходящий без укрепления

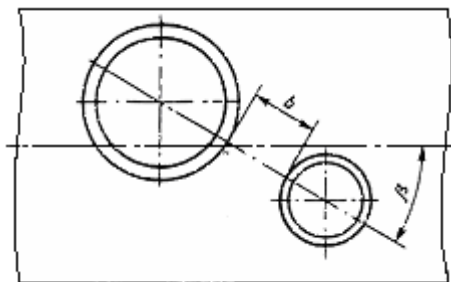


Материал несущего элемента: 09Г2С
 Толщина стенки несущего элемента, s : 16 мм
 Сумма прибавок к стенке несущего элемента, c : 4 мм
 Материал штуцера: 09Г2С (КП245) Gr.
 Внутренний диаметр штуцера, d : 48 мм
 Толщина стенки штуцера, s_1 : 14 мм
 Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c_s : 4 мм
 Длина штуцера, l_1 : 140 мм



Смещение штуцера, $L_{ш}$: 1930 мм
 Угол поворота штуцера, θ : 90 °
 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

Инов. № подл. 19756.4	Подпись и дата				Инов. № дубл.	Подпись и дата							
	Взам. инв. №					<div><div>Материал штуцера: 09Г2С (КП245) Gr.</div><div>Внутренний диаметр штуцера, d: 48 мм</div><div>Толщина стенки штуцера, s₁: 14 мм</div><div>Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c_s: 4 мм</div><div>Длина штуцера, l₁: 140 мм</div><div><div></div></div></div>							
Изм.					Лист								
Лист					84								
№ докум.					ЕД-2.00.00.000 РР								
Подп.													
Дата													



Название штуцера: Штуцер PI DN50

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 119,5 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:

$D_p = D = 700 \text{ мм}$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 200 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,34 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 200 °C (расчётные условия):

$[\sigma] = 165 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 200 °C:

$E = 1,81 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 200 °C (расчётные условия):

$[\sigma]_1 = \eta \cdot \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B; R_{m/10n/t} / n_D; R_{p1,0/10n/t} / n_L) = 1 \cdot \min\{194 / 1,5; 439 / 2,4; - / -; - / -\} = 129,3 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 200 °C:

$E_1 = 1,81 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,34 \cdot (48 + 2 \cdot 4) / (2 \cdot 129,3 \cdot 1 - 0,34) = 0,07371 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 129,3 \cdot 1 \cdot (14 - 4) / (48 + 14 + 4) = 39,19 \text{ МПа}$$

39,19 МПа \geq 0,34 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
				85

$$D_p = D = 700 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 0,7302 \text{ мм}$$

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

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

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((16 - 4) / 0,7302 - 0,8) \cdot (700 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 2866 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 140; 1,25 \cdot ((48 + 2 \cdot 4) \cdot (14 - 4))^{1/2} \} = 29,58 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_h}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0; 129,3 / 165 \} = 0,7838$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{2p} = \min \left\{ l_2; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((48 + 2 \cdot 4) \cdot (14 - 4 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (700 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 91,65 \text{ мм}$$

Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (Фланец с крышкой DN700):

$$L_k = 285 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 91,65 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (700 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 36,66 \text{ мм}$$

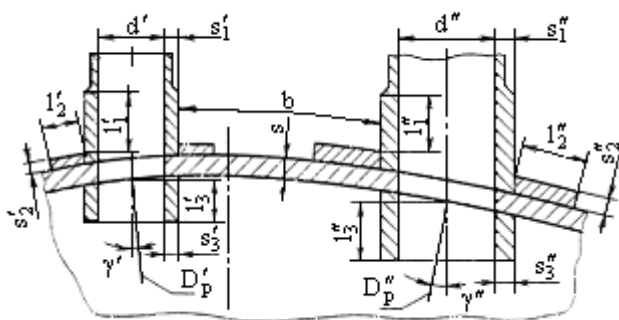
$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0,5 \cdot \frac{d_p - d_{0p}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}}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

$$= \min \{ 1; [1 + (29,58 \cdot (14 - 4) \cdot 0,7838 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (14 - 4 - 0) \cdot 0,7838) / (91,65 \cdot (16 - 4))] / [1 + 0,5 \cdot (56 - 36,66) / 91,65 + 1 \cdot (48 + 2 \cdot 4) / 700 \cdot 1 / 1 \cdot 29,58 / 91,65] \} = 1,07$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (16 - 4) \cdot 1 \cdot 165 \cdot 1 / [700 + (16 - 4) \cdot 1] = 5,562 \text{ МПа}$$

Инов. № подл. 19756.4	Подпись и дата				
	Инов. № дубл.				
	Взам. инв. №				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР
					Лист
					86



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

$$b > \sqrt{D'_p \cdot (s - c)} + \sqrt{D''_p \cdot (s - c)} = (700 \cdot (16 - 4))^{1/2} + (700 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 183,3 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, требуется дополнительный расчёт укреплений.

$$K_3 = \frac{1 + \cos^2 \beta}{2} = [1 + \cos^2(90)] / 2 = 0,5$$

$$V_1 = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l'_{1p} \cdot (s'_1 - c'_s) \cdot \chi'_1 + l'_{2p} \cdot s'_2 \cdot \chi'_2 + l'_{3p} \cdot (s'_3 - c'_s - c'_{s1}) \cdot \chi'_3 + l'_{1p} \cdot (s''_1 - c_s) \cdot \chi''_1 + l'_{2p} \cdot s''_2 \cdot \chi''_2 + l'_{3p} \cdot (s''_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi''_3}{b \cdot (s - c)}}{K_3 \left(0,8 + \frac{d'_p + d''_p}{2 \cdot b} \right) + K_1 \left(\frac{d' + 2 \cdot c'_s}{D'_p} \cdot \frac{\varphi'}{\varphi'_1} \cdot \frac{l'_{1p}}{b} + \frac{d'' + 2 \cdot c''_s}{D''_p} \cdot \frac{\varphi''}{\varphi''_1} \cdot \frac{l''_{1p}}{b} \right)} \right\}$$

$$= \min \{ 1; (1 + [(29,58 \cdot (14 - 4) \cdot 0,7838 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (14 - 4 - 0) \cdot 0,7838 + 24,92 \cdot (11,5 - 4) \cdot 0,7838 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (11,5 - 4 - 0) \cdot 0,7838) / (119,5 \cdot (16 - 4))] / (0,5 \cdot (0,8 + (56 + 53) / (2 \cdot 119,5)) + 1 \cdot [(48 + 2 \cdot 4) / 700 \cdot 1 / 1 \cdot 29,58 / 119,5 + [(45 + 2 \cdot 4) / 700 \cdot 1 / 1 \cdot 24,92 / 119,5]]) = 1,905 \}$$

$$= 1$$

$$[p]_{\text{н}} = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{0,5 \cdot (D'_p + D''_p) + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2 \cdot 1 \cdot (16 - 4) \cdot 1 \cdot 165 / [0,5 \cdot (700 + 700) + (16 - 4) \cdot 1] \cdot 1 = 5,562 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление $[p] = \min \{ 5,562; 5,562 \} \text{ МПа}$

$$5,562 \text{ МПа} \geq 0,34 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (56 - 36,66) \cdot 0,7302 = 0,7061 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

$$= 29,58 \cdot (14 - 0,07371 - 4) \cdot 0,7838 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (14 - 4 - 0) \cdot 0,7838 + 91,65 \cdot (16 - 0,7302 - 4)$$

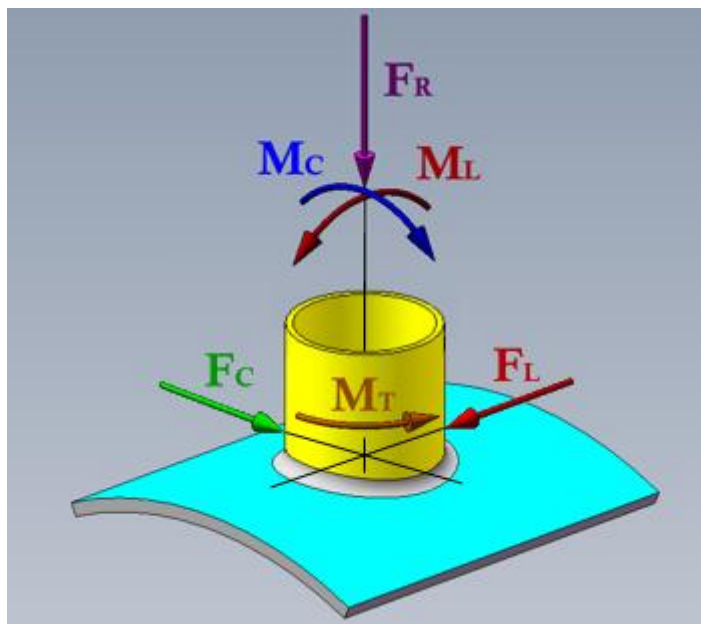
$$= 0,001263 \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,7061 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \leq 0,001263 \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
			Дата
ЕД-2.00.00.000 РР			
Лист 87			

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:

$$s_3 = s - c = 16 - 4 = 12 \text{ мм}$$

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c = 700 + 16 + 4 = 720 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_s = 48 + 14 + 4 = 66 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} = 66 / (720 \cdot 12)^{1/2} = 0,71$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 119,5 \text{ мм}$$

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D_c}{2} = 720 / 2 = 360 \text{ мм}$$

Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |0,34 / 5,562| = 0,06113$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

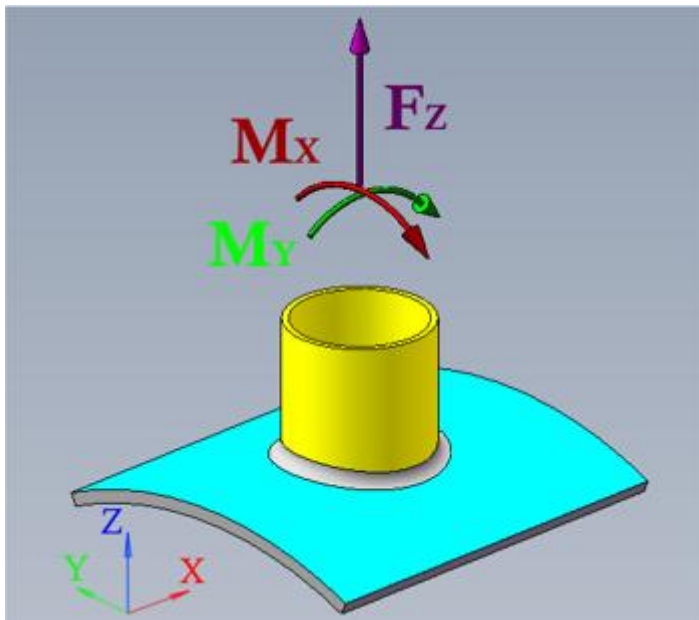
0,06113 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Расчетная схема по ГОСТ Р 52857.3-2007

Инов. № подл.	Подпись и дата
19756.4	
Инов. № дубл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Подпись и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ЕД-2.00.00.000 РР



Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_z = -F_R = -(-1500) = 1500 \text{ Н}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s - c)}} = 66 / (720 \cdot (16 - 4)^{1/2}) = 0,71$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 0,71 + 0,005196 \cdot 0,71^2 + (-0,001406) \cdot 0,71^3 + 0 \cdot 0,71^4 = 1,279$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,71$):

$$[F_z] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1,81\} = 165 \cdot (16 - 4)^2 \cdot \max\{1,279; 1,81\} = 4,301 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{[F_z]} \right| = |1500 / 4,301 \cdot 10^4| = 0,03488$$

Условие прочности: $\Phi_z \leq 1$

0,03488 ≤ 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:

$$M_y = M_L = 200 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 0,71 + 0,1589 \cdot 0,71^2 + (-0,02142) \cdot 0,71^3 + 0,001035 \cdot 0,71^4 = 4,644$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,71$):

$$[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4,9\} = 165 \cdot (16 - 4)^2 \cdot 66 / 4 \cdot \max\{4,644; 4,9\} = 1921 \text{ Н м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 5,709$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,71$):

$$[M_y] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4,9\} = 165 \cdot (16 - 4)^2 \cdot 66 / 4 \cdot \max\{5,709; 4,9\} = 2238 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
				89

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((200/1921)^2 + (200/2238)^2)^{1/2} = 0,1372$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

$0,1372 \leq 1.0$. Условие прочности выполнено

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_P}{C_4} + \Phi_z\right|, \left|\Phi_z\right|, \left|\frac{\Phi_P}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} = (\sqrt{\max(|0,06113/1 + 0,03488|; |0,03488|; |0,06113/1 - 0.2 \cdot 0,03488|)^2 + 0,1372^2})^{1/2} = 0,1675$$

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

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

$0,1675 \leq 1.0$. Условие прочности выполнено

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_c)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_c)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_c)} = 0,34 * (48 + 14) / (4 * (14 - 4)) + 4 * (200^2 + 200^2)^{1/2} / (3,142 * (48 + 14)^2 * (14 - 4)) + 1500 / (3,142 * (48 + 14) * (14 - 4)) = 10,67 \text{ МПа}$$

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

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

$10,67 \text{ МПа} \leq 129,3 \text{ МПа}$. Условие прочности выполнено

$$\frac{|p|}{|p|} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{|M|} + \frac{|F_z|}{|F|} = 0,39,19 + (200^2 + 200^2)^{1/2} / 2828 + |0| / 2,357 \cdot 10^5 = 0,1000$$

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

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

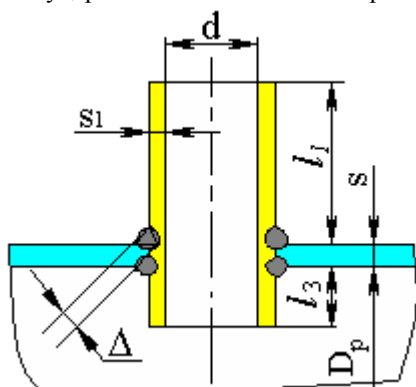
$0,1000 \leq 1.0$. Условие устойчивости выполнено

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p>ми нулю.</p> <p>Условие устойчивости штуцера: $\frac{ P }{[P]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{ F_x }{[F]} \leq 1.0$</p> <p>0,1000 ≤ 1.0. Условие устойчивости выполнено</p>
19756.4					
					ЕД-2.00.00.000 РР
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист
					90

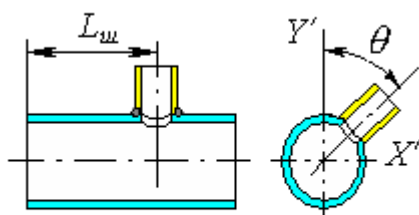
Штуцер V DN50

Исходные данные

Элемент: Штуцер V DN50
 Условное обозначение (метка) Штуцер V
 Элемент, несущий штуцер: Штуцер МН DN800
 Тип элемента, несущего штуцер: Штуцер
 Тип штуцера: Проходящий без укрепления

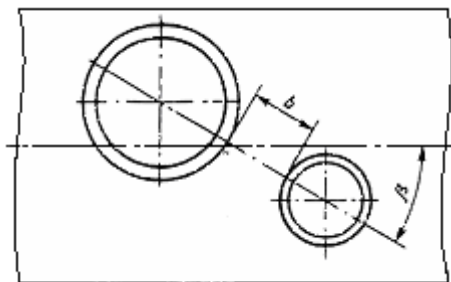


Материал несущего элемента: 09Г2С
 Толщина стенки несущего элемента, s : 16 мм
 Сумма прибавок к стенке несущего элемента, c : 4 мм
 Материал штуцера: 09Г2С (КП245) Gr.
 Внутренний диаметр штуцера, d : 48 мм
 Толщина стенки штуцера, s_1 : 14 мм
 Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c_s : 4 мм
 Длина штуцера, l_1 : 140 мм



Смещение штуцера, $L_{ш}$: 1930 мм
 Угол поворота штуцера, θ : 90 °
 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

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
				91



Название штуцера: - Штуцер НО1 DN25

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 1174 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:

$D_p = D = 800 \text{ мм}$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 200 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,34 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 200 °C (расчётные условия):

$[\sigma] = 165 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 200 °C:

$E = 1,81 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 200 °C (расчётные условия):

$[\sigma]_1 = \eta \cdot \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B; R_{m/10n/t} / n_D; R_{p1,0/10n/t} / n_P) = 1 \cdot \min\{194 / 1,5; 439 / 2,4; - / -; - / -\} = 129,3 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 200 °C:

$E_1 = 1,81 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,34 \cdot (48 + 2 \cdot 4) / (2 \cdot 129,3 \cdot 1 - 0,34) = 0,07371 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

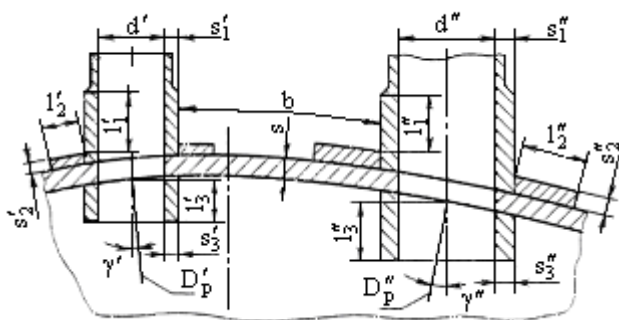
$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 129,3 \cdot 1 \cdot (14 - 4) / (48 + 14 + 4) = 39,19 \text{ МПа}$$

39,19 МПа \geq 0,34 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
				92



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие - Штуцер НО1 DN25 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D'_p \cdot (s - c)} + \sqrt{D''_p \cdot (s - c)} = (800 \cdot (16 - 4))^{1/2} + (800 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 196 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 4,877 \text{ МПа}$

$4,877 \text{ МПа} \geq 0,34 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0.5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0.5 \cdot (56 - 39,19) \cdot 0,8333 = 0,7003 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

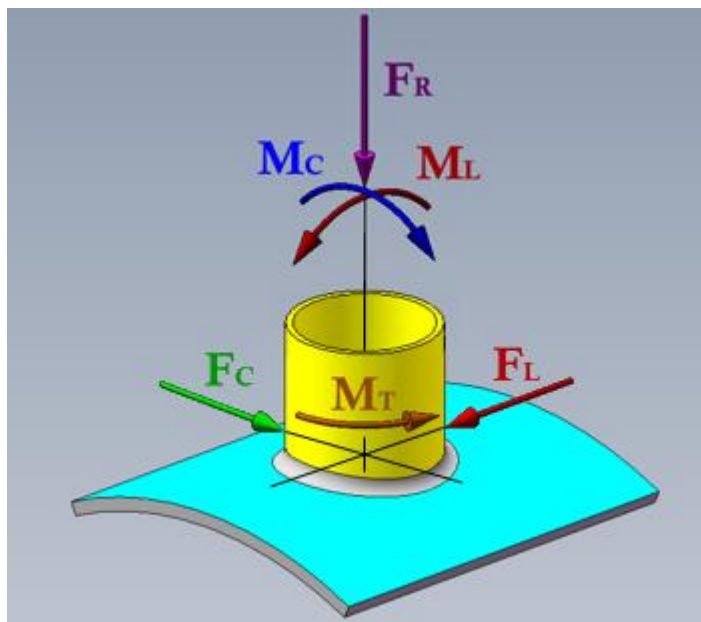
$$= 29,58 \cdot (14 - 0,07371 - 4) \cdot 0,7838 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (14 - 4 - 0) \cdot 0,7838 + 97,98 \cdot (16 - 0,8333 - 4)$$

$$= 0,001324 \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,7003 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \leq 0,001324 \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

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



Радиальная нагрузка, F_R : (-1500) Н

Окружной момент, M_C : 200 Н м

Продольный момент, M_L : 200 Н м

Крутящий момент, M_T : 300 Н м

Инов. № подл.	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
			Дата
ЕД-2.00.00.000 РР			
Лист 94			

Сдвиговая нагрузка, F_C : 1100 Н
 Сдвиговая нагрузка, F_L : 1100 Н
 Эквивалентная толщина обечайки около штуцера:

$$s_3 = s - c = 16 - 4 = 12 \text{ мм}$$

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c = 800 + 16 + 4 = 820 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_s = 48 + 14 + 4 = 66 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} = 66 / (820 \cdot 12)^{1/2} = 0,6653$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 247 \text{ мм}$$

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D_c}{2} = 820 / 2 = 410 \text{ мм}$$

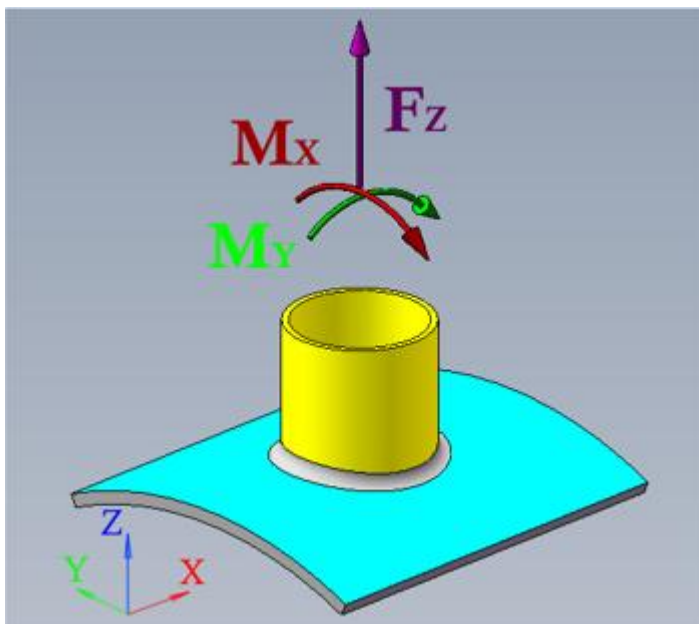
Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |0,34 / 4,877| = 0,06972$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

0,06972 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Расчетная схема по ГОСТ Р 52857.3-2007



Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_z = -F_R = -(-1500) = 1500 \text{ Н}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s - c)}} = 66 / (820 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 0,6653$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 0,6653 + 0,005196 \cdot 0,6653^2 + (-0,001406) \cdot 0,6653^3 + 0 \cdot 0,6653^4 = 1,236$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,6653$):

Инов. № подл.	19756.4	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист 95

$$[F_z] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1.81\} = 165 \cdot (16 - 4)^2 \cdot \max\{1.236; 1.81\} = 4,301 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{[F_z]} \right| = |1500 / 4,301 \cdot 10^4| = 0,03488$$

Условие прочности: $\Phi_z \leq 1$

0,03488 ≤ 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:

$$M_y = M_L = 200 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 0,6653 + 0,1589 \cdot 0,6653^2 + (-0,02142) \cdot 0,6653^3 + 0,001035 \cdot 0,6653^4 = 4,633$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,6653$):

$$[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 165 \cdot (16 - 4)^2 \cdot 66 / 4 \cdot \max\{4,633; 4.9\} = 1921 \text{ Н м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 5,645$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,6653$):

$$[M_y] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 165 \cdot (16 - 4)^2 \cdot 66 / 4 \cdot \max\{5,645; 4.9\} = 2213 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]} \right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]} \right)^2} = ((200 / 1921)^2 + (200 / 2213)^2)^{1/2} = 0,1379$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

0,1379 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max \left(\left| \frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z \right|, \left| \Phi_z \right|, \left| \frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z \right| \right) \right]^2 + \Phi_b^2} = (\max(|0,06972 / 1 + 0,03488|; |0,03488|; |0,06972 / 1 - 0.2 \cdot 0,03488|)^2 + 0,1379^2)^{1/2} = 0,1731$$

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

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

0,1731 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = 0,34 \cdot (48 + 14) / (4 \cdot (14 - 4)) + 4 \cdot (200^2 + 200^2)^{1/2} / (3,142 \cdot (48 + 14)^2 \cdot (14 - 4)) + 1500 / (3,142 \cdot (48 + 14) \cdot (14 - 4)) = 10,67 \text{ МПа}$$

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

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

10,67 МПа ≤ 129,3 МПа. **Условие прочности выполнено**

$$\left| \frac{p}{[p]} \right| + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \left| \frac{F_z}{[F]} \right| = 0 / 39,19 + (200^2 + 200^2)^{1/2} / 2828 + |0| / 2,357 \cdot 10^5 = 0,1000$$

Изн.	№ подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19756.4					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
					ЕД-2.00.00.000 РР
					Лист 96

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

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

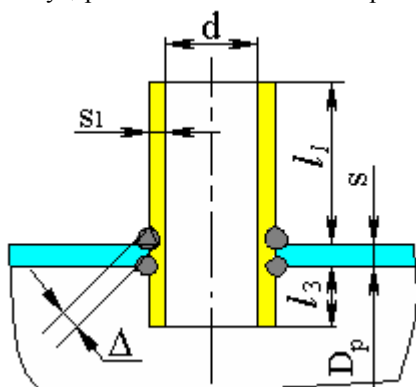
$0,1000 \leq 1.0$. Условие устойчивости выполнено

Инв. № подл. 19756.4	Подпись и дата		Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР	Лист
						97

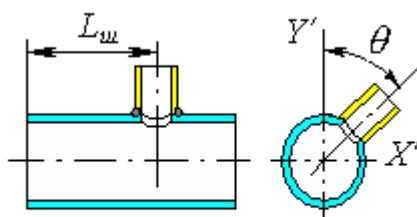
Штуцер PI DN50

Исходные данные

Элемент: Штуцер PI DN50
 Условное обозначение (метка) Штуцер PI
 Элемент, несущий штуцер: Штуцер А DN700
 Тип элемента, несущего штуцер: Штуцер
 Тип штуцера: Проходящий без укрепления

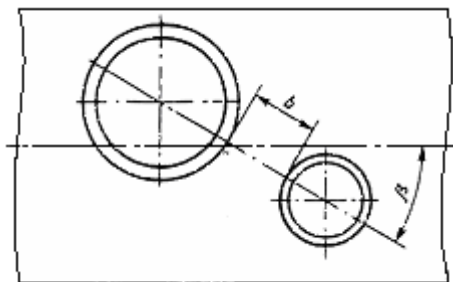


Материал несущего элемента: 09Г2С
 Толщина стенки несущего элемента, s : 16 мм
 Сумма прибавок к стенке несущего элемента, c : 4 мм
 Материал штуцера: 09Г2С (КП245) Gr.
 Внутренний диаметр штуцера, d : 45 мм
 Толщина стенки штуцера, s_1 : 11,5 мм
 Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c_s : 4 мм
 Длина штуцера, l_1 : 120 мм



Смещение штуцера, $L_{ш}$: 1930 мм
 Угол поворота штуцера, θ : 120 °
 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

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
				98



Название штуцера: Штуцер UC DN50

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 119,5 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:

$D_p = D = 700$ мм

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 200 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,34 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 200 °C (расчётные условия):

$[\sigma] = 165$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 200 °C:

$E = 1,81 \cdot 10^5$ МПа

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 200 °C (расчётные условия):

$[\sigma]_1 = \eta \cdot \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B; R_{m/10n/t} / n_D; R_{p1,0/10n/t} / n_n) = 1 \cdot \min\{194 / 1,5; 439 / 2,4; - / -; - / -\} = 129,3$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 200 °C:

$E_1 = 1,81 \cdot 10^5$ МПа

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,34 \cdot (45 + 2 \cdot 4) / (2 \cdot 129,3 \cdot 1 - 0,34) = 0,06976 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

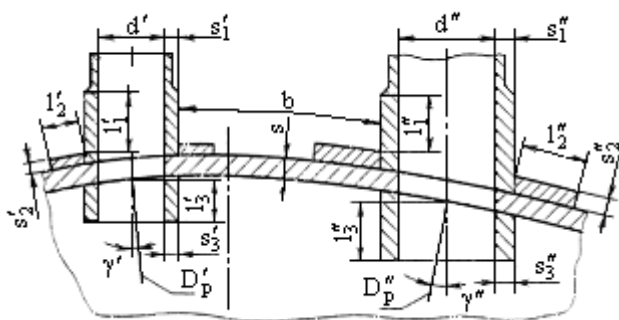
$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 129,3 \cdot 1 \cdot (11,5 - 4) / (45 + 11,5 + 4) = 32,07 \text{ МПа}$$

32,07 МПа \geq 0,34 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
				99



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер UC, O3 DN50 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D'_p \cdot (s - c)} + \sqrt{D''_p \cdot (s - c)} = (700 \cdot (16 - 4))^{1/2} + (700 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 183,3 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, требуется дополнительный расчет укреплений.

$$K_3 = \frac{1 + \cos^2 \beta}{2} = [1 + \cos^2(90)] / 2 = 0,5$$

$$V_1 = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l'_{1p} \cdot (s'_1 - c'_s) \cdot \chi'_1 + l'_{2p} \cdot s'_2 \cdot \chi'_2 + l'_{3p} \cdot (s'_3 - c'_s - c'_{s1}) \cdot \chi'_3 + l'_{1p} \cdot (s''_1 - c_s) \cdot \chi''_1 + l'_{2p} \cdot s''_2 \cdot \chi''_2 + l'_{3p} \cdot (s''_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi''_3}{b \cdot (s - c)}}{K_3 \left(0,8 + \frac{d'_p + d''_p}{2 \cdot b} \right) + K_1 \left(\frac{d' + 2 \cdot c'_s}{D'_p} \cdot \frac{\varphi'}{\varphi'_1} \cdot \frac{l'_{1p}}{b} + \frac{d'' + 2 \cdot c_s}{D''_p} \cdot \frac{\varphi''}{\varphi''_1} \cdot \frac{l'_{1p}}{b} \right)} \right\}$$

$$= \min \{ 1; (1 + [(24,92 \cdot (11,5 - 4) \cdot 0,7838 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (11,5 - 4 - 0) \cdot 0,7838 + 29,58 \cdot (14 - 4) \cdot 0,7838 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (14 - 4 - 0) \cdot 0,7838) / (119,5 \cdot (16 - 4))] / (0,5 \cdot (0,8 + (53 + 56) / (2 \cdot 119,5)) + 1 \cdot [(45 + 2 \cdot 4) / 700 \cdot 1 / 1 \cdot 24,92 / 119,5 + [(48 + 2 \cdot 4) / 700 \cdot 1 / 1 \cdot 29,58 / 119,5])]) = 1,905 \}$$

$$= 1$$

$$[p]_{\text{н}} = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{0,5 \cdot (D'_p + D''_p) + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2 \cdot 1 \cdot (16 - 4) \cdot 1 \cdot 165 / [0,5 \cdot (700 + 700) + (16 - 4) \cdot 1] \cdot 1 = 5,562 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление $[p] = \min \{ 5,562; 5,562 \} \text{ МПа}$

$$5,562 \text{ МПа} \geq 0,34 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (53 - 36,66) \cdot 0,7302 = 0,5966 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

$$= 24,92 \cdot (11,5 - 0,06976 - 4) \cdot 0,7838 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (11,5 - 4 - 0) \cdot 0,7838 + 91,65 \cdot (16 - 0,7302 - 4)$$

$$= 0,001178 \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,5966 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \leq 0,001178 \text{ м}^2$$

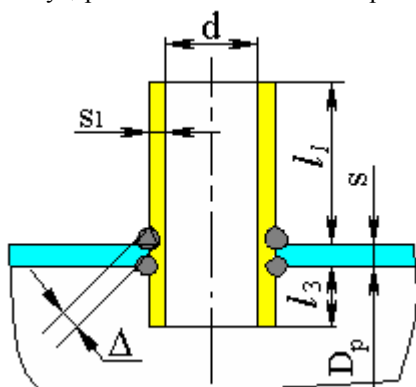
Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
			Дата
ЕД-2.00.00.000 РР			
Лист 101			

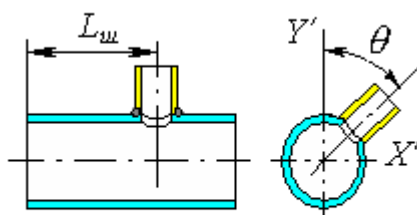
Штуцер TW DN50

Исходные данные

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

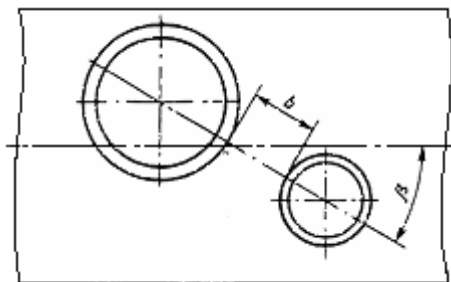


Материал несущего элемента: 09Г2С
 Толщина стенки несущего элемента, s : 16 мм
 Сумма прибавок к стенке несущего элемента, c : 4 мм
 Материал штуцера: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281
 Внутренний диаметр штуцера, d : 48 мм
 Толщина стенки штуцера, s_1 : 10 мм
 Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c_s : 5,5 мм
 Длина штуцера, l_1 : 1620 мм



Смещение штуцера, $L_{ш}$: 1690 мм
 Угол поворота штуцера, θ : 0 °
 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

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
				102



Название штуцера: Штуцер LT1-LT2 DN100

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 250,5 мм

Угол β : 180 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$\varphi_1 = 1$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$\varphi = 1$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 2000 \text{ мм}$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 200 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,34 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 200 °C (расчётные условия):

$[\sigma] = 165 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 200 °C:

$E = 1,81 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 200 °C (расчётные условия):

$[\sigma]_1 = 148 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 200 °C:

$E_1 = 1,81 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,34 \cdot (48 + 2 \cdot 5,5) / (2 \cdot 148 \cdot 1 - 0,34) = 0,06785 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 148 \cdot 1 \cdot (10 - 5,5) / (48 + 10 + 5,5) = 20,98 \text{ МПа}$$

20,98 МПа \geq 0,34 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
				103

$$D_p = D = 2000 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 2,063 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 48 + 2 \cdot 5,5 = 59 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((16 - 4) / 2,063 - 0,8) \cdot (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 1555 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 1620; 1,25 \cdot ((48 + 2 \cdot 5,5) \cdot (10 - 5,5))^{1/2} \} = 20,37 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_h}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0; 148 / 165 \} = 0,897$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

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

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 154,9 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 1716 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 154,9 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 61,97 \text{ мм}$$

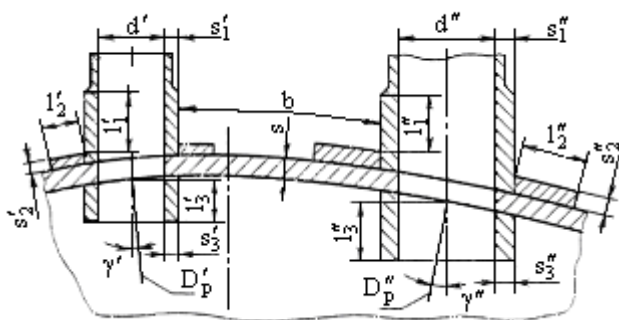
$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0,5 \cdot \frac{d_p - d_{0p}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}}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

$$= \min \{ 1; [1 + (20,37 \cdot (10 - 5,5) \cdot 0,897 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 5,5 - 0) \cdot 0,897) / (154,9 \cdot (16 - 4))] / [1 + 0,5 \cdot (59 - 61,97) / 154,9 + 1 \cdot (48 + 2 \cdot 5,5) / 2000 \cdot 1 / 1 \cdot 20,37 / 154,9] \} = 1,05$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (16 - 4) \cdot 1 \cdot 165 \cdot 1 / [2000 + (16 - 4) \cdot 1] = 1,968 \text{ МПа}$$

Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	
Взам. инв. №		Подпись и дата	
Инов. № дубл.		Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
ЕД-2.00.00.000 РР			Лист
			104



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер LT1-LT2 DN100 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D'_p \cdot (s - c)} + \sqrt{D''_p \cdot (s - c)} = (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} + (2000 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 309,8 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, требуется дополнительный расчёт укреплений.

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

$$V_1 = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l'_{1p} \cdot (s'_1 - c'_s) \cdot \chi'_1 + l'_{2p} \cdot s'_2 \cdot \chi'_2 + l'_{3p} \cdot (s'_3 - c'_s - c'_{s1}) \cdot \chi'_3 + l'_{1p} \cdot (s''_1 - c_s) \cdot \chi''_1 + l'_{2p} \cdot s''_2 \cdot \chi''_2 + l'_{3p} \cdot (s''_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi''_3}{b \cdot (s - c)}}{K_3 \left(0,8 + \frac{d'_p + d''_p}{2 \cdot b} \right) + K_1 \left(\frac{d' + 2 \cdot c'_s}{D'_p} \cdot \frac{\varphi'}{\varphi'_1} \cdot \frac{l'_{1p}}{b} + \frac{d'' + 2 \cdot c''_s}{D''_p} \cdot \frac{\varphi''}{\varphi''_1} \cdot \frac{l'_{1p}}{b} \right)} \right\}$$

$$= \min \{ 1; (1 + [(20,37 \cdot (10 - 5,5) \cdot 0,897 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 5,5 - 0) \cdot 0,897 + 32,44 \cdot (12 - 5,8) \cdot 0,897 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (12 - 5,8 - 0) \cdot 0,897) / (250,5 \cdot (16 - 4))] / (1 \cdot (0,8 + (59 + 108,6) / (2 \cdot 250,5)) + 1 \cdot [(48 + 2 \cdot 5,5) / 2000 \cdot 1 / 1 \cdot 20,37 / 250,5 + [(97 + 2 \cdot 5,8) / 2000 \cdot 1 / 1 \cdot 32,44 / 250,5] \cdot 0,9505] \cdot 0,9505) \}$$

$$= 0,9505$$

$$[p]_{\Sigma} = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{0,5 \cdot (D'_p + D''_p) + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2 \cdot 1 \cdot (16 - 4) \cdot 1 \cdot 165 / [0,5 \cdot (2000 + 2000) + (16 - 4) \cdot 0,9505] \cdot 0,9505 = 1,871 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление $[p] = \min \{ 1,968; 1,871 \} \text{ МПа}$

$$1,871 \text{ МПа} \geq 0,34 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (59 - 61,97) \cdot 2,063 = (-0,3061 \cdot 10^{-5}) \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

$$= 20,37 \cdot (10 - 0,06785 - 5,5) \cdot 0,897 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 5,5 - 0) \cdot 0,897 + 154,9 \cdot (16 - 2,063 - 4)$$

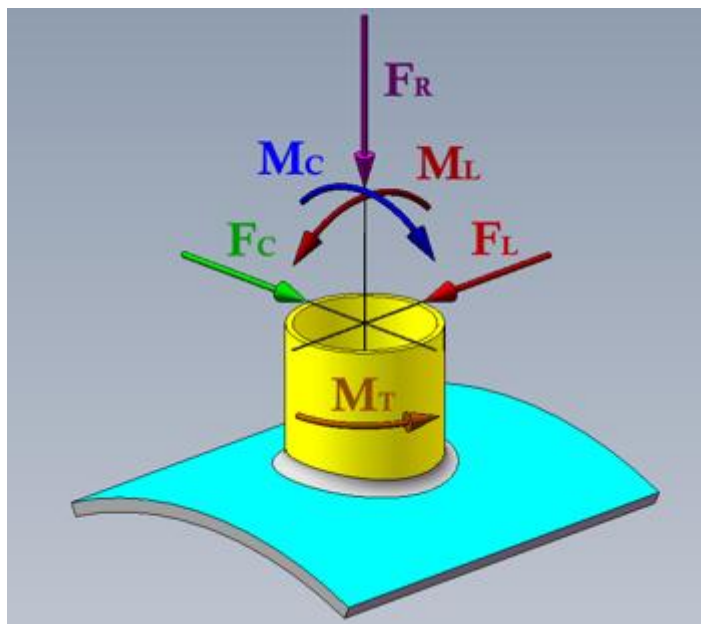
$$= 0,001620 \text{ м}^2$$

$$A_r = (-0,3061 \cdot 10^{-5}) \text{ м}^2 \leq 0,001620 \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	19756.4	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист 105

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



Радиальная нагрузка, F_R : 293,2 Н

Окружной момент, M_C : 0 Н м

Продольный момент, M_L : 0 Н м

Крутящий момент, M_T : 0 Н м

Сдвиговая нагрузка, F_C : 0 Н

Сдвиговая нагрузка, F_L : 0 Н

Эквивалентная толщина обечайки около штуцера:

$$s_3 = s - c = 16 - 4 = 12 \text{ мм}$$

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c = 2000 + 16 + 4 = 2020 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_s = 48 + 10 + 5,5 = 63,5 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} = 63,5 / (2020 \cdot 12)^{1/2} = 0,4079$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 250,5 \text{ мм}$$

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D_c}{2} = 2020 / 2 = 1010 \text{ мм}$$

Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |0,34 / 1,968| = 0,1727$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

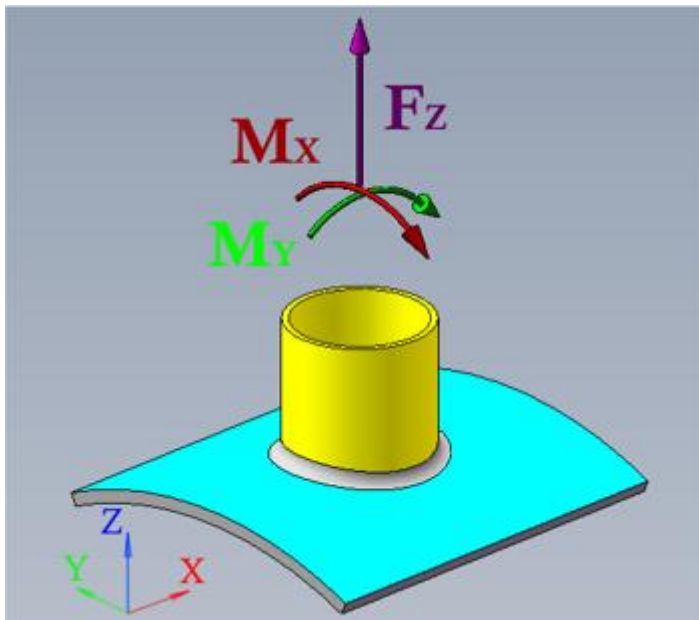
0,1727 ≤ 1.0. Условие прочности выполнено

Расчетная схема по ГОСТ Р 52857.3-2007

Инов. № подл.	Подпись и дата
19756.4	
Инов. № дубл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Подпись и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ЕД-2.00.00.000 РР



Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_z = -F_R = -293,2 \quad = (-293,2) \text{ Н}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s-c)}} = 63,5 / (2020 \cdot (16-4))^{1/2} = 0,4079$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 0,4079 + 0,005196 \cdot 0,4079^2 + (-0,001406) \cdot 0,4079^3 + 0 \cdot 0,4079^4 = 0,9898$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4079$):

$$[F_z] = [\sigma] \cdot (s-c)^2 \cdot \max\{C_1; 1,81\} = 165 \cdot (16-4)^2 \cdot \max\{0,9898; 1,81\} = 4,301 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{[F_z]} \right| = |(-293,2) / 4,301 \cdot 10^4| = 0,006819$$

Условие прочности: $\Phi_z \leq 1$

$0,006819 \leq 1,0$. Условие прочности выполнено

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_x = M_c + F_c \cdot l_1 = 0 + 0 \cdot 1620 = 0 \text{ Н м}$$

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_y = M_L + F_L \cdot l_1 = 0 + 0 \cdot 1620 = 0 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 0,4079 + 0,1589 \cdot 0,4079^2 + (-0,02142) \cdot 0,4079^3 + 0,001035 \cdot 0,4079^4 = 4,577$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4079$):

$$[M_x] = [\sigma] \cdot (s-c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4,9\} = 165 \cdot (16-4)^2 \cdot 63,5 / 4 \cdot \max\{4,577; 4,9\} = 1848 \text{ Н м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 5,52$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4079$):

$$[M_y] = [\sigma] \cdot (s-c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4,9\} = 165 \cdot (16-4)^2 \cdot 63,5 / 4 \cdot \max\{5,52; 4,9\} = 2082 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата	Инов. № подл.
19756.4					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР
					Лист 107

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((0/1848)^2 + (0/2082)^2)^{1/2} = 0$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

$0 \leq 1.0$. Условие прочности выполнено

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right|; \left|\Phi_z\right|; \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} = \left(\left[\max\left(|0.1727/1 + (-0.006819)|; |(-0.006819)|; |0.1727/1 - 0.2 \cdot (-0.006819)|\right)\right]^2 + 0^2\right)^{1/2} = 0.1741$$

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

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

$0.1741 \leq 1.0$. Условие прочности выполнено

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = 0.34 \cdot (48 + 10) / (4 \cdot (10 - 5.5)) + 4 \cdot (0^2 + 0^2)^{1/2} / (3.142 \cdot (48 + 10)^2 \cdot (10 - 5.5)) + 0 / (3.142 \cdot (48 + 10) \cdot (10 - 5.5)) = 1.096 \text{ МПа}$$

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

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

$1.096 \text{ МПа} \leq 148 \text{ МПа}$. Условие прочности выполнено

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0/20.98 + (0^2 + 0^2)^{1/2}/1318 + |(-293.2)|/3232 = 0.09074$$

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

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

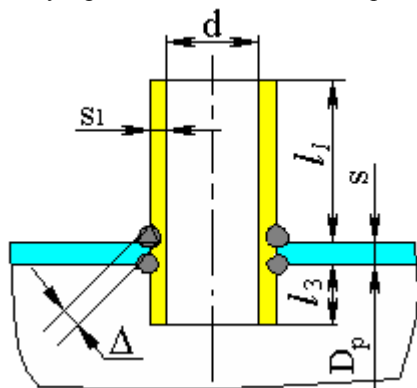
$0.09074 \leq 1.0$. Условие устойчивости выполнено

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4						
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР	
					Лист	
					108	

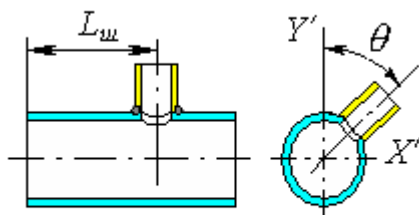
Штуцер Н11, НО1 DN25

Исходные данные

Элемент: Штуцер Н11, НО1 DN25
Условное обозначение (метка) Штуцер Н11
Элемент, несущий штуцер: Штуцер МН DN800
Тип элемента, несущего штуцер: Штуцер
Тип штуцера: Проходящий без укрепления

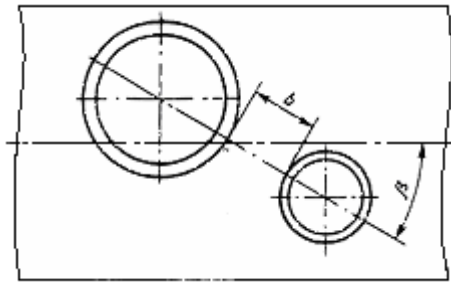


Материал несущего элемента: 09Г2С
Толщина стенки несущего элемента, s : 16 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, c : 4 мм
Материал штуцера: 09Г2С (КП245) Gr.
Внутренний диаметр штуцера, d : 25 мм
Толщина стенки штуцера, s_1 : 10 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c_s : 2 мм
Длина штуцера, l_1 : 143 мм



Смещение штуцера, $L_{ш}$: 1930 мм
Угол поворота штуцера, θ : 260 °
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
19756.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
ЕД-2.00.00.000 РР			Лист 109



Название штуцера: - Штуцер НО1 DN25

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 100,2 мм

Угол β : 90 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$\phi_1 = 1$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$\phi = 1$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 800 \text{ мм}$

Расчёт в расчётных условиях

Расчёт толщины стенки штуцера по ГОСТ Р 52857.3-2007

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 200 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,88 МПа

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Гг. при температуре T = 200 °C (рабочие условия):

$[\sigma]_1 = \eta \cdot \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B; R_{m/10^{0.5}/t} / n_D; R_{p1,0/10^{0.5}/t} / n_P) = 1 \cdot \min\{194 / 1,5; 439 / 2,4; - / -; - / -\} = 129,3 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 200 °C:

$E_1 = 1,81 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \phi_1 - p} = 0,88 \cdot (25 + 2 \cdot 2) / (2 \cdot 129,3 \cdot 1 - 0,88) = 0,09900 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \phi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 129,3 \cdot 1 \cdot (10 - 2) / (25 + 10 + 2) = 55,93 \text{ МПа}$$

55,93 МПа \geq 0,88 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 200 °C

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
				110

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				

Свойства материала элемента, несущего штучер

$$[\sigma] = 165 \text{ MPa}$$
$$E = 1.81 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Гр. при температуре $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$[\sigma]_I = \eta^* \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B; R_{m/10n/t} / n_L; R_{n1.0/10n/t} / n_H) = 1^* \min\{194 / 1,5; 439 / 2,4; -/-; -/-\} = 129,3 \text{ МПа}$$
$$E_1 = 1.81 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$
$$D_p = D = 800 \text{ mm}$$
$$s_p = 0,8333 \text{ MM}$$
$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 25 + 2 \cdot 2 = 29 \text{ mm}$$
$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s-c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = 2 \cdot ((16-4)/0,8333 - 0,8) \cdot (800 \cdot (16-4))^{1/2} = 2665 \text{ mm}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min[l_1; 1.25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)}] = \min[143; 1.25 \cdot ((25 + 2 \cdot 2) \cdot (10 - 2))^{1/2}] = 19,04 \text{ mm}$$

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 129,3 / 165 \} = 0,7838$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{30} = \min \{ l_3; \quad 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \} = \min \{ 0; 0.5 \cdot ((25 + 2 \cdot 2) \cdot (10 - 2 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ mm}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (800 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 97,98 \text{ mm}$$

Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (Фланец с крышкой DN800):

$$L_k = 304,5 \text{ mm}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 97,98 \text{ mm}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

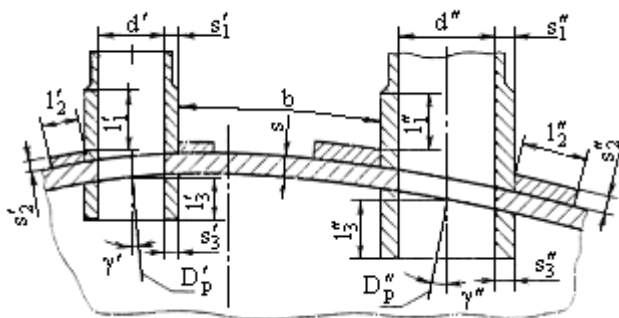
$$d_{op} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (800 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 39,19 \text{ mm}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (19,04 \cdot (10 - 2) \cdot 0,7838 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 2 - 0) \cdot 0,7838) / (97,98 \cdot (16 - 4))] / [1 + 0.5 \cdot (29 - 39,19) / 97,98 + 1 \cdot (25 + 2 \cdot 2) / 800 \cdot 1 / 1 \cdot 19,04 / 97,98] = 1,153 \}$$

= 1

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (16 - 4) \cdot 1 \cdot 165 \cdot 1 / [800 + (16 - 4) \cdot 1] = 4,877 \text{ МПа}$$



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие - Штуцер НО1 DN25 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D'_p \cdot (s - c)} + \sqrt{D''_p \cdot (s - c)} = (800 \cdot (16 - 4))^{1/2} + (800 \cdot (16 - 4))^{1/2} = 196 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, требуется дополнительный расчёт укреплений.

$$K_3 = \frac{1 + \cos^2 \beta}{2} = [1 + \cos^2(90)] / 2 = 0,5$$

$$V_1 = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l'_{1p} \cdot (s'_1 - c'_s) \cdot \chi'_1 + l'_{2p} \cdot s'_2 \cdot \chi'_2 + l'_{3p} \cdot (s'_3 - c'_s - c'_{s1}) \cdot \chi'_3 + l''_{1p} \cdot (s''_1 - c_s) \cdot \chi''_1 + l''_{2p} \cdot s''_2 \cdot \chi''_2 + l''_{3p} \cdot (s''_3 - c_s - c'_{s1}) \cdot \chi''_3}{b \cdot (s - c)}}{K_3 \left(0.8 + \frac{d'_p + d''_p}{2 \cdot b} \right) + K_1 \left(\frac{d' + 2 \cdot c'_s}{D'_p} \cdot \frac{\varphi'}{\varphi'_1} \cdot \frac{l'_{1p}}{b} + \frac{d'' + 2 \cdot c_s}{D''_p} \cdot \frac{\varphi''}{\varphi''_1} \cdot \frac{l''_{1p}}{b} \right)} \right\}$$

$$= \min \{ 1; (1 + [(19,04 \cdot (10 - 2) \cdot 0,7838 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 2 - 0) \cdot 0,7838 + 19,04 \cdot (10 - 2) \cdot 0,7838 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 2 - 0) \cdot 0,7838) / (100,2 \cdot (16 - 4))] / (0,5 \cdot (0.8 + (29 + 29) / (2 \cdot 100,2)) + 1 \cdot [(25 + 2 \cdot 2) / 800 \cdot 1 / 1 \cdot 19,04 / 100,2 + [(25 + 2 \cdot 2) / 800 \cdot 1 / 1 \cdot 19,04 / 100,2]]) = 2,146 \}$$

= 1

$$[p]_E = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{0.5 \cdot (D'_p + D''_p) + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2 \cdot 1 \cdot (16 - 4) \cdot 1 \cdot 165 / [0.5 \cdot (800 + 800) + (16 - 4) \cdot 1] \cdot 1 = 4,877 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление $[p] = \min \{ 4,877; 4,877 \} \text{ МПа}$

4,877 МПа \geq 0,34 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0.5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0.5 \cdot (29 - 39,19) \cdot 0,8333 = (-0,4247 \cdot 10^{-5}) \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

19756.4

ЕД-2.00.00.000 РР

Лист

112

Изм. Лист № докум. Подп. Дата

$$= 19,04 * (10 - 0,03817 - 2) * 0,7838 + 0 * 0 * 0 + 0 * (10 - 2 - 0) * 0,7838 + 97,98 * (16 - 0,8333 - 4)$$

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				

A diagram illustrating the forces and moments acting on a thick-walled cylinder. The cylinder is shown in cross-section, with a yellow outer shell and a white inner core. A blue curved surface represents the base of the cylinder. A coordinate system is defined with the Z-axis pointing vertically upwards, the X-axis pointing horizontally to the right, and the Y-axis pointing out of the page. A force vector F_z is shown acting vertically upwards from the center of the cylinder. A moment vector M_x is shown acting around the X-axis, and a moment vector M_y is shown acting around the Y-axis.

$$F_z = -F_R = -(-1500) = 1500 \text{ H}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s - c)}} = 37 / (820 \cdot (16 - 4)^{1/2}) = 0,373$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 0,373 + 0,005196 \cdot 0,373^2 + (-0,001406) \cdot 0,373^3 + 0 \cdot 0,373^4 = 0,9564$$

$$[F_r] = [\sigma] \cdot (s-c)^2 \cdot \max\{C_1; 1.81\} = 165 * (16-4)^2 * \max\{0,9564; 1.81\} = 4,301 \cdot 10^4 \text{ H}$$
$$\Phi_x = \frac{F_x}{F_y} = |1500 / 4,301 \cdot 10^4| = 0,03488$$
$$M_x = M_c = 200 \text{ H}_M$$
$$M_y = M_L = 200 \text{ H}_M$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = \frac{4,526 + 0,06402 * 0,373 + 0,1589 * 0,373^2 + (-0,02142) * 0,373^3 + 0,001035 *}{0,373^4} = 4,571$$

$$[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 165 \cdot (16 - 4)^2 \cdot 37 / 4 \cdot \max\{4.571; 4.9\} = 1077 \text{ H m}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 5,538$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,373$):

$$[M_y] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 165 \cdot (16 - 4)^2 \cdot 37 / 4 \cdot \max\{5,538; 4.9\} = 1217 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((200 / 1077)^2 + (200 / 1217)^2)^{1/2} = 0,248$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

0,248 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right|, \left|\Phi_z\right|, \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} = \left(\left[\max\left(|0,06972 / 1 + 0,03488|; |0,03488|; |0,06972 / 1 - 0.2 \cdot 0,03488|\right)\right]^2 + 0,248^2\right)^{1/2} = 0,2691$$

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

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

0,2691 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = 0,34 \cdot (25 + 10) / (4 \cdot (10 - 2)) + 4 \cdot (200^2 + 200^2)^{1/2} / (3,142 \cdot (25 + 10)^2 \cdot (10 - 2)) + 1500 / (3,142 \cdot (25 + 10) \cdot (10 - 2)) = 38,82 \text{ МПа}$$

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

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

38,82 МПа ≤ 129,3 МПа. **Условие прочности выполнено**

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0 / 55,93 + (200^2 + 200^2)^{1/2} / 670,4 + |0| / 1,073 \cdot 10^5 = 0,4219$$

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

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

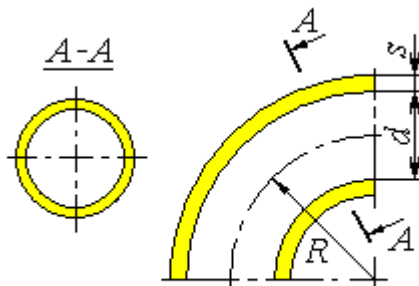
0,4219 ≤ 1.0. **Условие устойчивости выполнено**

Инов. № подл. 19756.4	Подпись и дата				
	Инов. № дубл.				
	Взам. инв. №				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР
					Лист
					115

Отвод DN50

Расчёт прочности отвода по СА 03-003-07

Исходные данные



Элемент:	Отвод DN50
Тип отвода:	Гнутый или крутоизогнутый отвод
Материал отвода:	09Г2С Gr.ГОСТ 19281
Внутренний диаметр отвода, d:	45 мм
Толщина стенки отвода, s:	6 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c ₁ :	4 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, c ₂ :	0,9 мм
Прибавка технологическая, c ₃ :	0 мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, c:	4,9 мм
Радиус отвода, R:	75 мм
Угол, γ:	0 °
Коэффициенты прочности сварных швов:	
Продольный шов:	

$$\varphi_y = 1$$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T:	200 °С
Расчётное внутреннее избыточное давление, p:	0,34 МПа
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 200 °С (расчётные условия):	

$$[\sigma] = 148 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 200 °С:

$$E = 1,81 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

$$k_1 = 1,159 \text{ для соотношения } R / (d + s) = 1,471$$

Расчётная толщина стенки трубы (патрубка штуцера):

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c)}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_y - p} = (0,34 \cdot (45 + 2 \cdot 4,9)) / (2 \cdot 148 \cdot 1 - 0,34) = 0,06302 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки гнутых и крутоизогнутых отводов:

$$s_{p0} = k_1 \cdot s_p = 1,159 \cdot 0,06302 = 0,07303 \text{ мм}$$

Изн. № подл.	Подпись и дата
19756.4	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ЕД-2.00.00.000 РР

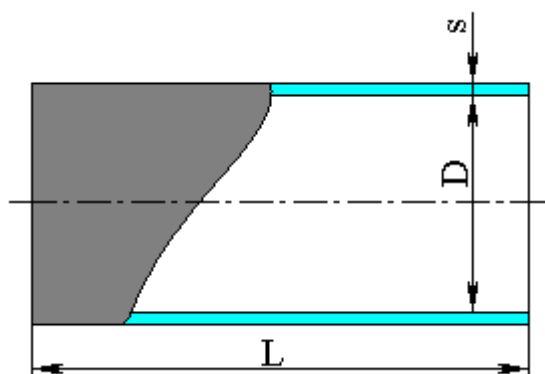
Лист

116

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_y \cdot (s - c)}{k_i \left[d + \frac{s - c}{k_i} \right]} = 2 * 148 * 1 * (6 - 4,9) / (1,159 * [45 + (6 - 4,9) / 1,159]) = 6,115 \text{ МПа}$$

Ив. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
				117

Патрубок DN50



Исходные данные

Материал: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281
 Внутр. диаметр, D: 45 мм
 Толщина стенки, s: 6 мм
 Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c_1 : 4 мм
 Прибавка для компенсации минусового допуска, c_2 : 0,9 мм
 Прибавка технологическая, c_3 : 0 мм
 Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, c: 4,9 мм
 Длина обечайки, L: 102 мм
 Коэффициенты прочности сварных швов:
 Продольный шов:

$$\varphi_P = 1$$

Окружной шов:

$$\varphi_T = 1$$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 200 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,34 МПа

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 200 °C (расчётные условия):

$[\sigma] = 148$ МПа

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 200 °C:

E = $1,81 \cdot 10^5$ МПа

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

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_P + c = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_P - p} + c = (0,34 \cdot 45) / (2 \cdot 148 \cdot 1 - 0,34) + 4,9 = 4,952 \text{ мм}$$

4,952 мм ≤ 6 мм

Заключение: **Условие работоспособности выполнено**

Инов. № подл.	Подпись и дата
19756.4	
Инов. № дубл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Подпись и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР	Лист
						118

Допускаемое давление:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 148 \cdot 1 \cdot (6 - 4,9) / (45 + 6 - 4,9) = 7,063 \text{ МПа}$$

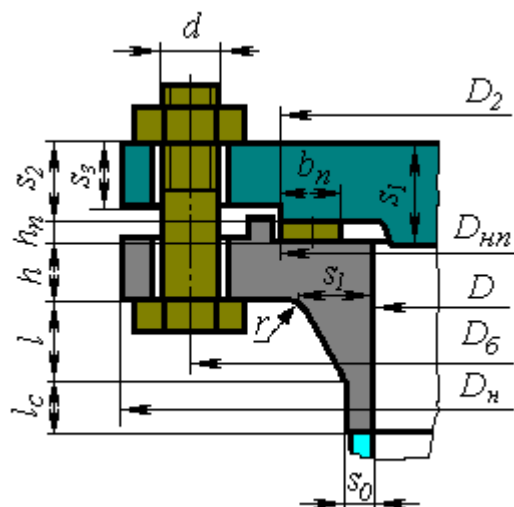
7,063 МПа ≥ 0,34 МПа

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата						Лист
										119
19756.4					ЕД-2.00.00.000 РР					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

Фланец с крышкой DN800

Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.4-2007 и ГОСТ Р 52857.2-2007



Исходные данные

Параметры крышки:

Материал:	09Г2С
Толщина стенки, s_1 :	34 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c_1 :	4 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, c_2 :	0 мм
Прибавка технологическая, c_3 :	1 мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, c :	5 мм
Толщина в месте прокладки, s_2 :	30 мм
Толщина вне уплотнения, s_3 :	24 мм
Наименьший диаметр наружной утоненной части, D_2 :	866 мм
Наружный диаметр крышки, D_n :	945 мм

Параметры фланца:

Тип фланца:	Приварные встык
Исполнение фланца:	Выступ-впадина
Диаметр болтовой окружности, D_6 :	905 мм
Материал фланца:	09Г2С (КП245) Gr.
Смежный элемент:	Штуцер МН DN800
Материал смежного элемента:	09Г2С
Толщина стенки смежного элемента:	16 мм
Внутренний диаметр фланца, D :	800 мм
Наружный диаметр фланца, D_n :	945 мм
Толщина фланца, h :	40 мм
Сумма прибавок, c :	4 мм
Длина конической части втулки, l :	42 мм

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Инов. № подл.	19756.4	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 PP	Лист	120
---------------	----------------	---------------	----------------	--------------	---------------	----------------	---------------	---------	------	------	----------	-------	------	-------------------	------	-----

$E_{\phi} = 1,818 \cdot 10^5$ МПа
Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 192$ °С:
 $\alpha_{\phi} = 0,126 \cdot 10^{-4}$ °С
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 20$ °С (расчётные условия):
 $[\sigma]_{\phi}^{20} = \eta \cdot \min(R_{eL} / n_T; R_{mT} / n_B; R_{m10nT} / n_d; R_{p1.0/10nT} / n_n) = 1 \cdot \min(245 / 1,5; 440 / 2,4; - / -; - / -) = 163,3$ МПа
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 20$ °С:
 $E_{\phi}^{20} = 1,99 \cdot 10^5$ МПа

Характеристики прокладки:

Тип и материал прокладки	Коэффициент m	Удельное давление обжатия $q_{обж}$, 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:

$b_0 = 12$ мм

Примечание:
$$\begin{cases} b_0 = b_{пр} & \text{при } b_{пр} \leq 15,0 \text{ мм} \\ b_0 = 3,8 \cdot \sqrt{b_{пр}} & \text{при } b_{пр} > 15,0 \text{ мм} \end{cases}$$

Рабочий наружный диаметр прокладки:

$D_{пр} = 865$ мм

Средний эффективный диаметр прокладки:

$D_{ст} = D_{пр} - b_0 = 865 - 12 = 853$ мм

Для металлических и асбометаллических прокладок $y_n = 0$.

Расчётные параметры болтов (шпилек):

Рабочая длина болта (шпильки):

$L_{\phi 0} = h + s_2 + h_{ш} = 30 + 40 + 4,5 = 74,5$ мм

Площадь сечения шпильки (по внутреннему диаметру резьбы):

$f_{\phi} = 0,225 \cdot 10^{-3}$ м²

Эффективная длина шпильки:

$L_{\phi} = L_{\phi 0} + 0,56 \cdot d = 74,5 + 0,56 \cdot 20 = 85,7$ мм

Податливость шпилек:

$$y_{\phi} = \frac{L_{\phi}}{E_{\phi}^{20} \cdot f_{\phi} \cdot n} = \frac{85,7}{(2,18 \cdot 10^5 \cdot 0,225 \cdot 10^{-3} \cdot 40)} = 0,4368 \cdot 10^{-7} \text{ мм/Н}$$

Расчётные параметры крышки:

$$K_{кр} = \frac{D_{кр}}{D_{ст}} = 945 / 853 = 1,108$$

Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата		Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР	
						Лист
						122

$$x_{кр} = \frac{0.67 \cdot [K_{кр}^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K_{кр}) - 1]}{(K_{кр} - 1) \cdot \left[K_{кр}^2 - 1 + (1.857 \cdot K_{кр}^2 + 1) \cdot \left(\frac{s_1}{s_2} \right)^3 \right]} = \frac{(0.67 \cdot (1.108^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg(1.108)) - 1)) / ((1.108 - 1) \cdot [1.108^2 - 1 + (1.857 \cdot 1.108^2 + 1) \cdot (34/30)^3])}{0.8623}$$

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

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

Угловая податливость крышки:

$$y_{кр} = \frac{x_{кр}}{E_{кр}^{20} \cdot s_2^3} = 0,8623 / (1,99 \cdot 10^5 \cdot 30^3) = 0,9195 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{Н м}$$

Расчётные параметры фланца:

$$l_0 = \sqrt{D \cdot s_0} = (800 \cdot 9)^{1/2} = 84,85 \text{ мм}$$

$$\beta_F = 0,818$$

$$K = \frac{D_K}{D + 2 \cdot c} = 945 / (800 + 2 \cdot 0) = 1,181$$

$$\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (1.181^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 1.181) - 1) / ((1.05 + 1.945 \cdot 1.181^2) \cdot (1.181 - 1)) = 1,845$$

$$\beta_V = 0,1837$$

$$\beta_U = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (1.181^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 1.181) - 1) / (1.36 \cdot (1.181^2 - 1) \cdot (1.181 - 1)) = 12,91$$

$$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot s_0^2} = (0,818 \cdot 40 + 84,85) / (1,845 \cdot 84,85) + 0,1837 \cdot 40^3 / (12,91 \cdot 84,85 \cdot 9^2) = 0,8836$$

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_{\Phi} = \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot l_0} = 0.91 \cdot 0,1837 / (1,99 \cdot 10^5 \cdot 0,8836 \cdot 9^2 \cdot 84,85) = 0,7925 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{Н м}$$

Плечи моментов:

$$a = 0$$

$$b = 0.5 \cdot (D_6 - D_{сн}) = 0.5 \cdot (905 - 853) = 26 \text{ мм}$$

$$\beta = \frac{s_1}{s_0} = 23/9 = 2,556$$

$$x = \frac{1}{\sqrt{(D + 2c) \cdot (s_0 - c)}} = 42 / ((800 + 2 \cdot 0) \cdot (9 - 0))^{1/2} = 0,495$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
				123

$$\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (2,556 - 1) \cdot 0,495 / (0,495 + (1 + 2,556) / 4) = 1,556$$

Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:

$$s_3 = \kappa \cdot (s_0 - c) = 1,556 \cdot (9 - 0) = 14,01 \text{ мм}$$

$$e = 0,5 \cdot (D_{\text{сп}} - (D + 2 \cdot c) - s_3) = 0,5 \cdot (853 - (800 + 2 \cdot 0) - 14,01) = 19,5 \text{ мм}$$

Расчёт нагрузок:

Равнодействующая давления:

$$Q_{\text{д}} = 0,785 \cdot D_{\text{ст}}^2 \cdot p = 0,785 \cdot 853^2 \cdot 0,34 = 1,942 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Усилие на прокладке в расчётных условиях, необходимое для обеспечения герметичности:

$$R_{\text{п}} = \pi \cdot D_{\text{ст}} \cdot b_0 \cdot m \cdot |p| = 3,142 \cdot 853 \cdot 12 \cdot 3 \cdot |0,34| = 3,28 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке:

$$P_{\text{обж}} = 0,5 \cdot \pi \cdot D_{\text{ст}} \cdot b_0 \cdot q_{\text{обж}} = 0,5 \cdot 3,142 \cdot 853 \cdot 12 \cdot 69 = 1,109 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$\eta = y_{\text{п}} + y_{\text{б}} + y_{\text{ф}}' \cdot b'^2 + y_{\text{ф}}'' \cdot b''^2 = 0 + 0,4368 \cdot 10^{-7} + 0,9195 \cdot 10^{-5} \cdot 26^2 + 0,7925 \cdot 10^{-5} \cdot 26^2 = 0,2457 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения с крышкой, нагруженного внутренним давлением:

$$\alpha = 1 - \frac{y_{\text{п}} - (y_{\text{ф}}' \cdot e + y_{\text{ф}}'' \cdot b) \cdot b}{\eta} = 1 - (0 - (0,7925 \cdot 10^{-5} \cdot 19,5 + 0,9195 \cdot 10^{-5} \cdot 26) \cdot 26) / 0,2457 \cdot 10^{-6} = 1,727$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в расчётных условиях:

$$P_{\text{б1}} = \alpha \cdot Q_{\text{д}} + R_{\text{п}} = 1,727 \cdot 1,942 \cdot 10^5 + 3,28 \cdot 10^4 = 3,682 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или сечению наименьшего диаметра:

$$A_{\text{б}} = n \cdot f_{\text{б}} = 40 \cdot 0,225 \cdot 10^{-3} = 0,009000 \text{ м}^2$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов:

$$P_{\text{б2}} = \max \{ P_{\text{обж}}; 0,4 \cdot A_{\text{б}} \cdot [\sigma]_{\text{б}}^{20} \} = \max \{ 1,109 \cdot 10^6; 0,4 \cdot 0,009000 \cdot 230 = 8,28 \cdot 10^5 \} = 1,109 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Расчёт без учета стесненности температурных деформаций

Расчёт болтов(шпилек):

Коэффициент увеличения допускаемых напряжений при затяжке: $\xi = 1,2$

Коэффициент условий работы: $K_{\text{ур}} = 1$

Коэффициент условий затяжки: $K_{\text{уз}} = 1$

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при затяжке:

$$[\sigma]_{\text{б}}^{\text{м}} = \xi \cdot K_{\text{ур}} \cdot K_{\text{уз}} \cdot K_{\text{ут}} \cdot [\sigma]_{\text{б}}^{20} = 1,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 276 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в условиях затяжки:

$$P_{\text{б}}^{\text{м}} = \max \{ P_{\text{б1}}; P_{\text{б2}} \} = \max \{ 3,682 \cdot 10^5; 1,109 \cdot 10^6 \} = 1,109 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{\text{б1}} = \frac{P_{\text{б}}^{\text{м}}}{A_{\text{б}}} \leq [\sigma]_{\text{б}}^{\text{м}}$$

$$\sigma_{\text{б1}} = \frac{P_{\text{б}}^{\text{м}}}{A_{\text{б}}} = 1,109 \cdot 10^6 / 0,009000 = 123,3 \text{ МПа}$$

Инв. № подл. 19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	ЕД-2.00.00.000 РР					Лист
										124
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

$$\beta_z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (1,181^2 + 1) / (1,181^2 - 1) = 6,059$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_z \cdot \sigma_R^M = 11,86 \cdot 2,885 \cdot 10^4 / (40^2 \cdot 800) - 6,059 \cdot 38,58 = 33,61 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении s_1 (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|, \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_M^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|, \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ |113 + 38,58|; |113 + 33,61| \} = 151,6 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1):

$$[\sigma]_M^{20} = 1,5 \cdot [\sigma]_F^{20} = 1,5 \cdot 163,3 = 245 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_M^{20} = 1 \cdot 245 = 245 \text{ МПа}$$

151,6 МПа \leq 245 МПа, **Условие прочности выполнено**

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при расчётных условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \left\{ P_F^P \cdot b + Q_d^P \cdot e; |Q_d^P| \cdot e \right\} = 1 \cdot \max \{ 9,682 \cdot 10^5 \cdot 26 + 1,942 \cdot 10^5 \cdot 19,5; |1,942 \cdot 10^5| \cdot 19,5 \} = 2,896 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в расчётных условиях в сечении s_1 :

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 2,896 \cdot 10^4 / (0,8836 \cdot (23 - 4)^2 \cdot 800) = 113,5 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в расчётных условиях:

$$\sigma_R^P = \frac{1,33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^P = (1,33 \cdot 0,818 \cdot 40 + 84,85) / (0,8836 \cdot 40^2 \cdot 84,85 \cdot 800) \cdot 2,896 \cdot 10^4 = 38,74 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в расчётных условиях:

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_z \cdot \sigma_R^P = 11,86 \cdot 2,896 \cdot 10^4 / (40^2 \cdot 800) - 6,059 \cdot 38,74 = 33,74 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в расчётных условиях в сечении s_1 :

$$\sigma_{1mm}^P = \frac{Q_d^P}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = 1,942 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot (800 + 23) \cdot (23 - 4)) = 3,953 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в расчётных условиях в сечении s_1 :

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^P + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^P + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_M$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^P + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^P + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^P \right| \right\} = \max \{ |113,5 - 3,953 + 38,74|; |113,5 - 3,953 + 33,74|; |113,5 + 3,953| \} = 148,3 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1):

$$[\sigma]_M = 1,5 \cdot [\sigma]_F = 1,5 \cdot 130,2 = 195,3 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_M = 1 \cdot 195,3 = 195,3 \text{ МПа}$$

148,3 МПа \leq 195,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$f = \max \left\{ \frac{C_{36}}{1 + A}, 1,0 \right\} = \max \{ 5,359 / (1 + 1,556); 1,0 \} = 2,097$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении s_0 :

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 2,097 \cdot 113 = 237 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении s_0 (п. 8.5.2):

Инв. № подл. 19756.4	Подпись и дата				
	Инв. № дубл.				
	Взам. инв. №				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР
					Лист 126

$$\gamma = \frac{1}{y_{\pi} + y_{\epsilon} \cdot \frac{E_{\epsilon}^{20}}{E_{\epsilon}} + \left(y_{\Phi} \cdot \frac{E_{\Phi}^{20}}{E_{\Phi}} + y_{xp} \cdot \frac{E_{xp}^{20}}{E_{xp}} \right) \cdot b^2} = \frac{1 / (0 + 0,4368 \cdot 10^{-7} * 2,18 \cdot 10^5 / 2,101 \cdot 10^5 + (0,7925 \cdot 10^{-5} * 1,99 \cdot 10^5 / 1,818 \cdot 10^5) * 26^2)}{1,818 \cdot 10^5 + 0,9195 \cdot 10^{-5} * 1,99 \cdot 10^5 / 1,818 \cdot 10^5} = 3,754 \cdot 10^6 \text{ Н/мм}$$

Нагрузка от температурных деформаций:

$$Q_t = \gamma \cdot \left(\alpha'_{\Phi} \cdot h' \cdot (t_{\Phi 1} - 20^0 \text{ C}) + \alpha'_{\Phi} \cdot h'' \cdot (t_{\Phi 2} - 20^0 \text{ C}) - \alpha_{\epsilon} \cdot (h' + h'') \cdot (t_{\epsilon} - 20^0 \text{ C}) \right) = \frac{3,754 \cdot 10^6 * (0,1252 \cdot 10^{-4} * 30 * (192 - 20^0 \text{ C}) + 0,126 \cdot 10^{-4} * 40 * (192 - 20^0 \text{ C}) - 0,1333 \cdot 10^{-4} * (30 + 40) * (170 - 20^0 \text{ C}))}{1} = 4,251 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в расчётных условиях:

$$P_{\epsilon 1} = \max \left\{ \begin{array}{l} \alpha \cdot Q_{\pi} + R_{\pi} \\ \alpha \cdot Q_{\pi} + R_{\pi} - Q_t \end{array} \right\} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,727 * 1,942 \cdot 10^5 + 3,28 \cdot 10^4 = 3,682 \cdot 10^5 \\ 1,727 * 1,942 \cdot 10^5 + 3,28 \cdot 10^4 - 4,251 \cdot 10^4 = 3,257 \cdot 10^5 \end{array} \right\} = 3,682 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Болтовая нагрузка в расчётных условиях:

$$P_{\epsilon}^p = P_{\epsilon}^M + (1 - \alpha) \cdot Q_{\pi} + Q_t = \frac{1,109 \cdot 10^6 + (1 - 1,727) * 1,942 \cdot 10^5 + 4,251 \cdot 10^4}{1} = 1,011 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$\psi = \frac{P_{\epsilon}^p}{Q_{\pi}} = \frac{1,011 \cdot 10^6}{1,943 \cdot 10^5} = 5,202$$

$$K_6 = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{1 + 3 \cdot \psi \cdot \left(\frac{D_3}{D_{\text{сп}}} - 1 \right)}{\frac{D_3}{D_{\text{сп}}}}} = \frac{0,41 * [(1 + 3 * 5,202 * (905 / 853 - 1)) / (905 / 853)]^{1/2}}{1} = 0,556$$

Поправочный коэффициент для допускаемого давления $K_p = 1,0$

Допускаемое давление:

$$[p] = \left(\frac{s_1 - c}{K_0 \cdot K_6 \cdot D_p} \right)^2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi \cdot K_p = \frac{(34 - 5)^2}{[1 * 0,556 * 853]} * 148,5 * 1 * 1 = 0,5552 \text{ МПа}$$

0,5552 МПа \geq 0,34 МПа

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Днища и крышки, нагруженные избыточным давлением

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_{\pi} + c = K_6 \cdot K_0 \cdot D_p \cdot \sqrt{\frac{p}{\varphi \cdot [\sigma] \cdot K_p}} + c = 0,556 * 1 * 853 * (0,34 / [1 * 148,5 * 1])^{1/2} + 5 = 27,7 \text{ мм}$$

27,7 мм \leq 34 мм

Заключение: **Условие прочности выполнено**

$$K_7 = 0,8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_{\text{сп}}} - 1} = 0,8 * [905 / 853 - 1]^{1/2} = 0,1975$$

$$\Phi = \max \left\{ \frac{P_{\epsilon}^p}{[\sigma]}; \frac{P_{\epsilon}^M}{[\sigma]^{20}} \right\} = \max \{ 1,011 \cdot 10^6 / 148,5; 1,109 \cdot 10^6 / 183 \} = 0,006806 \text{ м}^2$$

Расчётная толщина крышки в месте уплотнения с учётом прибавок:

$$s_{2p} + c = \max \left\{ K_7 \cdot \sqrt{\Phi}; \frac{0,6}{D_{\text{сп}}} \cdot \Phi \right\} + c = \max \{ 0,1975 * 0,006806^{1/2}; 0,6 * 0,006806 / 853 \} + 5 = 21,3 \text{ мм}$$

21,3 мм \leq 30 мм

Заключение: **Условие прочности выполнено**

$$K'_7 = 0,8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_2} - 1} = 0,8 * [905 / 866 - 1]^{1/2} = 0,1698$$

Изн. № подл.	19756.4	Подпись и дата		Подпись и дата	
Взам. инв. №		Изн. № дубл.		Подпись и дата	
Изн. № подл.	19756.4	Подпись и дата		Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
ЕД-2.00.00.000 РР					Лист
					129

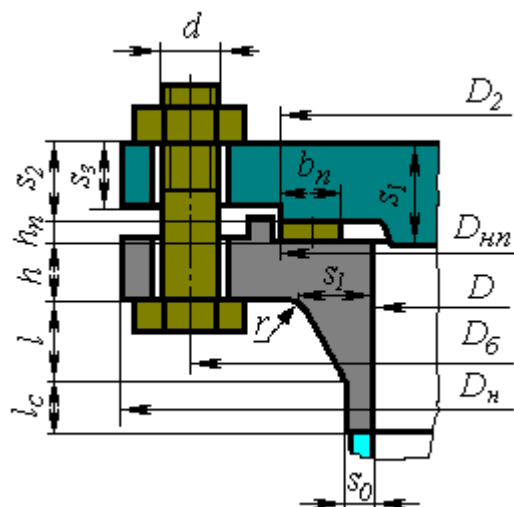
$$s_{3p} + c = \max \left\{ K_7' \cdot \sqrt{\Phi}; \frac{0,6}{D_2} \cdot \Phi \right\} + c = \max \{ 0,1698 * 0,006806^{1/2}; 0,6 * 0,006806 / 866 \} + 5 = 19,01 \text{ mm}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инва. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист 130

Фланец с крышкой DN700

Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.4-2007 и ГОСТ Р 52857.2-2007



Исходные данные

Параметры крышки:

Материал:	09Г2С
Толщина стенки, s_1 :	32 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c_1 :	4 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, c_2 :	0 мм
Прибавка технологическая, c_3 :	1 мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, c :	5 мм
Толщина в месте прокладки, s_2 :	28 мм
Толщина вне уплотнения, s_3 :	22 мм
Наименьший диаметр наружной утоненной части, D_2 :	764 мм
Наружный диаметр крышки, D_n :	840 мм

Параметры фланца:

Тип фланца:	Приварные встык
Исполнение фланца:	Выступ-впадина
Диаметр болтовой окружности, D_6 :	800 мм
Материал фланца:	09Г2С (КП245) Gr.
Смежный элемент:	Штуцер А DN700
Материал смежного элемента:	09Г2С
Толщина стенки смежного элемента:	16 мм
Внутренний диаметр фланца, D :	700 мм
Наружный диаметр фланца, D_n :	840 мм
Толщина фланца, h :	40 мм
Сумма прибавок, c :	4 мм
Длина конической части втулки, l :	33 мм

Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
<div>Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, с₁: 4 мм</div> <div>Прибавка для компенсации минусового допуска, с₂: 0 мм</div> <div>Прибавка технологическая, с₃: 1 мм</div> <div>Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, с: 5 мм</div> <div>Толщина в месте прокладки, s₂: 28 мм</div> <div>Толщина вне уплотнения, s₃: 22 мм</div> <div>Наименьший диаметр наружной утоненной части, D₂: 764 мм</div> <div>Наружный диаметр крышки, D_н: 840 мм</div> <div>Параметры фланца:</div> <div>Тип фланца: Приварные встык</div> <div>Исполнение фланца: Выступ-впадина</div> <div>Диаметр болтовой окружности, D_б: 800 мм</div> <div>Материал фланца: 09Г2С (КП245) Gr.</div> <div>Смежный элемент: Штуцер А DN700</div> <div>Материал смежного элемента: 09Г2С</div> <div>Толщина стенки смежного элемента: 16 мм</div> <div>Внутренний диаметр фланца, D: 700 мм</div> <div>Наружный диаметр фланца, D_н: 840 мм</div> <div>Толщина фланца, h: 40 мм</div> <div>Сумма прибавок, с: 4 мм</div> <div>Длина конической части втулки, l: 33 мм</div>					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
ЕД-2.00.00.000 РР					Лист
					131

$E_{\phi} = 1,818 \cdot 10^5 \text{ МПа}$
Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 192 \text{ }^{\circ}\text{C}$:
 $\alpha_{\phi} = 0,126 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}$
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):
 $[\sigma]_{\phi}^{20} = \eta \cdot \min(R_{eL} / n_T; R_{mT} / n_B; R_{m10nT} / n_d; R_{p1.0/10nT} / n_n) = 1 \cdot \min(245 / 1,5; 440 / 2,4; - / -; - / -) = 163,3 \text{ МПа}$
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$:
 $E_{\phi}^{20} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

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:
$$\begin{cases} b_0 = b_{\text{пр}} & \text{при } b_{\text{пр}} \leq 15,0 \text{ мм} \\ b_0 = 3,8 \cdot \sqrt{b_{\text{пр}}} & \text{при } b_{\text{пр}} > 15,0 \text{ мм} \end{cases}$$

Рабочий наружный диаметр прокладки:

$D_{\text{пр}} = 763 \text{ мм}$

Средний эффективный диаметр прокладки:

$D_{\text{ст}} = D_{\text{пр}} - b_0 = 763 - 12 = 751 \text{ мм}$

Для металлических и асбометаллических прокладок $y_n = 0$.

Расчётные параметры болтов (шпилек):

Рабочая длина болта (шпильки):

$L_{\phi 0} = h + s_2 + h_{\text{ш}} = 28 + 40 + 4,5 = 72,5 \text{ мм}$

Площадь сечения шпильки (по внутреннему диаметру резьбы):

$f_{\phi} = 0,225 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$

Эффективная длина шпильки:

$L_{\phi} = L_{\phi 0} + 0,56 \cdot d = 72,5 + 0,56 \cdot 20 = 83,7 \text{ мм}$

Податливость шпилек:

$$y_{\phi} = \frac{L_{\phi}}{E_{\phi}^{20} \cdot f_{\phi} \cdot n} = 83,7 / (2,18 \cdot 10^5 \cdot 0,225 \cdot 10^{-3} \cdot 32) = 0,5333 \cdot 10^{-7} \text{ мм/Н}$$

Расчётные параметры крышки:

$$K_{\text{кр}} = \frac{D_{\text{к}}}{D_{\text{ст}}} = 840 / 751 = 1,119$$

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата					
19756.4									
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР				
					Лист 133				

$$x_{кр} = \frac{0.67 \cdot [K_{кр}^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K_{кр}) - 1]}{(K_{кр} - 1) \cdot \left[K_{кр}^2 - 1 + (1.857 \cdot K_{кр}^2 + 1) \cdot \left(\frac{s_1}{s_2} \right)^3 \right]} = \frac{0.67 \cdot (1.119^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg(1.119)) - 1)}{1 + (1.857 \cdot 1.119^2 + 1) \cdot (32/28)^3} = 0.8367$$

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

$$E_{кр}^{20} = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Угловая податливость крышки:

$$y_{кр} = \frac{x_{кр}}{E_{кр}^{20} \cdot s_2^3} = 0.8367 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 28^3) = 0.1097 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{Н м}$$

Расчётные параметры фланца:

$$l_0 = \sqrt{D \cdot s_0} = (700 \cdot 9)^{1/2} = 79.37 \text{ мм}$$

$$\beta_F = 0.8414$$

$$K = \frac{D_K}{D + 2 \cdot c} = 840 / (700 + 2 \cdot 0) = 1.2$$

$$\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (1.2^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 1.2) - 1) / ((1.05 + 1.945 \cdot 1.2^2) \cdot (1.2 - 1)) = 1.837$$

$$\beta_V = 0.2332$$

$$\beta_U = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (1.2^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 1.2) - 1) / (1.36 \cdot (1.2^2 - 1) \cdot (1.2 - 1)) = 11.82$$

$$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot s_0^2} = (0.8414 \cdot 40 + 79.37) / (1.837 \cdot 79.37) + 0.2332 \cdot 40^3 / (11.82 \cdot 79.37 \cdot 9^2) = 0.9715$$

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_\Phi = \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot l_0} = 0.91 \cdot 0.2332 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 0.9715 \cdot 9^2 \cdot 79.37) = 0.9781 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{Н м}$$

Плечи моментов:

$$a = 0$$

$$b = 0.5 \cdot (D_B - D_{сп}) = 0.5 \cdot (800 - 751) = 24.5 \text{ мм}$$

$$\beta = \frac{s_1}{s_0} = 20 / 9 = 2.222$$

$$x = \frac{1}{\sqrt{(D + 2c) \cdot (s_0 - c)}} = 33 / ((700 + 2 \cdot 0) \cdot (9 - 0))^{1/2} = 0.4158$$

Инов. № подл. 19756.4	Подпись и дата			
	Инов. № дубл.			
	Взам. инв. №			
	Подпись и дата			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
				134

$$\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (2,222 - 1) * 0,4158 / (0,4158 + (1 + 2,222) / 4) = 1,416$$

Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:

$$s_3 = \kappa \cdot (s_0 - c) = 1,416 * (9 - 0) = 12,74 \text{ мм}$$

$$e = 0,5 \cdot (D_{\text{сп}} - (D + 2 \cdot c) - s_3) = 0,5 * (751 - (700 + 2 * 0) - 12,74) = 19,13 \text{ мм}$$

Расчёт нагрузок:

Равнодействующая давления:

$$Q_{\text{д}} = 0,785 \cdot D_{\text{ст}}^2 \cdot p = 0,785 * 751^2 * 0,34 = 1,505 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Усилие на прокладке в расчётных условиях, необходимое для обеспечения герметичности:

$$R_{\text{п}} = \pi \cdot D_{\text{ст}} \cdot b_0 \cdot m \cdot |p| = 3,142 * 751 * 12 * 3 * |0,34| = 2,888 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке:

$$P_{\text{обж}} = 0,5 \cdot \pi \cdot D_{\text{ст}} \cdot b_0 \cdot q_{\text{обж}} = 0,5 * 3,142 * 751 * 12 * 69 = 9,768 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

$$\eta = y_{\text{п}} + y_{\text{б}} + y_{\text{ф}}' \cdot b'^{1/2} + y_{\text{ф}}'' \cdot b''^{1/2} = 0 + 0,5333 \cdot 10^{-7} + 0,1097 \cdot 10^{-4} * 24,5^2 + 0,9781 \cdot 10^{-5} * 24,5^2 = 0,2708 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения с крышкой, нагруженного внутренним давлением:

$$\alpha = 1 - \frac{y_{\text{п}} - (y_{\text{ф}}' \cdot e + y_{\text{ф}}'' \cdot b) \cdot b}{\eta} = 1 - (0 - (0,9781 \cdot 10^{-5} * 19,13 + 0,1097 \cdot 10^{-4} * 24,5) * 24,5) / 0,2708 \cdot 10^{-6} = 1,72$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в расчётных условиях:

$$P_{\text{б1}} = \alpha \cdot Q_{\text{д}} + R_{\text{п}} = 1,72 * 1,505 \cdot 10^5 + 2,888 \cdot 10^4 = 2,878 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или сечению наименьшего диаметра:

$$A_{\text{б}} = n \cdot f_{\text{б}} = 32 * 0,225 \cdot 10^{-3} = 0,007200 \text{ м}^2$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов:

$$P_{\text{б2}} = \max \{ P_{\text{обж}}; 0,4 \cdot A_{\text{б}} \cdot [\sigma]_{\text{б}}^{20} \} = \max \{ 9,768 \cdot 10^5; 0,4 * 0,007200 * 230 = 6,624 \cdot 10^5 \} = 9,768 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

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:

$$[\sigma]_{\text{б}}^{\text{м}} = \xi \cdot K_{\text{уп}} \cdot K_{\text{уз}} \cdot K_{\text{ут}} \cdot [\sigma]_{\text{б}}^{20} = 1,2 * 1 * 1 * 1 * 230 = 276 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в условиях затяжки:

$$P_{\text{б}}^{\text{м}} = \max \{ P_{\text{б1}}; P_{\text{б2}} \} = \max \{ 2,878 \cdot 10^5; 9,768 \cdot 10^5 \} = 9,768 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{\text{б1}} = \frac{P_{\text{б}}^{\text{м}}}{A_{\text{б}}} \leq [\sigma]_{\text{б}}^{\text{м}}$$

$$\sigma_{\text{б1}} = \frac{P_{\text{б}}^{\text{м}}}{A_{\text{б}}} = 9,768 \cdot 10^5 / 0,007200 = 135,7 \text{ МПа}$$

Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	$P_{б1} = \alpha \cdot Q_{д} + R_{п} = 1,72 \cdot 1,505 \cdot 10^5 + 2,888 \cdot 10^5 = 2,878 \cdot 10^5 \text{ Н}$
						Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или сечению наименьшего диаметра:
						$A_б = n \cdot f_б = 32 \cdot 0,225 \cdot 10^{-3} = 0,007200 \text{ м}^2$
						Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов:
						$P_{б2} = \max \{ P_{обж}; 0,4 \cdot A_б \cdot [\sigma]_б^{20} \} = \max \{ 9,768 \cdot 10^5; 0,4 \cdot 0,007200 \cdot 230 = 6,624 \cdot 10^5 \} = 9,768 \cdot 10^5 \text{ Н}$
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Расчёт без учета стесненности температурных деформаций
						Расчёт болтов(шпилек):
						Коэффициент увеличения допускаемых напряжений при затяжке: $\xi = 1,2$
						Коэффициент условий работы: $K_{ур} = 1$
						Коэффициент условий затяжки: $K_{уз} = 1$
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при затяжке:
						$[\sigma]_б^M = \xi \cdot K_{ур} \cdot K_{уз} \cdot K_{ут} \cdot [\sigma]_б^{20} = 1,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 276 \text{ МПа}$
						Болтовая нагрузка в условиях затяжки:
						$P_б^M = \max \{ P_{б1}; P_{б2} \} = \max \{ 2,878 \cdot 10^5; 9,768 \cdot 10^5 \} = 9,768 \cdot 10^5 \text{ Н}$
						Условие прочности при затяжке:
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	$\sigma_{б1} = \frac{P_б^M}{A_б} \leq [\sigma]_б^M$
						$\sigma_{б1} = \frac{P_б^M}{A_б} = 9,768 \cdot 10^5 / 0,007200 = 135,7 \text{ МПа}$
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Инов. № подл.						

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при $\sigma_{61} \geq 120$ МПа выбирается по рис. Л.1 ГОСТ 52857.4–2007:

$$M_{кр} = 151,9 \text{ Н м}$$

При наличии смазки величина $M_{кр}$ снижается на 25% и составляет $0.75 \cdot M_{кр} = 113,9 \text{ Н м}$

$135,7 \text{ МПа} \leq 276 \text{ МПа}$, **Условие прочности выполнено**

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при расчётных условиях:

$$[\sigma]_6^P = K_{уп} \cdot K_{уз} \cdot K_{ут} \cdot [\sigma]_6 = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 226,5 = 226,5 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в расчётных условиях:

$$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot Q_d = 9,768 \cdot 10^5 + (1 - 1,72) \cdot 1,505 \cdot 10^5 = 8,684 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности в расчётных условиях:

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} \leq [\sigma]_6^P$$

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} = 8,684 \cdot 10^5 / 0,007200 = 120,6 \text{ МПа}$$

$120,6 \text{ МПа} \leq 226,5 \text{ МПа}$, **Условие прочности выполнено**

Болтовая нагрузка в условиях затяжки:

$$P_6^M = \max\{P_{b1}; P_{b2}\} = \max\{2,878 \cdot 10^5; 9,768 \cdot 10^5\} = 9,768 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} \leq [\sigma]_6^M$$

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} = 9,768 \cdot 10^5 / 0,007200 = 135,7 \text{ МПа}$$

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при $\sigma_{61} \geq 120$ МПа выбирается по рис. Л.1 ГОСТ 52857.4–2007:

$$M_{кр} = 151,9 \text{ Н м}$$

При наличии смазки величина $M_{кр}$ снижается на 25% и составляет $0.75 \cdot M_{кр} = 113,9 \text{ Н м}$

Расчёт ответного фланца:

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:

$$C_F = \max \left\{ 1; \frac{\frac{\pi \cdot D_6}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}} \right\} = \max \{ 1; (3,142 \cdot 800 / 32 / (2 \cdot 20 + 6 \cdot 40 / (3 + 0.5)))^{1/2} \} = 1$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке:

$$M^M = C_F \cdot P_6^M \cdot b = 1 \cdot 9,768 \cdot 10^5 \cdot 24,5 = 2,393 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

$$D^* = (D + 2 \cdot c)_{\text{при } (D + 2 \cdot c) \geq 20 \cdot (s_1 - c)} = 700 + 2 \cdot 0 \text{ при } (700 + 2 \cdot 0) \geq 20 \cdot (20 - 0) = 700 \text{ мм}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении s_1 :

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 2,393 \cdot 10^4 / (0,9715 \cdot (20 - 4)^2 \cdot 700) = 137,5 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_R^M = \frac{1,33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^M = (1,33 \cdot 0,8414 \cdot 40 + 79,37) / (0,9715 \cdot 40^2 \cdot 79,37 \cdot 700) \cdot 2,393 \cdot 10^4 = 34,4 \text{ МПа}$$

$$\beta_Y = \frac{1}{K - 1} \cdot \left(0,69 + 5,72 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (1,2 - 1) \cdot (0,69 + 5,72 \cdot 1,2^2 \cdot \lg 1,2 / (1,2^2 - 1)) = 10,86$$

Инов. № подл. 19756.4	Подпись и дата			
	Инов. № дубл.			
	Взам. инв. №			
	Подпись и дата			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист 136

$$\beta_z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (1,2^2 + 1) / (1,2^2 - 1) = 5,545$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_z \cdot \sigma_R^M = 10,86 \cdot 2,393 \cdot 10^4 / (40^2 \cdot 700) - 5,545 \cdot 34,4 = 41,32 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении s_1 (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|, \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_M^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|, \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ |137,5 + 34,4|; |137,5 + 41,32| \} = 178,8 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1):

$$[\sigma]_M^{20} = 1,5 \cdot [\sigma]_F^{20} = 1,5 \cdot 163,3 = 245 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_M^{20} = 1 \cdot 245 = 245 \text{ МПа}$$

178,8 МПа ≤ 245 МПа, **Условие прочности выполнено**

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при расчётных условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \left\{ P_F^P \cdot b + Q_{\text{д}} \cdot e; |Q_{\text{д}}| \cdot e \right\} = 1 \cdot \max \{ 8,684 \cdot 10^5 \cdot 24,5 + 1,505 \cdot 10^5 \cdot 19,13; |1,505 \cdot 10^5| \cdot 19,13 \} = 2,415 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в расчётных условиях в сечении s_1 :

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 2,415 \cdot 10^4 / (0,9715 \cdot (20 - 4)^2 \cdot 700) = 138,7 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в расчётных условиях:

$$\sigma_R^P = \frac{1,33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^P = (1,33 \cdot 0,8414 \cdot 40 + 79,37) / (0,9715 \cdot 40^2 \cdot 79,37 \cdot 700) \cdot 2,415 \cdot 10^4 = 34,72 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в расчётных условиях:

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_z \cdot \sigma_R^P = 10,86 \cdot 2,415 \cdot 10^4 / (40^2 \cdot 700) - 5,545 \cdot 34,72 = 41,7 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в расчётных условиях в сечении s_1 :

$$\sigma_{\text{лмм}}^P = \frac{Q_{\text{д}}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = 1,505 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot (700 + 20) \cdot (20 - 4)) = 4,159 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в расчётных условиях в сечении s_1 :

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^P + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^P + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_M$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^P + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^P + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^P \right| \right\} = \max \{ |138,7 - 4,159 + 34,72|; |138,7 - 4,159 + 41,7|; |138,7 + 4,159| \} = 176,3 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1):

$$[\sigma]_M = 1,5 \cdot [\sigma]_F = 1,5 \cdot 130,2 = 195,3 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_M = 1 \cdot 195,3 = 195,3 \text{ МПа}$$

176,3 МПа ≤ 195,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$f = \max \left\{ \frac{C_{36}}{1 + A}, 1,0 \right\} = \max \{ 4,274 / (1 + 1,222); 1,0 \} = 1,923$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении s_0 :

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1,923 \cdot 137,5 = 264,4 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении s_0 (п. 8.5.2):

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
				137

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1):

$$[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_F^{20} = 3 \cdot 163,3 = 490 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 490 = 637 \text{ МПа}$$

264,4 МПа ≤ 637 МПа, **Условие прочности выполнено**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в расчётных условиях в сечении s_0 :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1,923 \cdot 138,7 = 266,9 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в расчётных условиях в сечении s_0 :

$$\sigma_{0mm}^P = \frac{Q_{\pi}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = 1,505 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot (700 + 9) \cdot (9 - 4)) = 13,52 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в расчётных условиях в сечении s_0 :

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 0,34 \cdot 700 / (2 \cdot (9 - 4)) = 23,8 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в расчётных условиях в сечении s_0 :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^P \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^P - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^P \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^P - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \max \{ |266,9 \pm 13,52|; |0.3 \cdot 266,9 \pm 23,8|; |0.7 \cdot 266,9 \pm (13,52 - 23,8)| \} = 280,4 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_F = 3 \cdot 130,2 = 390,6 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 \cdot 390,6 = 507,8 \text{ МПа}$$

280,4 МПа ≤ 507,8 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие статической прочности в расчётных условиях в сечении s_0 :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} \leq [\sigma]_F$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} = \max \{ |23,8|; |13,52| \} = 23,8 \text{ МПа}$$

23,8 МПа ≤ 130,2 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_F^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ |34,4|; |41,32| \} = 41,32 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_F^{20} = 1 \cdot 163,3 = 163,3 \text{ МПа}$$

41,32 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие статической прочности в расчётных условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_F$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} = \max \{ |34,72|; |41,7| \} = 41,7 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_F = 1 \cdot 130,2 = 130,2 \text{ МПа}$$

41,7 МПа ≤ 130,2 МПа, **Условие прочности выполнено**

Изн. № подл.	Подпись и дата	Изн. № дубл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	Изн. № подл.
19756.4							
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР		
					Лист		
					138		

Жёсткость фланца:

Угол поворота фланца в расчётных условиях:

$$\Theta = M^P \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E^{20}}{E} = 2,415 \cdot 10^4 * 0,9781 \cdot 10^{-5} * 1,99 \cdot 10^5 / 1,818 \cdot 10^5 = 0,2586^{\circ}$$

Допускаемый угол поворота фланца:

$$[\Theta] = 0,419^{\circ}$$

Коэффициент увеличения допускаемого угла поворота фланцев: $K_{\Theta} = 1$

Условие выполнения жесткости фланцев:

$$\Theta \leq K_{\Theta} \cdot [\Theta] = 1 * 0,419 = 0,419^{\circ}$$

Условие жёсткости выполнено

В соответствии с п. 4.7 ГОСТ Р 52857.4–2007 допускается не учитывать нагрузку от температурных деформаций при выполнении условия:

$$\max\{t_{\Phi}; t_{\text{кр}}; t_{\epsilon}\} \leq 100^{\circ}\text{C}$$

$$\max\{t_{\Phi}; t_{\text{кр}}; t_{\epsilon}\} = \max\{192; 192; 170\} = 192^{\circ}\text{C}$$

Расчет с учетом усилий от температурных деформаций не производится.

В соответствии с п. 4.7 ГОСТ Р 52857.4–2007 допускается не учитывать нагрузку от температурных деформаций при выполнении условия:

$$0 \leq \frac{\alpha_{\Phi} \cdot h \cdot (t_{\Phi} - 20^{\circ}\text{C}) + \alpha_{\text{кр}} \cdot h_{\text{кр}} \cdot (t_{\text{кр}} - 20^{\circ}\text{C})}{\alpha_{\epsilon} \cdot (h + h_{\text{кр}}) \cdot (t_{\epsilon} - 20^{\circ}\text{C})} - 1 \leq 0.1$$
$$\frac{\alpha_{\Phi} \cdot h \cdot (t_{\Phi} - 20^{\circ}\text{C}) + \alpha_{\text{кр}} \cdot h_{\text{кр}} \cdot (t_{\text{кр}} - 20^{\circ}\text{C})}{\alpha_{\epsilon} \cdot (h + h_{\text{кр}}) \cdot (t_{\epsilon} - 20^{\circ}\text{C})} - 1 = \frac{[0,126 \cdot 10^{-4} * 40 * (192 - 20^{\circ}\text{C}) + 0,1252 \cdot 10^{-4} * 28 * (192 - 20^{\circ}\text{C})] / [0,1333 \cdot 10^{-4} * (40 + 28) * (170 - 20^{\circ}\text{C})] - 1}{0,08104}$$

Расчет с учетом усилий от температурных деформаций не производится.

Расчёт крышки на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Коэффициент ослабления для днищ, не имеющих отверстий $K_0 = 1.0$

Температура фланца (кольца), t_{Φ} : 192°C

Свойства материала крышки

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 192^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$[\sigma]_{\text{кр}} = 165,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре $T = 192^{\circ}\text{C}$:

$$E_{\text{кр}} = 1,818 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С при температуре $T = 192^{\circ}\text{C}$:

$$\alpha_{\text{кр}} = 0,1252 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}$$

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

$$[\sigma]_{\text{кр}}^{20} = 196 \text{ МПа}$$

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

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

Днища и крышки с дополнительным краевым моментом, нагруженные избыточным давлением

Равнодействующая давления:

$$Q_{\text{д}} = p \cdot \frac{\pi \cdot D_{\text{ст}}^2}{4} = 0,34 * 3,142 * 751^2 / 4 = 1,506 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
				139

$$\gamma = \frac{1}{y_{\pi} + y_{\phi} \cdot \frac{E_{\phi}^{20}}{E_{\phi}} + \left(y_{\psi} \cdot \frac{E_{\psi}^{20}}{E_{\psi}} + y_{xp} \cdot \frac{E_{xp}^{20}}{E_{xp}} \right) \cdot b^2} = \frac{1 / (0 + 0,5333 \cdot 10^{-7} * 2,18 \cdot 10^5 / 2,101 \cdot 10^5 + (0,9781 \cdot 10^{-5} * 1,99 \cdot 10^5 / 1,818 \cdot 10^5 + 0,1097 \cdot 10^{-4} * 1,99 \cdot 10^5 / 1,818 \cdot 10^5) * 24,5^2)}{3,409 \cdot 10^6} = \frac{1}{3,409 \cdot 10^6} \text{ H/mm}$$

Нагрузка от температурных деформаций:

$$Q_t = \gamma \cdot (\alpha'_{\Phi} \cdot h' \cdot (t_{\Phi 1} - 20^{\circ}C) + \alpha'_{\Phi} \cdot h'' \cdot (t_{\Phi 2} - 20^{\circ}C) - \alpha_6 \cdot (h' + h'') \cdot (t_6 - 20^{\circ}C)) = \frac{3,409 \cdot 10^6 \cdot (0,1252 \cdot 10^{-4} \cdot 28 \cdot (192 - 20^{\circ}C) + 0,126 \cdot 10^{-4} \cdot 40 \cdot (192 - 20^{\circ}C) - 0,1333 \cdot 10^{-4} \cdot (28 + 40) \cdot (170 - 20^{\circ}C))}{H} = 3,756 \cdot 10^4$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в расчётных условиях:

$$P_{61} = \max \left\{ \begin{matrix} \alpha \cdot Q_{\pi} + R_{\pi} \\ \alpha \cdot Q_{\pi} + R_{\pi} - Q_t \end{matrix} \right\} = \max \{ 1,72 \cdot 1,505 \cdot 10^5 + 2,888 \cdot 10^4 = 2,878 \cdot 10^5 \\ 1,72 \cdot 1,505 \cdot 10^5 + 2,888 \cdot 10^4 - 3,756 \cdot 10^4 = 2,502 \cdot 10^5 \} = 2,878 \cdot 10^5 \text{ H}$$

Болтовая нагрузка в расчётных условиях:

$$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot Q_H + Q_L = \frac{9,768 \cdot 10^5}{3,756 \cdot 10^4} + (1 - 1,72) * 1,505 \cdot 10^5 + \frac{9,059 \cdot 10^5}{H}$$

$$\Psi = \frac{P_6^P}{Q_{\pi}} = 9,059 \cdot 10^5 / 1,506 \cdot 10^5 = 6,015$$

$$K_6 = 0.41 \cdot \sqrt{\frac{1 + 3 \cdot \psi \cdot \left(\frac{D_3}{D_{\text{сп}}} - 1 \right)}{\frac{D_3}{D_{\text{сп}}}}} = 0.41 \cdot [(1 + 3 \cdot 6,015 \cdot (800 / 751 - 1)) / (800 / 751)]^{1/2} = 0,5862$$

Поправочный коэффициент для допускаемого давления $K_p = 1.0$

Допускаемое давление:

$$[p] = \left(\frac{s_1 - c}{K_0 \cdot K_6 \cdot D_p} \right)^2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi \cdot K_p = ((32 - 5) / (1 \cdot 0,5862 \cdot 751))^2 \cdot 165,5 \cdot 1 \cdot 1 = 0,6226 \text{ МПа}$$

$$0,6226 \text{ МПа} \geq 0,34 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Днища и крышки, нагруженные избыточным давлением

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_p + c = K_6 \cdot K_0 \cdot D_p \cdot \sqrt{\frac{p}{\varphi \cdot [\sigma] \cdot K_p}} + c = 0,5862 \cdot 1 \cdot 751 \cdot (0,34 / [1 \cdot 165,5 \cdot 1])^{1/2} + 5 = 24,95 \text{ mm}$$

$$24,95 \text{ mm} \leq 32 \text{ mm}$$

Заключение: Условие прочности выполнено

$$K_7 = 0.8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_{\text{с.п.}}} - 1} = 0.8 \cdot [800/751 - 1]^{1/2} = 0.2043$$

$$\Phi = \max \left\{ \frac{P_6^P}{[\sigma]}; \frac{P_6^M}{[\sigma]^{20}} \right\} = \max \{ 9,059 \cdot 10^5 / 165,5; 9,768 \cdot 10^5 / 196 \} = 0,005474 \text{ м}^2$$

Расчётная толщина крышки в месте уплотнения с учётом прибавок:

$$s_{2p} + c = \max \left\{ K_7 \cdot \sqrt{\Phi}; \frac{0.6}{D_{\text{сн}}} \cdot \Phi \right\} + c = \max \{ 0,2043 * 0,005474^{1/2}; 0.6 * 0,005474 / 751 \} + 5 = 20,12 \text{ мм}$$

$$20.12 \text{ mm} \leq 28 \text{ mm}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

$$K'_7 = 0.8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_2} - 1} = 0.8 \cdot [800/764 - 1]^{1/2} = 0,1737$$

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p> $[p] = \left(\frac{s_1 - c}{K_0 \cdot K_6 \cdot D_p} \right) \cdot [\sigma] \cdot \varphi \cdot K_p = ([32 - 5] / [1 \cdot 0,5862 \cdot 751])^2 \cdot 165,5 \cdot 1 \cdot 1 = 0,6226 \text{ МПа}$ </p> <p> $0,6226 \text{ МПа} \geq 0,34 \text{ МПа}$ </p> <p> Заключение: Условие прочности выполнено </p> <p style="text-align: center; font-weight: bold;"> <i>Днища и крышки, нагруженные избыточным давлением</i> </p> <p> Расчётная толщина стенки с учётом прибавок: </p> <p> $s_p + c = K_0 \cdot K_6 \cdot D_p \cdot \sqrt{\frac{p}{\varphi \cdot [\sigma] \cdot K_p}} + c = 0,5862 \cdot 1 \cdot 751 \cdot (0,34 / [1 \cdot 165,5 \cdot 1])^{1/2} + 5 = 24,95 \text{ мм}$ </p> <p> $24,95 \text{ мм} \leq 32 \text{ мм}$ </p> <p> Заключение: Условие прочности выполнено </p> <p> $K_7 = 0,8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_{сн}}} - 1 = 0,8 \cdot [800 / 751 - 1]^{1/2} = 0,2043$ </p> <p> $\Phi = \max \left\{ \frac{p_6^p}{[\sigma]}; \frac{p_6^m}{[\sigma]^{20}} \right\} = \max \{ 9,059 \cdot 10^5 / 165,5; 9,768 \cdot 10^5 / 196 \} = 0,005474 \text{ м}^2$ </p> <p> Расчётная толщина крышки в месте уплотнения с учётом прибавок: </p> <p> $s_{2p} + c = \max \left\{ K_7 \cdot \sqrt{\Phi}; \frac{0,6}{D_{сн}} \cdot \Phi \right\} + c = \max \{ 0,2043 \cdot 0,005474^{1/2}; 0,6 \cdot 0,005474 / 751 \} + 5 = 20,12 \text{ мм}$ </p> <p> $20,12 \text{ мм} \leq 28 \text{ мм}$ </p> <p> Заключение: Условие прочности выполнено </p> <p> $K_7' = 0,8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_2}} - 1 = 0,8 \cdot [800 / 764 - 1]^{1/2} = 0,1737$ </p>
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<div style="font-size: 24px; font-weight: bold;">ЕД-2.00.00.000 РР</div>
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<div style="font-size: 24px; font-weight: bold;">140</div>

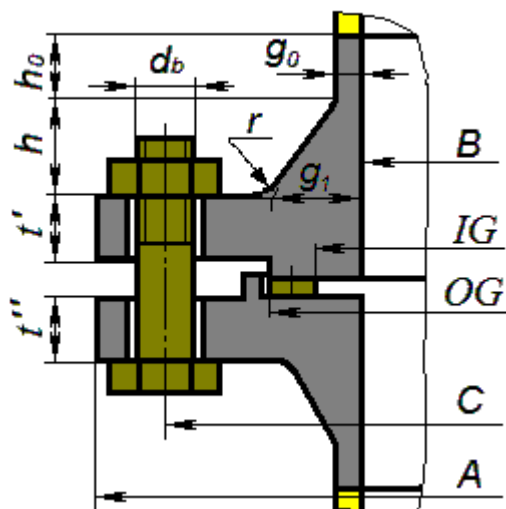
$$s_{3p} + c = \max \left\{ K_7' \cdot \sqrt{\Phi}; \frac{0.6}{D_2} \cdot \Phi \right\} + c = \max \{ 0,1737 * 0,005474^{1/2}; 0.6 * 0,005474 / 764 \} + 5 = 17,85 \text{ mm}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Иув. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
				141

Фланец DN100

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: 190 мм

Данные первого фланца (кольца):

Смежный элемент: Штуцер LT1-LT2 DN100

Материал смежного элемента: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281

Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245) Gr.

Наружный диаметр фланца (кольца), А: 230 мм

Толщина фланца (кольца), t: 21 мм

Сумма прибавок, с: 4 мм

Внешняя коррозия фланца, c_f : 0 мм

Внутренний диаметр фланца, В: 96 мм

Длина конической части втулки, h: 27,5 мм

Длина цилиндрической части втулки, h_0 : 9,5 мм

Толщина цилиндрической части втулки, g_0 : 7 мм

Толщина конической части втулки, g_1 : 18 мм

Радиус перехода, г: 5 мм

Шпильки:

Материал: 35Х

Наружный диаметр, d_b : 20 мм

Количество, n: 8

Радиальная коррозия крепежа, c_b : 0 мм

Прокладка:

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Свободный/интегральный: -	
					Диаметр болтовой окружности, С: 190 мм Данные первого фланца (кольца): Смежный элемент: Штуцер LT1-LT2 DN100 Материал смежного элемента: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245) Gr. Наружный диаметр фланца (кольца), А: 230 мм Толщина фланца (кольца), t: 21 мм Сумма прибавок, с: 4 мм Внешняя коррозия фланца, с _г : 0 мм Внутренний диаметр фланца, В: 96 мм Длина конической части втулки, h: 27,5 мм Длина цилиндрической части втулки, h ₀ : 9,5 мм Толщина цилиндрической части втулки, g ₀ : 7 мм Толщина конической части втулки, g ₁ : 18 мм Радиус перехода, г: 5 мм Шпильки: Материал: 35Х Наружный диаметр, d _б : 20 мм Количество, n: 8 Радиальная коррозия крепежа, с _б : 0 мм Прокладка:	
19756.4						
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР	

$$B = B + 2 \cdot c = 96 + 2 \cdot 4 = 104 \text{ мм}$$

Диаметр втулки с учетом коррозии (для фланцев, приварных встык):

$$g_0 = g_0 - c = 7 - 4 = 3 \text{ мм}$$

Больший диаметр конической втулки с учетом коррозии:

$$g_1 = g_1 - c = 18 - 4 = 14 \text{ мм}$$

Толщина фланца, с учетом коррозии:

$$t = t - c_f = 21 - 0 = 21 \text{ мм}$$

Расчётные параметры второго фланца:

Параметры первого и второго фланцев полностью совпадают, расчёт второго фланца не проводится

Характеристики прокладки:

Тип и материал прокладки	Прокладочный коэффициент, m	Давление обжатия, у, МПа	Допускаемое удельное давление [q], МПа	Коэффициент обжатия K	Условный модуль сжатия E _n , 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:

$$N = \frac{OG - IG}{2} = (149 - 129) / 2 = 10 \text{ мм}$$

Базовая контактная ширина прокладки:

$$b_0 = \frac{N}{2} = 10 / 2 = 5 \text{ мм}$$

Диаметр окружности приложения реакции со стороны прокладки:

Если b₀ ≤ 6 мм, G равно среднему диаметру контактирующей поверхности прокладки.

$$G = \frac{OG + \max\{B', B'', IG\}}{2} = (149 + \max\{96; 96; 129\}) / 2 = 139 \text{ мм}$$

Ширина, используемая для определения базовой контактной ширины прокладки через b₀, на основании возможной контактной ширины прокладки:

$$N = \frac{OG - IG}{2} = (149 - 129) / 2 = 10 \text{ мм}$$

Базовая контактная ширина прокладки:

$$b_0 = \frac{N}{2} = 10 / 2 = 5 \text{ мм}$$

Диаметр окружности приложения реакции со стороны прокладки:

Если b₀ ≤ 6 мм, G равно среднему диаметру контактирующей поверхности прокладки.

$$G = \frac{OG + \max\{B', B'', IG\}}{2} = (149 + \max\{96; 96; 129\}) / 2 = 139 \text{ мм}$$

Эффективная контактная ширина прокладки:

$$b = \begin{cases} b_0 & \text{если } b_0 \leq 6 \text{ мм} \\ 2.5 \cdot \sqrt{b_0} & \text{если } b_0 > 6 \text{ мм} \end{cases} = 5 \text{ мм}$$

Расчёт нагрузок

Проектная болтовая нагрузка для расчётных условий (для несамонуплотняющихся прокладок):

Инов. № подл.	Подпись и дата
19756.4	
Изм.	Лист
№ докум.	Подп.
Дата	

ЕД-2.00.00.000 РР

Лист

144

$$W_o = 0.785 \cdot G^2 \cdot p + 2 \cdot b \cdot \pi \cdot G \cdot m \cdot p = 0.785 \cdot 139^2 \cdot 0,34 + 2 \cdot 5 \cdot 3,142 \cdot 139 \cdot 3 \cdot 0,34 = 9611 \text{ Н}$$

Величина растягивающей внешней силы:

$$F_A = 142,2 \text{ Н}$$

Сжимающими нагрузками пренебрегают, и в этом случае F_A приравнивается нулю.

Внешний изгибающий момент:

$$M_E = 0 \text{ Н м}$$

$$W_{gs} = \pi \cdot b \cdot G \cdot y = 3,142 \cdot 5 \cdot 139 \cdot 69 = 1,507 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Общая расчетная площадь сечения болтов:

$$A_m = \max \left[\frac{W_o + F_A + \frac{4 \cdot M_E}{G}}{S_{bo}}; \frac{W_{gs}}{S_{bg}} \right] = \max[(9611 + 142,2 + 4 \cdot 0 / 139) / 141,2; 1,507 \cdot 10^5 / 147,2] = 0,001023 \text{ м}^2$$

Диаметр сечения болта (шпильки) с учетом коррозии:

$$d_{bc} = 20 \text{ мм}$$

Площадь сечения болта (шпильки) (по внутреннему диаметру резьбы с учетом коррозии):

$$f_b = 0,225 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Площадь поперечного сечения болтов по внутреннему диаметру резьбы или минимальному диаметру стержня:

$$A_b = n \cdot f_b = 8 \cdot 0,225 \cdot 10^{-3} = 0,001800 \text{ м}^2$$

Расчёт болтов(шпилек):

Условие прочности болтов:

$$A_m \leq A_b$$

$$0,001023 \text{ м}^2 \leq 0,001800 \text{ м}^2$$

Условие прочности выполнено

Расчёт напряжений первого фланца:

Равнодействующая давления на внутренней поверхности фланца:

$$H_D = 0.785 \cdot B^2 \cdot p = 0.785 \cdot 104^2 \cdot 0,34 = 2887 \text{ Н}$$

Плечо момента для силы H_D (фланцы интегрального типа, или другие, рассчитываемые аналогично):

$$h_D = \frac{C - B - g_1}{2} = (190 - 104 - 14) / 2 = 36 \text{ мм}$$

Равнодействующая давления:

$$H = 0.785 \cdot G^2 \cdot p = 0.785 \cdot 139^2 \cdot 0,34 = 5157 \text{ Н}$$

Разница между общей равнодействующей давления и равнодействующей на внутренней поверхности фланца:

$$H_T = H - H_D = 5157 - 2887 = 2270 \text{ Н}$$

Радиальное расстояние от реакции прокладки до болтовой окружности:

$$h_G = \frac{C - G}{2} = (190 - 139) / 2 = 25,5 \text{ мм}$$

Плечо для нагрузки H_T (интегральные фланцы, а также иные, рассчитываемые аналогично):

$$h_T = \frac{1}{2} \left[\frac{C - B}{2} + h_G \right] = 1/2 \cdot [(190 - 104) / 2 + 25,5] = 34,25 \text{ мм}$$

Нагрузка на прокладку (разница между проектной болтовой нагрузкой и равнодействующей давления), в расчётных:

$$H_G = W_o - H = 9611 - 5157 = 4454 \text{ Н}$$

Болтовой интервал:

$$B_S = \frac{\pi \cdot C}{n} = 3,142 \cdot 190 / 8 = 74,61 \text{ мм}$$

Номинальный диаметр болта:

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
				145

$$K_{CD} = \left(C_c \cdot D_{DG}^3 \right) \cdot \left[\frac{1}{3} - 1,05 \cdot \left(\frac{D_{DG}}{C_c} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{192} \cdot \left\{ \frac{D_{DG}}{C_c} \right\}^4 \right) \right] = (27,5 \cdot 8,5^3) \cdot [1/3 - 1,05 \cdot (8,5 / 27,5) \cdot (1 - 1/192 \cdot \{8,5 / 27,5\}^4)] = 0,1487 \cdot 10^{-9} \text{ м}^4$$

Полярный момент сечения фланца (интегральные фланцы, плоские фланцы с втулкой):

$$I_p = K_{AB} + K_{CD} = 0,1537 \cdot 10^{-6} + 0,1487 \cdot 10^{-9} = 0,1538 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$$

Компонент проектного момента на фланце, как результат действия внешнего изгибающего момента и/или осевой силы:

$$M_{oe} = 4 \cdot M_E \cdot \left[\frac{I}{0,3846 \cdot I_p + I} \right] \cdot \left[\frac{h_D}{C - 2 \cdot h_D} \right] + F_A \cdot h_D = 4 \cdot 0 \cdot [0,9241 \cdot 10^{-7} / (0,3846 \cdot 0,1538 \cdot 10^{-6} + 0,9241 \cdot 10^{-7})] \cdot [36 / (190 - 2 \cdot 36)] + 142,2 \cdot 36 = 5,12 \text{ Н м}$$

Коэффициент момента для расчета свободных колец:

$$F_S = 1$$

Изгибающий момент в расчётных условиях (внутреннее давление):

$$M_o = [(H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G) \cdot B_{SC} + M_{oe}] \cdot F_S = [(2887 \cdot 36 + 2270 \cdot 34,25 + 4454 \cdot 25,5) \cdot 1,106 + 5,12] \cdot 1 = 331,7 \text{ Н м}$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$f = 1$$

Продольные напряжения во втулке, в расчётных условиях:

$$S_H = \frac{f \cdot M_o}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 331,7 / (1,715 \cdot 14^2 \cdot 104) = 9,487 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min \{1,5 \cdot S_{fo}; 2,5 \cdot S_{no}\}$$

$$\min \{1,5 \cdot S_{fo}; 2,5 \cdot S_{no}\} = \min \{1,5 \cdot 130,2; 2,5 \cdot 148\} = 195,3 \text{ МПа}$$

9,487 МПа ≤ 195,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, расчётные условия:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_o}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 \cdot 21 \cdot 0,03195 + 1) \cdot 331,7 / (1,715 \cdot 21^2 \cdot 104) = 7,979 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{fo}$$

7,979 МПа ≤ 130,2 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left(0,66845 + 5,7169 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (2,212 - 1) \cdot (0,66845 + 5,7169 \cdot 2,212^2 \cdot \lg 2,212 / (2,212^2 - 1)) = 2,596$$

$$Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (2,212^2 + 1) / (2,212^2 - 1) = 1,514$$

Касательные напряжения во фланце, расчётные условия:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_o}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 2,596 \cdot 331,7 / (21^2 \cdot 104) - 1,514 \cdot 7,979 = 6,695 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{fo}$$

6,695 МПа ≤ 130,2 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (9,487 + 7,979) / 2 = 8,733 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{fo}$$

8,733 МПа ≤ 130,2 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (9,487 + 6,695) / 2 = 8,091 \text{ МПа}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Инов. № подл.	19756.4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР			Лист
								147

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\text{до}}$$

8,091 МПа ≤ 130,2 МПа, **Условие прочности выполнено**

Болтовая нагрузка в условиях монтажа:

$$W_{\text{г}} = \left(\frac{A_m + A_b}{2} \right) \cdot S_{b\text{г}} = (0,001023 + 0,001800) / 2 \cdot 147,2 = 2,078 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Изгибающий момент в условиях монтажа (внутреннее давление):

$$M_{\text{г}} = \frac{W_{\text{г}} \cdot (C - G) \cdot B_{sc} \cdot F_s}{2} = 2,078 \cdot 10^5 \cdot (190 - 139) \cdot 1,106 \cdot 1 / 2 = 5861 \text{ Н м}$$

Продольные напряжения во втулке, в условиях монтажа:

$$S_H = \frac{f \cdot M_{\text{г}}}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 5861 / (1,715 \cdot 14^2 \cdot 104) = 167,6 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min\{1,5 \cdot S_{\text{гг}}; 2,5 \cdot S_{\text{нг}}\}$$

$$\min\{1,5 \cdot S_{\text{гг}}; 2,5 \cdot S_{\text{нг}}\} = \min\{1,5 \cdot 163,3; 2,5 \cdot 183\} = 245 \text{ МПа}$$

167,6 МПа ≤ 245 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_{\text{г}}}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 \cdot 21 \cdot 0,03195 + 1) \cdot 5861 / (1,715 \cdot 21^2 \cdot 104) = 141 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{\text{гг}}$$

141 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Касательные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_{\text{г}}}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 2,596 \cdot 5861 / (21^2 \cdot 104) - 1,514 \cdot 141 = 118,3 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{\text{гг}}$$

118,3 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (167,6 + 141) / 2 = 154,3 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\text{гг}}$$

154,3 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (167,6 + 118,3) / 2 = 143 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\text{гг}}$$

143 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):

Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	ЕД-2.00.00.000 РР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			148

$$J = \frac{52.14 \cdot V \cdot M_o}{L \cdot E_{yo} \cdot \xi_o^2 \cdot K_R \cdot h_o} = (52.14 * 0,02682 * 331,7) / (1,715 * 1,818 \cdot 10^5 * 3^2 * 0,3 * 17,66) = 0,03119$$

Условие жесткости:

$$J. \leq 1.0$$

$$0,03119 \leq 1.0$$

Условие жёсткости выполнено

- для условий монтажа:

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, условия монтажа):

$$J = \frac{52.14 \cdot V \cdot M_{\xi}}{L \cdot E_{y\xi} \cdot \xi_o^2 \cdot K_R \cdot h_o} = (52.14 * 0,02682 * 5861) / (1,715 * 1,99 \cdot 10^5 * 3^2 * 0,3 * 17,66) = 0,5035$$

Условие жесткости:

$$J. \leq 1.0$$

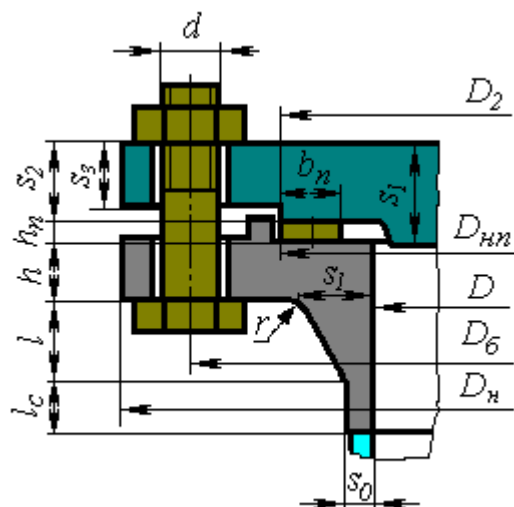
$$0,5035 \leq 1.0$$

Условие жёсткости выполнено

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				
				Лист
				149

Крышка DN100

Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.4-2007 и ГОСТ Р 52857.2-2007



Исходные данные

Параметры крышки:

Материал:	09Г2С (КП245) Gr.
Толщина стенки, s_1 :	24 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c_1 :	4 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, c_2 :	0 мм
Прибавка технологическая, c_3 :	0 мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, c :	4 мм
Толщина в месте прокладки, s_2 :	22 мм
Толщина вне уплотнения, s_3 :	18 мм
Наименьший диаметр наружной утоненной части, D_2 :	158 мм
Наружный диаметр крышки, D_n :	230 мм

Прокладка:

Материал прокладки:	Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали
Толщина, h_n :	3,2 мм
Наружный диаметр, $D_{n.p.}$:	149 мм
Ширина, b_n :	10 мм
Коэффициент прочности сварного шва:	
φ_p	= 1

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётное внутреннее избыточное давление, p : 0,34 МПа

Расчёт параметров крышки по ГОСТ Р 52857.2-2007

Характеристики прокладки:

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР	Лист
19756.4	150					

$$Q_H = 0.785 \cdot D_{\text{gr}}^2 \cdot p = 0.785 \cdot 139^2 \cdot 0,34 = 5157 \text{ H}$$

Усилие на прокладке в расчётных условиях, необходимое для обеспечения герметичности:

$$R_{\pi} = \pi \cdot D_{\text{eff}} \cdot b_0 \cdot m \cdot |p| = 3,142 \cdot 139 \cdot 10 \cdot 3 \cdot |0,34| = 4454 \text{ H}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке:

$$P_{06ж} = 0.5 \cdot \pi \cdot D_{\text{ш}} \cdot b_0 \cdot q_{06ж} = 0.5 * 3,142 * 139 * 10 * 69 = 1,507 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

$$\eta = y_{\Pi} + y_6 + y_{\Phi}' \cdot b^{1/2} + y_{\Phi}'' \cdot b^{1/2} = 0 + 0,1539 \cdot 10^{-6} + 0,1969 \cdot 10^{-4} * 25,5^2 + 0,1254 \cdot 10^{-4} * 25,5^2 = 0,5198 \cdot 10^{-6} \text{ MM/H}$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения с крышкой, нагруженного внутренним давлением:

$$\alpha = 1 - \frac{y_{\pi} - (y_{\Phi} \cdot e + y_{xp} \cdot b) \cdot b}{n} = 1 - (0 - (0,1254 \cdot 10^{-4} * 15,01 + 0,1969 \cdot 10^{-4} * 25,5) * 25,5) / 0,5198 \cdot 10^{-6} = 1,591$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в расчётных условиях:

$$P_{61} = \alpha \cdot Q_{\pi} + R_{\pi} = 1,591 \cdot 5157 + 4454 = 1,266 \cdot 10^4 \text{ H}$$

Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или сечению наименьшего диаметра:

$$A_6 = n \cdot f_6 = 8 * 0,225 \cdot 10^{-3} = 0,001800 \text{ m}^2$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов:

$$P_{62} = \max \{ P_{062}, 0.4 \cdot A_6 \cdot [\sigma_6]^{20} \} = \max \{ 1,507 \cdot 10^5; 0.4 \cdot 0,001800 \cdot 230 = 1,656 \cdot 10^5 \} = 1,656 \cdot 10^5 \text{ H}$$

Расчёт крышки на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Коэффициент ослабления для днищ, не имеющих отверстий $K_0 = 1.0$

Температура фланца (кольца), $t_{\text{ф}}$: 192 °C

Днища и крышки с дополнительным краевым моментом, нагруженные избыточным давлением

Равнодействующая давления:

$$Q_{\text{п}} = p \cdot \frac{\pi \cdot D_{\text{г}}^2}{4} = 0,34 \cdot 3,142 \cdot 139^2 / 4 = 5159 \text{ Н}$$

$$\gamma = \frac{1}{y_{\pi} + y_{\phi} \cdot \frac{E_{\phi}^{20}}{E_{\phi}} + \left(y_{\psi} \cdot \frac{E_{\psi}^{20}}{E_{\psi}} + y_{xp} \cdot \frac{E_{xp}^{20}}{E_{xp}} \right) \cdot b^2} = \frac{1 / (0 + 0,1539 \cdot 10^{-6} * 2,18 \cdot 10^5 / 2,101 \cdot 10^5 + (0,1254 \cdot 10^{-4} * 1,99 \cdot 10^5 / 1,818 \cdot 10^5 + 0,1969 \cdot 10^{-4} * 1,99 \cdot 10^5 / 1,818 \cdot 10^5) * 25,5^2)}{=} = 1,785 \cdot 10^6 \text{ H/MM}$$

Нагрузка от температурных деформаций:

$$Q_t = \gamma \cdot (\alpha'_{\Phi} \cdot h' \cdot (t_{\Phi 1} - 20^0 C) + \alpha'_{\Phi} \cdot h'' \cdot (t_{\Phi 2} - 20^0 C) - \alpha_6 \cdot (h' + h'') \cdot (t_6 - 20^0 C)) = \frac{1,785 \cdot 10^6 * (0,126 \cdot 10^{-4} * 22 * (192 - 20^0 C) + 0,126 \cdot 10^{-4} * 24 * (192 - 20^0 C) - 0,1333 \cdot 10^{-4} * (22 + 24) * (170 - 20^0 C))}{1,377 \cdot 10^4} = 1,377 \cdot 10^4 \text{ H}$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в расчётных условиях:

$$P_{61} = \max \left\{ \begin{array}{l} \alpha \cdot Q_{\pi} + R_{\pi} \\ \alpha \cdot Q_{\pi} + R_{\pi} - Q_t \end{array} \right\} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,591 \cdot 5157 + 4454 = 1,266 \cdot 10^4 \\ 1,591 \cdot 5157 + 4454 - 1,377 \cdot 10^4 = (-1112) \end{array} \right\} = 1,266 \cdot 10^4 \text{ H}$$

Болтовая нагрузка в расчётных условиях:

$$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot Q_H + Q_L = \frac{1,656 \cdot 10^5}{1,377 \cdot 10^4} + (1 - 1,591) \cdot 5157 + H = 1,763 \cdot 10^5$$

$$\Psi = \frac{P_6^P}{Q_{\pi}} = 1,763 \cdot 10^5 / 5159 = 34,18$$

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p align="center">Днища и крышки с дополнительным краевым моментом, нагруженные избыточным давлением</p> <p>Равнодействующая давления:</p> $Q_d = p \cdot \frac{\pi \cdot D_{\text{ан}}^2}{4} = 0,34 \cdot 3,142 \cdot 139^2 / 4 = 5159 \text{ Н}$ $\gamma = \frac{1}{y_{\text{п}} + y_{\text{с}} \cdot \frac{E_{\text{с}}^{20}}{E_{\text{с}}} + \left(y_{\text{ф}} \cdot \frac{E_{\text{ф}}^{20}}{E_{\text{ф}}} + y_{\text{кп}} \cdot \frac{E_{\text{кп}}^{20}}{E_{\text{кп}}} \right) \cdot b^2} = \frac{1 / (0 + 0,1539 \cdot 10^{-6} \cdot 2,18 \cdot 10^5 / 2,101 \cdot 10^5 + (0,1254 \cdot 10^{-4} \cdot 1,99 \cdot 10^5 / 1,818 \cdot 10^5 + 0,1969 \cdot 10^{-4} \cdot 1,99 \cdot 10^5 / 1,818 \cdot 10^5) \cdot 25,5^2)}{1} = 1,785 \cdot 10^6 \text{ Н/мм}$ <p>Нагрузка от температурных деформаций:</p> $Q_t = \gamma \cdot (\alpha'_{\text{ф}} \cdot h' \cdot (t_{\text{ф1}} - 20^{\circ}\text{C}) + \alpha'_{\text{ф}} \cdot h'' \cdot (t_{\text{ф2}} - 20^{\circ}\text{C}) - \alpha_{\text{с}} \cdot (h' + h'') \cdot (t_{\text{с}} - 20^{\circ}\text{C})) = \frac{1,785 \cdot 10^6 \cdot (0,126 \cdot 10^{-4} \cdot 22 \cdot (192 - 20^{\circ}\text{C}) + 0,126 \cdot 10^{-4} \cdot 24 \cdot (192 - 20^{\circ}\text{C}) - 0,1333 \cdot 10^{-4} \cdot (22 + 24) \cdot (170 - 20^{\circ}\text{C}))}{1} = 1,377 \cdot 10^4 \text{ Н}$ <p>Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в расчётных условиях:</p> $F_{\text{с1}} = \max \left\{ \begin{matrix} \alpha \cdot Q_d + R_{\text{п}} \\ \alpha \cdot Q_d + R_{\text{п}} - Q_t \end{matrix} \right\} = \max \{ 1,591 \cdot 5157 + 4454 = 1,266 \cdot 10^4; 1,591 \cdot 5157 + 4454 - 1,377 \cdot 10^4 = (-1112) \} = 1,266 \cdot 10^4 \text{ Н}$ <p>Болтовая нагрузка в расчётных условиях:</p> $F_{\text{с}}^{\text{Р}} = F_{\text{с}}^{\text{М}} + (1 - \alpha) \cdot Q_d + Q_t = \frac{1,656 \cdot 10^5 + (1 - 1,591) \cdot 5157 + 1,377 \cdot 10^4}{1} = 1,763 \cdot 10^5 \text{ Н}$ $\psi = \frac{F_{\text{с}}^{\text{Р}}}{Q_d} = 1,763 \cdot 10^5 / 5159 = 34,18$
					<div> <div> <div>Изм.</div> <div>Лист</div> <div>№ докум.</div> <div>Подп.</div> <div>Дата</div> </div> <div> <div>ЕД-2.00.00.000 РР</div> <div>152</div> </div> </div>

$$K_6 = 0.41 \cdot \sqrt{\frac{1 + 3 \cdot \psi \cdot \left(\frac{D_3}{D_{\text{сп}}} - 1 \right)}{\frac{D_3}{D_{\text{сп}}}}} = 0.41 \cdot [(1 + 3 \cdot 34,18 \cdot (190 / 139 - 1)) / (190 / 139)]^{1/2} = 2,179$$

Нарушено условие применимости расчётных формул:

$$\frac{s_1 - c}{D_p} \leq 0.11$$

В этом случае поправочный коэффициент для допускаемого давления:

$$K_p = \frac{2.2}{1 + \sqrt{1 + \left(6 \cdot \frac{s_1 - c}{D_p} \right)^2}} = 2.2 / [1 + (1 + (6 \cdot [24 - 4] / 139)^2)^{1/2}] = 0,9478$$

Допускаемое давление:

$$[p] = \left(\frac{s_1 - c}{K_0 \cdot K_6 \cdot D_p} \right)^2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi \cdot K_p = ([24 - 4] / [1 \cdot 2,179 \cdot 139])^2 \cdot 130,2 \cdot 1 \cdot 0,9478 = 0,538 \text{ МПа}$$

$$0,538 \text{ МПа} \geq 0,34 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Днища и крышки, нагруженные избыточным давлением

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_{\text{пр}} + c = K_6 \cdot K_0 \cdot D_p \cdot \sqrt{\frac{p}{\varphi \cdot [\sigma] \cdot K_p}} + c = 2,179 \cdot 1 \cdot 139 \cdot (0,34 / [1 \cdot 130,2 \cdot 0,9478])^{1/2} + 4 = 19,9 \text{ мм}$$

$$19,9 \text{ мм} \leq 24 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

$$K_7 = 0.8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_{\text{сп}}} - 1} = 0.8 \cdot [190 / 139 - 1]^{1/2} = 0,4846$$

$$\Phi = \max \left\{ \frac{P_6^p}{[\sigma]}; \frac{P_6^m}{[\sigma]^{20}} \right\} = \max \{ 1,763 \cdot 10^5 / 130,2; 1,656 \cdot 10^5 / 163,3 \} = 0,001354 \text{ м}^2$$

Расчётная толщина крышки в месте уплотнения с учётом прибавок:

$$s_{2\text{пр}} + c = \max \left\{ K_7 \cdot \sqrt{\Phi}; \frac{0.6}{D_{\text{сп}}} \cdot \Phi \right\} + c = \max \{ 0,4846 \cdot 0,001354^{1/2}; 0.6 \cdot 0,001354 / 139 \} + 4 = 21,83 \text{ мм}$$

$$21,83 \text{ мм} \leq 22 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

$$K_7' = 0.8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_2} - 1} = 0.8 \cdot [190 / 158 - 1]^{1/2} = 0,36$$

Расчётная толщина вне зоны уплотнения с учётом прибавок:

$$s_{3\text{пр}} + c = \max \left\{ K_7' \cdot \sqrt{\Phi}; \frac{0.6}{D_2} \cdot \Phi \right\} + c = \max \{ 0,36 \cdot 0,001354^{1/2}; 0.6 \cdot 0,001354 / 158 \} + 4 = 17,25 \text{ мм}$$

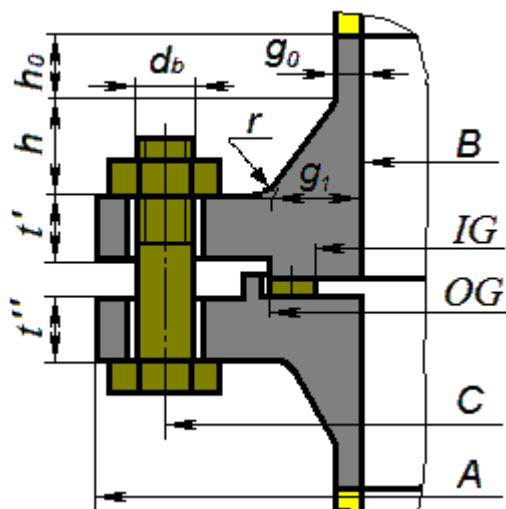
$$17,25 \text{ мм} \leq 18 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
19756.4								
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР			
					Лист 153			

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 UC, O3 DN50

Материал смежного элемента: 09Г2С (КП245) Gr.

Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245) Gr.

Наружный диаметр фланца (кольца), А: 160 мм

Толщина фланца (кольца), t: 19 мм

Сумма прибавок, с: 4 мм

Внешняя коррозия фланца, c_f : 0 мм

Внутренний диаметр фланца, В: 48 мм

Длина конической части втулки, h: 18 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 Gr.ГОСТ 19281

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 UC, O3 DN50 Материал смежного элемента: 09Г2С (КП245) Gr. Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245) Gr. Наружный диаметр фланца (кольца), А: 160 мм Толщина фланца (кольца), t: 19 мм Сумма прибавок, с: 4 мм Внешняя коррозия фланца, с _г : 0 мм Внутренний диаметр фланца, В: 48 мм Длина конической части втулки, h: 18 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 Gr.ГОСТ 19281 Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245) Gr. Наружный диаметр фланца (кольца), А: 160 мм Толщина фланца (кольца), t: 17 мм
19756.4					Изм. Лист № докум. Подп. Дата
					ЕД-2.00.00.000 РР
					Лист 154

Сумма прибавок, с: 4 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: 0,34 МПа
Расчётная температура элементов соединения:
Температура фланца (кольца), t_ф: 192 °С
Температура фланца (кольца), t_ф: 192 °С
Температура болтов (шпилек), t_б: 170 °С

Свойства материала болтов (шпилек)

Допускаемые напряжения для материала 35Х при температуре T = 170 °С (расчётные условия):

$S_b = \min\{R_e^{20} / n_{T20}; R_m^{20} / n_{B20}; R_e / n_T; R_m / n_B\} = \min(590 / 4; 736 / 5; 537,4 / 1,5; 706 / 5) = 141,2 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости для материала 35Х при температуре T = 170 °С:

$E_b = 2,062 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Коэффициент линейного расширения для материала 35Х при температуре T = 170 °С:

$\alpha_b = 0,1232 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$

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 UC, O3 DN50

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 200 °С (расчётные условия):

$S_{n01} = \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min(194 / 1,5; 440 / 2,4) = 129,3 \text{ МПа}$

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. 19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	ЕД-2.00.00.000 РР					Лист
										155
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

Свойства материала смежного элемента фланца 2

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 192\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{no2}} = 149 \text{ MPa}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{ng2} = 183 \text{ MPa}$$

Свойства материала фланца (кольца) 1

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 192\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{fol}} = \min(R_{\text{et}} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{195,3 / 1,5; 440 / 2,4\} = 130,2 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 192\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_1 = 1,818 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 192\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\alpha_1 = 0,126 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{gr}} = \min(R_{\text{eff}} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min(245 / 1,5; 440 / 2,4) = 163,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

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

Свойства материала фланца (кольца) 2

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Гр. при температуре $T = 192\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{fo2} = \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{195,3 / 1,5; 440 / 2,4\} = 130,2 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 192\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_7 = 1,818 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 192\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\alpha_2 = 0,126 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{g2} = \min(R_{ef} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{245 / 1,5; 440 / 2,4\} = 163,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 20^\circ\text{C}$:

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

Расчётные параметры первого фланца:

Внутренний диаметр фланца (с учетом коррозии):

$$B = B + 2 \cdot c = 48 + 2 \cdot 4 = 56 \text{ mm}$$

Диаметр втулки с учетом коррозии (для фланцев, приварных встык):

$$g_0 = g_0 - c = 14 - 4 = 10 \text{ mm}$$

Большой диаметр конической втулки с учетом коррозии:

$$g_1 = g_1 - c = 14 - 4 = 10 \text{ mm}$$

Толщина фланца, с учетом коррозии:

$$t = t - c_f = 19 - 0 = 19 \text{ mm}$$

Расчётные параметры второго фланца:

Внутренний диаметр фланца (с учетом коррозии):

$$B = B + 2 \cdot c = 48 + 2 \cdot 4 = 56 \text{ mm}$$

Диаметр втулки с учетом коррозии (для фланцев, приварных встык):

$$g_0 = g_0 - c = 5 - 4 = 1 \text{ mm}$$

Больший диаметр конической втулки с учетом коррозии:

$$g_1 = g_1 - c = 14 - 4 = 10 \text{ mm}$$

Толщина фланца, с учетом коррозии:

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Гр. при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчетные условия):</p> <p>$S_{g2} = \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min(245 / 1,5; 440 / 2,4) = 163,3\text{ МПа}$</p> <p>Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Гр. при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$:</p> <p>$E^{20}_{2} = 1,99 \cdot 10^5\text{ МПа}$</p> <p>Расчётные параметры первого фланца:</p> <p>Внутренний диаметр фланца (с учетом коррозии):</p> <p>$B = B + 2 \cdot c = 48 + 2 \cdot 4 = 56\text{ мм}$</p> <p>Диаметр втулки с учетом коррозии (для фланцев, приварных встык):</p> <p>$\xi_0 = \xi_0 - c = 14 - 4 = 10\text{ мм}$</p> <p>Больший диаметр конической втулки с учетом коррозии:</p> <p>$\xi_1 = \xi_1 - c = 14 - 4 = 10\text{ мм}$</p> <p>Толщина фланца, с учетом коррозии:</p> <p>$t = t - c_f = 19 - 0 = 19\text{ мм}$</p> <p>Расчётные параметры второго фланца:</p> <p>Внутренний диаметр фланца (с учетом коррозии):</p> <p>$B = B + 2 \cdot c = 48 + 2 \cdot 4 = 56\text{ мм}$</p> <p>Диаметр втулки с учетом коррозии (для фланцев, приварных встык):</p> <p>$\xi_0 = \xi_0 - c = 5 - 4 = 1\text{ мм}$</p> <p>Большой диаметр конической втулки с учетом коррозии:</p> <p>$\xi_1 = \xi_1 - c = 14 - 4 = 10\text{ мм}$</p> <p>Толщина фланца, с учетом коррозии:</p>
					<div> <div>Изм.</div> <div>Лист</div> <div>№ докум.</div> <div>Подп.</div> <div>Дата</div> </div> <div> <div>ЕД-2.00.00.000 РР</div> <div>Лист 156</div> </div>

$$t = t - c_f = 17 - 0 = 17 \text{ мм}$$

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_n , МПа
Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали	3	69	—	—	—

Ширина, используемая для определения базовой контактной ширины прокладки через b_0 , 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 $b_0 \leq 6 \text{ мм}$, G равно среднему диаметру контактирующей поверхности прокладки.

$$G = \frac{OG + \max\{B', B'', IG\}}{2} = (87 + \max\{48; 48; 74\}) / 2 = 80,5 \text{ мм}$$

Ширина, используемая для определения базовой контактной ширины прокладки через b_0 , 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 $b_0 \leq 6 \text{ мм}$, G равно среднему диаметру контактирующей поверхности прокладки.

$$G = \frac{OG + \max\{B', B'', IG\}}{2} = (87 + \max\{48; 48; 74\}) / 2 = 80,5 \text{ мм}$$

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):

$$W_0 = 0,785 \cdot G^2 \cdot p + 2 \cdot b \cdot \pi \cdot G \cdot m \cdot p = 0,785 \cdot 80,5^2 \cdot 0,34 + 2 \cdot 3,25 \cdot 3,142 \cdot 80,5 \cdot 3 \cdot 0,34 = 3406 \text{ Н}$$

Величина растягивающей внешней силы:

$$F_A = 1500 \text{ Н}$$

Сжимающими нагрузками пренебрегают, и в этом случае F_A приравнивается нулю.

Внешний изгибающий момент:

$$M_E = 282,8 \text{ Н м}$$

$$W_{\text{ср}} = \pi \cdot b \cdot G \cdot y = 3,142 \cdot 3,25 \cdot 80,5 \cdot 69 = 5,671 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Общая расчетная площадь сечения болтов:

Изнв. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изнв. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР
					Лист
					157

$$A_m = \max \left[\frac{W_o + F_A + \frac{4 \cdot M_E}{G}}{S_{bo}}; \frac{W_{gs}}{S_{bg}} \right] = \max[(3406 + 1500 + 4 \cdot 282,8 / 80,5) / 141,2; 5,671 \cdot 10^4 / 147,2] = 0,3853 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Диаметр сечения болта (шпильки) с учетом коррозии:

$$d_{bc} = 16 \text{ мм}$$

Площадь сечения болта (шпильки) (по внутреннему диаметру резьбы с учетом коррозии):

$$f_0 = 0,144 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Площадь поперечного сечения болтов по внутреннему диаметру резьбы или минимальному диаметру стержня:

$$A_b = n \cdot f_b = 4 \cdot 0,144 \cdot 10^{-3} = 0,576 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

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:

$$H_D = 0,785 \cdot B^2 \cdot p = 0,785 \cdot 56^2 \cdot 0,34 = 837 \text{ Н}$$

Плечо момента для силы H_D (фланцы интегрального типа, или другие, рассчитываемые аналогично):

$$h_D = \frac{C - B - g_1}{2} = (125 - 56 - 10) / 2 = 29,5 \text{ мм}$$

Равнодействующая давления:

$$H = 0,785 \cdot G^2 \cdot p = 0,785 \cdot 80,5^2 \cdot 0,34 = 1730 \text{ Н}$$

Разница между общей равнодействующей давления и равнодействующей на внутренней поверхности фланца:

$$H_T = H - H_D = 1730 - 837 = 892,6 \text{ Н}$$

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):

$$h_T = \frac{1}{2} \left[\frac{C - B}{2} + h_G \right] = 1/2 \cdot [(125 - 56) / 2 + 22,25] = 28,38 \text{ мм}$$

Нагрузка на прокладку (разница между проектной болтовой нагрузкой и равнодействующей давления), в расчётах:

$$H_G = W_o - H = 3406 - 1730 = 1677 \text{ Н}$$

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:

$$B_{sc} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{B_S}{2 \cdot a + t}} \right\} = \max \{ 1; (98,17 / (2 \cdot 16 + 19))^{1/2} \} = 1,387$$

$$X_g = \frac{g_1}{g_0} = 10 / 10 = 1$$

Коэффициент

Изн. № подл. 19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	ЕД-2.00.00.000 РР					Лист
										158
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

$$h_o = \sqrt{B \cdot g_0} = (56 \cdot 10)^{1/2} = 23,66 \text{ мм}$$

$$X_h = \frac{h}{h_o} = 18 / 23,66 = 0,7606$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$F = 0,8975$$

Расчетные коэффициенты:

$$e = \frac{F}{h_o} = 0,8975 / 23,66 = 0,03793 \text{ 1/мм}$$

$$K = \frac{A}{B} = 160 / 56 = 2,857$$

$$T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg K) - 1}{(1,0472 + 1,9448 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (2,857^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg 2,857) - 1) / ((1,0472 + 1,9448 \cdot 2,857^2) \cdot (2,857 - 1)) = 1,241$$

$$U = \frac{K^2 (1 + 8,55246 \cdot \lg K) - 1}{1,36136 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (2,857^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg 2,857) - 1) / (1,36136 \cdot (2,857^2 - 1) \cdot (2,857 - 1)) = 2,153$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$V = 0,5528$$

Коэффициент d для интегральных фланцев:

$$d = \frac{U}{V} \cdot h_o \cdot g_0^2 = 2,153 / 0,5528 \cdot 23,66 \cdot 10^2 = 0,9218 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$$

$$L = \frac{t \cdot e + 1}{T} + \frac{t^3}{d} = (19 \cdot 0,03793 + 1) / 1,241 + 19^3 / 0,9218 \cdot 10^{-5} = 2,131$$

Момент инерции сечения фланца при изгибе (интегральные фланцы с втулкой):

$$I = \frac{0,0874 \cdot L \cdot g_0^2 \cdot h_o \cdot B}{V} = 0,0874 \cdot 2,131 \cdot 10 \cdot 23,66 \cdot 56 / 0,5528 = 0,4465 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

$$G_{wg} = 0,5 \cdot (g_0 + g_1) = 0,5 \cdot (10 + 10) = 10 \text{ мм}$$

$$A_R = 0,5 \cdot (A - B) = 0,5 \cdot (160 - 56) = 52 \text{ мм}$$

Так как $t \geq G_{wg}$,

$$A_A = A_R = 52 \text{ мм}$$

$$B_B = t = 19 \text{ мм}$$

$$K_{AB} = \left\{ A_A \cdot B_B^3 \right\} \cdot \left[\frac{1}{3} - 0,21 \cdot \left(\frac{B_B}{A_A} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{12} \cdot \left\{ \frac{B_B}{A_A} \right\}^4 \right) \right] = (52 \cdot 19^3) \cdot [1/3 - 0,21 \cdot (19/52) \cdot (1 - 1/12 \cdot (19/52)^4)] = 0,9156 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

$$C_c = h = 18 \text{ мм}$$

$$D_{DG} = G_{wg} = 10 \text{ мм}$$

$$K_{CD} = \left\{ C_c \cdot D_{DG}^3 \right\} \cdot \left[\frac{1}{3} - 1,05 \cdot \left(\frac{D_{DG}}{C_c} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{192} \cdot \left\{ \frac{D_{DG}}{C_c} \right\}^4 \right) \right] = (18 \cdot 10^3) \cdot [1/3 - 1,05 \cdot (10/18) \cdot (1 - 1/192 \cdot (10/18)^4)] = (-0,4495 \cdot 10^{-8}) \text{ м}^4$$

Полярный момент сечения фланца (интегральные фланцы, плоские фланцы с втулкой):

$$I_P = K_{AB} + K_{CD} = 0,9156 \cdot 10^{-7} + (-0,4495 \cdot 10^{-8}) = 0,8707 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

Компонент проектного момента на фланце, как результат действия внешнего изгибающего момента и/или осевой силы:

Инв. № подл. 19756.4	Подпись и дата				
	Инв. № дубл.				
	Взам. инв. №				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР
					Лист 159

$$M_{oe} = 4 \cdot M_E \cdot \left[\frac{I}{0,3846 \cdot I_p + I} \right] \cdot \left[\frac{h_D}{C - 2 \cdot h_D} \right] + F_A \cdot h_D = 4 \cdot 282,8 \cdot [0,4465 \cdot 10^{-7} / (0,3846 \cdot 0,8707 \cdot 10^{-7} + 0,4465 \cdot 10^{-7})] \cdot [29,5 / (125 - 2 \cdot 29,5)] + 1500 \cdot 29,5 = 333,2 \text{ Н м}$$

Коэффициент момента для расчета свободных колец:

$$F_S = 1$$

Изгибающий момент в расчётных условиях (внутреннее давление):

$$M_o = [(H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G) \cdot B_{SC} + M_{oe}] \cdot F_S = [(837 \cdot 29,5 + 892,6 \cdot 28,38 + 1677 \cdot 22,25) \cdot 1,387 + 333,2] \cdot 1 = 454,4 \text{ Н м}$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$f = 1$$

Продольные напряжения во втулке, в расчётных условиях:

$$S_H = \frac{f \cdot M_o}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 454,4 / (2,131 \cdot 10^2 \cdot 56) = 38,08 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min \{1,5 \cdot S_{\text{до}}; 2,5 \cdot S_{\text{но}}\}$$

$$\min \{1,5 \cdot S_{\text{до}}; 2,5 \cdot S_{\text{но}}\} = \min \{1,5 \cdot 130,2; 2,5 \cdot 129,3\} = 195,3 \text{ МПа}$$

38,08 МПа ≤ 195,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, расчётные условия:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_o}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 \cdot 19 \cdot 0,03793 + 1) \cdot 454,4 / (2,131 \cdot 19^2 \cdot 56) = 20,66 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{\text{до}}$$

20,66 МПа ≤ 130,2 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left(0,66845 + 5,7169 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (2,857 - 1) \cdot (0,66845 + 5,7169 \cdot 2,857^2 \cdot \lg 2,857 / (2,857^2 - 1)) = 1,959$$

$$Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (2,857^2 + 1) / (2,857^2 - 1) = 1,279$$

Касательные напряжения во фланце, расчётные условия:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_o}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 1,959 \cdot 454,4 / (19^2 \cdot 56) - 1,279 \cdot 20,66 = 17,61 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{\text{до}}$$

17,61 МПа ≤ 130,2 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (38,08 + 20,66) / 2 = 29,37 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\text{до}}$$

29,37 МПа ≤ 130,2 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (38,08 + 17,61) / 2 = 27,85 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\text{до}}$$

27,85 МПа ≤ 130,2 МПа, **Условие прочности выполнено**

Болтовая нагрузка в условиях монтажа:

$$W_{\text{г}} = \left(\frac{A_m + A_b}{2} \right) \cdot S_{\text{бг}} = (0,3853 \cdot 10^{-3} + 0,576 \cdot 10^{-3}) / 2 \cdot 147,2 = 7,075 \cdot 10^{-4} \text{ Н}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
ЕД-2.00.00.000 РР			
Лист			
160			

Изгибающий момент в условиях монтажа (внутреннее давление):

$$M_{\xi} = \frac{W_{\xi} \cdot (C - G) \cdot B_{sc} \cdot F_s}{2} = 7,075 \cdot 10^4 \cdot (125 - 80,5) \cdot 1,387 \cdot 1 / 2 = 2184 \text{ Н м}$$

Продольные напряжения во втулке, в условиях монтажа:

$$S_H = \frac{f \cdot M_{\xi}}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 2184 / (2,131 \cdot 10^2 \cdot 56) = 183 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min\{1,5 \cdot S_{\xi g}; 2,5 \cdot S_{ng}\}$$

$$\min\{1,5 \cdot S_{\xi g}; 2,5 \cdot S_{ng}\} = \min\{1,5 \cdot 163,3; 2,5 \cdot 163,3\} = 245 \text{ МПа}$$

183 МПа ≤ 245 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_{\xi}}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 \cdot 19 \cdot 0,03793 + 1) \cdot 2184 / (2,131 \cdot 19^2 \cdot 56) = 99,29 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{\xi g}$$

99,29 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Касательные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_{\xi}}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 1,959 \cdot 2184 / (19^2 \cdot 56) - 1,279 \cdot 99,29 = 84,67 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{\xi g}$$

84,67 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (183 + 99,29) / 2 = 141,2 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\xi g}$$

141,2 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (183 + 84,67) / 2 = 133,9 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\xi g}$$

133,9 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):

$$J = \frac{52,14 \cdot V \cdot M_o}{L \cdot E_{yo} \cdot g_o^2 \cdot K_R \cdot h_o} = (52,14 \cdot 0,5528 \cdot 454,4) / (2,131 \cdot 1,818 \cdot 10^5 \cdot 10^2 \cdot 0,3 \cdot 23,66) = 0,04762$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1,0$$

$$0,04762 \leq 1,0$$

Условие жёсткости выполнено

- для условий монтажа:

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, условия монтажа):

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
				161

$$J = \frac{52.14 \cdot V \cdot M_{\varepsilon}}{L \cdot E_{y\varepsilon} \cdot g_0^2 \cdot K_R \cdot h_o} = (52.14 * 0,5528 * 2184) / (2,131 * 1,99 \cdot 10^5 * 10^2 * 0,3 * 23,66) = 0,2091$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1.0$$

$$0,2091 \leq 1.0$$

Условие жёсткости выполнено

Расчёт напряжений второго фланца:

Равнодействующая давления на внутренней поверхности фланца:

$$H_D = 0.785 \cdot B^2 \cdot p = 0.785 * 56^2 * 0,34 = 837 \text{ Н}$$

Плечо момента для силы H_D (фланцы интегрального типа, или другие, рассчитываемые аналогично):

$$h_D = \frac{C - B - g_1}{2} = (125 - 56 - 10) / 2 = 29,5 \text{ мм}$$

Разница между общей равнодействующей давления и равнодействующей на внутренней поверхности фланца:

$$H_T = H - H_D = 1730 - 837 = 892,6 \text{ Н}$$

Плечо для нагрузки H_T (интегральные фланцы, а также иные, рассчитываемые аналогично):

$$h_T = \frac{1}{2} \left[\frac{C - B}{2} + h_G \right] = 1/2 * [(125 - 56) / 2 + 22,25] = 28,38 \text{ мм}$$

Коэффициент болтового интервала:

$$B_{SC} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{B_S}{2 \cdot a + t}} \right\} = \max \{ 1; (98,17 / (2 * 16 + 17))^{1/2} \} = 1,415$$

$$X_{\varepsilon} = \frac{g_1}{g_0} = 10 / 1 = 10$$

Коэффициент

$$h_o = \sqrt{B \cdot g_0} = (56 * 1)^{1/2} = 7,483 \text{ мм}$$

$$X_h = \frac{h}{h_o} = 22,5 / 7,483 = 3,007$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$F = 0,2805$$

Расчетные коэффициенты:

$$e = \frac{F}{h_o} = 0,2805 / 7,483 = 0,03749 \text{ 1/мм}$$

$$K = \frac{A}{B} = 160 / 56 = 2,857$$

$$T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55246 \cdot \lg K) - 1}{(1.0472 + 1.9448 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (2,857^2 * (1 + 8.55246 * \lg 2,857) - 1) / ((1.0472 + 1.9448 * 2,857^2) * (2,857 - 1)) = 1,241$$

$$U = \frac{K^2 (1 + 8.55246 \cdot \lg K) - 1}{1.36136 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (2,857^2 * (1 + 8.55246 * \lg 2,857) - 1) / (1.36136 * (2,857^2 - 1) * (2,857 - 1)) = 2,153$$

Коэффициент d для интегральных фланцев:

$$d = \frac{U}{V} \cdot h_o \cdot g_0^2 = 2,153 / 0,003385 * 7,483 * 1^2 = 0,4761 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$$

$$L = \frac{t \cdot e + 1}{T} + \frac{t^3}{d} = (17 * 0,03749 + 1) / 1,241 + 17^3 / 0,4761 \cdot 10^{-5} = 2,352$$

Момент инерции сечения фланца при изгибе (интегральные фланцы с втулкой):

Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР
					Лист
					162

$$I = \frac{0.0874 \cdot L \cdot g_0^2 \cdot h_0 \cdot B}{V} = 0.0874 \cdot 2,352 \cdot 1 \cdot 7,483 \cdot 56 / 0,003385 = 0,2545 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

$$G_{\text{вг}} = 0.5 \cdot (g_0 + g_1) = 0.5 \cdot (1 + 10) = 5,5 \text{ мм}$$

$$A_R = 0.5 \cdot (A - B) = 0.5 \cdot (160 - 56) = 52 \text{ мм}$$

Так как $t \geq G_{\text{вг}}$,

$$A_A = A_R = 52 \text{ мм}$$

$$B_B = t = 17 \text{ мм}$$

$$K_{AB} = \left(A_A \cdot B_B^3 \right) \cdot \left[\frac{1}{3} - 0.21 \cdot \left(\frac{B_B}{A_A} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{12} \cdot \left\{ \frac{B_B}{A_A} \right\}^4 \right) \right] = (52 \cdot 17^3) \cdot [1/3 - 0.21 \cdot (17/52) \cdot (1 - 1/12 \cdot (17/52)^4)] = 0,6764 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

$$C_c = h = 22,5 \text{ мм}$$

$$D_{DG} = G_{\text{вг}} = 5,5 \text{ мм}$$

$$K_{CD} = \left(C_c \cdot D_{DG}^3 \right) \cdot \left[\frac{1}{3} - 1.05 \cdot \left(\frac{D_{DG}}{C_c} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{192} \cdot \left\{ \frac{D_{DG}}{C_c} \right\}^4 \right) \right] = (22,5 \cdot 5,5^3) \cdot [1/3 - 1.05 \cdot (5,5/22,5) \cdot (1 - 1/192 \cdot (5,5/22,5)^4)] = 0,287 \cdot 10^{-9} \text{ м}^4$$

Полярный момент сечения фланца (интегральные фланцы, плоские фланцы с втулкой):

$$I_p = K_{AB} + K_{CD} = 0,6764 \cdot 10^{-7} + 0,287 \cdot 10^{-9} = 0,6792 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

Компонент проектного момента на фланце, как результат действия внешнего изгибающего момента и/или осевой силы:

$$M_{oe} = 4 \cdot M_E \cdot \left[\frac{I}{0.3846 \cdot I_p + I} \right] \cdot \left[\frac{h_D}{C - 2 \cdot h_D} \right] + F_A \cdot h_D = 4 \cdot 282,8 \cdot [0,2545 \cdot 10^{-7} / (0.3846 \cdot 0,6792 \cdot 10^{-7} + 0,2545 \cdot 10^{-7})] \cdot [29,5 / (125 - 2 \cdot 29,5)] + 1500 \cdot 29,5 = 293,8 \text{ Н м}$$

Изгибающий момент в расчётных условиях (внутреннее давление):

$$M_o = [(H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G) \cdot B_{SC} + M_{oe}] \cdot F_S / l = [(837 \cdot 29,5 + 892,6 \cdot 28,38 + 1677 \cdot 22,25) \cdot 1,415 + 293,8] \cdot 417,4 / 1 = 417,4 \text{ Н м}$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$f = 1$$

Продольные напряжения во втулке, в расчётных условиях:

$$S_H = \frac{f \cdot M_o}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 417,4 / (2,352 \cdot 10^2 \cdot 56) = 31,69 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min \{ 1.5 \cdot S_{fo}; 2.5 \cdot S_{no} \}$$

$$\min \{ 1.5 \cdot S_{fo}; 2.5 \cdot S_{no} \} = \min \{ 1.5 \cdot 130,2; 2.5 \cdot 149 \} = 195,3 \text{ МПа}$$

31,69 МПа ≤ 195,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, расчётные условия:

$$S_R = \frac{(1.33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_o}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1.33 \cdot 17 \cdot 0,03749 + 1) \cdot 417,4 / (2,352 \cdot 17^2 \cdot 56) = 20,26 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{fo}$$

20,26 МПа ≤ 130,2 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left(0.66845 + 5.7169 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (2,857 - 1) \cdot (0.66845 + 5.7169 \cdot 2,857^2 \cdot \lg 2,857 / (2,857^2 - 1)) = 1,959$$

$$Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (2,857^2 + 1) / (2,857^2 - 1) = 1,279$$

Касательные напряжения во фланце, расчётные условия:

Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР
					Лист 163

$$S_T = \frac{Y \cdot M_o}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 1,959 \cdot 417,4 / (17^2 \cdot 56) - 1,279 \cdot 20,26 = 24,61 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{\text{до}}$$

24,61 МПа ≤ 130,2 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (31,69 + 20,26) / 2 = 25,98 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\text{до}}$$

25,98 МПа ≤ 130,2 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (31,69 + 24,61) / 2 = 28,15 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\text{до}}$$

28,15 МПа ≤ 130,2 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:

$$S_H = \frac{f \cdot M_{\xi}}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 2228 / (2,352 \cdot 10^2 \cdot 56) = 169,2 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min\{1,5 \cdot S_{\text{до}}; 2,5 \cdot S_{\text{н}}\}$$

$$\min\{1,5 \cdot S_{\text{до}}; 2,5 \cdot S_{\text{н}}\} = \min\{1,5 \cdot 163,3; 2,5 \cdot 183\} = 245 \text{ МПа}$$

169,2 МПа ≤ 245 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_{\xi}}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 \cdot 17 \cdot 0,03749 + 1) \cdot 2228 / (2,352 \cdot 17^2 \cdot 56) = 108,2 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{\text{до}}$$

108,2 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Касательные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_{\xi}}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 1,959 \cdot 2228 / (17^2 \cdot 56) - 1,279 \cdot 108,2 = 131,4 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{\text{до}}$$

131,4 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (169,2 + 108,2) / 2 = 138,7 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\text{до}}$$

138,7 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (169,2 + 131,4) / 2 = 150,3 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	$\min\{1.5 \cdot S_{\text{фг}}; 2.5 \cdot S_{\text{нг}}\} = \min\{1.5 * 163,3; 2.5 * 183\} = 245 \text{ МПа}$ 169,2 МПа ≤ 245 МПа, Условие прочности выполнено Радиальные напряжения во фланце, условия монтажа: $S_R = \frac{(1.33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_{\text{фг}}}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1.33 * 17 * 0,03749 + 1) * 2228 / (2,352 * 17^2 * 56) = 108,2 \text{ МПа}$ Условие прочности: $S_R \leq S_{\text{фг}}$ 108,2 МПа ≤ 163,3 МПа, Условие прочности выполнено Касательные напряжения во фланце, условия монтажа: $S_T = \frac{Y \cdot M_{\text{фг}}}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 1,959 * 2228 / (17^2 * 56) - 1,279 * 108,2 = 131,4 \text{ МПа}$ Условие прочности: $S_T \leq S_{\text{фг}}$ 131,4 МПа ≤ 163,3 МПа, Условие прочности выполнено $\frac{S_H + S_R}{2} = (169,2 + 108,2) / 2 = 138,7 \text{ МПа}$ Условие прочности: $\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\text{фг}}$ 138,7 МПа ≤ 163,3 МПа, Условие прочности выполнено $\frac{S_H + S_T}{2} = (169,2 + 131,4) / 2 = 150,3 \text{ МПа}$ Условие прочности:	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР		Лист 164

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\xi}$$

150,3 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие прочности выполнено

Жесткость фланца

- для расчётных условий:

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, расчётные условия):

$$J = \frac{52.14 \cdot V \cdot M_o}{L \cdot E_{y0} \cdot \xi_0^2 \cdot K_R \cdot h_o} = (52.14 \cdot 0,003385 \cdot 417,4) / (2,352 \cdot 1,818 \cdot 10^5 \cdot 1^2 \cdot 0,3 \cdot 7,483) = 0,07674$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1.0$$

$$0,07674 \leq 1.0$$

Условие жёсткости выполнено

- для условий монтажа:

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, условия монтажа):

$$J = \frac{52.14 \cdot V \cdot M_{\xi}}{L \cdot E_{y\xi} \cdot \xi_0^2 \cdot K_R \cdot h_o} = (52.14 \cdot 0,003385 \cdot 2228) / (2,352 \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot 1^2 \cdot 0,3 \cdot 7,483) = 0,3743$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1.0$$

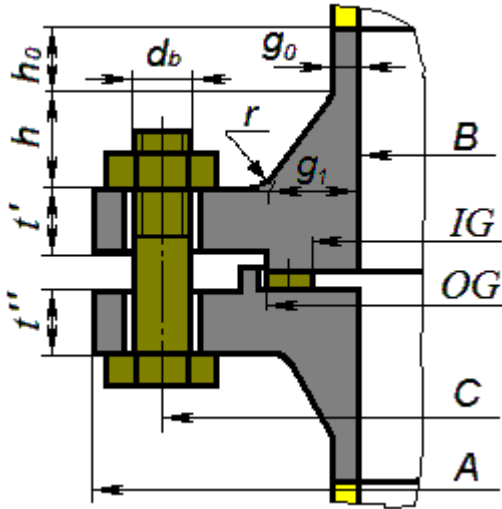
$$0,3743 \leq 1.0$$

Условие жёсткости выполнено

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
				165

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: Патрубок DN50

Материал смежного элемента: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281

Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245) Gr.

Наружный диаметр фланца (кольца), А: 160 мм

Толщина фланца (кольца), t: 17 мм

Сумма прибавок, с: 4 мм

Внешняя коррозия фланца, c_f : 0 мм

Внутренний диаметр фланца, В: 48 мм

Длина конической части втулки, h: 22,5 мм

Длина цилиндрической части втулки, h_0 : 5,5 мм

Толщина цилиндрической части втулки, g_0 : 5 мм

Толщина конической части втулки, g_1 : 14 мм

Радиус перехода, г: 5 мм

Данные второго фланца (кольца):

Смежный элемент:

Материал смежного элемента: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281

Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245) Gr.

Наружный диаметр фланца (кольца), А: 160 мм

Толщина фланца (кольца), t: 21 мм

[illegible]

Свойства материала смежного элемента фланца 2

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 192\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{но}2} = 149\text{ МПа}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{нг}2} = 183\text{ МПа}$$

Свойства материала фланца (кольца) 1

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 192\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{ф}01} = \min(R_{\text{e}t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{195,3 / 1,5; 440 / 2,4\} = 130,2\text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 192\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_1 = 1,818 \cdot 10^5\text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 192\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\alpha_1 = 0,126 \cdot 10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{г}1} = \min(R_{\text{e}t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{245 / 1,5; 440 / 2,4\} = 163,3\text{ МПа}$$

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 $T = 192\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{ф}02} = \min(R_{\text{e}t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{195,3 / 1,5; 440 / 2,4\} = 130,2\text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 192\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_2 = 1,818 \cdot 10^5\text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 192\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\alpha_2 = 0,126 \cdot 10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{г}2} = \min(R_{\text{e}t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{245 / 1,5; 440 / 2,4\} = 163,3\text{ МПа}$$

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):

$$B = B + 2 \cdot c = 48 + 2 \cdot 4 = 56\text{ мм}$$

Диаметр втулки с учетом коррозии (для фланцев, приварных встык):

$$\xi_0 = \xi_0 - c = 5 - 4 = 1\text{ мм}$$

Больший диаметр конической втулки с учетом коррозии:

$$\xi_1 = \xi_1 - c = 14 - 4 = 10\text{ мм}$$

Толщина фланца, с учетом коррозии:

$$t = t - c_f = 17 - 0 = 17\text{ мм}$$

Расчётные параметры второго фланца:

Внутренний диаметр фланца (с учетом коррозии):

$$B = B + 2 \cdot c = 21 + 2 \cdot 4 = 29\text{ мм}$$

Диаметр втулки с учетом коррозии (для фланцев, приварных встык):

$$\xi_0 = \xi_0 - c = 18,5 - 4 = 14,5\text{ мм}$$

Больший диаметр конической втулки с учетом коррозии:

$$\xi_1 = \xi_1 - c = 27,5 - 4 = 23,5\text{ мм}$$

Толщина фланца, с учетом коррозии:

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата						Лист	
19756.4										ЕД-2.00.00.000 РР	168
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата							

$$A_m = \max \left[\frac{W_o + F_A + \frac{4 \cdot M_E}{G}}{S_{bo}}; \frac{W_{es}}{S_{bg}} \right] = \max[(3406 + 0 + 4 \cdot 0 / 80,5) / 141,2; 5,671 \cdot 10^4 / 147,2] = 0,3853 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

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:

$$H_p = 0.785 \cdot B^2 \cdot p = 0.785 \cdot 56^2 \cdot 0,34 = 837 \text{ H}$$

Плечо момента для силы N_D (фланцы интегрального типа, или другие, рассчитываемые аналогично):

$$h_D = \frac{C - B - g_1}{2} = (125 - 56 - 10) / 2 = 29,5 \text{ mm}$$

Равнодействующая давления:

$$H = 0.785 \cdot G^2 \cdot p = 0.785 \cdot 80,5^2 \cdot 0,34 = 1730 \text{ H}$$

Разница между общей равнодействующей давления и равнодействующей на внутренней поверхности фланца:

$$H_T = H - H_D = 1730 - 837 = 892,6 \text{ H}$$

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):

$$h_T = \frac{1}{2} \left[\frac{C-B}{2} + h_G \right] = 1/2 * [(125-56)/2 + 22,25] = 28,38 \text{ mm}$$

Нагрузка на прокладку (разница между проектной болтовой нагрузкой и равнодействующей давления), в расчётах:

$$H_G = W_o - H = 3406 - 1730 = 1677 \text{ H}$$

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:

$$B_{SC} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{B_s}{2 \cdot a + t}} \right\} = \max \{ 1; (98,17 / (2 \cdot 16 + 17))^{1/2} \} = 1,415$$

$$X_{\epsilon} = \frac{g_1}{g_0} = 10/1 = 10$$

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> $H_T = H - H_D = 1730 - 837 = 892,6 \text{ Н}$ <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> $h_T = \frac{1}{2} \left[\frac{C - B}{2} + h_G \right] = 1/2 * [(125 - 56) / 2 + 22,25] = 28,38 \text{ мм}$ <p>Нагрузка на прокладку (разница между проектной болтовой нагрузкой и равнодействующей давления), в расчётах:</p> $H_G = W_0 - H = 3406 - 1730 = 1677 \text{ Н}$ <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> $B_{SC} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{B_S}{2 \cdot a + t}} \right\} = \max \{ 1; (98,17 / (2 * 16 + 17))^{1/2} \} = 1,415$ $X_g = \frac{\xi_1}{\xi_0} = 10 / 1 = 10$ <p>Коэффициент</p>
					<p>Инв. № подл. 19756.4</p>

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР	Лист
						170

$$h_o = \sqrt{B \cdot g_0} = (56 \cdot 1)^{1/2} = 7,483 \text{ мм}$$

$$X_h = \frac{h}{h_o} = 22,5 / 7,483 = 3,007$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$F = 0,2805$$

Расчетные коэффициенты:

$$e = \frac{F}{h_o} = 0,2805 / 7,483 = 0,03749 \text{ 1/мм}$$

$$K = \frac{A}{B} = 160 / 56 = 2,857$$

$$T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg K) - 1}{(1,0472 + 1,9448 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (2,857^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg 2,857) - 1) / ((1,0472 + 1,9448 \cdot 2,857^2) \cdot (2,857 - 1)) = 1,241$$

$$U = \frac{K^2 (1 + 8,55246 \cdot \lg K) - 1}{1,36136 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (2,857^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg 2,857) - 1) / (1,36136 \cdot (2,857^2 - 1) \cdot (2,857 - 1)) = 2,153$$

Коэффициент d для интегральных фланцев:

$$d = \frac{U}{V} \cdot h_o \cdot g_0^2 = 2,153 / 0,003385 \cdot 7,483 \cdot 1^2 = 0,4761 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$$

$$L = \frac{t \cdot e + 1}{T} + \frac{t^3}{d} = (17 \cdot 0,03749 + 1) / 1,241 + 17^3 / 0,4761 \cdot 10^{-5} = 2,352$$

Момент инерции сечения фланца при изгибе (интегральные фланцы с втулкой):

$$I = \frac{0,0874 \cdot L \cdot g_0^2 \cdot h_o \cdot B}{V} = 0,0874 \cdot 2,352 \cdot 1 \cdot 7,483 \cdot 56 / 0,003385 = 0,2545 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

$$G_{\text{avg}} = 0,5 \cdot (g_0 + g_1) = 0,5 \cdot (1 + 10) = 5,5 \text{ мм}$$

$$A_R = 0,5 \cdot (A - B) = 0,5 \cdot (160 - 56) = 52 \text{ мм}$$

Так как $t \geq G_{\text{avg}}$,

$$A_A = A_R = 52 \text{ мм}$$

$$B_B = t = 17 \text{ мм}$$

$$K_{AB} = \left(A_A \cdot B_B^3 \right) \cdot \left[\frac{1}{3} - 0,21 \cdot \left(\frac{B_B}{A_A} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{12} \cdot \left\{ \frac{B_B}{A_A} \right\}^4 \right) \right] = (52 \cdot 17^3) \cdot [1/3 - 0,21 \cdot (17/52) \cdot (1 - 1/12 \cdot \{17/52\}^4)] = 0,6764 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

$$C_c = h = 22,5 \text{ мм}$$

$$D_{DG} = G_{\text{avg}} = 5,5 \text{ мм}$$

$$K_{CD} = \left(C_c \cdot D_{DG}^3 \right) \cdot \left[\frac{1}{3} - 1,05 \cdot \left(\frac{D_{DG}}{C_c} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{192} \cdot \left\{ \frac{D_{DG}}{C_c} \right\}^4 \right) \right] = (22,5 \cdot 5,5^3) \cdot [1/3 - 1,05 \cdot (5,5/22,5) \cdot (1 - 1/192 \cdot \{5,5/22,5\}^4)] = 0,287 \cdot 10^{-9} \text{ м}^4$$

Полярный момент сечения фланца (интегральные фланцы, плоские фланцы с втулкой):

$$I_P = K_{AB} + K_{CD} = 0,6764 \cdot 10^{-7} + 0,287 \cdot 10^{-9} = 0,6792 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

Компонент проектного момента на фланце, как результат действия внешнего изгибающего момента и/или осевой силы:

$$M_{oe} = 4 \cdot M_E \cdot \left[\frac{I}{0,3846 \cdot I_P + I} \right] \cdot \left[\frac{h_D}{C - 2 \cdot h_D} \right] + F_A \cdot h_D = 4 \cdot 0 \cdot [0,2545 \cdot 10^{-7} / (0,3846 \cdot 0,6792 \cdot 10^{-7} + 0,2545 \cdot 10^{-7})] \cdot [29,5 / (125 - 2 \cdot 29,5)] + 0 \cdot 29,5 = 0 \text{ Н м}$$

Коэффициент момента для расчета свободных колец:

Подпись и дата	
Инв. № дубл.	
Взам. инв. №	
Подпись и дата	
Инв. № подл.	19756.4
Изм.	
Лист	
№ докум.	
Подп.	
Дата	
ЕД-2.00.00.000 РР	
Лист	171

$$0,3743 \leq 1.0$$

Условие жёсткости выполнено

Расчёт напряжений второго фланца:

Равнодействующая давления на внутренней поверхности фланца:

$$H_D = 0.785 \cdot B^2 \cdot p = 0.785 \cdot 29^2 \cdot 0.34 = 224,5 \text{ Н}$$

Плечо момента для силы H_D (фланцы интегрального типа, или другие, рассчитываемые аналогично):

$$h_D = \frac{C - B - g_1}{2} = (125 - 29 - 23,5) / 2 = 36,25 \text{ мм}$$

Разница между общей равнодействующей давления и равнодействующей на внутренней поверхности фланца:

$$H_T = H - H_D = 1730 - 224,5 = 1505 \text{ Н}$$

Плечо для нагрузки H_T (интегральные фланцы, а также иные, рассчитываемые аналогично):

$$h_T = \frac{1}{2} \left[\frac{C - B}{2} + h_G \right] = 1/2 \cdot [(125 - 29) / 2 + 22,25] = 35,12 \text{ мм}$$

Коэффициент болтового интервала:

$$B_{SC} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{B_S}{2 \cdot a + t}} \right\} = \max \{ 1; (98,17 / (2 \cdot 16 + 21))^{1/2} \} = 1,361$$

$$X_g = \frac{g_1}{g_0} = 23,5 / 14,5 = 1,621$$

Коэффициент

$$h_o = \sqrt{B \cdot g_0} = (29 \cdot 14,5)^{1/2} = 20,51 \text{ мм}$$

$$X_h = \frac{h}{h_o} = 22,5 / 20,51 = 1,097$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$F = 0,774$$

Расчетные коэффициенты:

$$e = \frac{F}{h_o} = 0,774 / 20,51 = 0,03774 \text{ 1/мм}$$

$$K = \frac{A}{B} = 160 / 29 = 5,517$$

$$T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55246 \cdot \lg K) - 1}{(1.0472 + 1.9448 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (5,517^2 \cdot (1 + 8.55246 \cdot \lg 5,517) - 1) / ((1.0472 + 1.9448 \cdot 5,517^2) \cdot (5,517 - 1)) = 0,8177$$

$$U = \frac{K^2 (1 + 8.55246 \cdot \lg K) - 1}{1.36136 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (5,517^2 \cdot (1 + 8.55246 \cdot \lg 5,517) - 1) / (1.36136 \cdot (5,517^2 - 1) \cdot (5,517 - 1)) = 1,229$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$V = 0,2141$$

Коэффициент d для интегральных фланцев:

$$d = \frac{U}{V} \cdot h_o \cdot g_0^2 = 1,229 / 0,2141 \cdot 20,51 \cdot 14,5^2 = 0,2475 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$$

$$L = \frac{t \cdot e + 1}{T} + \frac{t^3}{d} = (21 \cdot 0,03774 + 1) / 0,8177 + 21^3 / 0,2475 \cdot 10^{-4} = 2,566$$

Момент инерции сечения фланца при изгибе (интегральные фланцы с втулкой):

$$I = \frac{0.0874 \cdot L \cdot g_0^2 \cdot h_o \cdot B}{V} = 0.0874 \cdot 2,566 \cdot 14,5^2 \cdot 20,51 \cdot 29 / 0,2141 = 0,131 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$$

Инов. № подл. 19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР
					Лист 174

$$G_{\text{вг}} = 0.5 \cdot (g_0 + g_1) = 0.5 \cdot (14,5 + 23,5) = 19 \text{ мм}$$

$$A_R = 0.5 \cdot (A - B) = 0.5 \cdot (160 - 29) = 65,5 \text{ мм}$$

Так как $t \geq G_{\text{вг}}$,

$$A_A = A_R = 65,5 \text{ мм}$$

$$B_B = t = 21 \text{ мм}$$

$$K_{AB} = \left(A_A \cdot B_B^3 \right) \cdot \left[\frac{1}{3} - 0.21 \cdot \left(\frac{B_B}{A_A} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{12} \cdot \left\{ \frac{B_B}{A_A} \right\}^4 \right) \right] = (65,5 \cdot 21^3) \cdot [1/3 - 0.21 \cdot (21/65,5) \cdot (1 - 1/12 \cdot (21/65,5)^4)] = 0,1614 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$$

$$C_C = h = 22,5 \text{ мм}$$

$$D_{DG} = G_{\text{вг}} = 19 \text{ мм}$$

$$K_{CD} = \left(C_C \cdot D_{DG}^3 \right) \cdot \left[\frac{1}{3} - 1.05 \cdot \left(\frac{D_{DG}}{C_C} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{192} \cdot \left\{ \frac{D_{DG}}{C_C} \right\}^4 \right) \right] = (22,5 \cdot 19^3) \cdot [1/3 - 1.05 \cdot (19/22,5) \cdot (1 - 1/192 \cdot (19/22,5)^4)] = (-0,8503 \cdot 10^{-7}) \text{ м}^4$$

Полярный момент сечения фланца (интегральные фланцы, плоские фланцы с втулкой):

$$I_P = K_{AB} + K_{CD} = 0,1614 \cdot 10^{-6} + (-0,8503 \cdot 10^{-7}) = 0,7636 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

Компонент проектного момента на фланце, как результат действия внешнего изгибающего момента и/или осевой силы:

$$M_{oe} = 4 \cdot M_E \cdot \left[\frac{I}{0.3846 \cdot I_P + I} \right] \cdot \left[\frac{h_D}{C - 2 \cdot h_D} \right] + F_A \cdot h_D = 4 \cdot 0 \cdot [0,131 \cdot 10^{-6} / (0.3846 \cdot 0,7636 \cdot 10^{-7} + 0,131 \cdot 10^{-6})] \cdot [36,25 / (125 - 2 \cdot 36,25)] + 0 \cdot 36,25 = 0 \text{ Н м}$$

Изгибающий момент в расчётных условиях (внутреннее давление):

$$M_o = [(H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G) \cdot B_{SC} + M_{oe}] \cdot F_S = [(224,5 \cdot 36,25 + 1505 \cdot 35,12 + 1677 \cdot 22,25) \cdot 1,361 + 0] \cdot 1 = 133,8 \text{ Н м}$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$f = 1$$

Продольные напряжения во втулке, в расчётных условиях:

$$S_H = \frac{f \cdot M_o}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 133,8 / (2,566 \cdot 23,5^2 \cdot 29) = 3,255 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min \{ 1.5 \cdot S_{fo}; 2.5 \cdot S_{no} \}$$

$$\min \{ 1.5 \cdot S_{fo}; 2.5 \cdot S_{no} \} = \min \{ 1.5 \cdot 130,2; 2.5 \cdot 149 \} = 195,3 \text{ МПа}$$

3,255 МПа ≤ 195,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, расчётные условия:

$$S_R = \frac{(1.33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_o}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1.33 \cdot 21 \cdot 0,03774 + 1) \cdot 133,8 / (2,566 \cdot 21^2 \cdot 29) = 8,374 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{fo}$$

8,374 МПа ≤ 130,2 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left(0.66845 + 5.7169 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (5,517 - 1) \cdot (0.66845 + 5.7169 \cdot 5,517^2 \cdot \lg 5,517 / (5,517^2 - 1)) = 1,119$$

$$Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (5,517^2 + 1) / (5,517^2 - 1) = 1,068$$

Касательные напряжения во фланце, расчётные условия:

Инв. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР
					Лист 175

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\xi}$$

48,16 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие прочности выполнено

Жесткость фланца

- для расчётных условий:

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, расчётные условия):

$$J = \frac{52.14 \cdot V \cdot M_o}{L \cdot E_{yo} \cdot \xi_o^2 \cdot K_R \cdot h_o} = (52.14 \cdot 0.2141 \cdot 133.8) / (2.566 \cdot 1.818 \cdot 10^5 \cdot 14.5^2 \cdot 0.3 \cdot 20.51) = 0.002476$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1.0$$

$$0.002476 \leq 1.0$$

Условие жёсткости выполнено

- для условий монтажа:

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, условия монтажа):

$$J = \frac{52.14 \cdot V \cdot M_{\xi}}{L \cdot E_{y\xi} \cdot \xi_o^2 \cdot K_R \cdot h_o} = (52.14 \cdot 0.2141 \cdot 2142) / (2.566 \cdot 1.99 \cdot 10^5 \cdot 14.5^2 \cdot 0.3 \cdot 20.51) = 0.03621$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1.0$$

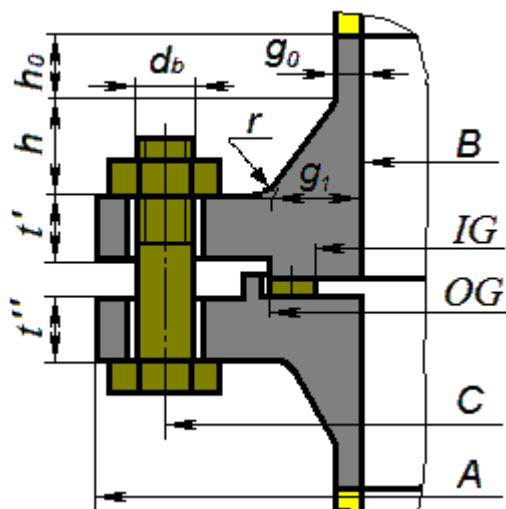
$$0.03621 \leq 1.0$$

Условие жёсткости выполнено

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				
Лист				
177				

Фланцевое соединение DN50-M33

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 TW DN50

Материал смежного элемента: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281

Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245) Gr.

Наружный диаметр фланца (кольца), А: 160 мм

Толщина фланца (кольца), t: 17 мм

Сумма прибавок, с: 4 мм

Внешняя коррозия фланца, c_f : 0 мм

Внутренний диаметр фланца, В: 48 мм

Длина конической части втулки, h: 22,5 мм

Длина цилиндрической части втулки, h_0 : 5,5 мм

Толщина цилиндрической части втулки, g_0 : 5 мм

Толщина конической части втулки, g_1 : 14 мм

Радиус перехода, г: 5 мм

Данные второго фланца (кольца):

Смежный элемент:

Материал смежного элемента: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281

Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245) Gr.

Наружный диаметр фланца (кольца), А: 160 мм

Толщина фланца (кольца), t: 21 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 TW DN50 Материал смежного элемента: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245) Gr. Наружный диаметр фланца (кольца), А: 160 мм Толщина фланца (кольца), t: 17 мм Сумма прибавок, с: 4 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, h ₀ : 5,5 мм Толщина цилиндрической части втулки, g ₀ : 5 мм Толщина конической части втулки, g ₁ : 14 мм Радиус перехода, г: 5 мм Данные второго фланца (кольца): Смежный элемент: Материал смежного элемента: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245) Gr. Наружный диаметр фланца (кольца), А: 160 мм Толщина фланца (кольца), t: 21 мм
19756.4					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР
					Лист 178

Свойства материала смежного элемента фланца 2

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 192 °С (расчётные условия):
S_{но2}= 149 МПа
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 20 °С (расчётные условия):
S_{нг2}= 183 МПа

Свойства материала фланца (кольца) 1

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 192 °С (расчётные условия):
S_{fo1}= min(R_{e/t} / n_T; R_m²⁰ / n_B) = min{195,3 / 1,5; 440 / 2,4}= 130,2 МПа
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 192 °С:
E₁= 1,818·10⁵ МПа
Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 192 °С:
α₁= 0,126·10⁻⁴ °С
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 20 °С (расчётные условия):
S_{g1}= min(R_{e/t} / n_T; R_m²⁰ / n_B) = min{245 / 1,5; 440 / 2,4}= 163,3 МПа
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 20 °С:
E²⁰₁= 1,99·10⁵ МПа

Свойства материала фланца (кольца) 2

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 192 °С (расчётные условия):
S_{fo2}= min(R_{e/t} / n_T; R_m²⁰ / n_B) = min{195,3 / 1,5; 440 / 2,4}= 130,2 МПа
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 192 °С:
E₂= 1,818·10⁵ МПа
Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 192 °С:
α₂= 0,126·10⁻⁴ °С
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 20 °С (расчётные условия):
S_{g2}= min(R_{e/t} / n_T; R_m²⁰ / n_B) = min{245 / 1,5; 440 / 2,4}= 163,3 МПа
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре T = 20 °С:
E²⁰₂= 1,99·10⁵ МПа

Расчётные параметры первого фланца:

Внутренний диаметр фланца (с учетом коррозии):
B = B + 2 · c = 48 + 2 · 4 = 56 мм
Диаметр втулки с учетом коррозии (для фланцев, приварных встык):
g₀ = g₀ - c = 5 - 4 = 1 мм
Больший диаметр конической втулки с учетом коррозии:
g₁ = g₁ - c = 14 - 4 = 10 мм
Толщина фланца, с учетом коррозии:
t = t - c_f = 17 - 0 = 17 мм

Расчётные параметры второго фланца:

Внутренний диаметр фланца (с учетом коррозии):
B = B + 2 · c = 33 + 2 · 4 = 41 мм
Диаметр втулки с учетом коррозии (для фланцев, приварных встык):
g₀ = g₀ - c = 12,5 - 4 = 8,5 мм
Больший диаметр конической втулки с учетом коррозии:
g₁ = g₁ - c = 21,5 - 4 = 17,5 мм
Толщина фланца, с учетом коррозии:

Изн. № подл. 19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	ЕД-2.00.00.000 РР					Лист
										180
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

$$A_m = \max \left[\frac{W_o + F_A + \frac{4 \cdot M_E}{G}}{S_{bo}}; \frac{W_{es}}{S_{bg}} \right] = \max[(3406 + 0 + 4 \cdot 0 / 80,5) / 141,2; 5,671 \cdot 10^4 / 147,2] = 0,3853 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

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:

$$H_p = 0.785 \cdot B^2 \cdot p = 0.785 \cdot 56^2 \cdot 0,34 = 837 \text{ H}$$

Плечо момента для силы N_D (фланцы интегрального типа, или другие, рассчитываемые аналогично):

$$h_D = \frac{C - B - g_1}{2} = (125 - 56 - 10) / 2 = 29,5 \text{ mm}$$

Равнодействующая давления:

$$H = 0.785 \cdot G^2 \cdot p = 0.785 \cdot 80,5^2 \cdot 0,34 = 1730 \text{ H}$$

Разница между общей равнодействующей давления и равнодействующей на внутренней поверхности фланца:

$$H_T = H - H_D = 1730 - 837 = 892,6 \text{ H}$$

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):

$$h_T = \frac{1}{2} \left[\frac{C-B}{2} + h_G \right] = 1/2 * [(125-56)/2 + 22,25] = 28,38 \text{ mm}$$

Нагрузка на прокладку (разница между проектной болтовой нагрузкой и равнодействующей давления), в расчётных:

$$H_G = W_o - H = 3406 - 1730 = 1677 \text{ H}$$

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:

$$B_{sc} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{B_s}{2 \cdot a + t}} \right\} = \max \{ 1; (98,17 / (2 \cdot 16 + 17))^{1/2} \} = 1,415$$

$$X_g = \frac{g_1}{g_0} = 10/1 = 10$$

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> $H_T = H - H_D = 1730 - 837 = 892,6 \text{ Н}$ <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> $h_T = \frac{1}{2} \left[\frac{C - B}{2} + h_G \right] = 1/2 * [(125 - 56) / 2 + 22,25] = 28,38 \text{ мм}$ <p>Нагрузка на прокладку (разница между проектной болтовой нагрузкой и равнодействующей давления), в расчётах:</p> $H_G = W_0 - H = 3406 - 1730 = 1677 \text{ Н}$ <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> $B_{SC} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{B_S}{2 \cdot a + t}} \right\} = \max \{ 1; (98,17 / (2 * 16 + 17))^{1/2} \} = 1,415$ $X_g = \frac{\xi_1}{\xi_0} = 10 / 1 = 10$ <p>Коэффициент</p>
					<p>Инв. № подл. 19756.4</p>

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР	Лист
						182

$$h_o = \sqrt{B \cdot g_0} = (56 \cdot 1)^{1/2} = 7,483 \text{ мм}$$

$$X_h = \frac{h}{h_o} = 22,5 / 7,483 = 3,007$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$F = 0,2805$$

Расчетные коэффициенты:

$$e = \frac{F}{h_o} = 0,2805 / 7,483 = 0,03749 \text{ 1/мм}$$

$$K = \frac{A}{B} = 160 / 56 = 2,857$$

$$T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg K) - 1}{(1,0472 + 1,9448 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (2,857^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg 2,857) - 1) / ((1,0472 + 1,9448 \cdot 2,857^2) \cdot (2,857 - 1)) = 1,241$$

$$U = \frac{K^2 (1 + 8,55246 \cdot \lg K) - 1}{1,36136 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (2,857^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg 2,857) - 1) / (1,36136 \cdot (2,857^2 - 1) \cdot (2,857 - 1)) = 2,153$$

Коэффициент d для интегральных фланцев:

$$d = \frac{U}{V} \cdot h_o \cdot g_0^2 = 2,153 / 0,003385 \cdot 7,483 \cdot 1^2 = 0,4761 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$$

$$L = \frac{t \cdot e + 1}{T} + \frac{t^3}{d} = (17 \cdot 0,03749 + 1) / 1,241 + 17^3 / 0,4761 \cdot 10^{-5} = 2,352$$

Момент инерции сечения фланца при изгибе (интегральные фланцы с втулкой):

$$I = \frac{0,0874 \cdot L \cdot g_0^2 \cdot h_o \cdot B}{V} = 0,0874 \cdot 2,352 \cdot 1 \cdot 7,483 \cdot 56 / 0,003385 = 0,2545 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

$$G_{\text{avg}} = 0,5 \cdot (g_0 + g_1) = 0,5 \cdot (1 + 10) = 5,5 \text{ мм}$$

$$A_R = 0,5 \cdot (A - B) = 0,5 \cdot (160 - 56) = 52 \text{ мм}$$

Так как $t \geq G_{\text{avg}}$,

$$A_A = A_R = 52 \text{ мм}$$

$$B_B = t = 17 \text{ мм}$$

$$K_{AB} = \left(A_A \cdot B_B^3 \right) \cdot \left[\frac{1}{3} - 0,21 \cdot \left(\frac{B_B}{A_A} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{12} \cdot \left\{ \frac{B_B}{A_A} \right\}^4 \right) \right] = (52 \cdot 17^3) \cdot [1/3 - 0,21 \cdot (17/52) \cdot (1 - 1/12 \cdot \{17/52\}^4)] = 0,6764 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

$$C_c = h = 22,5 \text{ мм}$$

$$D_{DG} = G_{\text{avg}} = 5,5 \text{ мм}$$

$$K_{CD} = \left(C_c \cdot D_{DG}^3 \right) \cdot \left[\frac{1}{3} - 1,05 \cdot \left(\frac{D_{DG}}{C_c} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{192} \cdot \left\{ \frac{D_{DG}}{C_c} \right\}^4 \right) \right] = (22,5 \cdot 5,5^3) \cdot [1/3 - 1,05 \cdot (5,5/22,5) \cdot (1 - 1/192 \cdot \{5,5/22,5\}^4)] = 0,287 \cdot 10^{-9} \text{ м}^4$$

Полярный момент сечения фланца (интегральные фланцы, плоские фланцы с втулкой):

$$I_P = K_{AB} + K_{CD} = 0,6764 \cdot 10^{-7} + 0,287 \cdot 10^{-9} = 0,6792 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

Компонент проектного момента на фланце, как результат действия внешнего изгибающего момента и/или осевой силы:

$$M_{oe} = 4 \cdot M_E \cdot \left[\frac{I}{0,3846 \cdot I_P + I} \right] \cdot \left[\frac{h_D}{C - 2 \cdot h_D} \right] + F_A \cdot h_D = 4 \cdot 0 \cdot [0,2545 \cdot 10^{-7} / (0,3846 \cdot 0,6792 \cdot 10^{-7} + 0,2545 \cdot 10^{-7})] \cdot [29,5 / (125 - 2 \cdot 29,5)] + 0 \cdot 29,5 = 0 \text{ Н м}$$

Коэффициент момента для расчета свободных колец:

Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата			
		Инов. № дубл.			
Инов. № подл.	19756.4	Взам. инв. №			
		Подпись и дата			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР
					Лист
					183

$$F_s = 1$$

Изгибающий момент в расчётных условиях (внутреннее давление):

$$M_o = [(H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G) \cdot B_{sc} + M_{oe}] \cdot F_s = [(837 \cdot 29,5 + 892,6 \cdot 28,38 + 1677 \cdot 22,25) \cdot 1,415 + 0] \cdot 1 = 123,6 \text{ Н м}$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$f = 1$$

Продольные напряжения во втулке, в расчётных условиях:

$$S_H = \frac{f \cdot M_o}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 123,6 / (2,352 \cdot 10^2 \cdot 56) = 9,386 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min\{1,5 \cdot S_{fo}; 2,5 \cdot S_{no}\}$$

$$\min\{1,5 \cdot S_{fo}; 2,5 \cdot S_{no}\} = \min\{1,5 \cdot 130,2; 2,5 \cdot 148\} = 195,3 \text{ МПа}$$

9,386 МПа ≤ 195,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, расчётные условия:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_o}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 \cdot 17 \cdot 0,03749 + 1) \cdot 123,6 / (2,352 \cdot 17^2 \cdot 56) = 6,001 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{fo}$$

6,001 МПа ≤ 130,2 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left(0,66845 + 5,7169 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (2,857 - 1) \cdot (0,66845 + 5,7169 \cdot 2,857^2 \cdot \lg 2,857 / (2,857^2 - 1)) = 1,959$$

$$Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (2,857^2 + 1) / (2,857^2 - 1) = 1,279$$

Касательные напряжения во фланце, расчётные условия:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_o}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 1,959 \cdot 123,6 / (17^2 \cdot 56) - 1,279 \cdot 6,001 = 7,289 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{fo}$$

7,289 МПа ≤ 130,2 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (9,386 + 6,001) / 2 = 7,693 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{fo}$$

7,693 МПа ≤ 130,2 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (9,386 + 7,289) / 2 = 8,337 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{fo}$$

8,337 МПа ≤ 130,2 МПа, **Условие прочности выполнено**

Болтовая нагрузка в условиях монтажа:

$$W_g = \left(\frac{A_m + A_b}{2} \right) \cdot S_{bg} = (0,3853 \cdot 10^{-3} + 0,576 \cdot 10^{-3}) / 2 \cdot 147,2 = 7,075 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Изгибающий момент в условиях монтажа (внутреннее давление):

$$M_g = \frac{W_g \cdot (C - G) \cdot B_{sc} \cdot F_s}{2} = 7,075 \cdot 10^4 \cdot (125 - 80,5) \cdot 1,415 \cdot 1 / 2 = 2228 \text{ Н м}$$

Продольные напряжения во втулке, в условиях монтажа:

Изн.	№ подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19756.4					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
					ЕД-2.00.00.000 РР
					Лист 184

$$0,3743 \leq 1.0$$

Условие жёсткости выполнено

Расчёт напряжений второго фланца:

Равнодействующая давления на внутренней поверхности фланца:

$$H_D = 0.785 \cdot B^2 \cdot p = 0.785 \cdot 41^2 \cdot 0.34 = 448,7 \text{ Н}$$

Плечо момента для силы H_D (фланцы интегрального типа, или другие, рассчитываемые аналогично):

$$h_D = \frac{C - B - g_1}{2} = (125 - 41 - 17,5) / 2 = 33,25 \text{ мм}$$

Разница между общей равнодействующей давления и равнодействующей на внутренней поверхности фланца:

$$H_T = H - H_D = 1730 - 448,7 = 1281 \text{ Н}$$

Плечо для нагрузки H_T (интегральные фланцы, а также иные, рассчитываемые аналогично):

$$h_T = \frac{1}{2} \left[\frac{C - B}{2} + h_G \right] = 1/2 \cdot [(125 - 41) / 2 + 22,25] = 32,12 \text{ мм}$$

Коэффициент болтового интервала:

$$B_{SC} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{B_S}{2 \cdot a + t}} \right\} = \max \{ 1; (98,17 / (2 \cdot 16 + 21))^{1/2} \} = 1,361$$

$$X_g = \frac{g_1}{g_0} = 17,5 / 8,5 = 2,059$$

Коэффициент

$$h_o = \sqrt{B \cdot g_0} = (41 \cdot 8,5)^{1/2} = 18,67 \text{ мм}$$

$$X_h = \frac{h}{h_o} = 22,5 / 18,67 = 1,205$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$F = 0,7195$$

Расчетные коэффициенты:

$$e = \frac{F}{h_o} = 0,7195 / 18,67 = 0,03854 \text{ 1/мм}$$

$$K = \frac{A}{B} = 160 / 41 = 3,902$$

$$T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55246 \cdot \lg K) - 1}{(1.0472 + 1.9448 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (3,902^2 \cdot (1 + 8.55246 \cdot \lg 3,902) - 1) / ((1.0472 + 1.9448 \cdot 3,902^2) \cdot (3,902 - 1)) = 1,025$$

$$U = \frac{K^2 (1 + 8.55246 \cdot \lg K) - 1}{1.36136 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (3,902^2 \cdot (1 + 8.55246 \cdot \lg 3,902) - 1) / (1.36136 \cdot (3,902^2 - 1) \cdot (3,902 - 1)) = 1,623$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$V = 0,1337$$

Коэффициент d для интегральных фланцев:

$$d = \frac{U}{V} \cdot h_o \cdot g_0^2 = 1,623 / 0,1337 \cdot 18,67 \cdot 8,5^2 = 0,1637 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$$

$$L = \frac{t \cdot e + 1}{T} + \frac{t^3}{d} = (21 \cdot 0,03854 + 1) / 1,025 + 21^3 / 0,1637 \cdot 10^{-4} = 2,33$$

Момент инерции сечения фланца при изгибе (интегральные фланцы с втулкой):

$$I = \frac{0.0874 \cdot L \cdot g_0^2 \cdot h_o \cdot B}{V} = 0.0874 \cdot 2,33 \cdot 8,5 \cdot 18,67 \cdot 41 / 0,1337 = 0,8424 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР
					Лист
					186

$$G_{\text{вг}} = 0.5 \cdot (g_0 + g_1) = 0.5 \cdot (8,5 + 17,5) = 13 \text{ мм}$$

$$A_R = 0.5 \cdot (A - B) = 0.5 \cdot (160 - 41) = 59,5 \text{ мм}$$

Так как $t \geq G_{\text{вг}}$,

$$A_A = A_R = 59,5 \text{ мм}$$

$$B_B = t = 21 \text{ мм}$$

$$K_{AB} = \left(A_A \cdot B_B^3 \right) \cdot \left[\frac{1}{3} - 0.21 \cdot \left(\frac{B_B}{A_A} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{12} \cdot \left\{ \frac{B_B}{A_A} \right\}^4 \right) \right] = (59,5 \cdot 21^3) \cdot [1/3 - 0.21 \cdot (21/59,5) \cdot (1 - 1/12 \cdot \{21/59,5\}^4)] = 0,1429 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$$

$$C_C = h = 22,5 \text{ мм}$$

$$D_{DG} = G_{\text{вг}} = 13 \text{ мм}$$

$$K_{CD} = \left(C_C \cdot D_{DG}^3 \right) \cdot \left[\frac{1}{3} - 1.05 \cdot \left(\frac{D_{DG}}{C_C} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{192} \cdot \left\{ \frac{D_{DG}}{C_C} \right\}^4 \right) \right] = (22,5 \cdot 13^3) \cdot [1/3 - 1.05 \cdot (13/22,5) \cdot (1 - 1/192 \cdot \{13/22,5\}^4)] = (-0,1349 \cdot 10^{-7}) \text{ м}^4$$

Полярный момент сечения фланца (интегральные фланцы, плоские фланцы с втулкой):

$$I_P = K_{AB} + K_{CD} = 0,1429 \cdot 10^{-6} + (-0,1349 \cdot 10^{-7}) = 0,1294 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$$

Компонент проектного момента на фланце, как результат действия внешнего изгибающего момента и/или осевой силы:

$$M_{oe} = 4 \cdot M_E \cdot \left[\frac{I}{0.3846 \cdot I_P + I} \right] \cdot \left[\frac{h_D}{C - 2 \cdot h_D} \right] + F_A \cdot h_D = 4 \cdot 0 \cdot [0,8424 \cdot 10^{-7} / (0.3846 \cdot 0,1294 \cdot 10^{-6} + 0,8424 \cdot 10^{-7})] \cdot [33,25 / (125 - 2 \cdot 33,25)] + 0 \cdot 33,25 = 0 \text{ Н м}$$

Изгибающий момент в расчётных условиях (внутреннее давление):

$$M_o = \left[(H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G) \cdot B_{SC} + M_{oe} \right] \cdot F_S / [(448,7 \cdot 33,25 + 1281 \cdot 32,12 + 1677 \cdot 22,25) \cdot 1,361 + 0] \cdot 1 = 127,1 \text{ Н м}$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$f = 1$$

Продольные напряжения во втулке, в расчётных условиях:

$$S_H = \frac{f \cdot M_o}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 127,1 / (2,33 \cdot 17,5^2 \cdot 41) = 4,343 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min \{ 1.5 \cdot S_{fo}; 2.5 \cdot S_{no} \}$$

$$\min \{ 1.5 \cdot S_{fo}; 2.5 \cdot S_{no} \} = \min \{ 1.5 \cdot 130,2; 2.5 \cdot 149 \} = 195,3 \text{ МПа}$$

4,343 МПа ≤ 195,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, расчётные условия:

$$S_R = \frac{(1.33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_o}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1.33 \cdot 21 \cdot 0,03854 + 1) \cdot 127,1 / (2,33 \cdot 21^2 \cdot 41) = 6,262 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{fo}$$

6,262 МПа ≤ 130,2 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left(0.66845 + 5.7169 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (3,902 - 1) \cdot (0.66845 + 5.7169 \cdot 3,902^2 \cdot \lg 3,902 / (3,902^2 - 1)) = 1,477$$

$$Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (3,902^2 + 1) / (3,902^2 - 1) = 1,141$$

Касательные напряжения во фланце, расчётные условия:

Инв. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР
					Лист
					187

$$S_T = \frac{Y \cdot M_o}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 1,477 * 127,1 / (21^2 * 41) - 1,141 * 6,262 = 3,238 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{\text{до}}$$

3,238 МПа ≤ 130,2 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (4,343 + 6,262) / 2 = 5,303 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\text{до}}$$

5,303 МПа ≤ 130,2 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (4,343 + 3,238) / 2 = 3,79 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\text{до}}$$

3,79 МПа ≤ 130,2 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:

$$S_H = \frac{f \cdot M_{\xi}}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 * 2142 / (2,33 * 17,5^2 * 41) = 73,22 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min\{1,5 \cdot S_{\text{до}}; 2,5 \cdot S_{\text{н}}\}$$

$$\min\{1,5 \cdot S_{\text{до}}; 2,5 \cdot S_{\text{н}}\} = \min\{1,5 * 163,3; 2,5 * 183\} = 245 \text{ МПа}$$

73,22 МПа ≤ 245 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_{\xi}}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 * 21 * 0,03854 + 1) * 2142 / (2,33 * 21^2 * 41) = 105,6 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{\text{до}}$$

105,6 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Касательные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_{\xi}}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 1,477 * 2142 / (21^2 * 41) - 1,141 * 105,6 = 54,59 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{\text{до}}$$

54,59 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (73,22 + 105,6) / 2 = 89,4 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\text{до}}$$

89,4 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (73,22 + 54,59) / 2 = 63,9 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Инов. № подл.	19756.4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР			Лист
								188

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\xi}$$

63,9 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие прочности выполнено

Жесткость фланца

- для расчётных условий:

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, расчётные условия):

$$J = \frac{52.14 \cdot V \cdot M_o}{L \cdot E_{yo} \cdot \xi_o^2 \cdot K_R \cdot h_o} = (52.14 \cdot 0.1337 \cdot 127.1) / (2.33 \cdot 1.818 \cdot 10^5 \cdot 8.5^2 \cdot 0.3 \cdot 18.67) = 0.005168$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1.0$$

$$0.005168 \leq 1.0$$

Условие жёсткости выполнено

- для условий монтажа:

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, условия монтажа):

$$J = \frac{52.14 \cdot V \cdot M_{\xi}}{L \cdot E_{y\xi} \cdot \xi_o^2 \cdot K_R \cdot h_o} = (52.14 \cdot 0.1337 \cdot 2142) / (2.33 \cdot 1.99 \cdot 10^5 \cdot 8.5^2 \cdot 0.3 \cdot 18.67) = 0.07959$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1.0$$

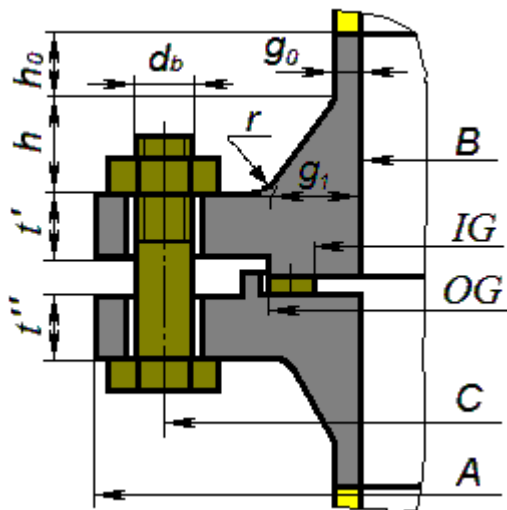
$$0.07959 \leq 1.0$$

Условие жёсткости выполнено

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
				189

Фланцевое соединение DN25 (H11, H01)

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: 85 мм

Данные первого фланца (кольца):

Смежный элемент: Штуцер НН1, НО1 DN25

Материал смежного элемента: 09Г2С (КП245) Gr.

Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245) Gr.

Наружный диаметр фланца (кольца), А: 115 мм

Толщина фланца (кольца), t: 14 мм

Сумма прибавок, с: 2 мм

Внешняя коррозия фланца, c_f : 0 мм

Внутренний диаметр фланца, В: 25 мм

Длина конической части втулки, h: 15 мм

Длина цилиндрической части втулки, h_0 : 7 мм

Толщина цилиндрической части втулки, g_0 : 10 мм

Толщина конической части втулки, g_1 : 10 мм

Радиус перехода, г: 5 мм

Данные второго фланца (кольца):

Смежный элемент:

Материал смежного элемента: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281

Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245) Gr.

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Свободный/интегральный:	-		
					Диаметр болтовой окружности, С: 85 мм			
19756.4					Данные первого фланца (кольца):			
					Смежный элемент:	Штуцер НН1, НО1 DN25		
					Материал смежного элемента:	09Г2С (КП245) Gr.		
					Материал фланца (кольца):	09Г2С (КП245) Gr.		
					Наружный диаметр фланца (кольца), А:	115 мм		
					Толщина фланца (кольца), t:	14 мм		
						Сумма прибавок, с:	2 мм	
						Внешняя коррозия фланца, с _г :	0 мм	
						Внутренний диаметр фланца, В:	25 мм	
						Длина конической части втулки, h:	15 мм	
						Длина цилиндрической части втулки, h ₀ :	7 мм	
						Толщина цилиндрической части втулки, g ₀ :	10 мм	
						Толщина конической части втулки, g ₁ :	10 мм	
						Радиус перехода, r:	5 мм	
						Данные второго фланца (кольца):		
						Смежный элемент:		
						Материал смежного элемента:	09Г2С Gr.ГОСТ 19281	
						Материал фланца (кольца):	09Г2С (КП245) Gr.	
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	ЕД-2.00.00.000 РР			
Изн.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				
					190			

Свойства материала смежного элемента фланца 1 Штуцер Н11, НО1 DN25

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рабочие условия):

$$S_{n01} = \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{194 / 1,5; 440 / 2,4\} = 129,3 \text{ МПа}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рабочие условия):

$$S_{ng1} = \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{245 / 1,5; 440 / 2,4\} = 163,3 \text{ МПа}$$

Свойства материала смежного элемента фланца 2

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 192\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рабочие условия):

$$S_{n02} = 149 \text{ МПа}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рабочие условия):

$$S_{ng2} = 183 \text{ МПа}$$

Свойства материала фланца (кольца) 1

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 192\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рабочие условия):

$$S_{f01} = \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{195,3 / 1,5; 440 / 2,4\} = 130,2 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 192\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_1 = 1,818 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 192\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\alpha_1 = 0,126 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рабочие 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 $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E^{20}_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала фланца (кольца) 2

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 192\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рабочие условия):

$$S_{f02} = \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{195,3 / 1,5; 440 / 2,4\} = 130,2 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 192\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_2 = 1,818 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 192\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\alpha_2 = 0,126 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) Gr. при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рабочие 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 $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E^{20}_2 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётные параметры первого фланца:

Внутренний диаметр фланца (с учетом коррозии):

$$B = B + 2 \cdot c = 25 + 2 \cdot 2 = 29 \text{ мм}$$

Диаметр втулки с учетом коррозии (для фланцев, приварных встык):

$$g_0 = g_0 - c = 10 - 2 = 8 \text{ мм}$$

Больший диаметр конической втулки с учетом коррозии:

$$g_1 = g_1 - c = 10 - 2 = 8 \text{ мм}$$

Толщина фланца, с учетом коррозии:

$$t = t - c_f = 14 - 0 = 14 \text{ мм}$$

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				Лист
				192

Расчётные параметры второго фланца:

Внутренний диаметр фланца (с учетом коррозии):

$B = B + 2 \cdot c = 25 + 2 \cdot 2 = 29 \text{ мм}$

Диаметр втулки с учетом коррозии (для фланцев, приварных встык):

$g_0 = g_0 - c = 4 - 2 = 2 \text{ мм}$

Больший диаметр конической втулки с учетом коррозии:

$g_1 = g_1 - c = 10 - 2 = 8 \text{ мм}$

Толщина фланца, с учетом коррозии:

$t = t - c_f = 14 - 0 = 14 \text{ мм}$

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:

$N = \frac{OG - IG}{2} = (57 - 43) / 2 = 7 \text{ мм}$

Базовая контактная ширина прокладки:

$b_0 = \frac{N}{2} = 7 / 2 = 3,5 \text{ мм}$

Диаметр окружности приложения реакции со стороны прокладки:

Если b₀ ≤ 6 мм, G равно среднему диаметру контактирующей поверхности прокладки.

$G = \frac{OG + \max\{B', B'', IG\}}{2} = (57 + \max\{25; 25; 43\}) / 2 = 50 \text{ мм}$

Ширина, используемая для определения базовой контактной ширины прокладки через b₀, на основании возможной контактной ширины прокладки:

$N = \frac{OG - IG}{2} = (57 - 43) / 2 = 7 \text{ мм}$

Базовая контактная ширина прокладки:

$b_0 = \frac{N}{2} = 7 / 2 = 3,5 \text{ мм}$

Диаметр окружности приложения реакции со стороны прокладки:

Если b₀ ≤ 6 мм, G равно среднему диаметру контактирующей поверхности прокладки.

$G = \frac{OG + \max\{B', B'', IG\}}{2} = (57 + \max\{25; 25; 43\}) / 2 = 50 \text{ мм}$

Эффективная контактная ширина прокладки:

$b = \begin{cases} b_0 & \text{если } b_0 \leq 6 \text{ мм} \\ 2,5 \cdot \sqrt{b_0} & \text{если } b_0 > 6 \text{ мм} \end{cases} = 3,5 \text{ мм}$

Расчёт нагрузок

Проектная болтовая нагрузка для рабочих условий (для самоуплотняющихся прокладок):

Инов. № подл. 19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата						Лист 193
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР					

$$W_o = 0.785 \cdot G^2 \cdot p + 2 \cdot b \cdot \pi \cdot G \cdot m \cdot p = 0.785 \cdot 50^2 \cdot 0,88 + 2 \cdot 3,5 \cdot 3,142 \cdot 50 \cdot 3 \cdot 0,88 = 4630 \text{ Н}$$

Величина растягивающей внешней силы:

$$F_A = 1500 \text{ Н}$$

Сжимающими нагрузками пренебрегают, и в этом случае F_A приравнивается нулю.

Внешний изгибающий момент:

$$M_E = 282,8 \text{ Н м}$$

$$W_{gs} = \pi \cdot b \cdot G \cdot y = 3,142 \cdot 3,5 \cdot 50 \cdot 69 = 3,793 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Общая расчетная площадь сечения болтов:

$$A_m = \max \left[\frac{W_o + F_A + \frac{4 \cdot M_E}{G}}{S_{bo}}; \frac{W_{gs}}{S_{bg}} \right] = \max[(4630 + 1500 + 4 \cdot 282,8 / 50) / 141,2; 3,793 \cdot 10^4 / 147,2] = 0,2577 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Диаметр сечения болта (шпильки) с учетом коррозии:

$$d_{bc} = 12 \text{ мм}$$

Площадь сечения болта (шпильки) (по внутреннему диаметру резьбы с учетом коррозии):

$$f_o = 0,762 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Площадь поперечного сечения болтов по внутреннему диаметру резьбы или минимальному диаметру стержня:

$$A_b = n \cdot f_o = 4 \cdot 0,762 \cdot 10^{-4} = 0,3048 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Расчёт болтов(шпилек):

Условие прочности болтов:

$$A_m \leq A_b$$

$$0,2577 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \leq 0,3048 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Условие прочности выполнено

Расчёт напряжений первого фланца:

Равнодействующая давления на внутренней поверхности фланца:

$$H_D = 0.785 \cdot B^2 \cdot p = 0.785 \cdot 29^2 \cdot 0,88 = 581 \text{ Н}$$

Плечо момента для силы H_D (фланцы интегрального типа, или другие, рассчитываемые аналогично):

$$h_D = \frac{C - B - g_1}{2} = (85 - 29 - 8) / 2 = 24 \text{ мм}$$

Равнодействующая давления:

$$H = 0.785 \cdot G^2 \cdot p = 0.785 \cdot 50^2 \cdot 0,88 = 1727 \text{ Н}$$

Разница между общей равнодействующей давления и равнодействующей на внутренней поверхности фланца:

$$H_T = H - H_D = 1727 - 581 = 1146 \text{ Н}$$

Радиальное расстояние от реакции прокладки до болтовой окружности:

$$h_G = \frac{C - G}{2} = (85 - 50) / 2 = 17,5 \text{ мм}$$

Плечо для нагрузки H_T (интегральные фланцы, а также иные, рассчитываемые аналогично):

$$h_T = \frac{1}{2} \left[\frac{C - B}{2} + h_G \right] = 1/2 \cdot [(85 - 29) / 2 + 17,5] = 22,75 \text{ мм}$$

Нагрузка на прокладку (разница между проектной болтовой нагрузкой и равнодействующей давления), в рабочих:

$$H_G = W_o - H = 4630 - 1727 = 2903 \text{ Н}$$

Болтовой интервал:

$$B_S = \frac{\pi \cdot C}{n} = 3,142 \cdot 85 / 4 = 66,76 \text{ мм}$$

Номинальный диаметр болта:

Изн. № подл.	19756.4	Подпись и дата		Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
Изм.		Лист		№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР						Лист
						194

$$a = d_b = 12 \text{ мм}$$

Коэффициент болтового интервала:

$$B_{sc} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{B_s}{2 \cdot a + t}} \right\} = \max \{ 1; (66,76 / (2 \cdot 12 + 14))^{1/2} \} = 1,325$$

$$X_g = \frac{g_1}{g_0} = 8/8 = 1$$

Коэффициент

$$h_o = \sqrt{B \cdot g_0} = (29 \cdot 8)^{1/2} = 15,23 \text{ мм}$$

$$X_h = \frac{h}{h_o} = 15 / 15,23 = 0,9848$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$F = 0,8976$$

Расчетные коэффициенты:

$$e = \frac{F}{h_o} = 0,8976 / 15,23 = 0,05893 \text{ 1/мм}$$

$$K = \frac{A}{B} = 115 / 29 = 3,966$$

$$T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg K) - 1}{(1,0472 + 1,9448 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (3,966^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg 3,966) - 1) / ((1,0472 + 1,9448 \cdot 3,966^2) \cdot (3,966 - 1)) = 1,015$$

$$U = \frac{K^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg K) - 1}{1,36136 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (3,966^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg 3,966) - 1) / (1,36136 \cdot (3,966^2 - 1) \cdot (3,966 - 1)) = 1,601$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$V = 0,5514$$

Коэффициент d для интегральных фланцев:

$$d = \frac{U}{V} \cdot h_o \cdot g_0^2 = 1,601 / 0,5514 \cdot 15,23 \cdot 8^2 = 0,2831 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$$

$$L = \frac{t \cdot e + 1}{T} + \frac{t^3}{d} = (14 \cdot 0,05893 + 1) / 1,015 + 14^3 / 0,2831 \cdot 10^{-5} = 2,768$$

Момент инерции сечения фланца при изгибе (интегральные фланцы с втулкой):

$$I = \frac{0,0874 \cdot L \cdot g_0^2 \cdot h_o \cdot B}{V} = 0,0874 \cdot 2,768 \cdot 8^2 \cdot 15,23 \cdot 29 / 0,5514 = 0,124 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

$$G_{\text{шг}} = 0,5 \cdot (g_0 + g_1) = 0,5 \cdot (8 + 8) = 8 \text{ мм}$$

$$A_R = 0,5 \cdot (A - B) = 0,5 \cdot (115 - 29) = 43 \text{ мм}$$

Так как $t \geq G_{\text{шг}}$,

$$A_A = A_R = 43 \text{ мм}$$

$$B_B = t = 14 \text{ мм}$$

$$K_{AB} = \left(A_A \cdot B_B^3 \right) \cdot \left[\frac{1}{3} - 0,21 \cdot \left(\frac{B_B}{A_A} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{12} \cdot \left\{ \frac{B_B}{A_A} \right\}^4 \right) \right] = (43 \cdot 14^3) \cdot [1/3 - 0,21 \cdot (14/43) \cdot (1 - 1/12 \cdot \{14/43\}^4)] = 0,3127 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

$$C_c = h = 15 \text{ мм}$$

$$D_{DG} = G_{\text{шг}} = 8 \text{ мм}$$

Инв. № подл.	19756.4	Подпись и дата			
		Инв. № дубл.			
		Взам. инв. №			
		Подпись и дата			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР
					Лист
					195

$$K_{CD} = \left(C_c \cdot D_{DG}^3 \right) \cdot \left[\frac{1}{3} - 1.05 \cdot \left(\frac{D_{DG}}{C_c} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{192} \cdot \left\{ \frac{D_{DG}}{C_c} \right\}^4 \right) \right] = (15 * 8^3) * [1/3 - 1.05 * (8/15) * (1 - 1/192 * \{8/15\}^4)] = (-0,1739 \cdot 10^{-8}) \text{ M}^4$$

Полярный момент сечения фланца (интегральные фланцы, плоские фланцы с втулкой):

$$I_p = K_{AB} + K_{CD} = 0,3127 \cdot 10^{-7} + (-0,1739 \cdot 10^{-8}) = 0,2953 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$$

Компонент проектного момента на фланце, как результат действия внешнего изгибающего момента и/или осевой силы:

$$M_{oe} = 4 \cdot M_E \cdot \left[\frac{I}{0.3846 \cdot I_D + I} \right] \cdot \left[\frac{h_D}{C - 2 \cdot h_D} \right] + F_A \cdot h_D = 4 \cdot 282,8 \cdot [0,124 \cdot 10^{-7} / (0.3846 \cdot 0,2953 \cdot 10^{-7} + 0,124 \cdot 10^{-7})] \cdot [24 / (85 - 2 \cdot 24)] + 1500 \cdot 24 = 419 \text{ H}$$

Коэффициент момента для расчета свободных колец:

$$F_c = 1$$

Изгибающий момент в рабочих условиях (внутреннее давление):

$$M_o = |((H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G) \cdot B_{SC} + M_{oe}) \cdot F_S| = |((581 \cdot 24 + 1146 \cdot 22,75 + 2903 \cdot 17,5) \cdot 1,325 + 419) \cdot 1| = 539,4 \text{ H M}$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$f \equiv 1$$

Продольные напряжения во втулке, в рабочих условиях:

$$S_H = \frac{f \cdot M_o}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 * 539,4 / (2,768 * 8^2 * 29) = 105 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min \{1.5 \cdot S_{f_0}; 2.5 \cdot S_{n_0}\}$$

$$\min \{1.5 \cdot S_{\text{вн}}; 2.5 \cdot S_{\text{но}}\} = \min \{1.5 \cdot 130,2; 2.5 \cdot 129,3\} = 195,3 \text{ МПа}$$

$105 \text{ МПа} \leq 195,3 \text{ МПа}$, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, рабочие условия:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_o}{L \cdot t^2 \cdot R} = (1,33 \cdot 14 \cdot 0,05893 + 1) \cdot 539,4 / (2,768 \cdot 14^2 \cdot 29) = 71,91 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \preceq S_{f_0}$$

$$71,91 \text{ МПа} \leq 130,2 \text{ МПа}, \text{ Условие прочности выполнено}$$

$$Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left(0.66845 + 5.7169 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (3,966 - 1) * (0.66845 + 5.7169 * 3,966^2 * \lg 3,966 / (3,966^2 - 1)) = 1,457$$

$$Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (3,966^2 + 1) / (3,966^2 - 1) = 1,136$$

Касательные напряжения во фланце, рабочие условия:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_0}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 1,457 * 539,4 / (14^2 * 29) - 1,136 * 71,91 = 56,6 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{f_0}$$

$$56,6 \text{ МПа} \leq 130,2 \text{ МПа, Условие прочности выполнено}$$

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (105 + 71,91) / 2 = 88,46 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{f_0}$$

$$88,46 \text{ МПа} \leq 130,2 \text{ МПа, Условие прочности выполнено}$$

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (105 + 56,6) / 2 = 80,81 \text{ МПа}$$

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$S_R = \frac{(1.33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_o}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1.33 \cdot 14 \cdot 0,05893 + 1) \cdot 539,4 / (2,768 \cdot 14^2 \cdot 29) = 71,91 \text{ МПа}$ <p>Условие прочности:</p> $S_R \leq S_{\text{ф}}$ $71,91 \text{ МПа} \leq 130,2 \text{ МПа, Условие прочности выполнено}$ $Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left(0.66845 + 5.7169 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (3,966 - 1) \cdot (0.66845 + 5.7169 \cdot 3,966^2 \cdot \lg 3,966 / (3,966^2 - 1)) = 1,457$ $Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (3,966^2 + 1) / (3,966^2 - 1) = 1,136$ <p>Касательные напряжения во фланце, рабочие условия:</p> $S_T = \frac{Y \cdot M_o}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 1,457 \cdot 539,4 / (14^2 \cdot 29) - 1,136 \cdot 71,91 = 56,6 \text{ МПа}$ <p>Условие прочности:</p> $S_T \leq S_{\text{ф}}$ $56,6 \text{ МПа} \leq 130,2 \text{ МПа, Условие прочности выполнено}$ $\frac{S_H + S_R}{2} = (105 + 71,91) / 2 = 88,46 \text{ МПа}$ <p>Условие прочности:</p> $\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\text{ф}}$ $88,46 \text{ МПа} \leq 130,2 \text{ МПа, Условие прочности выполнено}$ $\frac{S_H + S_T}{2} = (105 + 56,6) / 2 = 80,81 \text{ МПа}$
					<div> <div>Инв. № подл.</div> <div>19756.4</div> </div> <div> <div>Изм.</div> <div>Лист</div> <div>№ докум.</div> <div>Подп.</div> <div>Дата</div> </div> <div> <div>ЕД-2.00.00.000 РР</div> <div>Лист</div> <div>196</div> </div>

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\text{до}}$$

80,81 МПа ≤ 130,2 МПа, **Условие прочности выполнено**

Болтовая нагрузка в условиях монтажа:

$$W_{\text{г}} = \left(\frac{A_m + A_b}{2} \right) \cdot S_{b\text{г}} = (0,2577 \cdot 10^{-3} + 0,3048 \cdot 10^{-3}) / 2 \cdot 147,2 = 4,14 \cdot 10^{-4} \text{ Н}$$

Изгибающий момент в условиях монтажа (внутреннее давление):

$$M_{\text{г}} = \frac{W_{\text{г}} \cdot (C - G) \cdot B_{sc} \cdot F_s}{2} = 4,14 \cdot 10^{-4} \cdot (85 - 50) \cdot 1,325 \cdot 1 / 2 = 960,3 \text{ Н м}$$

Продольные напряжения во втулке, в условиях монтажа:

$$S_H = \frac{f \cdot M_{\text{г}}}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 960,3 / (2,768 \cdot 8^2 \cdot 29) = 186,9 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min\{1,5 \cdot S_{\text{гг}}; 2,5 \cdot S_{\text{нг}}\}$$

$$\min\{1,5 \cdot S_{\text{гг}}; 2,5 \cdot S_{\text{нг}}\} = \min\{1,5 \cdot 163,3; 2,5 \cdot 163,3\} = 245 \text{ МПа}$$

186,9 МПа ≤ 245 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_{\text{г}}}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 \cdot 14 \cdot 0,05893 + 1) \cdot 960,3 / (2,768 \cdot 14^2 \cdot 29) = 128 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{\text{гг}}$$

128 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Касательные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_{\text{г}}}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 1,457 \cdot 960,3 / (14^2 \cdot 29) - 1,136 \cdot 128 = 100,8 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{\text{гг}}$$

100,8 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (186,9 + 128) / 2 = 157,5 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\text{гг}}$$

157,5 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (186,9 + 100,8) / 2 = 143,9 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\text{гг}}$$

143,9 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие прочности выполнено

Жесткость фланца

- для рабочих условий:

Коэффициент жесткости для интегральных фланцев:

$K_R = 0,3$

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, рабочие условия):

Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата		Подпись и дата	
Взам. инв. №		Инов. № дубл.		Подпись и дата	
Инов. № подл.	19756.4	Подпись и дата		Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ЕД-2.00.00.000 РР
					Лист 197

$$U = \frac{K^2(1 + 8.55246 \cdot \lg K) - 1}{1.36136 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (3,966^2 \cdot (1 + 8.55246 \cdot \lg 3,966) - 1) / (1.36136 \cdot (3,966^2 - 1) \cdot (3,966 - 1)) = 1,601$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$V = 0,02872$$

Коэффициент d для интегральных фланцев:

$$d = \frac{U}{V} \cdot h_0 \cdot g_0^2 = 1,601 / 0,02872 \cdot 7,616 \cdot 2^2 = 0,1699 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$L = \frac{t \cdot e + 1}{T} + \frac{t^3}{d} = (14 \cdot 0,06973 + 1) / 1,015 + 14^3 / 0,1699 \cdot 10^5 = 3,563$$

Момент инерции сечения фланца при изгибе (интегральные фланцы с втулкой):

$$I = \frac{0,0874 \cdot L \cdot g_0^2 \cdot h_0 \cdot B}{W} = 0,0874 \cdot 3,563 \cdot 2 \cdot 7,616 \cdot 29 / 0,02872 = 0,9579 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$G_{\text{max}} = 0.5 \cdot (g_0 + g_1) = 0.5 \cdot (2 + 8) = 5 \text{ MM}$$

$$A_B = 0.5 \cdot (A - B) = 0.5 \cdot (115 - 29) = 43 \text{ mm}$$

Так как $t \geq G_{avg}$,

$$A_{\text{eff}} = A_{\text{p}} = 43 \text{ mm}$$

$$B_p = t = 14 \text{ mm}$$

$$K_{AB} = \left\{ A_A \cdot B_B^3 \right\} \cdot \left[\frac{1}{3} - 0.21 \cdot \left(\frac{B_B}{A_A} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{12} \cdot \left\{ \frac{B_B}{A_A} \right\}^4 \right) \right] = (43 \cdot 14^3) \cdot [1/3 - 0.21 \cdot (14/43) \cdot (1 - 1/12 \cdot \{14/43\}^4)] = 0,3127 \cdot 10^{-7} \text{ M}^4$$

$$C_c = h = 15 \text{ mm}$$

$$D_{DG} = G_{mz} = 5 \text{ mm}$$

$$K_{CD} = \left(C_c \cdot D_{DG}^3 \right) \cdot \left[\frac{1}{3} - 1.05 \cdot \left(\frac{D_{DG}}{C_c} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{192} \cdot \left\{ \frac{D_{DG}}{C_c} \right\}^4 \right) \right] = (15 * 5^3) * [1/3 - 1.05 * (5/15) * (1 - 1/192 * \{5/15\}^4)] = (-0,3121 \cdot 10^{-10}) \text{ M}^4$$

Полярный момент сечения фланца (интегральные фланцы, плоские фланцы с втулкой):

$$I_p = K_{AB} + K_{CD} = 0,3127 \cdot 10^{-7} + (-0,3121 \cdot 10^{-10}) = 0,3124 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$$

Компонент проектного момента на фланце, как результат действия внешнего изгибающего момента и/или осевой силы:

$$M_{oe} = 4 \cdot M_E \cdot \left[\frac{I}{0.3846 \cdot I_p + I} \right] \cdot \left[\frac{h_D}{C - 2 \cdot h_D} \right] + F_A \cdot h_D = 4 \cdot 282,8 \cdot [0,9579 \cdot 10^{-8} / (0,3846 \cdot 0,3124 \cdot 10^{-7} + 0,9579 \cdot 10^{-8})] \cdot [24 / (85 - 2 \cdot 24)] + 1500 \cdot 24 = 361,5 \text{ H}_M$$

Изгибающий момент в рабочих условиях (внутреннее давление):

$$M_o = \left| \left((H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G) \cdot B_{SC} + M_{oe} \right) \cdot F_S \right| = \frac{(581 \cdot 24 + 1146 \cdot 22,75 + 2903 \cdot 17,5) \cdot 1,325 + 361,5}{M} \cdot 1l = 481,9 \text{ H}$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$f = 1$$

Продольные напряжения во втулке, в рабочих условиях:

$$S_H = \frac{f \cdot M_o}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 * 481,9 / (3,563 * 8^2 * 29) = 72,88 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min \{1.5 \cdot S_{f_0}; 2.5 \cdot S_{n_0}\}$$

$$\min\{1.5 \cdot S_{\text{сн}}; 2.5 \cdot S_{\text{но}}\} = \min\{1.5 \cdot 130,2; 2.5 \cdot 149\} = 195,3 \text{ МПа}$$

$$72,88 \text{ МПа} \leq 195,3 \text{ МПа, Условие прочности выполнено}$$

Радиальные напряжения во фланце, рабочие условия:

Инв. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	$D_{DG} = G_{\text{шг}}$ $= 5 \text{ мм}$ $K_{CD} = \left[C_c \cdot D_{DG}^3 \right] \cdot \left[\frac{1}{3} - 1.05 \cdot \left(\frac{D_{DG}}{C_c} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{192} \cdot \left\{ \frac{D_{DG}}{C_c} \right\}^4 \right) \right]$ $= (15 * 5^3) * [1/3 - 1.05 * (5 / 15) * (1 - 1/192 * \{5 / 15\}^4)]$ $= (-0,3121 \cdot 10^{-10}) \text{ м}^4$
					Полярный момент сечения фланца (интегральные фланцы, плоские фланцы с втулкой):
					$I_p = K_{AB} + K_{CD} = 0,3127 \cdot 10^{-7} + (-0,3121 \cdot 10^{-10}) = 0,3124 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$
					Компонент проектного момента на фланце, как результат действия внешнего изгибающего момента и/или осевой силы:
					$M_{oe} = 4 \cdot M_E \cdot \left[\frac{I}{0.3846 \cdot I_p + I} \right] \cdot \left[\frac{h_D}{C - 2 \cdot h_D} \right] + F_A \cdot h_D$ $= 4 * 282,8 * [0,9579 \cdot 10^{-8} / (0,3846 * 0,3124 \cdot 10^{-7} + 0,9579 \cdot 10^{-8})] * [24 / (85 - 2 * 24)] + 1500 * 24$ $= 361,5 \text{ Нм}$
					Изгибающий момент в рабочих условиях (внутреннее давление):
Подпись и дата	19756.4	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$M_o = [(H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G) \cdot B_{SC} + M_{oe}] \cdot F_S$ $= [(581 * 24 + 1146 * 22,75 + 2903 * 17,5) * 1,325 + 361,5] * 1$ $= 481,9 \text{ Нм}$
					Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):
					$f = 1$
					Продольные напряжения во втулке, в рабочих условиях:
					$S_H = \frac{f \cdot M_o}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 * 481,9 / (3,563 * 8^2 * 29) = 72,88 \text{ МПа}$
					Условие прочности:
Инв. № подл.	19756.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	$S_H \leq \min \{ 1.5 \cdot S_{fo}; 2.5 \cdot S_{no} \}$ $\min \{ 1.5 \cdot S_{fo}; 2.5 \cdot S_{no} \} = \min \{ 1.5 * 130,2; 2.5 * 149 \} = 195,3 \text{ МПа}$ $72,88 \text{ МПа} \leq 195,3 \text{ МПа}$, Условие прочности выполнено
					Радиальные напряжения во фланце, рабочие условия:
					ЕД-2.00.00.000 РР
					Лист
					199
					Изм. Лист № докум. Подп. Дата

$$S_R = \frac{(1.33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_o}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1.33 \cdot 14 \cdot 0.06973 + 1) \cdot 481,9 / (3,563 \cdot 14^2 \cdot 29) = 54,7 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{\text{до}}$$

54,7 МПа ≤ 130,2 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left(0.66845 + 5.7169 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (3,966 - 1) \cdot (0.66845 + 5.7169 \cdot 3,966^2 \cdot \lg 3,966 / (3,966^2 - 1)) = 1,457$$

$$Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (3,966^2 + 1) / (3,966^2 - 1) = 1,136$$

Касательные напряжения во фланце, рабочие условия:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_o}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 1,457 \cdot 481,9 / (14^2 \cdot 29) - 1,136 \cdot 54,7 = 61,42 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{\text{до}}$$

61,42 МПа ≤ 130,2 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (72,88 + 54,7) / 2 = 63,79 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\text{до}}$$

63,79 МПа ≤ 130,2 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (72,88 + 61,42) / 2 = 67,15 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\text{до}}$$

67,15 МПа ≤ 130,2 МПа, **Условие прочности выполнено**

Изгибающий момент в условиях монтажа (внутреннее давление):

$$M_{\text{г}} = \frac{W_{\text{г}} \cdot (C - G) \cdot B_{\text{sc}} \cdot F_{\text{с}}}{2} = 4,14 \cdot 10^4 \cdot (85 - 50) \cdot 1,325 \cdot 1 / 2 = 960,3 \text{ Н м}$$

Продольные напряжения во втулке, в условиях монтажа:

$$S_H = \frac{f \cdot M_{\text{г}}}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 960,3 / (3,563 \cdot 8^2 \cdot 29) = 145,2 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min\{1.5 \cdot S_{\text{гг}}; 2.5 \cdot S_{\text{нг}}\}$$

$$\min\{1.5 \cdot S_{\text{гг}}; 2.5 \cdot S_{\text{нг}}\} = \min\{1.5 \cdot 163,3; 2.5 \cdot 183\} = 245 \text{ МПа}$$

145,2 МПа ≤ 245 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_R = \frac{(1.33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_{\text{г}}}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1.33 \cdot 14 \cdot 0.06973 + 1) \cdot 960,3 / (3,563 \cdot 14^2 \cdot 29) = 109 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{\text{гг}}$$

109 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Касательные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_{\text{г}}}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 1,457 \cdot 960,3 / (14^2 \cdot 29) - 1,136 \cdot 109 = 122,4 \text{ МПа}$$

Изн. № подл. 19756.4	Подпись и дата				
	Изн. № дубл.				
	Взам. инв. №				
	Подпись и дата				
ЕД-2.00.00.000 РР					Лист 200
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

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) ГОСТ Р 52857.5-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет обечаек и днищ от воздействия опорных нагрузок.
- 3) СА 03-003-07. Расчет на прочность и вибрацию стальных технологических трубопроводов. Стандарт ассоциации экспертных организаций техногенных объектов повышенной опасности "Ростехэкспертиза"
- 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 обечаек 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 обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек.
- 8) ГОСТ Р 52630-2012. Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия
- 9) СП 16.13330.2011 СП 16.13330.2011 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81
- 10) СП 43.13330.2012 Сооружения промышленных предприятий. Актуализированная редакция СНиП 2.09.03-85
- 11) СП 20.13330.2011 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19756.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
ЕД-2.00.00.000 РР				
				Лист
				202