

АО «ВНИИНЕФТЕМАШ»



ОАО "Славнефть-ЯНОС"

Цех №13, Участок налива нефтепродукта в автоцистерны,

Титул 351/4

ДРЕНАЖНАЯ ЕМКОСТЬ Е-3

Е-3

Расчеты

Е-3.00.00.000 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
19785.4				

## Оглавление

Расчёт на прочность сосуда.....	4
Определение давления испытания .....	6
Расчет давления испытания в соответствии с ГОСТ Р 52630-2012.....	6
Проверка необходимости проведения расчетов на прочность в условиях испытания.....	8
Расчет давления грунта на наружную поверхность сосуда.....	5
Исходные данные.....	5
Расчет давления грунта на основе СП 43.13330.2012.....	5
Сводные таблицы.....	9
Основные элементы .....	9
Результаты расчета .....	9
Штуцера .....	9
Результаты расчета .....	10
Эпюры сил и моментов.....	12
Днище эллиптическое.....	18
Расчёт в рабочих условиях .....	18
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	19
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания).....	20
Обечайка цилиндрическая.....	21
Расчёт в рабочих условиях .....	21
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	24
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания).....	27
Опора седловая подвижная .....	31
Расчёт в рабочих условиях .....	31
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	36
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания).....	41
Опора седловая неподвижная .....	47
Расчёт в рабочих условиях .....	47
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	52
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания).....	57
Штуцер МН DN800.....	63
Расчёт в рабочих условиях .....	64
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	67
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания).....	69
Штуцер А1, А2 DN700 .....	71
Расчёт в рабочих условиях .....	72
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление).....	76
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания).....	79
Штуцер И1, И2 DN150.....	82
Расчёт в рабочих условиях .....	83
Расчет на прочность по МКЭ в рабочих условиях.....	84
Штуцер И3 DN150.....	88
Расчёт в рабочих условиях .....	89
Штуцер V DN80 .....	94
Расчёт в рабочих условиях .....	95
Штуцер UC1, UC2 DN50 .....	99
Расчёт в рабочих условиях .....	100
Штуцер LT1, LT2 DN80 .....	104
Расчёт в рабочих условиях .....	105
Штуцер T1, T2, LT3 DN50 .....	108
Расчёт в рабочих условиях .....	109
Штуцер НО1, НО2, НН1, НН2 DN25 .....	112
Расчёт в рабочих условиях .....	113
Фланец с крышкой DN800 .....	118
Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.4-2007 и ГОСТ Р 52857.2-2007.....	118

Е-3.00.00.000 РР

Подпись						Е-3.00.00.000 РР							
	Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата								
Инв. № подл.	19785.4	Разраб.	Иванов		07.2016	Дренажная емкость Е-3  Расчеты				Лит.		Лист	Листов
		Пров.	Копчикова		07.2016					Т		2	188
		Рук.								АО «ВНИИНЕФТЕМАШ»			
		Н.контр.	Копчикова		07.2016								
		Утв.											

Расчёт в рабочих условиях .....	119
Фланец с крышкой DN700 .....	128
Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.4-2007 и ГОСТ Р 52857.2-2007.....	128
Расчёт в рабочих условиях .....	129
Фланцевое соединение DN150.....	138
Расчёт на прочность и герметичность по ASME VIII-2.....	138
Расчёт в рабочих условиях .....	139
Фланцевое соединение DN80.....	147
Расчёт на прочность и герметичность по ASME VIII-2.....	147
Расчёт в рабочих условиях .....	148
Крышка DN80.....	156
Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.4-2007 и ГОСТ Р 52857.2-2007.....	156
Расчёт в рабочих условиях .....	156
Фланцевое соединение DN50.....	161
Расчёт на прочность и герметичность по ASME VIII-2.....	161
Расчёт в рабочих условиях .....	162
Крышка DN50.....	170
Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.4-2007 и ГОСТ Р 52857.2-2007.....	170
Расчёт в рабочих условиях .....	170
Фланцевое соединение DN25 (НО1, НО2, НН1, НН2) .....	175
Расчёт на прочность и герметичность по ASME VIII-2.....	175
Расчёт в рабочих условиях .....	176
Расчет фундаментных болтов на прочность от действия осевой растягивающей силы.....	187
Исходные данные.....	187
Результаты расчета на прочность фундаментных болтов .....	187
Список литературы .....	188

Инов. № подл. 19785.4	Подпись и дата		Инов. № дубл.	Подпись и дата
	Взам. инв. №	Инов. №		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Е-3.00.00.000 РР

Лист  
3

## Расчёт на прочность сосуда

Наименование аппарата

### Дренажная емкость Е-3

Название установки:

Цех №13, Участок налива нефтепродукта в автоцистерны,  
Титул 351/4

Наименование объекта:

ОАО "Славнефть-ЯНОС"

Сосуд, содержащий рабочую жидкость:

Да

Вид испытаний:

## Гидроиспытания

Учёт сейсмических нагрузок:

Het

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
19785.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Е-3.00.00.000 РР				Лист
				4

## 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 <sup>3</sup>
Коэффициент Пуассона грунта	$\mu =$	0,33	
Теоретический собственный вес сосуда	$G =$	$11,5 \cdot 10^4$	Н
Высота уровня засыпки грунта от верхней образующей сосуда	$H =$	1185	мм
Внутренний диаметр сосуда	$D =$	1800	мм
Расчетная длина сосуда	$L =$	7900	мм

### Расчет давления грунта на основе СП 43.13330.2012

Вертикальное давление грунта с учетом собственного веса сосуда

$$p_v = \gamma_0 \left[ H + \frac{D}{2} \right] + \frac{G}{LD} = 0,046 \text{ МПа}$$

Горизонтальное давление грунта

$$p_h = \frac{\gamma_0 \left[ H + \frac{D}{2} \right] \mu}{1 - \mu} = 0,018 \text{ МПа}$$

Коэффициент надежности по СП 20.13330.2011

$$\gamma_f = 1,15$$

Расчетное давление грунта

$$P = \gamma_f \max(p_v, p_h) = 0,05 \text{ МПа}$$

При расчете аппарата работающего в условиях вакуума общее расчетное наружное давление принимается как сумма наружного давления и расчетного давления грунта.

Изнв. № подл.	Взам. инв. №	Изнв. № дубл.	Подпись и дата					
19785.4								
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР			
					Лист			
					5			

## Определение давления испытания

### Расчет давления испытания в соответствии с ГОСТ Р 52630-2012

#### Расчетные условия

Расчетное давление  $P_p =$  0,07 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  $[\sigma]^t =$  184 МПа

Расчетное условное давление  $P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t} =$  0,075 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  $[\sigma]^t =$  168,5 МПа

Расчетное условное давление  $P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t} =$  0,076 МПа

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

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

Допускаемые напряжения для материала корпуса при расчетной температуре  $[\sigma]^t =$  148,7 МПа

Расчетное условное давление  $P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t} =$  0,077 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  $P_{гн} = 1,25 \cdot P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t} =$  0,09 МПа

Изнв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изнв. № дубл.	Подпись и дата	
19785.4					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
					Е-3.00.00.000 РР
					Лист
					6

## Расчетные условия (условия пропарки)

Расчетное давление  $P_p =$  0,15 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  $[\sigma]^t =$  167 МПа

Расчетное условное давление  $P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t} =$  0,176 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  $[\sigma]^t =$  150 МПа

Расчетное условное давление  $P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t} =$  0,183 МПа

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

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

Допускаемые напряжения для материала корпуса при расчетной температуре  $[\sigma]^t =$  131,5 МПа

Расчетное условное давление  $P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t} =$  0,186 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  $P_{гг} = 1,25 \cdot P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t} =$  0,22 МПа

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

Изнв. № подл.	19785.4	Подпись и дата		Взам. инв. №		Изнв. № дубл.		Подпись и дата		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР					Лист 7

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР	Лист 8



**Сводные таблицы**

**Основные элементы**

**Исходные данные**

Элемент	Материал	Диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Длина (высота), мм	Суммарная прибавка, мм	Коэфф. прочности сварного шва
Днище эллиптическое	09Г2С	1800	16	526	6,2	1
Обечайка цилиндрическая	09Г2С	1800	16	6920	3	1

**Результаты расчета**

**Рабочие условия**

Элемент	Расчетная температура, °С	Расчетное давление, МПа	Допускаемые напряжения, МПа	Расчетная толщина с уч. прибавок, мм	Условие прочности
Днище эллиптическое	70	0,08167	184	6,6	выполнено
Обечайка цилиндрическая	70	0,08167	184	3,4	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	180	(-0,15)	167	10,92	выполнено
Обечайка цилиндрическая	180	(-0,15)	167	15,31	выполнено

**Условия испытаний**

Элемент	Расчетное давление, МПа	Допускаемые напряжения, МПа	Расчетная толщина с уч. прибавок, мм	Условие прочности
Днище эллиптическое	0,258	272,7	7,052	выполнено
Обечайка цилиндрическая	0,258	272,7	3,852	выполнено

**Штуцера**

Инов. № подл. 19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Расчётные условия (наружное давление)				
Элемент		Расчетная температура, °C	Расчетное давление, МПа	Допускаемые напряжения, МПа	Расчетная толщина с уч. прибавок, мм	Условие прочности			
Днище эллиптическое		180	(-0,15)	167	10,92	выполнено			
Обечайка цилиндрическая		180	(-0,15)	167	15,31	выполнено			
Условия испытаний									
Элемент		Расчетное давление, МПа	Допускаемые напряжения, МПа	Расчетная толщина с уч. прибавок, мм	Условие прочности				
Днище эллиптическое		0,258	272,7	7,052	выполнено				
Обечайка цилиндрическая		0,258	272,7	3,852	выполнено				
Штуцера									
Изм.					Лист	№ докум.			
Подп.					Дата				
Е-3.00.00.000 РР						Лист			
						9			

### Исходные данные

Элемент	Метка	Тип	Материал	Диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Суммарная прибавка, мм
Штуцер I1, I2 DN150	Штуцер I1	Проходящий без укрепления	09Г2С Gr.ГОСТ 19281	144	12	4,5
Штуцер A1, A2 DN700	Штуцер A2	Проходящий без укрепления	09Г2С	692	16	3
Штуцер UC1, UC2 DN50	Штуцер UC2	Проходящий без укрепления	09Г2С Gr.ГОСТ 19281	48	10	4,25
Штуцер МН DN800	Штуцер МН	Проходящий без укрепления	09Г2С	800	16	3
Штуцер V DN80	Штуцер V	Проходящий без укрепления	09Г2С Gr.ГОСТ 19281	77	9	4,13
Штуцер НО1, НО2, Н11, Н12 DN25	Штуцер НО1	Проходящий без укрепления	09Г2С (КП245)	25	10	3
Штуцер LT1, LT2 DN80	Штуцер LT2	Проходящий без укрепления	09Г2С Gr.ГОСТ 19281	77	9	4,13
Штуцер I3 DN150	Штуцер I3	Проходящий без укрепления	09Г2С Gr.ГОСТ 19281	144	12	4,5
Штуцер T1, T2, LT3 DN50	Штуцер T1	Проходящий без укрепления	09Г2С Gr.ГОСТ 19281	48	10	4,25

### Результаты расчета

### Рабочие условия

Элемент	Расчетная температура, °С	Расчетное давление, МПа	Условие прочности
Штуцер I1, I2 DN150	70	0,07000	выполнено
Штуцер A1, A2 DN700	70	0,07000	выполнено
Штуцер UC1, UC2 DN50	70	0,07000	выполнено
Штуцер МН DN800	70	0,07000	выполнено
Штуцер V DN80	70	0,07000	выполнено
Штуцер НО1, НО2, Н11, Н12 DN25	70	0,07000	выполнено
Штуцер LT1, LT2 DN80	70	0,07000	выполнено
Штуцер I3 DN150	70	0,07000	выполнено
Штуцер T1, T2, LT3 DN50	70	0,07000	выполнено

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19785.4				

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-3.00.00.000 PP	Лист
						10

**Расчётные условия (наружное давление)**

Элемент	Расчетная температура, °C	Расчетное давление, МПа	Условие прочности
Штуцер A1, A2 DN700	180	(-0,15)	выполнено
Штуцер МН DN800	180	(-0,15)	выполнено

**Условия испытаний**

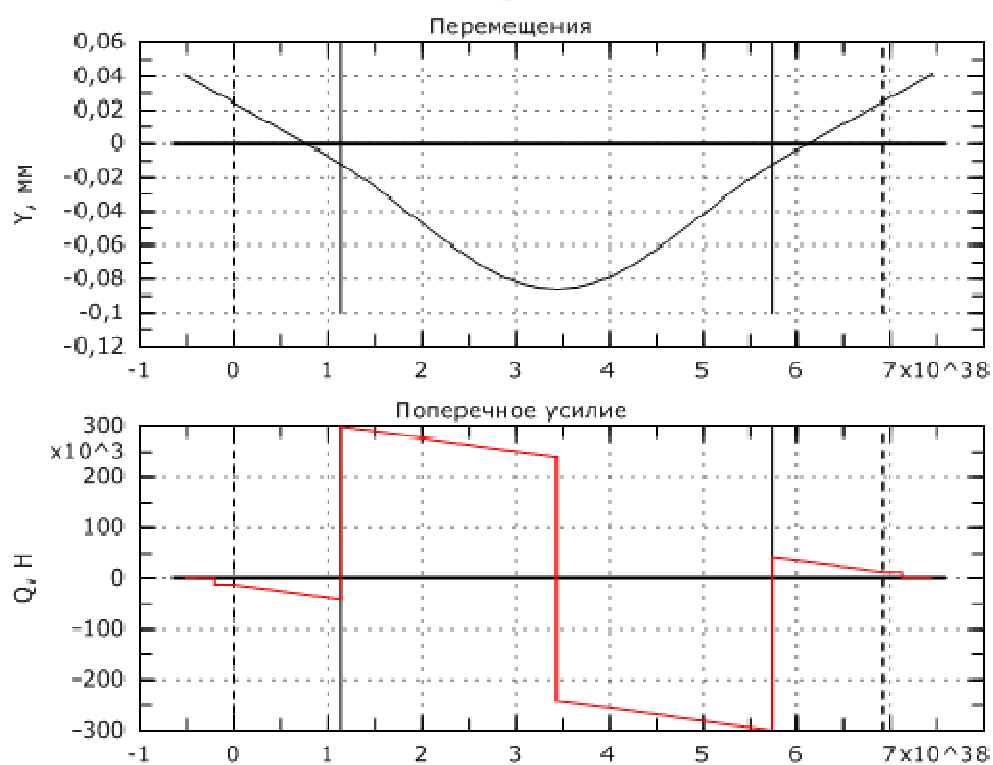
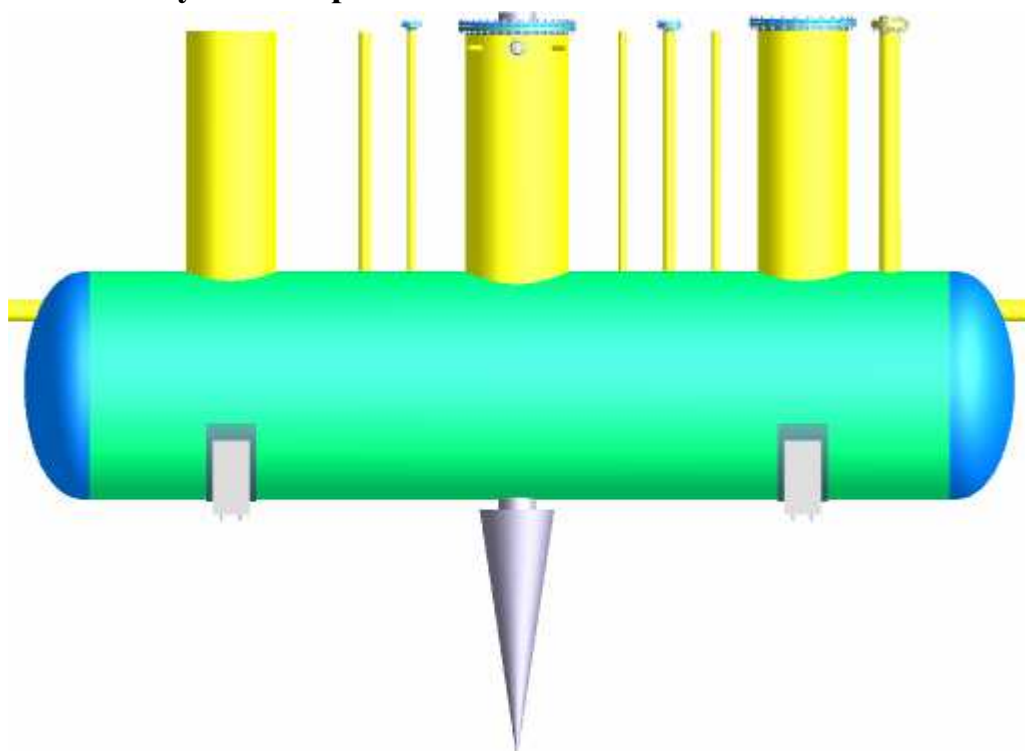
Элемент	Расчетное давление, МПа	Условие прочности
Штуцер A1, A2 DN700	0,2402	выполнено
Штуцер МН DN800	0,2402	выполнено

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата						
19785.4										
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР					Лист
										11

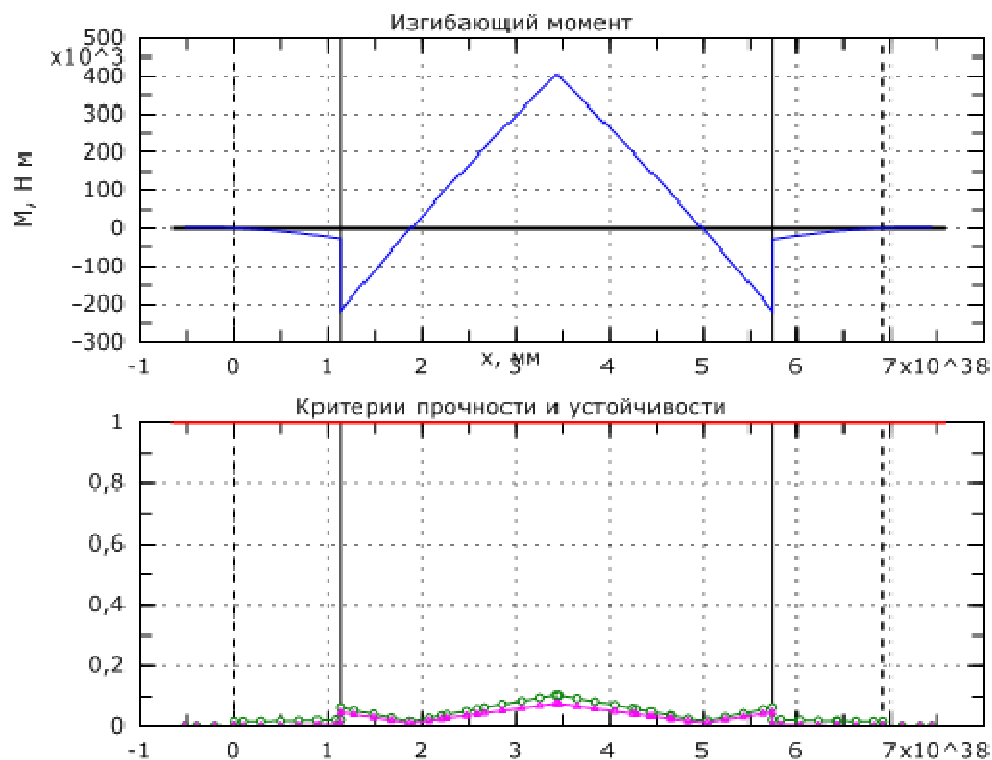
## Эпюры сил и моментов

**Расчёт в рабочих условиях**

**Результаты расчёта:**



Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19785.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Е-3.00.00.000 РР				Лист
				12



--o--o-- Критерий прочности

--Δ--Δ-- Критерий устойчивости

----- Предельное значение

Условие работоспособности выполнено

Общий вес:

$$\sum G_i = 6,92 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Дополнительные вертикальные нагрузки:

$$\sum Fy_i = 0 \text{ Н}$$

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	$3,436 \cdot 10^5$	$2,985 \cdot 10^5$	$2,155 \cdot 10^5$
2	Опора седловая неподвижная	$3,483 \cdot 10^5$	$2,993 \cdot 10^5$	$2,168 \cdot 10^5$

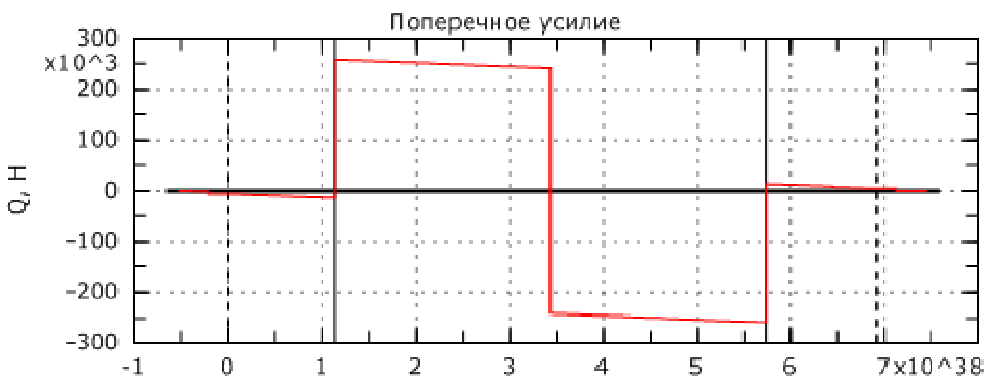
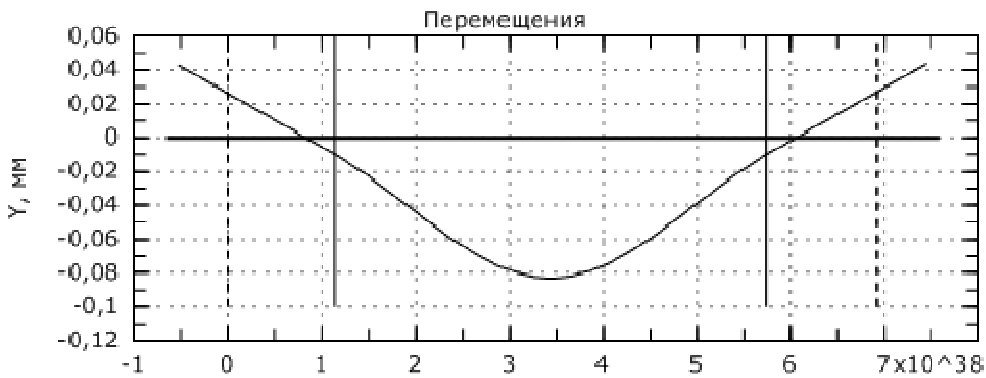
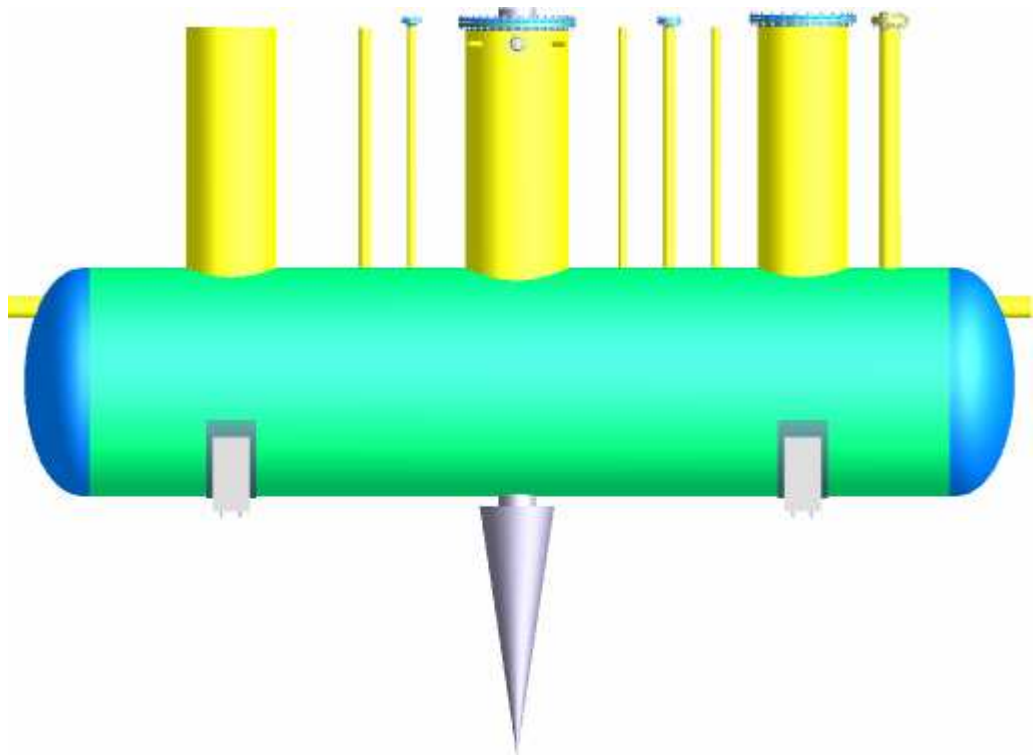
Инов. № подл.	Подпись и дата
19785.4	
Инов. № дубл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Подпись и дата
Инов. № подл.	Подпись и дата
19785.4	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

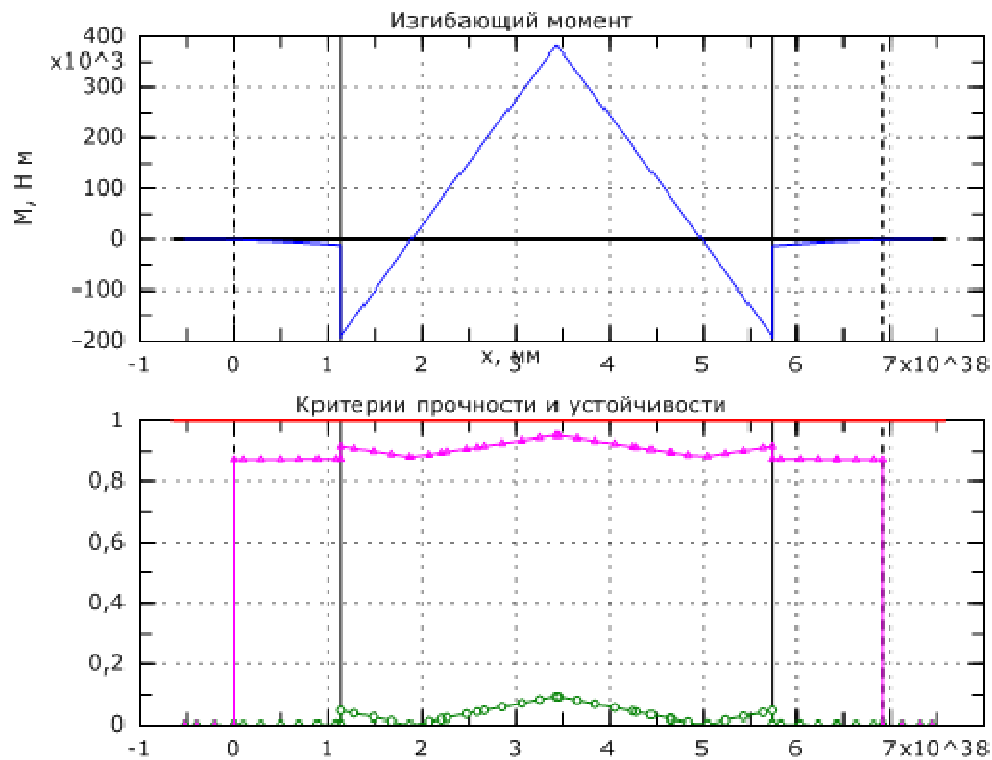
Е-3.00.00.000 РР

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Результаты расчёта:



Инов. № подл.	Подпись и дата
19785.4	
Изм.	Лист
№ докум.	Подп.
	Дата

--o--o-- Критерий прочности

--Δ--Δ-- Критерий устойчивости

----- Предельное значение

Условие работоспособности выполнено

Общий вес:

$$\sum G_i = 5,55 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

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	$2,757 \cdot 10^5$	$2,576 \cdot 10^5$	$1,919 \cdot 10^5$
2	Опора седловая неподвижная	$2,794 \cdot 10^5$	$2,581 \cdot 10^5$	$1,926 \cdot 10^5$

Инов. № подл.	Подпись и дата
19785.4	
Взам. инв. №	Инов. № дубл.
Подпись и дата	
Инов. № подл.	Подпись и дата
19785.4	

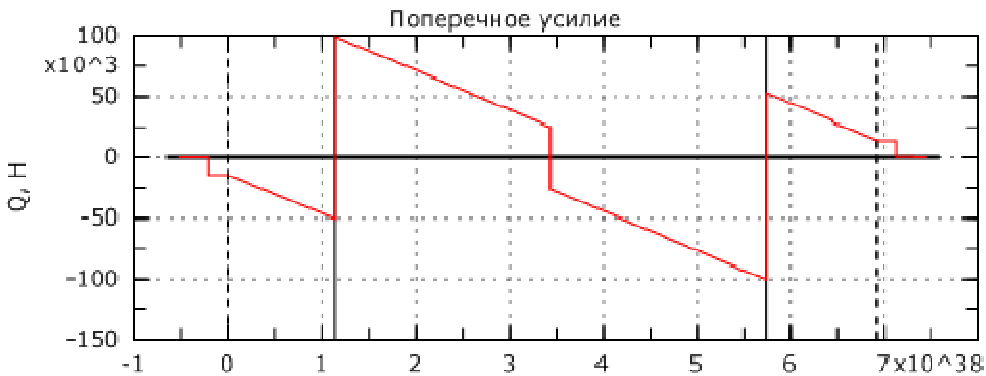
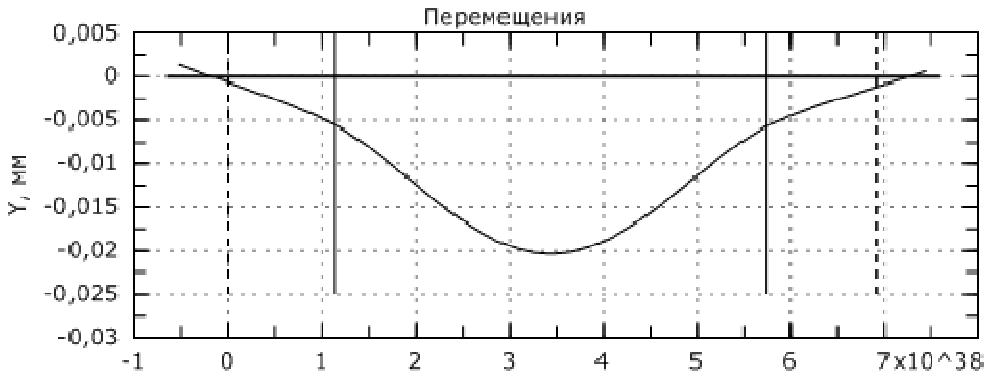
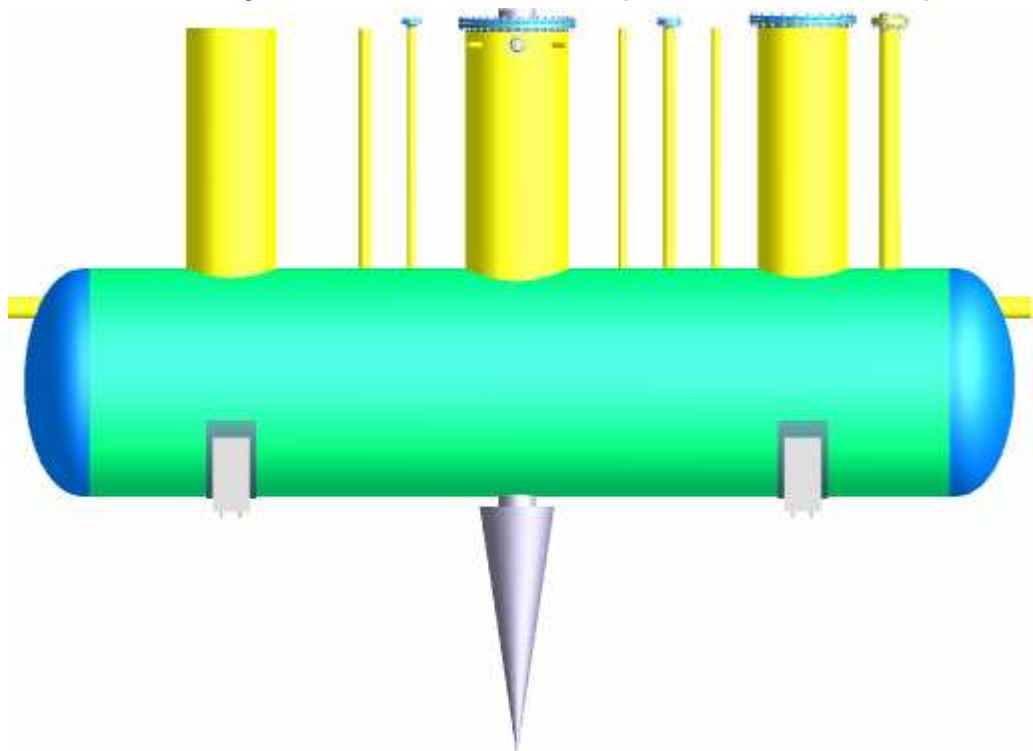
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Е-3.00.00.000 РР

Лист

15

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

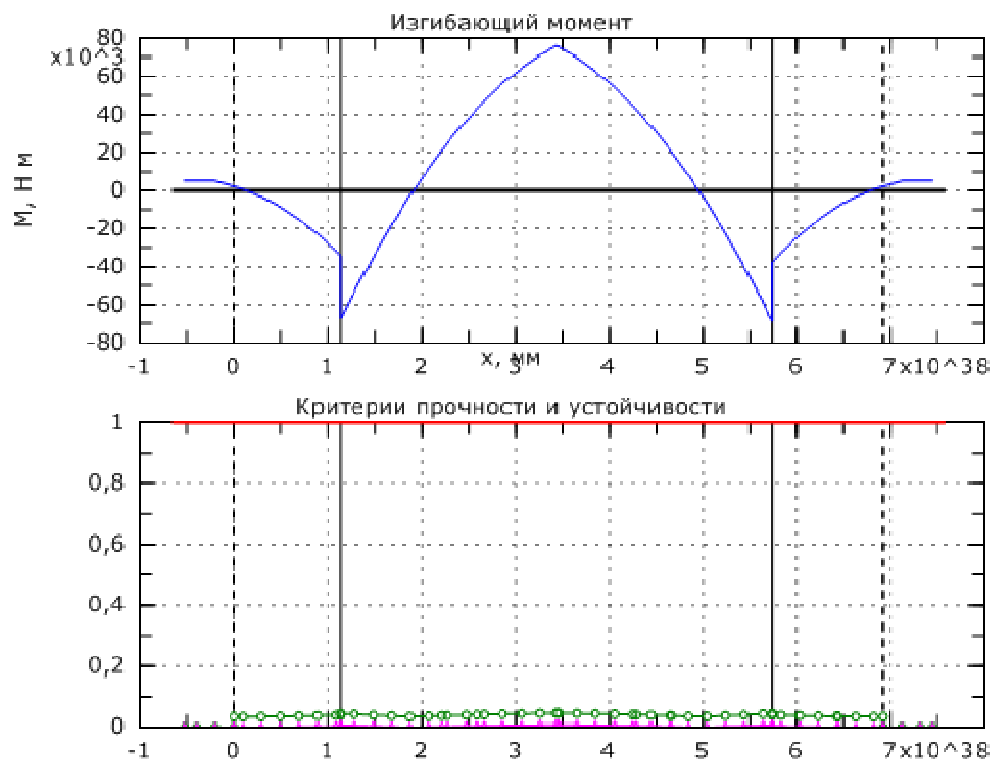


Инов. № подл.	Подпись и дата
19785.4	
Изм.	Лист
№ докум.	Подп.
	Дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Е-3.00.00.000 РР





--0---0-- Критерий прочности

--Δ---Δ-- Критерий устойчивости

----- Предельное значение

Условие работоспособности выполнено

Общий вес:

$$\sum G_i = 3,29 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

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	$1,619 \cdot 10^5$	$9,916 \cdot 10^4$	$6,706 \cdot 10^4$
2	Опора седловая неподвижная	$1,676 \cdot 10^5$	$1,002 \cdot 10^5$	$6,876 \cdot 10^4$

Инов. № подл. 19785.4	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата
Взам. инв. №			

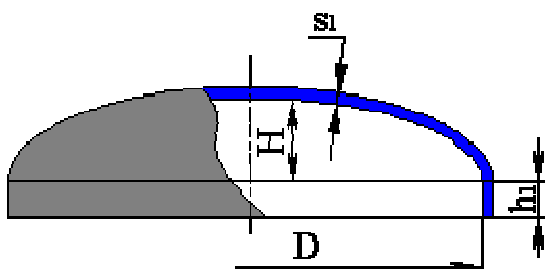
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

Е-3.00.00.000 РР

Лист

17

## Днище эллиптическое



### Исходные данные

Материал:	09Г2С
Внутр. диаметр, D:	1800 мм
Толщина стенки днища, s <sub>1</sub> :	16 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c <sub>1</sub> :	3 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, c <sub>2</sub> :	0,8 мм
Прибавка технологическая, c <sub>3</sub> :	2,4 мм
Суммарная прибавка к толщине стенки, c:	6,2 мм
Высота днища, H:	450 мм
Длина отбортовки, h <sub>1</sub> :	60 мм
Радиус кривизны в вершине днища:	

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

Коэффициент прочности сварного шва:

$$\varphi = 1$$

### Расчёт в рабочих условиях

#### Условия нагружения:

Расчётная температура, T:	70	°C
Расчётное внутреннее избыточное давление, p:	0,08167	МПа

### Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

#### Допускаемые напряжения:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 70 °C (рабочие условия):

$$[\sigma] = 184 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре T = 70 °C:

$$E = 1,94 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

#### Днища, нагруженные внутренним избыточным давлением.

Радиус кривизны в вершине днища:

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19785.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Е-3.00.00.000 РР				Лист
				18



$$[p]_E = \frac{26 \cdot 10^{-6} E}{n_y} \cdot \left[ \frac{100(s_1 - c)}{K_s \cdot R} \right]^2 = 26 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 / 2,4 \cdot (100 \cdot (16 - 6,2) / (0,9525 \cdot 1800))^2 = 0,6478 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_E}{\sqrt{1 + \left( \frac{[p]_E}{[p]_K} \right)^2}} = 1,814 / (1 + (1,814 / 0,6478)^2)^{1/2} = 0,61 \text{ МПа}$$

0,61 МПа  $\geq$  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: 0,258 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):

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

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:

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

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_p + c = \frac{p \cdot R}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi - 0,5 \cdot p} + c = (0,258 \cdot 1800) / (2 \cdot 272,7 \cdot 1 - 0,5 \cdot 0,258) + 6,2 = 7,052 \text{ мм}$$

$$7,052 \text{ мм} \leq 16 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие работоспособности выполнено**

Допускаемое давление:

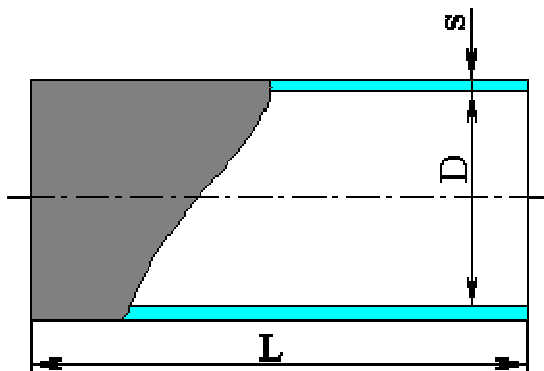
$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi \cdot (s_1 - c)}{R + 0,5 \cdot (s_1 - c)} = 2 \cdot 272,7 \cdot 1 \cdot (16 - 6,2) / (1800 + 0,5 \cdot (16 - 6,2)) = 2,962 \text{ МПа}$$

$$2,962 \text{ МПа} \geq 0,258 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. инв. №	Инов. № подл.	19785.4	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-3.00.00.000 PP	Лист	20
---------------	----------------	---------------	----------------	--------------	--------------	---------------	---------	------	------	----------	-------	------	------------------	------	----

### Обечайка цилиндрическая



## Исходные данные

Материал:	09Г2С
Внутр. диаметр, D:	1800 мм
Толщина стенки, s:	16 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, $c_1$ :	3 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, $c_2$ :	0 мм
Прибавка технологическая, $c_3$ :	0 мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, c:	3 мм
Длина обечайки, L:	6920 мм
Коэффициенты прочности сварных швов:	
Продольный шов:	

$$\varphi_p = 1$$

Окружной шов:

$$\varphi_T = 1$$

## Расчёт в рабочих условиях

**Условия нагружения:**

Расчётная температура, T:	70 °C
Расчётное внутреннее избыточное давление, p:	0,08167 МПа
Расчётный изгибающий момент, M:	$4,051 \cdot 10^5$ Н м
Расчётное поперечное усилие, Q:	$2,98 \cdot 10^5$ 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  $T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рабочие условия):

$$[\sigma] = 184 \text{ MPa}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре  $T = 70^\circ\text{C}$ :

$$E = 1,94 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

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

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_p + c = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} + c = (0,08167 \cdot 1800) / (2 \cdot 184 \cdot 1 - 0,08167) + 3 = 3,4 \text{ мм}$$

$$3,4 \text{ мм} \leq 16 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие работоспособности выполнено**

Допускаемое давление:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 184 \cdot 1 \cdot (16 - 3) / (1800 + 16 - 3) = 2,639 \text{ МПа}$$

$$2,639 \text{ МПа} \geq 0,08167 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Минимальное расстояние между "одиночными" штуцерами:

$$b_0 = 2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} = 2 \cdot (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 305,9 \text{ мм}$$

### Обечайка, нагруженная изгибающим моментом (п. 5.3.5)

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$[F]_{\Pi} = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3,142 \cdot (1800 + 16 - 3) \cdot (16 - 3) \cdot 184 = 1,362 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны сжатия:

$$[M]_{\Pi} = \frac{D}{4} \cdot [F]_{\Pi} = 1800 / 4 \cdot 1,362 \cdot 10^7 = 6,131 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:

$$[F]_{\text{EI}} = \frac{31,0 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2,5} = 31,0 \cdot 10^{-6} \cdot 1,94 \cdot 10^5 \cdot 1800^2 / (2,4) \cdot (100 \cdot (16 - 3) / 1800)^{2,5} = 3,599 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_{\text{E}} = \frac{D}{3,5} \cdot [F]_{\text{EI}} = 1800 / 3,5 \cdot 3,599 \cdot 10^7 = 1,851 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \frac{[M]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[M]_{\Pi}}{[M]_{\text{E}}} \right)^2}} = 6,131 \cdot 10^6 / (1 + (6,131 \cdot 10^6 / 1,851 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 5,82 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

$$5,82 \cdot 10^6 \text{ Н м} \geq 4,051 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

### Обечайка, нагруженная поперечным усилием (п. 5.3.6)

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности:

$$[Q]_{\Pi} = 0,25 \cdot \pi \cdot D \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 0,25 \cdot 3,142 \cdot 1800 \cdot (16 - 3) \cdot 184 = 3,382 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$$l_p = 7340 \text{ мм}$$

Расчётная длина для расчёта от действия поперечной силы:

$$l_Q = 7340 \text{ мм}$$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

$$[Q]_{\text{E}} = \frac{2,4 \cdot E \cdot (s - c)^2}{n_y} \cdot \left[ 0,18 + 3,3 \cdot \frac{D(s - c)}{l^2} \right] = 2,4 \cdot 1,94 \cdot 10^5 \cdot (16 - 3)^2 / 2,4 \cdot (0,18 + 3,3 \cdot 1800 \cdot (16 - 3) / 7340^2) = 5,948 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[Q]_{\Pi}}{[Q]_{\text{E}}} \right)^2}} = 3,382 \cdot 10^6 / (1 + (3,382 \cdot 10^6 / 5,948 \cdot 10^6)^2)^{1/2} = 2,94 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$2,94 \cdot 10^6 \text{ Н} \geq 2,98 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Изн. № подл. 19785.4	Подпись и дата				
	Изн. № дубл.				
	Взам. изн. №				
	Подпись и дата				
<div> <div>Изм.</div> <div>Лист</div> <div>№ докум.</div> <div>Подп.</div> <div>Дата</div> </div>					<div>Е-3.00.00.000 PP</div> <div>Лист</div> <div>22</div>

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

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

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

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left( \frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0/0 + 0/0 + 4,051 \cdot 10^5 / 5,82 \cdot 10^6 + (2,98 \cdot 10^5 / 2,94 \cdot 10^6)^2 = 0,07988 \leq 1$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

**Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием (п. 5.3.3)**

Допускаемое осевое растягивающее усилие:

$$[F] = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = 3,142 \cdot (1800 + 16 - 3) \cdot (16 - 3) \cdot 184 \cdot 1 = 1,362 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны растяжения:

$$[M]_{\text{пр}} = \frac{D}{4} \cdot [F] = 1800 / 4 \cdot 1,362 \cdot 10^7 = 6,131 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

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

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

$$\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{пр}}} = (0 + 0,08167 \cdot 3,142 \cdot 1800^2 / 4) / 1,362 \cdot 10^7 + 4,051 \cdot 10^5 / 6,131 \cdot 10^6 = 0,08133 \leq 1$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

**Для расчёта обечайки от действия седловых опор:**

$$B_1 = \min \left\{ 1,0; 9,45 \cdot \frac{D}{1} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (s - c)}} \right\} = \min \{ 1,0, 9,45 \cdot 1800 / 7340 \cdot (1800 / (100 \cdot (16 - 3)))^{1/2} \} = 1$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости:

$$[p]_u = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D}{1} \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2,5} = 20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,94 \cdot 10^5 \cdot 1800 / (2,4 \cdot 1 \cdot 7340) \cdot (100 \cdot (16 - 3) / 1800)^{2,5} = 0,1828 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$[p]_{\text{пр}} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 184 \cdot (16 - 3) / (1800 + 16 - 3) = 2,639 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_{\text{пр}}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[p]_{\text{пр}}}{[p]_u} \right)^2}} = 2,639 / (1 + (2,639 / 0,1828)^2)^{1/2} = 0,1823 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление:  $[p] = 0,1823 \text{ МПа}$

**Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием (п. 2.3.4)**

Допускаемое осевое сжимающее усилие:

Инов. № подл. 19785.4	Подпись и дата				
	Инов. № дубл.				
	Взам. инв. №				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР
					Лист
					23

$$[F] = \frac{[F]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\Pi}}{[F]_{E1}}\right)^2}} = 1,362 \cdot 10^7 / (1 + (1,362 \cdot 10^7 / 3,599 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 1,274 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости:

$$[M]_{уст} = \frac{[M]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\Pi}}{[M]_{E1}}\right)^2}} = 6,131 \cdot 10^6 / (1 + (6,131 \cdot 10^6 / 1,851 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 5,82 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \min\{M_{\text{кр}}, M_{уст}\} = \min\{6,131 \cdot 10^6, 5,82 \cdot 10^6\} = 5,82 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Расчётная длина для расчёта седловых опор:

$l_s = 4600 \text{ мм}$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

$$[Q]_E = \frac{2,4 \cdot E \cdot (s - c)^2}{n_y} \cdot \left[ 0,18 + 3,3 \frac{D(s - c)}{l_s^2} \right] = 2,4 \cdot 1,94 \cdot 10^5 \cdot (16 - 3)^2 / 2,4 \cdot (0,18 + 3,3 \cdot 1800 \cdot (16 - 3) / 4600^2) = 6,021 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\Pi}}{[Q]_E}\right)^2}} = 3,382 \cdot 10^6 / (1 + (3,382 \cdot 10^6 / 6,021 \cdot 10^6)^2)^{1/2} = 2,948 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

## Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

### Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 180 °C  
 Расчётное наружное избыточное давление, p: 0,15 МПа  
 Расчётный изгибающий момент, M:  $3,818 \cdot 10^5 \text{ Н м}$   
 Расчётное поперечное усилие, Q:  $2,577 \cdot 10^5 \text{ Н}$   
 Расчётное осевое растягивающее усилие, F: 0 Н

### Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

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

$[\sigma] = 167 \text{ МПа}$

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

$E = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

### Гладкая обечайка, нагруженная наружным давлением (п. 5.3.2)

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$l_p = 7340 \text{ мм}$

$$B = \max\left\{1; 0,47 \cdot \left(\frac{p}{10^{-5} \cdot E}\right)^{0,067} \cdot \left(\frac{1}{D}\right)^{0,4}\right\} = \max\{1; 0,47 \cdot (0,15 / (10^{-5} \cdot 1,83 \cdot 10^5))^{0,067} \cdot (7340 / 1800)^{0,4}\} = 1$$

Расчётная толщина стенки с учетом прибавок:

$$s_p + c = \max\left\{1,06 \cdot \frac{10^{-2} \cdot D}{B} \cdot \left(\frac{p}{10^{-5} \cdot E} \cdot \frac{1}{D}\right)^{0,4}; \frac{1,2 \cdot p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] - p}\right\} = \max\{1,06 \cdot 10^{-2} \cdot 1800 / 1 \cdot (0,15 / (10^{-5} \cdot 1,83 \cdot 10^5)) \cdot 7340 / 1800^{0,4}; 1,2 \cdot 0,15 \cdot 1800 / (2 \cdot 167 - 0,15)\} + 3 = 15,31 \text{ мм}$$

Инов. № подл.	19785.4	Подпись и дата		Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 PP	
						Лист
						24



$$15,31 \text{ мм} \leq 16 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие работоспособности выполнено**

$$B_1 = \min \left\{ 1.0; 9.45 \cdot \frac{D}{1} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (s - c)}} \right\} = \min \{ 1.0; 9.45 \cdot 1800 / 7340 \cdot (1800 / (100 \cdot (16 - 3)))^{1/2} \} = 1$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости:

$$[p]_E = \frac{2.08 \cdot 10^{-5} E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D}{1} \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2.5} = 2.08 \cdot 10^{-5} \cdot 1.83 \cdot 10^5 \cdot 1800 / (2.4 \cdot 1 \cdot 7340) \cdot (100 \cdot (16 - 3) / 1800)^{2.5} = 0,1724 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$[p]_H = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 167 \cdot (16 - 3) / (1800 + 16 - 3) = 2,395 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_H}{\sqrt{1 + \left( \frac{[p]_H}{[p]_E} \right)^2}} = 2,395 / (1 + (2,395 / 0,1724)^2)^{1/2} = 0,172 \text{ МПа}$$

$$0,172 \text{ МПа} \geq 0,15 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Минимальное расстояние между “одиночными” штуцерами:

$$b_0 = 2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} = 2 \cdot (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 305,9 \text{ мм}$$

### Обечайка, нагруженная изгибающим моментом (п. 5.3.5)

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$[F]_H = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3,142 \cdot (1800 + 16 - 3) \cdot (16 - 3) \cdot 167 = 1,237 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны сжатия:

$$[M]_H = \frac{D}{4} \cdot [F]_H = 1800 / 4 \cdot 1,237 \cdot 10^7 = 5,564 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:

$$[F]_{E1} = \frac{31.0 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2.5} = 310 \cdot 10^{-6} \cdot 1.83 \cdot 10^5 \cdot 1800^2 / (2.4) \cdot (100 \cdot (16 - 3) / 1800)^{2.5} = 3,395 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_E = \frac{D}{3.5} \cdot [F]_{E1} = 1800 / 3.5 \cdot 3,395 \cdot 10^7 = 1,746 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \frac{[M]_H}{\sqrt{1 + \left( \frac{[M]_H}{[M]_E} \right)^2}} = 5,564 \cdot 10^6 / (1 + (5,564 \cdot 10^6 / 1,746 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 5,302 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

$$5,302 \cdot 10^6 \text{ Н м} \geq 3,818 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

### Обечайка, нагруженная поперечным усилием (п. 5.3.6)

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности:

$$[Q]_H = 0.25 \cdot \pi \cdot D \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 0.25 \cdot 3,142 \cdot 1800 \cdot (16 - 3) \cdot 167 = 3,069 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Расчётная длина для расчёта от действия поперечной силы:

$$l_Q = 7340 \text{ мм}$$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

Инов. № подл. 19785.4	Подпись и дата				
	Взам. инв. №				
	Инов. № дубл.				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист				
	№ докум.				
	Подп.				
	Дата				
Е-3.00.00.000 РР					Лист
					25

$$[Q]_{\text{E}} = \frac{2,4 \cdot E \cdot (s-c)^2}{n_y} \cdot \left[ 0,18 + 3,3 \cdot \frac{D(s-c)}{l^2} \right] = 2,4 \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot (16-3)^2 / 2,4 \cdot (0,18 + 3,3 \cdot 1800 \cdot (16-3) / 7340^2) = 5,611 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_{\text{н}}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[Q]_{\text{н}}}{[Q]_{\text{E}}} \right)^2}} = 3,069 \cdot 10^6 / (1 + (3,069 \cdot 10^6 / 5,611 \cdot 10^6)^2)^{1/2} = 2,693 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$2,693 \cdot 10^6 \text{ Н} \geq 2,577 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

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

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

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left( \frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0,15 / 0,172 + 0 / 0 + 3,818 \cdot 10^5 / 5,302 \cdot 10^6 + (2,577 \cdot 10^5 / 2,693 \cdot 10^6)^2 = 0,9535 \leq 1$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

### Для расчёта обечайки от действия седловых опор:

$$B_1 = \min \left\{ 1,0; 9,45 \cdot \frac{D}{l} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (s-c)}} \right\} = \min \{ 1,0, 9,45 \cdot 1800 / 7340 \cdot (1800 / (100 \cdot (16-3)))^{1/2} \} = 1$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости:

$$[p]_{\text{E}} = \frac{2,08 \cdot 10^{-3} E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D}{l} \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s-c)}{D} \right]^{2,5} = 20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 1800 / (2,4 \cdot 1 \cdot 7340) \cdot (100 \cdot (16-3) / 1800)^{2,5} = 0,1724 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_{\text{н}}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[p]_{\text{н}}}{[p]_{\text{E}}} \right)^2}} = 2,395 / (1 + (2,395 / 0,1724)^2)^{1/2} = 0,172 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление:  $[p] = 0,172 \text{ МПа}$

### Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием (п. 2.3.4)

Допускаемое осевое сжимающее усилие:

$$[F] = \frac{[F]_{\text{н}}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[F]_{\text{н}}}{[F]_{\text{E1}}} \right)^2}} = 1,237 \cdot 10^7 / (1 + (1,237 \cdot 10^7 / 3,395 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 1,162 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

### Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием (п. 5.3.3)

Допускаемое осевое растягивающее усилие:

$$[F] = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = 3,142 \cdot (1800 + 16 - 3) \cdot (16 - 3) \cdot 167 \cdot 1 = 1,237 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны растяжения:

$$[M]_{\text{нр}} = \frac{D}{4} \cdot [F] = 1800 / 4 \cdot 1,237 \cdot 10^7 = 5,564 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Изн.	№ подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19785.4					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
					Е-3.00.00.000 РР
					Лист 26

$$[M]_{\text{gr}} = \frac{[M]_{\text{II}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\text{II}}}{[M]_{\text{IE}}}\right)^2}} = 5,564 \cdot 10^6 / (1 + (5,564 \cdot 10^6 / 1,746 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 5,302 \cdot 10^6 \text{ H M}$$
$$[M] = \min \{M_{\text{rp}}, M_{\text{ygr}}\} = \min \{5,564 \cdot 10^6, 5,302 \cdot 10^6\} = 5,302 \cdot 10^6 \text{ H}_\text{M}$$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

$$[Q]_E = \frac{2.4 \cdot E \cdot (s-c)^2}{n_y} \cdot \left[ 0.18 + 3.3 \frac{D(s-c)}{1_c^2} \right] = 2.4 \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot (16-3)^2 / 2.4 \cdot (0.18 + 3.3 \cdot 1800 \cdot (16-3) / 4600^2) = 5,68 \cdot 10^6 \text{ H}$$

$$[Q] = \frac{[Q]_I}{\sqrt{1 + \left( \frac{[Q]_I}{[Q]_E} \right)^2}} = 3,069 \cdot 10^6 / (1 + (3,069 \cdot 10^6 / 5,68 \cdot 10^6)^2)^{1/2} = 2,7 \cdot 10^6 \text{ H}$$

### Условия нагружения при испытаниях:

Расчётное осевое растягивающее усилие, F: 0 Н

$$E^{20} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$
$$s_p + c = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} + c = (0,258 \cdot 1800) / (2 \cdot 272,7 \cdot 1 - 0,258) + 3 = 3,852 \text{ mm}$$
$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 272,7 \cdot 1 \cdot (16 - 3) / (1800 + 16 - 3) = 3,911 \text{ МПа}$$

Минимальное расстояние между “одинокими” штуцерами:

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Расчётный изгибающий момент, М:	7,629·10 <sup>4</sup> Н·м
					Расчётное поперечное усилие, Q:	9,85·10 <sup>4</sup> Н
					Расчётное осевое растягивающее усилие, F:	0 Н
					<p align="center"><b>Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007</b></p> <p>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре Т = 20 °С (условия гидроиспытаний):</p> $[\sigma]^{20} = \eta * R_{e/20} / n_T = 1 * 300 / 1,1 = 272,7 \text{ МПа}$ <p>Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре Т = 20 °С:</p> $E^{20} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ <p align="center"><b>Гладкая обечайка, нагруженная внутренним избыточным давлением (п. 5.3.1)</b></p> <p>Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:</p> $s_p + c = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} + c = (0,258 * 1800) / (2 * 272,7 * 1 - 0,258) + 3 = 3,852 \text{ мм}$ <p>3,852 мм ≤ 16 мм</p> <p>Заключение: <b>Условие работоспособности выполнено</b></p> <p>Допускаемое давление:</p> $[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 * 272,7 * 1 * (16 - 3) / (1800 + 16 - 3) = 3,911 \text{ МПа}$ <p>3,911 МПа ≥ 0,258 МПа</p> <p>Заключение: <b>Условие прочности выполнено</b></p> <p>Минимальное расстояние между “одиночными” штуцерами:</p>	
19785.4					<p align="center">Е-3.00.00.000 РР</p>	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

$$b_0 = 2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} = 2 \cdot (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 305,9 \text{ мм}$$

### Обечайка, нагруженная изгибающим моментом (п. 5.3.5)

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$[F]_{\pi} = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3,142 \cdot (1800 + 16 - 3) \cdot (16 - 3) \cdot 272,7 = 2,019 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны сжатия:

$$[M]_{\pi} = \frac{D}{4} \cdot [F]_{\pi} = 1800 / 4 \cdot 2,019 \cdot 10^7 = 9,087 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:

$$[F]_{\text{Е1}} = \frac{31,0 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2,5} = 310 \cdot 10^6 \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot 1800^2 / (1,8) \cdot (100 \cdot (16 - 3) / 1800)^{2,5} = 4,922 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_{\text{Е}} = \frac{D}{3,5} \cdot [F]_{\text{Е1}} = 1800 / 3,5 \cdot 4,922 \cdot 10^7 = 2,531 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \frac{[M]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[M]_{\pi}}{[M]_{\text{Е}}} \right)^2}} = 9,087 \cdot 10^6 / (1 + (9,087 \cdot 10^6 / 2,531 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 8,553 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

$$8,553 \cdot 10^6 \text{ Н м} \geq 7,629 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

### Обечайка, нагруженная поперечным усилием (п. 5.3.6)

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности:

$$[Q]_{\pi} = 0,25 \cdot \pi \cdot D \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 0,25 \cdot 3,142 \cdot 1800 \cdot (16 - 3) \cdot 272,7 = 5,012 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$$l_p = 7340 \text{ мм}$$

Расчётная длина для расчёта от действия поперечной силы:

$$l_Q = 7340 \text{ мм}$$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

$$[Q]_{\text{Е}} = \frac{2,4 \cdot E \cdot (s - c)^2}{n_y} \cdot \left[ 0,18 + 3,3 \cdot \frac{D(s - c)}{l^2} \right] = 2,4 \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot (16 - 3)^2 / 1,8 \cdot (0,18 + 3,3 \cdot 1800 \cdot (16 - 3) / 7340^2) = 8,136 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[Q]_{\pi}}{[Q]_{\text{Е}}} \right)^2}} = 5,012 \cdot 10^6 / (1 + (5,012 \cdot 10^6 / 8,136 \cdot 10^6)^2)^{1/2} = 4,267 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$4,267 \cdot 10^6 \text{ Н} \geq 9,85 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

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.

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

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19785.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Е-3.00.00.000 РР				Лист
				28

$$\frac{p}{[F]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left( \frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0/0 + 0/0 + 7,629 \cdot 10^4 / 8,553 \cdot 10^6 + (9,85 \cdot 10^4 / 4,267 \cdot 10^6)^2 = 0,009453 \leq 1$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

### Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием (п. 5.3.3)

Допускаемое осевое растягивающее усилие:

$$[F] = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = 3,142 \cdot (1800 + 16 - 3) \cdot (16 - 3) \cdot 272,7 \cdot 1 = 2,019 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны растяжения:

$$[M]_{\text{пр}} = \frac{D}{4} \cdot [F] = 1800/4 \cdot 2,019 \cdot 10^7 = 9,087 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

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

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

$$\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{пр}}} = (0 + 0,258 \cdot 3,142 \cdot 1800^2 / 4) / 2,019 \cdot 10^7 + 7,629 \cdot 10^4 / 9,087 \cdot 10^6 = 0,04090 \leq 1$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

### Для расчёта обечайки от действия седловых опор:

$$B_1 = \min \left\{ 1,0; 9,45 \cdot \frac{D}{1} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (s - c)}} \right\} = \min \{ 1,0; 9,45 \cdot 1800 / 7340 \cdot (1800 / (100 \cdot (16 - 3)))^{1/2} \} = 1$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости:

$$[p]_E = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D}{1} \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2,5} = 20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot 1800 / (1,8 \cdot 1 \cdot 7340) \cdot (100 \cdot (16 - 3) / 1800)^{2,5} = 0,25 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$[p]_{\text{пр}} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 272,7 \cdot (16 - 3) / (1800 + 16 - 3) = 3,911 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_{\text{пр}}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[p]_{\text{пр}}}{[p]_E} \right)^2}} = 3,911 / (1 + (3,911 / 0,25)^2)^{1/2} = 0,2495 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление:  $[p] = 0,2495 \text{ МПа}$

### Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием (п. 2.3.4)

Допускаемое осевое сжимающее усилие:

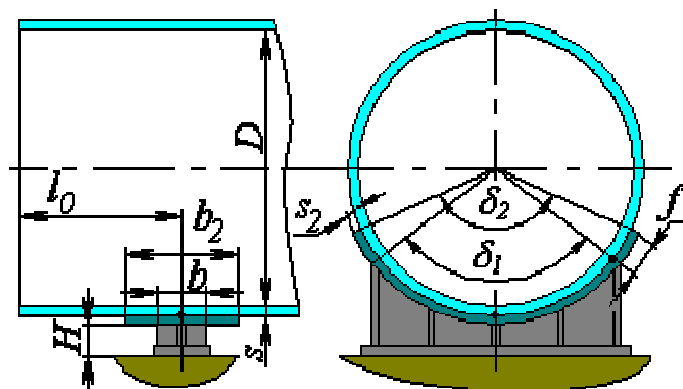
$$[F] = \frac{[F]_{\text{пр}}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[F]_{\text{пр}}}{[F]_{\text{EI}}} \right)^2}} = 2,019 \cdot 10^7 / (1 + (2,019 \cdot 10^7 / 4,922 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 1,868 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости:

Инов. № подл. 19785.4	Подпись и дата				Инов. № дубл.	Подпись и дата					
	Взам. инв. №										



## Опора седловая подвижная



### Исходные данные

Элемент, связанный с опорой:	Обечайка цилиндрическая
Внутренний диаметр обечайки, D:	1800 мм
Толщина стенки обечайки, s:	16 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c <sub>1</sub> :	3 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, c <sub>2</sub> :	0 мм
Прибавка технологическая, c <sub>3</sub> :	0 мм
Сумма прибавок к стенке обечайки, c:	3 мм
Ширина опоры, b:	300 мм
Угол охвата опоры, $\delta_1$ :	120 °
Расстояние от края элемента, l <sub>0</sub> :	1140 мм
Расстояние до днища, a:	$1,2 \cdot 10^3$ мм
Высота опоры, H:	104 мм
Толщина листа, s <sub>2</sub> :	16 мм
Ширина листа, b <sub>2</sub> :	400 мм
Угол охвата листа, $\delta_2$ :	140 °
Длина выступающей части листа, f:	162,7 мм

### Расчёт в рабочих условиях

#### Условия нагружения (см. Эпюры сил и моментов):

Расчётная температура, T:	70 °C
Коэффициент заполнения жидкостью, $\xi$ :	0,846
Плотность жидкости, $\rho_{ж}$ :	850 кг/м <sup>3</sup>
Расчётное внутреннее избыточное давление, действующее в элементе над опорой, p:	0,08167 МПа

Инов. № подл.	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19785.4			

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Е-3.00.00.000 РР

Поперечное усилие в сечении оболочки над опорой, Q:  $2,985 \cdot 10^5$  Н

Допускаемая поперечное усилие, [Q]:  $2,948 \cdot 10^6$  Н

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
19785.4				

Условие не выполнено, проводятся два расчёта

**Расчёт №1:**

Подкладной лист рассматривают как седловую опору шириной  $b_2$  с углом охвата  $\delta_2$ . Во всех формулах принимают  $b = b_2 = 400 \text{ мм}$ ,  $\delta_1 = \delta_2 = 140^\circ (2,443 \text{ рад})$

$$K_{13} = \frac{\max\left\{1,7 - \frac{2,1 \cdot \delta_1}{\pi}; 0\right\}}{\sin(0,5 \cdot \delta_1)} = \max\{1,7 - 2,1 * 2,443 / 3,142; 0\} / \sin(0,5 * 2,443) = 0,07095$$

Параметр, определяемый расстоянием до днища:

$$\gamma = 2,83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s-c}{D}} = 2,83 * 1,2 \cdot 10^3 / 1800 * ((16-3)/1800)^{1/2} = 0,1603$$

Коэффициенты, учитывающие влияние расстояния до днища ( $\delta_1$  подставляют в радианах):

$$K_{15} = \min\left\{1,0; \frac{0,8 \cdot \sqrt{\gamma + 6 \cdot \gamma}}{\delta_1}\right\} = \min\{1,0; (0,8 * 0,1603^{1/2} + 6 * 0,1603) / 2,443\} = 0,5248$$

Коэффициенты, учитывающие влияние угла охвата опоры ( $\delta_1$  подставляют в радианах):

$$K_{12} = \frac{1,15 - 0,1432 \cdot \delta_1}{\sin(0,5 \cdot \delta_1)} = (1,15 - 0,1432 * 2,443) / \sin(0,5 * 2,443) = 0,8514$$

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:



$$\beta_1 = 0.91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s - c)}} = 0.91 \cdot 400 / (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 2,38$$

Коэффициенты, учитывающие влияние ширины пояса опоры ( $\delta_1$  подставляют в радианах):

$$K_{10} = \max \left\{ \frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0,25 \right\} = \max \{ e^{-2,38} \cdot \sin(2,38) / 2,38; 0,25 \} = 0,25$$

$$\vartheta_1 = - \frac{0,23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0,23 \cdot 0,07095 \cdot 0,5248 / (0,8514 \cdot 0,25) = (-0,04023)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{mx} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = 4 \cdot 2,155 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot 1800^2 \cdot (16 - 3)) = 6,515 \text{ МПа}$$

$$\vartheta_{21} = - \frac{\bar{\sigma}_{mx}}{K_2 \cdot [\sigma]} = -6,515 / (1,25 \cdot 184) = (-0,02833)$$

$$\vartheta_{22} = \left( \frac{p \cdot D}{4 \cdot (s - c)} - \bar{\sigma}_{mx} \right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = [0,08167 \cdot 1800 / (4 \cdot (16 - 3)) - 6,515] / (1,2 \cdot 184) = (-0,01670)$$

Примечание: при  $\vartheta_{2i} < 0$  в расчёте  $K_1$  знаки  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left( \frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right) + \sqrt{\left( \frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 1,488 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{22} \end{array} \right|$$

$$= 1,491$$

$$K_1 = \min \{ 1,488, 1,491 \} = 1,488$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1,488 \cdot 1,25 \cdot 184 = 342,3 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0,7 \cdot [\sigma]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c) \cdot (s - c)}}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0,7 \cdot 342,3 \cdot (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} \cdot (16 - 3) / (0,25 \cdot 0,8514) = 2,239 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-2,38} \cdot \cos(2,38)) / 2,38 = 0,4484$$

$$K_{14} = \frac{1,45 - 0,43 \cdot \delta_1}{\sin(0,5 \cdot \delta_1)} = (1,45 - 0,43 \cdot 2,443) / \sin(0,5 \cdot 2,443) = 0,4249$$

$$K_{16} = 1 - \frac{0,65}{1 + (6 \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0,65 / (1 + (6 \cdot 0,1603)^2) \cdot [3,142 / (3 \cdot 2,443)]^{1/2} = 0,779$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0,6 \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{s - c}} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1} = 1 / [1 + 0,6 \cdot (1800 / (16 - 3))^{1/3} \cdot 400 / 1800 \cdot 2,443] = 0,3724$$

$$\vartheta_1 = - \frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 \cdot 0,4484 / [0,4249 \cdot 0,779 \cdot 0,3724 \cdot \sin(0,5 \cdot 2,443)] = (-2,052)$$

$$\vartheta_{21} = 0$$

Инов. № подл. 19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Е-3.00.00.000 PP					Лист
										33
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

$$\vartheta_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s - c)} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = 0,08167 \cdot 1800 / (2 \cdot (16 - 3)) \cdot 1 / (1,25 \cdot 184) = 0,02458$$

Примечание: при  $\vartheta_{21} < 0$  в расчёте  $K_1$  знаки  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 0,4146 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{22} \end{array} \right|$$

$$= 0,4247$$

$$K_1 = \min\{0,4146, 0,4247\} = 0,4146$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_3 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,4146 \cdot 1,25 \cdot 184 = 95,36 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0,9 \cdot [\sigma]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} \cdot (s - c)}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0,9 \cdot 95,36 \cdot (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} \cdot (16 - 3) / (0,4249 \cdot 0,779 \cdot 0,3724) = 1,385 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$s_{ef} = (s - c) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{s_2}{s - c}\right)^2} = (16 - 3) \cdot (1 + (16 / (16 - 3))^2)^{1/2} = 20,62 \text{ мм}$$

### Расчёт №2:

Подкладной лист рассматривают как усиление стенки сосуда. Во всех формулах принимают  $b = 300 \text{ мм}$ ,  $\delta_1 = 120^\circ$  (2,094 рад),  $s = s_{ef} + c = 20,62 + 3 = 23,62 \text{ мм}$ .

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

Параметр, определяемый расстоянием до днища:

$$\gamma = 2,83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s - c}{D}} = 2,83 \cdot 1,2 \cdot 10^3 / 1800 \cdot ((23,62 - 3) / 1800)^{1/2} = 0,2019$$

Коэффициенты, учитывающие влияние расстояния до днища ( $\delta_1$  подставляют в радианах):

$$K_{15} = \min\left\{1,0; \frac{0,8 \cdot \sqrt{\gamma + 6 \cdot \gamma}}{\delta_1}\right\} = \min\{1,0; (0,8 \cdot 0,2019^{1/2} + 6 \cdot 0,2019) / 2,094\} = 0,7501$$

Коэффициенты, учитывающие влияние угла охвата опоры ( $\delta_1$  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:

$$\beta_1 = 0,91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s - c)}} = 0,91 \cdot 300 / (1800 \cdot (23,62 - 3))^{1/2} = 1,417$$

Коэффициенты, учитывающие влияние ширины пояса опоры ( $\delta_1$  подставляют в радианах):

$$K_{10} = \max\left\{\frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0,25\right\} = \max\{e^{-1,417} \cdot \sin(1,417) / 1,417; 0,25\} = 0,25$$

Инов. № подл.	19785.4	Подпись и дата		Подпись и дата	
Взам. инв. №		Инов. № дубл.			
Изм.		Лист		№ докум.	
Подп.		Дата			
Е-3.00.00.000 РР					Лист
					34

$$\vartheta_1 = - \frac{0,23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0,23 * 0,3464 * 0,7501 / (0,9816 * 0,25) = (-0,2435)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{\text{мк}} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = 4 * 2,155 \cdot 10^5 / (3,142 * 1800^2 * (23,62 - 3)) = 4,108 \text{ МПа}$$

$$\vartheta_{21} = -\bar{\sigma}_{\text{мк}} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = -4,108 / (1,25 * 184) = (-0,01786)$$

$$\vartheta_{22} = \left( \frac{p \cdot D}{4 \cdot (s - c)} - \bar{\sigma}_{\text{мк}} \right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = [0,08167 * 1800 / (4 * (23,62 - 3)) - 4,108] / (1,2 * 184) = (-0,01053)$$

Примечание: при  $\vartheta_{2i} < 0$  в расчёте  $K_1$  знаки  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left( \frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right) + \sqrt{\left( \frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 1,326 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{22} \end{array} \right|$$

$$= 1,332$$

$$K_1 = \min \{ 1,326, 1,332 \} = 1,326$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma_i]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1,326 * 1,25 * 184 = 304,9 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0,7 \cdot [\sigma_i]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c) \cdot (s - c)}}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0,7 * 304,9 * (1800 * (23,62 - 3))^{1/2} * (23,62 - 3) / (0,25 * 0,9816) = 3,454 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-1,417} * \cos(1,417)) / 1,417 = 0,6795$$

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

$$K_{16} = 1 - \frac{0,65}{1 + (6 \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0,65 / (1 + (6 * 0,2019)^2) * [3,142 / (3 * 2,094)]^{1/2} = 0,8137$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0,6 \cdot \sqrt{\frac{D}{s - c} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1}} = 1 / [1 + 0,6 * (1800 / (23,62 - 3))^{1/3} * 300 / 1800 * 2,094] = 0,5184$$

$$\vartheta_1 = - \frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 * 0,6795 / [0,6344 * 0,8137 * 0,5184 * \sin(0,5 * 2,094)] = (-1,554)$$

$$\vartheta_{21} = 0$$

$$\vartheta_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s - c)} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = 0,08167 * 1800 / (2 * (23,62 - 3)) * 1 / (1,25 * 184) = 0,01550$$

Примечание: при  $\vartheta_{2i} < 0$  в расчёте  $K_1$  знаки  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left( \frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right) + \sqrt{\left( \frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 0,5201 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{22} \end{array} \right|$$

Инов. № подл. 19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-1,417} \cdot \cos(1,417)) / 1,417 = 0,6795$
					$K_{14} = \frac{1,45 - 0,43 \cdot \delta_1}{\sin(0,5 \cdot \delta_1)} = (1,45 - 0,43 \cdot 2,094) / \sin(0,5 \cdot 2,094) = 0,6344$
					$K_{16} = 1 - \frac{0,65}{1 + (6 \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0,65 / (1 + (6 \cdot 0,2019)^2) \cdot [3,142 / (3 \cdot 2,094)]^{1/2} = 0,8137$
					$K_{17} = \frac{1}{1 + 0,6 \cdot 3 \sqrt{\frac{D}{s - c}} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1} = 1 / [1 + 0,6 \cdot (1800 / (23,62 - 3))^{1/3} \cdot 300 / 1800 \cdot 2,094] = 0,5184$
					$\vartheta_1 = - \frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 \cdot 0,6795 / [0,6344 \cdot 0,8137 \cdot 0,5184 \cdot \sin(0,5 \cdot 2,094)] = (-1,554)$
					$\vartheta_{21} = 0$
					$\vartheta_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s - c)} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = 0,08167 \cdot 1800 / (2 \cdot (23,62 - 3)) \cdot 1 / (1,25 \cdot 184) = 0,01550$
					Примечание: при $\vartheta_{2i} < 0$ в расчёте $K_1$ знаки $\vartheta_1$ и $\vartheta_2$ 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}} = 0,5201 \quad \left  \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \end{array} \right $

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 PP	Лист
						35





$$\bar{\sigma}_{\max} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = 4 * 1,919 \cdot 10^5 / (3,142 * 1800^2 * (16 - 3)) = 5,801 \text{ МПа}$$

$$\vartheta_{21} = -\bar{\sigma}_{\max} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = -5,801 / (1,25 * 167) = (-0,02779)$$

$$\vartheta_{22} = \left( \frac{p \cdot D}{4 \cdot (s - c)} - \bar{\sigma}_{\max} \right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = [(-0,15) * 1800 / (4 * (16 - 3)) - 5,801] / (1,2 * 167) = (-0,05486)$$

Примечание: при  $\vartheta_{2i} < 0$  в расчёте  $K_1$  знаки  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left( \frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right) + \sqrt{\left( \frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 1,488 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{22} \end{array} \right|$$

$$= 1,48$$

$$K_1 = \min\{1,488, 1,48\} = 1,48$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma_i]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1,48 * 1,25 * 167 = 309 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0,7 \cdot [\sigma_i]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c) \cdot (s - c)}}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0,7 * 309 * (1800 * (16 - 3))^{1/2} * (16 - 3) / (0,25 * 0,8514) = 2,021 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-2,38} * \cos(2,38)) / 2,38 = 0,4484$$

$$K_{14} = \frac{1,45 - 0,43 \cdot \delta_1}{\sin(0,5 \cdot \delta_1)} = (1,45 - 0,43 * 2,443) / \sin(0,5 * 2,443) = 0,4249$$

$$K_{16} = 1 - \frac{0,65}{1 + (\delta \cdot \gamma)^2} \cdot \frac{\pi}{\sqrt{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0,65 / (1 + (6 * 0,1603)^2) * [3,142 / (3 * 2,443)]^{1/2} = 0,779$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0,6 \cdot \sqrt{\frac{D}{s - c} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1}} = 1 / [1 + 0,6 * (1800 / (16 - 3))^{1/3} * 400 / 1800 * 2,443] = 0,3724$$

$$\vartheta_1 = -\frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 * 0,4484 / [0,4249 * 0,779 * 0,3724 * \sin(0,5 * 2,443)] = (-2,052)$$

$$\vartheta_{21} = 0$$

$$\vartheta_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s - c)} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = (-0,15) * 1800 / (2 * (16 - 3)) * 1 / (1,25 * 167) = (-0,04975)$$

Примечание: при  $\vartheta_{2i} < 0$  в расчёте  $K_1$  знаки  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left( \frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right) + \sqrt{\left( \frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 0,4146 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{22} \end{array} \right|$$

$$= 0,3942$$

$$K_1 = \min\{0,4146, 0,3942\} = 0,3942$$

Инов. № подл. 19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
$K_{14} = \frac{1.45 - 0.43 \cdot \delta_1}{\sin(0.5 \cdot \delta_1)} = (1.45 - 0.43 \cdot 2.443) / \sin(0.5 \cdot 2.443) = 0,4249$ $K_{16} = 1 - \frac{0.65}{1 + (6 \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0.65 / (1 + (6 \cdot 0.1603)^2) \cdot [3.142 / (3 \cdot 2.443)]^{1/2} = 0,779$ $K_{17} = \frac{1}{1 + 0.6 \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{s-c}} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1} = 1 / [1 + 0.6 \cdot (1800 / (16 - 3))^{1/3} \cdot 400 / 1800 \cdot 2.443] = 0,3724$ $\vartheta_1 = -\frac{0.53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0.5 \cdot \delta_1)} = -0.53 \cdot 0.4484 / [0.4249 \cdot 0.779 \cdot 0.3724 \cdot \sin(0.5 \cdot 2.443)] = (-2,052)$ $\vartheta_{21} = 0$ $\vartheta_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s-c)} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = (-0.15) \cdot 1800 / (2 \cdot (16 - 3)) \cdot 1 / (1.25 \cdot 167) = (-0,04975)$ <p>Примечание: при <math>\vartheta_{2i} &lt; 0</math> в расчёте <math>K_1</math> знаки <math>\vartheta_1</math> и <math>\vartheta_2</math> меняют на противоположные</p> $K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 0,4146 \quad \left  \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{22} \end{array} \right.$ $= 0,3942$ $K_1 = \min\{0,4146, 0,3942\} = 0,3942$				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Е-3.00.00.000 РР				Лист 38

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_3 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,3942 \cdot 1,25 \cdot 167 = 82,3 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0,9 \cdot [\sigma]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} \cdot (s - c)}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0,9 \cdot 82,3 \cdot (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} \cdot (16 - 3) / (0,4249 \cdot 0,779 \cdot 0,3724) = 1,195 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$s_{ef} = (s - c) \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{s_2}{s - c} \right)^2} = (16 - 3) \cdot (1 + (16 / (16 - 3))^2)^{1/2} = 20,62 \text{ мм}$$

### Расчёт №2:

Подкладной лист рассматривают как усиление стенки сосуда. Во всех формулах принимают  $b = 300 \text{ мм}$ ,  $\delta_1 = 120^\circ$  (2,094 рад),  $s = s_{ef} + c = 20,62 + 3 = 23,62 \text{ мм}$ .

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

Параметр, определяемый расстоянием до днища:

$$\gamma = 2,83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s - c}{D}} = 2,83 \cdot 1,2 \cdot 10^3 / 1800 \cdot ((23,62 - 3) / 1800)^{1/2} = 0,2019$$

Коэффициенты, учитывающие влияние расстояния до днища ( $\delta_1$  подставляют в радианах):

$$K_{15} = \min \left\{ 1,0; \frac{0,8 \cdot \sqrt{\gamma + 6 \cdot \gamma}}{\delta_1} \right\} = \min \{ 1,0; (0,8 \cdot 0,2019^{1/2} + 6 \cdot 0,2019) / 2,094 \} = 0,7501$$

Коэффициенты, учитывающие влияние угла охвата опоры ( $\delta_1$  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:

$$\beta_1 = 0,91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s - c)}} = 0,91 \cdot 300 / (1800 \cdot (23,62 - 3))^{1/2} = 1,417$$

Коэффициенты, учитывающие влияние ширины пояса опоры ( $\delta_1$  подставляют в радианах):

$$K_{10} = \max \left\{ \frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0,25 \right\} = \max \{ e^{-1,417} \cdot \sin(1,417) / 1,417; 0,25 \} = 0,25$$

$$\Phi_1 = - \frac{0,23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0,23 \cdot 0,3464 \cdot 0,7501 / (0,9816 \cdot 0,25) = (-0,2435)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{mx} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = 4 \cdot 1,919 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot 1800^2 \cdot (23,62 - 3)) = 3,658 \text{ МПа}$$

$$\Phi_{2,1} = - \bar{\sigma}_{mx} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = -3,658 / (1,25 \cdot 167) = (-0,01752)$$

$$\Phi_{2,2} = \left( \frac{p \cdot D}{4 \cdot (s - c)} - \bar{\sigma}_{mx} \right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = [(-0,15) \cdot 1800 / (4 \cdot (23,62 - 3)) - 3,658] / (1,2 \cdot 167) = (-0,03459)$$

Примечание: при  $\Phi_{2,i} < 0$  в расчёте  $K_1$  знаки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  меняют на противоположные

Инов. № подл. 19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	$K_{13} = \max \left\{ \frac{1.15 - 0.1432 \cdot \delta_1}{\sin(0.5 \cdot \delta_1)} ; 0.25 \right\} = \max \{ 1.15 - 0.1432 \cdot 2.094 ; 0.25 \} = 0.7501$	
					Коэффициенты, учитывающие влияние угла охвата опоры ( $\delta_1$ 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:	
					$\beta_1 = 0.91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s - c)}} = 0.91 \cdot 300 / (1800 \cdot (23,62 - 3))^{1/2} = 1,417$	
					Коэффициенты, учитывающие влияние ширины пояса опоры ( $\beta_1$ подставляют в радианах):	
					$K_{10} = \max \left\{ \frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1} ; 0.25 \right\} = \max \{ e^{-1.417} \cdot \sin(1,417) / 1,417 ; 0.25 \} = 0,25$	
					$\vartheta_1 = - \frac{0.23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0.23 \cdot 0,3464 \cdot 0,7501 / (0,9816 \cdot 0,25) = (-0,2435)$	
					Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:	
					$\bar{\sigma}_{\text{мк}} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = 4 \cdot 1,919 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot 1800^2 \cdot (23,62 - 3)) = 3,658 \text{ МПа}$	
					$\vartheta_{21} = - \bar{\sigma}_{\text{мк}} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = -3,658 / (1,25 \cdot 167) = (-0,01752)$	
					$\vartheta_{22} = \left( \frac{p \cdot D}{4 \cdot (s - c)} - \bar{\sigma}_{\text{мк}} \right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = [(-0,15) \cdot 1800 / (4 \cdot (23,62 - 3)) - 3,658] / (1,2 \cdot 167) = (-0,03459)$	
					Примечание: при $\vartheta_{2i} < 0$ в расчёте $K_1$ знаки $\vartheta_1$ и $\vartheta_2$ меняют на противоположные	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 PP	Лист
						39









$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 1,493 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{2,2} \end{array} \right|$$

$$= 1,498$$

$$K_1 = \min\{1,493, 1,498\} = 1,493$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1,493 \cdot 1,05 \cdot 272,7 = 427,6 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0,7 \cdot [\sigma]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c) \cdot (s - c)}}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0,7 \cdot 427,6 \cdot (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} \cdot (16 - 3) / (0,25 \cdot 0,8514) = 2,796 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-2,38} \cdot \cos(2,38)) / 2,38 = 0,4484$$

$$K_{14} = \frac{1,45 - 0,43 \cdot \delta_1}{\sin(0,5 \cdot \delta_1)} = (1,45 - 0,43 \cdot 2,443) / \sin(0,5 \cdot 2,443) = 0,4249$$

$$K_{16} = 1 - \frac{0,65}{1 + (\delta \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0,65 / (1 + (6 \cdot 0,1603)^2) \cdot [3,142 / (3 \cdot 2,443)]^{1/2} = 0,779$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0,6 \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{s - c} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1}} = 1 / [1 + 0,6 \cdot (1800 / (16 - 3))^{1/3} \cdot 400 / 1800 \cdot 2,443] = 0,3724$$

$$\vartheta_1 = -\frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 \cdot 0,4484 / [0,4249 \cdot 0,779 \cdot 0,3724 \cdot \sin(0,5 \cdot 2,443)] = (-2,052)$$

$$\vartheta_{21} = 0$$

$$\vartheta_{2,2} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s - c) \cdot K_2 \cdot [\sigma]} = 0,258 \cdot 1800 / (2 \cdot (16 - 3)) \cdot 1 / (1,05 \cdot 272,7) = 0,06237$$

Примечание: при  $\vartheta_{2i} < 0$  в расчёте  $K_1$  знаки  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 0,4146 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{2,2} \end{array} \right|$$

$$= 0,4401$$

$$K_1 = \min\{0,4146, 0,4401\} = 0,4146$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_3 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,4146 \cdot 1,05 \cdot 272,7 = 118,7 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0,9 \cdot [\sigma]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c) \cdot (s - c)}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0,9 \cdot 118,7 \cdot (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} \cdot (16 - 3) / (0,4249 \cdot 0,779 \cdot 0,3724) = 1,724 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.  
19785.4

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Е-3.00.00.000 РР

Лист

43

$$s_{ef} = (s - c) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{s_2}{s - c}\right)^2} = (16 - 3) \cdot (1 + (16 / (16 - 3))^2)^{1/2} = 20,62 \text{ мм}$$

### Расчёт №2:

Подкладной лист рассматривают как усиление стенки сосуда. Во всех формулах принимают  $b = 300 \text{ мм}$ ,  $\delta_1 = 120^\circ$  (2,094 рад),  $s = s_{ef} + c = 20,62 + 3 = 23,62 \text{ мм}$ .

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

Параметр, определяемый расстоянием до днища:

$$\gamma = 2,83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s - c}{D}} = 2,83 \cdot 1,2 \cdot 10^3 / 1800 \cdot ((23,62 - 3) / 1800)^{1/2} = 0,2019$$

Коэффициенты, учитывающие влияние расстояния до днища ( $\delta_1$  подставляют в радианах):

$$K_{15} = \min\left\{1,0; \frac{0,8 \cdot \sqrt{\gamma} + 6 \cdot \gamma}{\delta_1}\right\} = \min\{1,0; (0,8 \cdot 0,2019^{1/2} + 6 \cdot 0,2019) / 2,094\} = 0,7501$$

Коэффициенты, учитывающие влияние угла охвата опоры ( $\delta_1$  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:

$$\beta_1 = 0,91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s - c)}} = 0,91 \cdot 300 / (1800 \cdot (23,62 - 3))^{1/2} = 1,417$$

Коэффициенты, учитывающие влияние ширины пояса опоры ( $\delta_1$  подставляют в радианах):

$$K_{10} = \max\left\{\frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0,25\right\} = \max\{e^{-1,417} \cdot \sin(1,417) / 1,417; 0,25\} = 0,25$$

$$\vartheta_1 = -\frac{0,23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0,23 \cdot 0,3464 \cdot 0,7501 / (0,9816 \cdot 0,25) = (-0,2435)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{mx} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = 4 \cdot 6,706 \cdot 10^4 / (3,142 \cdot 1800^2 \cdot (23,62 - 3)) = 1,278 \text{ МПа}$$

$$\vartheta_{21} = -\bar{\sigma}_{mx} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = -1,278 / (1,05 \cdot 272,7) = (-0,004464)$$

$$\vartheta_{22} = \left(\frac{p \cdot D}{4 \cdot (s - c)} - \bar{\sigma}_{mx}\right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = [0,258 \cdot 1800 / (4 \cdot (23,62 - 3)) - 1,278] / (1 \cdot 272,7) = 0,01596$$

Примечание: при  $\vartheta_{2i} < 0$  в расчёте  $K_1$  знаки  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 1,337 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{22} \end{array} \right|$$

$= 1,353$

$$K_1 = \min\{1,337, 1,353\} = 1,337$$

Расчёт в точке 2:

Инов. № подл.	19785.4	Подпись и дата				Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1,337 \cdot 1,05 \cdot 272,7 = 382,8 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0,7 \cdot [\sigma]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c) \cdot (s - c)}}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0,7 \cdot 382,8 \cdot (1800 \cdot (23,62 - 3))^{1/2} \cdot (23,62 - 3) / (0,25 \cdot 0,9816) = 4,336 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-1,417} \cdot \cos(1,417)) / 1,417 = 0,6795$$

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

$$K_{16} = 1 - \frac{0,65}{1 + (\delta \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0,65 / (1 + (6 \cdot 0,2019)^2) \cdot [3,142 / (3 \cdot 2,094)]^{1/2} = 0,8137$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0,6 \cdot 3 \sqrt{\frac{D}{s - c} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1}} = 1 / [1 + 0,6 \cdot (1800 / (23,62 - 3))^{1/3} \cdot 300 / 1800 \cdot 2,094] = 0,5184$$

$$\vartheta_1 = - \frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 \cdot 0,6795 / [0,6344 \cdot 0,8137 \cdot 0,5184 \cdot \sin(0,5 \cdot 2,094)] = (-1,554)$$

$$\vartheta_{21} = 0$$

$$\vartheta_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s - c) \cdot K_2 \cdot [\sigma]} = 0,258 \cdot 1800 / (2 \cdot (23,62 - 3)) \cdot 1 / (1,05 \cdot 272,7) = 0,03933$$

Примечание: при  $\vartheta_{2i} < 0$  в расчёте  $K_1$  знаки  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left( \frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right) + \sqrt{\left( \frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 0,5201 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{2,2} \end{array} \right|$$

$$= 0,5401$$

$$K_1 = \min \{ 0,5201, 0,5401 \} = 0,5201$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_3 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,5201 \cdot 1,05 \cdot 272,7 = 148,9 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0,9 \cdot [\sigma]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c) \cdot (s - c)}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0,9 \cdot 148,9 \cdot (1800 \cdot (23,62 - 3))^{1/2} \cdot (23,62 - 3) / (0,6344 \cdot 0,8137 \cdot 0,5184) = 1,989 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Условие прочности:

$$F \leq [F] = \min \{ [F]_{2P1}, [F]_{3P1}, [F]_{2P2}, [F]_{3P2} \}$$

$$[F] = 1,724 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$1,619 \cdot 10^5 \text{ Н} \leq 1,724 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

### Проверка условия устойчивости

Эффективное осевое усилие от местных мембранных напряжений:

$$F_e = F \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{D}{(s - c)}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} = 1,619 \cdot 10^5 \cdot 3,142 / 4 \cdot (1800 / (16 - 3))^{1/2} \cdot 0,07095 \cdot 0,5248 = 5,57 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Изн.	Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19785.4					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
					Е-3.00.00.000 РР
					Лист 45

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

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

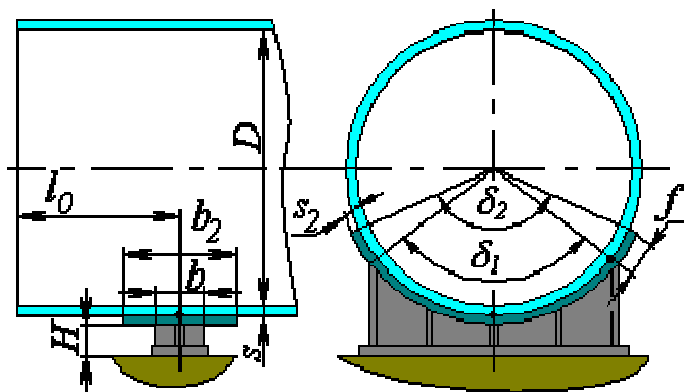
$\frac{|p|}{[p]} + \frac{F_e}{[F]} + \frac{M}{[M]_{уст}} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 = 0 / 0,2495 + 5,57 \cdot 10^4 / 1,868 \cdot 10^7 + 6,706 \cdot 10^4 / 8,553 \cdot 10^6 + (9,916 \cdot 10^4 / 4,282 \cdot 10^6)^2 = 0,01136$

$0,01136 \leq 1.0$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Инв. № подл. 19785.4	Подпись и дата		Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР	Лист
						46

**Опора седловая неподвижная**



**Исходные данные**

Элемент, связанный с опорой:	Обечайка цилиндрическая
Внутренний диаметр обечайки, D:	1800 мм
Толщина стенки обечайки, s:	16 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c <sub>1</sub> :	3 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, c <sub>2</sub> :	0 мм
Прибавка технологическая, c <sub>3</sub> :	0 мм
Сумма прибавок к стенке обечайки, c:	3 мм
Ширина опоры, b:	300 мм
Угол охвата опоры, $\delta_1$ :	120 °
Расстояние от края элемента, l <sub>0</sub> :	5740 мм
Расстояние до днища, a:	1,24·10 <sup>3</sup> мм
Высота опоры, H:	104 мм
Толщина листа, s <sub>2</sub> :	16 мм
Ширина листа, b <sub>2</sub> :	400 мм
Угол охвата листа, $\delta_2$ :	140 °
Длина выступающей части листа, f:	162,7 мм

**Расчёт в рабочих условиях**

**Условия нагружения (см. Эпюры сил и моментов):**

Расчётная температура, T:	70 °C
Коэффициент заполнения жидкостью, $\xi$ :	0,846
Плотность жидкости, $\rho_{ж}$ :	850 кг/м <sup>3</sup>
Расчётное внутреннее избыточное давление, действующее в элементе над опорой, p:	0,08167 МПа

Изгибающий момент в сечении оболочки над опорой, M: 2,168·10<sup>5</sup> Н м

Изнв. № подл.	Взам. инв. №	Изнв. № дубл.	Подпись и дата
19785.4			

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Е-3.00.00.000 РР

Лист

47

Опорное усилие, F:  $3,483 \cdot 10^5$  Н

Поперечное усилие в сечении оболочки над опорой, Q:  $2,993 \cdot 10^5$  Н

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

Допускаемое наружное давление, [p]:  $0,1823$  МПа

Допускаемый изгибающий момент, [M]<sub>уст</sub>:  $5,82 \cdot 10^6$  Н м

Допускаемая осевое сжимающее усилие, [F]:  $1,274 \cdot 10^7$  Н

Допускаемая поперечное усилие, [Q]:  $2,948 \cdot 10^6$  Н

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

#### Опора с подкладным листом

Проверка условия:  $b_2 \geq K_{19} \cdot D + 1,5 \cdot b$

$$K_{19} = \frac{5}{6 \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{s-c}} \cdot \delta_1} = 5 / [6 \cdot (1800 / (16 - 3))^{1/3} \cdot 2,094] = 0,07691$$

$$K_{19} \cdot D + 1,5 \cdot b = 0,07691 \cdot 1800 + 1,5 \cdot 300 = 588,4 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, проводятся два расчёта

#### Расчёт №1:

Подкладной лист рассматривают как седловую опору шириной  $b_2$  с углом охвата  $\delta_2$ . Во всех формулах принимают  $b = b_2 = 400$  мм,  $\delta_1 = \delta_2 = 140^\circ$  (2,443 рад)

$$K_{13} = \frac{\max \left\{ 1,7 - \frac{2,1 \cdot \delta_1}{\pi}; 0 \right\}}{\sin(0,5 \cdot \delta_1)} = \max \{ 1,7 - 2,1 \cdot 2,443 / 3,142; 0 \} / \sin(0,5 \cdot 2,443) = 0,07095$$

Параметр, определяемый расстоянием до днища:

$$\gamma = 2,83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s-c}{D}} = 2,83 \cdot 1,24 \cdot 10^3 / 1800 \cdot ((16 - 3) / 1800)^{1/2} = 0,1657$$

Коэффициенты, учитывающие влияние расстояния до днища ( $\delta_1$  подставляют в радианах):

$$K_{15} = \min \left\{ 1,0; \frac{0,8 \cdot \sqrt{\gamma} + 6 \cdot \gamma}{\delta_1} \right\} = \min \{ 1,0; (0,8 \cdot 0,1657^{1/2} + 6 \cdot 0,1657) / 2,443 \} = 0,5401$$

Коэффициенты, учитывающие влияние угла охвата опоры ( $\delta_1$  подставляют в радианах):

$$K_{12} = \frac{1,15 - 0,1432 \cdot \delta_1}{\sin(0,5 \cdot \delta_1)} = (1,15 - 0,1432 \cdot 2,443) / \sin(0,5 \cdot 2,443) = 0,8514$$

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta_1 = 0,91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s-c)}} = 0,91 \cdot 400 / (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 2,38$$

Изн. № подл.	Изн. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата					
19785.4								
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР			
					Лист 48			



Коэффициенты, учитывающие влияние ширины пояса опоры ( $\delta_1$  подставляют в радианах):

$$K_{10} = \max \left\{ \frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0,25 \right\} = \max \{ e^{-2,38} \cdot \sin(2,38) / 2,38; 0,25 \} = 0,25$$

$$\Phi_1 = - \frac{0,23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0,23 \cdot 0,07095 \cdot 0,5401 / (0,8514 \cdot 0,25) = (-0,04140)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{\text{мк}} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = 4 \cdot 2,168 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot 1800^2 \cdot (16 - 3)) = 6,554 \text{ МПа}$$

$$\Phi_{21} = - \bar{\sigma}_{\text{мк}} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = -6,554 / (1,25 \cdot 184) = (-0,02850)$$

$$\Phi_{22} = \left( \frac{p \cdot D}{4 \cdot (s - c)} - \bar{\sigma}_{\text{мк}} \right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = [0,08167 \cdot 1800 / (4 \cdot (16 - 3)) - 6,554] / (1,25 \cdot 184) = (-0,01688)$$

Примечание: при  $\Phi_{21} < 0$  в расчёте  $K_1$  знаки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \Phi_2^2}{\left( \frac{1}{3} + \Phi_1 \cdot \Phi_2 \right) + \sqrt{\left( \frac{1}{3} + \Phi_1 \cdot \Phi_2 \right)^2 + (1 - \Phi_2^2) \cdot \Phi_1}} = 1,488 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \Phi_2 = \Phi_{21} \\ \text{при } \Phi_2 = \Phi_{22} \end{array} \right|$$

$$= 1,491$$

$$K_1 = \min \{ 1,488, 1,491 \} = 1,488$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1,488 \cdot 1,25 \cdot 184 = 342,2 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0,7 \cdot [\sigma]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c) \cdot (s - c)}}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0,7 \cdot 342,2 \cdot (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} \cdot (16 - 3) / (0,25 \cdot 0,8514) = 2,238 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-2,38} \cdot \cos(2,38)) / 2,38 = 0,4484$$

$$K_{14} = \frac{1,45 - 0,43 \cdot \delta_1}{\sin(0,5 \cdot \delta_1)} = (1,45 - 0,43 \cdot 2,443) / \sin(0,5 \cdot 2,443) = 0,4249$$

$$K_{16} = 1 - \frac{0,65}{1 + (\delta \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0,65 / (1 + (6 \cdot 0,1657)^2) \cdot [3,142 / (3 \cdot 2,443)]^{1/2} = 0,786$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0,6 \cdot 3 \cdot \sqrt{\frac{D}{s - c}} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1} = 1 / [1 + 0,6 \cdot (1800 / (16 - 3))^{1/3} \cdot 400 / 1800 \cdot 2,443] = 0,3724$$

$$\Phi_1 = - \frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 \cdot 0,4484 / [0,4249 \cdot 0,786 \cdot 0,3724 \cdot \sin(0,5 \cdot 2,443)] = (-2,033)$$

$$\Phi_{21} = 0$$

$$\Phi_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s - c)} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = 0,08167 \cdot 1800 / (2 \cdot (16 - 3)) \cdot 1 / (1,25 \cdot 184) = 0,02458$$

Примечание: при  $\Phi_{21} < 0$  в расчёте  $K_1$  знаки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  меняют на противоположные

Инов. № подл. 19785.4	Подпись и дата				
	Взам. инв. №				
	Инов. № дубл.				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 PP
					Лист
					49

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 0,4177 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{2,2} \end{array} \right|$$

$$= 0,4278$$

$$K_1 = \min\{0,4177, 0,4278\} = 0,4177$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_3 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,4177 \cdot 1,25 \cdot 184 = 96,08 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0,9 \cdot [\sigma]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} \cdot (s - c)}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0,9 \cdot 96,08 \cdot (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} \cdot (16 - 3) / (0,4249 \cdot 0,786 \cdot 0,3724) = 1,383 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$s_{ef} = (s - c) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{s_2}{s - c}\right)^2} = (16 - 3) \cdot (1 + (16 / (16 - 3))^2)^{1/2} = 20,62 \text{ мм}$$

### Расчёт №2:

Подкладной лист рассматривают как усиление стенки сосуда. Во всех формулах принимают  $b = 300 \text{ мм}$ ,  $\delta_1 = 120^\circ$  (2,094 рад),  $s = s_{ef} + c = 20,62 + 3 = 23,62 \text{ мм}$ .

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

Параметр, определяемый расстоянием до днища:

$$\gamma = 2,83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s - c}{D}} = 2,83 \cdot 1,24 \cdot 10^3 / 1800 \cdot ((23,62 - 3) / 1800)^{1/2} = 0,2086$$

Коэффициенты, учитывающие влияние расстояния до днища ( $\delta_1$  подставляют в радианах):

$$K_{15} = \min\left\{1,0; \frac{0,8 \cdot \sqrt{\gamma} + 6 \cdot \gamma}{\delta_1}\right\} = \min\{1,0; (0,8 \cdot 0,2086^{1/2} + 6 \cdot 0,2086) / 2,094\} = 0,7722$$

Коэффициенты, учитывающие влияние угла охвата опоры ( $\delta_1$  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:

$$\beta_1 = 0,91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s - c)}} = 0,91 \cdot 300 / (1800 \cdot (23,62 - 3))^{1/2} = 1,417$$

Коэффициенты, учитывающие влияние ширины пояса опоры ( $\delta_1$  подставляют в радианах):

$$K_{10} = \max\left\{\frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0,25\right\} = \max\{e^{-1,417} \cdot \sin(1,417) / 1,417; 0,25\} = 0,25$$

$$\vartheta_1 = -\frac{0,23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0,23 \cdot 0,3464 \cdot 0,7722 / (0,9816 \cdot 0,25) = (-0,2507)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\sigma_{mx} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = 4 \cdot 2,168 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot 1800^2 \cdot (23,62 - 3)) = 4,133 \text{ МПа}$$

Инов. № подл. 19785.4	Подпись и дата				
	Взам. инв. №				
	Инов. № дубл.				
	Подпись и дата				
	Изм.				
Лист					Лист
№ докум.					50
Подп.					
Дата					
Е-3.00.00.000 РР					

$$\vartheta_{21} = -\frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = -4,133 / (1,25 \cdot 184) = (-0,01797)$$

$$\vartheta_{22} = \left( \frac{p \cdot D}{4 \cdot (s - c)} - \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} \right) = [0,08167 \cdot 1800 / (4 \cdot (23,62 - 3)) - 4,133] / (1,2 \cdot 184) = (-0,01064)$$

Примечание: при  $\vartheta_{2i} < 0$  в расчёте  $K_1$  знаки  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left( \frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right) + \sqrt{\left( \frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 1,318 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{22} \end{array} \right|$$

$$= 1,324$$

$$K_1 = \min\{ 1,318, 1,324 \} = 1,318$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1,318 \cdot 1,25 \cdot 184 = 303,1 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0,7 \cdot [\sigma]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c) \cdot (s - c)}}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0,7 \cdot 303,1 \cdot (1800 \cdot (23,62 - 3))^{1/2} \cdot (23,62 - 3) / (0,25 \cdot 0,9816) = 3,434 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-1,417} \cdot \cos(1,417)) / 1,417 = 0,6795$$

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

$$K_{16} = 1 - \frac{0,65}{1 + (\delta \cdot \gamma)^2} \cdot \frac{\pi}{\sqrt{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0,65 / (1 + (6 \cdot 0,2086)^2) \cdot [3,142 / (3 \cdot 2,094)]^{1/2} = 0,821$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0,6 \cdot \sqrt{\frac{D}{s - c} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1}} = 1 / [1 + 0,6 \cdot (1800 / (23,62 - 3))^{1/3} \cdot 300 / 1800 \cdot 2,094] = 0,5184$$

$$\vartheta_1 = -\frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 \cdot 0,6795 / [0,6344 \cdot 0,821 \cdot 0,5184 \cdot \sin(0,5 \cdot 2,094)] = (-1,54)$$

$$\vartheta_{21} = 0$$

$$\vartheta_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s - c) \cdot K_2 \cdot [\sigma]} = 0,08167 \cdot 1800 / (2 \cdot (23,62 - 3)) \cdot 1 / (1,25 \cdot 184) = 0,01550$$

Примечание: при  $\vartheta_{2i} < 0$  в расчёте  $K_1$  знаки  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left( \frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right) + \sqrt{\left( \frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 0,5238 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{22} \end{array} \right|$$

$$= 0,5317$$

$$K_1 = \min\{ 0,5238, 0,5317 \} = 0,5238$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_3 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,5238 \cdot 1,25 \cdot 184 = 120,5 \text{ МПа}$$

Инов. № подл. 19785.4	Подпись и дата				
	Инов. № дубл.				
	Взам. инв. №				
	Подпись и дата				
	Изм. Лист № докум. Подп. Дата				
Е-3.00.00.000 РР					Лист 51

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0.9 \cdot [\sigma_s]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} \cdot (s - c)}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0.9 \cdot 120.5 \cdot (1800 \cdot (23.62 - 3))^{1/2} \cdot (23.62 - 3) / (0.6344 \cdot 0.821 \cdot 0.5184) = 1.595 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Условие прочности:

$$F \leq [F] = \min([F]_{2[1]}, [F]_{3[1]}, [F]_{2[2]}, [F]_{3[2]})$$

$$[F] = 1.383 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$3.483 \cdot 10^5 \text{ Н} \leq 1.383 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

**Проверка условия устойчивости**

Эффективное осевое усилие от местных мембранных напряжений:

$$F_e = F \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{D}{(s - c)}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} = 3.483 \cdot 10^5 \cdot 3.142 / 4 \cdot (1800 / (16 - 3))^{1/2} \cdot 0.07095 \cdot 0.5401 = 1.233 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

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

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

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{F_e}{[F]} + \frac{M}{[M]_{уст}} + \left( \frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0 / 0.1823 + 1.233 \cdot 10^5 / 1.274 \cdot 10^7 + 2.168 \cdot 10^5 / 5.82 \cdot 10^6 + (2.993 \cdot 10^5 / 2.948 \cdot 10^6)^2 = 0.05724$$

$$0.05724 \leq 1.0$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

**Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)**

**Условия нагружения (см. Эпюры сил и моментов):**

Расчётная температура, T: 180 °C

Коэффициент заполнения жидкостью,  $\xi$ : 0

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

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

Изгибающий момент в сечении оболочки над опорой, M: 1,926·10<sup>5</sup> Н м

Опорное усилие, F: 2,794·10<sup>5</sup> Н

Поперечное усилие в сечении оболочки над опорой, Q: 2,581·10<sup>5</sup> Н

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

Допускаемое наружное давление, [p]: 0,172 МПа

Допускаемый изгибающий момент, [M]<sub>уст</sub>: 5,302·10<sup>6</sup> Н м

Допускаемая осевое сжимающее усилие, [F]: 1,162·10<sup>7</sup> Н

Допускаемая поперечное усилие, [Q]: 2,7·10<sup>6</sup> Н

Инов. № подл. 19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Е-3.00.00.000 PP					Лист
										52
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

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

## Опора с подкладным листом

Проверка условия:  $b_2 \geq K_{19} \cdot D + 1.5 \cdot b$

$$K_{19} = \frac{5}{6 \cdot 3 \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{s-c}} \cdot \delta_1} = 5 / [6 \cdot (1800 / (16 - 3))^{1/3} \cdot 2,094] = 0,07691$$

$$K_{19} \cdot D + 1.5 \cdot b = 0,07691 \cdot 1800 + 1.5 \cdot 300 = 588,4 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, проводятся два расчёта

### Расчёт №1:

Подкладной лист рассматривают как седловую опору шириной  $b_2$  с углом охвата  $\delta_2$ . Во всех формулах принимают  $b = b_2 = 400 \text{ мм}$ ,  $\delta_1 = \delta_2 = 140^\circ (2,443 \text{ рад})$

$$K_{13} = \frac{\max \left\{ 1.7 - \frac{2.1 \cdot \delta_1}{\pi}; 0 \right\}}{\sin(0.5 \cdot \delta_1)} = \max \{ 1.7 - 2.1 \cdot 2,443 / 3,142; 0 \} / \sin(0.5 \cdot 2,443) = 0,07095$$

Параметр, определяемый расстоянием до днища:

$$\gamma = 2.83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s-c}{D}} = 2.83 \cdot 1,24 \cdot 10^3 / 1800 \cdot ((16 - 3) / 1800)^{1/2} = 0,1657$$

Коэффициенты, учитывающие влияние расстояния до днища ( $\delta_1$  подставляют в радианах):

$$K_{15} = \min \left\{ 1,0; \frac{0,8 \cdot \sqrt{\gamma + 6 \cdot \gamma}}{\delta_1} \right\} = \min \{ 1,0; (0,8 \cdot 0,1657^{1/2} + 6 \cdot 0,1657) / 2,443 \} = 0,5401$$

Коэффициенты, учитывающие влияние угла охвата опоры ( $\delta_1$  подставляют в радианах):

$$K_{12} = \frac{1.15 - 0.1432 \cdot \delta_1}{\sin(0.5 \cdot \delta_1)} = (1.15 - 0.1432 \cdot 2,443) / \sin(0.5 \cdot 2,443) = 0,8514$$

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta_1 = 0.91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s-c)}} = 0.91 \cdot 400 / (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 2,38$$

Коэффициенты, учитывающие влияние ширины пояса опоры ( $\delta_1$  подставляют в радианах):

$$K_{10} = \max \left\{ \frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0.25 \right\} = \max \{ e^{-2,38} \cdot \sin(2,38) / 2,38; 0.25 \} = 0,25$$

$$\Phi_1 = - \frac{0.23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0.23 \cdot 0,07095 \cdot 0,5401 / (0,8514 \cdot 0,25) = (-0,04140)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{\text{мк}} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s-c)} = 4 \cdot 1,926 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot 1800^2 \cdot (16 - 3)) = 5,821 \text{ МПа}$$

$$\Phi_{21} = - \bar{\sigma}_{\text{мк}} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = -5,821 / (1,25 \cdot 167) = (-0,02789)$$

Изн. № подл.	19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	$\gamma = 1,05$ $D \sqrt{D}$
Коэффициенты, учитывающие влияние расстояния до днища ( $\delta_1$ подставляют в радианах):						
$K_{15} = \min \left\{ 1,0; \frac{0,8 \cdot \sqrt{\gamma + 6 \cdot \gamma}}{\delta_1} \right\} = \min \{ 1,0; (0,8 * 0,1657^{1/2} + 6 * 0,1657) / 2,443 \} = 0,5401$						
Коэффициенты, учитывающие влияние угла охвата опоры ( $\delta_1$ подставляют в радианах):						
$K_{12} = \frac{1,15 - 0,1432 \cdot \delta_1}{\sin(0,5 \cdot \delta_1)} = (1,15 - 0,1432 * 2,443) / \sin(0,5 * 2,443) = 0,8514$						
Параметр, определяемый шириной пояса опоры:						
$\beta_1 = 0,91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s - c)}} = 0,91 * 400 / (1800 * (16 - 3))^{1/2} = 2,38$						
Коэффициенты, учитывающие влияние ширины пояса опоры ( $\delta_1$ подставляют в радианах):						
$K_{10} = \max \left\{ \frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0,25 \right\} = \max \{ e^{-2,38} * \sin(2,38) / 2,38; 0,25 \} = 0,25$						
$\vartheta_1 = - \frac{0,23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0,23 * 0,07095 * 0,5401 / (0,8514 * 0,25) = (-0,04140)$						
Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:						
$\sigma_{\text{изг}} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = 4 * 1,926 \cdot 10^5 / (3,142 * 1800^2 * (16 - 3)) = 5,821 \text{ МПа}$						
$\vartheta_{21} = - \sigma_{\text{изг}} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = -5,821 / (1,25 * 167) = (-0,02789)$						
Изн. № подл.	19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	Изн. № подл.
						Лист
Е-3.00.00.000 РР						53
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

$$\vartheta_{22} = \left( \frac{p \cdot D}{4 \cdot (s - c)} - \frac{\sigma_{\text{max}}}{K_2 \cdot [\sigma]} \right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = [(-0,15) \cdot 1800 / (4 \cdot (16 - 3)) - 5,821] / (1,2 \cdot 167) = (-0,05496)$$

Примечание: при  $\vartheta_{2i} < 0$  в расчёте  $K_1$  знаки  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left( \frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right) + \sqrt{\left( \frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 1,488 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{22} \end{array} \right|$$

$$= 1,48$$

$$K_1 = \min\{1,488, 1,48\} = 1,48$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1,48 \cdot 1,25 \cdot 167 = 308,9 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0,7 \cdot [\sigma]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c) \cdot (s - c)}}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0,7 \cdot 308,9 \cdot (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} \cdot (16 - 3) / (0,25 \cdot 0,8514) = 2,02 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-2,38} \cdot \cos(2,38)) / 2,38 = 0,4484$$

$$K_{14} = \frac{1,45 - 0,43 \cdot \delta_1}{\sin(0,5 \cdot \delta_1)} = (1,45 - 0,43 \cdot 2,443) / \sin(0,5 \cdot 2,443) = 0,4249$$

$$K_{16} = 1 - \frac{0,65}{1 + (6 \cdot \gamma)^2} \cdot \frac{\pi}{\sqrt{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0,65 / (1 + (6 \cdot 0,1657)^2) \cdot [3,142 / (3 \cdot 2,443)]^{1/2} = 0,786$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0,6 \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{s - c}} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1} = 1 / [1 + 0,6 \cdot (1800 / (16 - 3))^{1/3} \cdot 400 / 1800 \cdot 2,443] = 0,3724$$

$$\vartheta_1 = - \frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 \cdot 0,4484 / [0,4249 \cdot 0,786 \cdot 0,3724 \cdot \sin(0,5 \cdot 2,443)] = (-2,033)$$

$$\vartheta_{21} = 0$$

$$\vartheta_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s - c) \cdot K_2 \cdot [\sigma]} = (-0,15) \cdot 1800 / (2 \cdot (16 - 3)) \cdot 1 / (1,25 \cdot 167) = (-0,04975)$$

Примечание: при  $\vartheta_{2i} < 0$  в расчёте  $K_1$  знаки  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left( \frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right) + \sqrt{\left( \frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 0,4177 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{22} \end{array} \right|$$

$$= 0,3972$$

$$K_1 = \min\{0,4177, 0,3972\} = 0,3972$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_3 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,3972 \cdot 1,25 \cdot 167 = 82,91 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

Инов. № подл.	19785.4	Подпись и дата					Лист 54
Инов. № дубл.		Подпись и дата					
Взам. инв. №		Подпись и дата					
Инов. № дубл.		Подпись и дата					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР		

$$K_{16} = 1 - \frac{1}{1 + (6 \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{3 \cdot \delta_1} = 1 - 0,65 / (1 + (6 \cdot 0,165)^2) \cdot \sqrt{3 \cdot 1,42 / (3 \cdot 2,443)} = 0,786$$
$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0,6 \cdot 3 \cdot \sqrt{\frac{D}{s - c}} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1} = 1 / [1 + 0,6 \cdot (1800 / (16 - 3))^{1/3} \cdot 400 / 1800 \cdot 2,443] = 0,3724$$
$$\vartheta_{21} = - \frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 \cdot 0,4484 / [0,4249 \cdot 0,786 \cdot 0,3724 \cdot \sin(0,5 \cdot 2,443)] = (-2,033)$$
$$\vartheta_{21} = 0$$
$$\vartheta_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s - c)} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = (-0,15) \cdot 1800 / (2 \cdot (16 - 3)) \cdot 1 / (1,25 \cdot 167) = (-0,04975)$$

Примечание: при  $\vartheta_{2i} < 0$  в расчёте  $K_i$  знаки  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 0,4177 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{2,2} \end{array} \right|$$
$$= 0,3972$$
$$K_1 = \min\{0,4177, 0,3972\} = 0,3972$$

Расчёт в точке 3:  
Предельное напряжение изгиба:  
 $[\sigma]_B = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,3972 \cdot 1,25 \cdot 167 = 82,91 \text{ МПа}$   
Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0.9 \cdot [\sigma_1]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} \cdot (s - c)}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0.9 \cdot 82,91 \cdot (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} \cdot (16 - 3) / (0,4249 \cdot 0,786 \cdot 0,3724) = 1,193 \cdot 10^6 \text{ H}$$

$$s_{ef} = (s - c) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{s_2}{s - c}\right)^2} = (16 - 3) \cdot (1 + (16 / (16 - 3))^2)^{1/2} = 20,62 \text{ mm}$$

**Расчет №2:**

Подкладной лист рассматривают как усиление стенки сосуда. Во всех формулах принимают  $b = 300$  мм,  $\delta_1 = 120^\circ$  (2,094 рад),  $s = s_{ef} + c = 20,62 + 3 = 23,62$  мм.

$$K_{13} = \frac{\max\left\{1.7 - \frac{2.1 \cdot \delta_1}{\pi}; 0\right\}}{\sin(0.5 \cdot \delta_1)} = \max\{1.7 - 2.1 \cdot 2.094 / 3.142; 0\} / \sin(0.5 \cdot 2.094) = 0,3464$$

Параметр, определяемый расстоянием до дна:

$$\gamma = 2.83 \cdot \frac{a}{b} \cdot \sqrt{\frac{s-c}{b}} = 2.83 \cdot 1,24 \cdot 10^3 / 1800 \cdot ((23,62 - 3) / 1800)^{1/2} = 0,2086$$

Коэффициенты, учитывающие влияние расстояния до днища ( $\delta_1$  подставляются в радианах):

$$K_{15} = \min \left\{ 1,0; \frac{0,8 \cdot \sqrt{\gamma} + 6 \cdot \gamma}{\delta_1} \right\} = \min \{ 1,0; (0,8 * 0,2086^{1/2} + 6 * 0,2086) / 2,094 \} = 0,7722$$

Коэффициенты, учитывающие влияние угла охвата опоры ( $\delta_1$  подставляют в радианах):

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

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta_1 = 0.91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s - c)}} = 0.91 \cdot 300 / (1800 \cdot (23,62 - 3))^{1/2} = 1,417$$

Коэффициенты, учитывающие влияние ширины пояса опоры ( $\delta_1$  подставляют в радианах):

$$K_{10} = \max \left\{ \frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0.25 \right\} = \max \{ e^{-1.417} * \sin(1.417) / 1.417; 0.25 \} = 0.25$$

$$g_1 = - \frac{0,23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0,23 * 0,3464 * 0,7722 / (0,9816 * 0,25) = (-0,2507)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = 4 \cdot 1,926 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot 1800^2 \cdot (23,62 - 3)) = 3,671 \text{ МПа}$$

$$g_{21} = -\bar{\sigma}_{\max} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot \sigma} = -3,671 / (1,25 \cdot 167) = (-0,01759)$$

$$g_{22} = \left( \frac{p \cdot D}{4 \cdot (s - t)} - \bar{\sigma}_{\max} \right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot \sigma} = [(-0,15) * 1800 / (4 * (23,62 - 3)) - 3,671] / (1,2 * 167) = (-0,03466)$$

Примечание: при  $g_{21} < 0$  в расчёте  $K_1$  знаки  $g_1$  и  $g_2$  меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 1,318 \quad \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21}$$

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$K_{12} = \frac{\sin(0.5 \cdot \delta_1)}{\sin(0.5 \cdot \delta_1)} = (1.15 - 0.1432 \cdot 2.094) / \sin(0.5 \cdot 2.094) = 0.9816$
					<p>Параметр, определяемый шириной пояса опоры:</p> $\beta_1 = 0.91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s - c)}} = 0.91 \cdot 300 / (1800 \cdot (23.62 - 3))^{1/2} = 1.417$ <p>Коэффициенты, учитывающие влияние ширины пояса опоры (<math>\delta_1</math> подставляют в радианах):</p> $K_{10} = \max \left\{ \frac{e^{-\beta_1 \cdot \sin \beta_1}}{\beta_1}; 0.25 \right\} = \max \{ e^{-1.417 \cdot \sin(1.417)} / 1.417; 0.25 \} = 0.25$ $\varphi_1 = - \frac{0.23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0.23 \cdot 0.3464 \cdot 0.7722 / (0.9816 \cdot 0.25) = (-0.2507)$ <p>Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:</p> $\bar{\sigma}_{\max} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = 4 \cdot 1.926 \cdot 10^5 / (3.142 \cdot 1800^2 \cdot (23.62 - 3)) = 3.671 \text{ МПа}$ $\varphi_{21} = - \bar{\sigma}_{\max} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = -3.671 / (1.25 \cdot 167) = (-0.01759)$ $\varphi_{22} = \left( \frac{p \cdot D}{4 \cdot (s - c)} - \bar{\sigma}_{\max} \right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = [(-0.15) \cdot 1800 / (4 \cdot (23.62 - 3)) - 3.671] / (1.2 \cdot 167) = (-0.03466)$ <p>Примечание: при <math>\varphi_{2i} &lt; 0</math> в расчёте <math>K_1</math> знаки <math>\varphi_1</math> и <math>\varphi_2</math> меняют на противоположные</p> $K_1 = \frac{1 - \varphi_2^2}{\left( \frac{1}{3} + \varphi_1 \cdot \varphi_2 \right) + \sqrt{\left( \frac{1}{3} + \varphi_1 \cdot \varphi_2 \right)^2 + (1 - \varphi_2^2) \cdot \varphi_1}} = 1.318 \quad \left  \begin{array}{l} \text{при } \varphi_2 = \varphi_{21} \end{array} \right $
Инв. № инв.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p>Изм. Лист № докум. Подп. Дата</p>

$$= 1,304$$

$$\left| \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{2,2} \right|$$

$$K_1 = \min\{ 1,318, 1,304 \} = 1,304$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1,304 \cdot 1,25 \cdot 167 = 272,2 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0,7 \cdot [\sigma]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c) \cdot (s - c)}}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0,7 \cdot 272,2 \cdot (1800 \cdot (23,62 - 3))^{1/2} \cdot (23,62 - 3) / (0,25 \cdot 0,9816) = 3,083 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-1,417} \cdot \cos(1,417)) / 1,417 = 0,6795$$

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

$$K_{16} = 1 - \frac{0,65}{1 + (6 \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0,65 / (1 + (6 \cdot 0,2086)^2) \cdot [3,142 / (3 \cdot 2,094)]^{1/2} = 0,821$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0,6 \cdot 3 \sqrt{\frac{D}{s - c} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1}} = 1 / [1 + 0,6 \cdot (1800 / (23,62 - 3))^{1/3} \cdot 300 / 1800 \cdot 2,094] = 0,5184$$

$$\vartheta_1 = - \frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 \cdot 0,6795 / [0,6344 \cdot 0,821 \cdot 0,5184 \cdot \sin(0,5 \cdot 2,094)] = (-1,54)$$

$$\vartheta_{21} = 0$$

$$\vartheta_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s - c)} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = (-0,15) \cdot 1800 / (2 \cdot (23,62 - 3)) \cdot 1 / (1,25 \cdot 167) = (-0,03137)$$

Примечание: при  $\vartheta_{2i} < 0$  в расчёте  $K_1$  знаки  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left( \frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right) + \sqrt{\left( \frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right)^2 + \left( 1 - \vartheta_2^2 \right) \cdot \vartheta_1}} = 0,5238$$

$$= 0,5077$$

$$K_1 = \min\{ 0,5238, 0,5077 \} = 0,5077$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_3 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,5077 \cdot 1,25 \cdot 167 = 106 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0,9 \cdot [\sigma]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c) \cdot (s - c)}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0,9 \cdot 106 \cdot (1800 \cdot (23,62 - 3))^{1/2} \cdot (23,62 - 3) / (0,6344 \cdot 0,821 \cdot 0,5184) = 1,403 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Условие прочности:

$$F \leq [F] = \min\{ [F]_{2(1)}, [F]_{3(1)}, [F]_{2(2)}, [F]_{3(2)} \}$$

$$[F] = 1,193 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$2,794 \cdot 10^5 \text{ Н} \leq 1,193 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

**Проверка условия устойчивости**

Изн.	№ подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19785.4					

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР	Лист
						56



Эффективное осевое усилие от местных мембранных напряжений:

$$F_e = F \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{D}{(s-c)}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} = 2,794 \cdot 10^5 \cdot 3,142 / 4 \cdot (1800 / (16 - 3))^{1/2} \cdot 0,07095 \cdot 0,5401 = 9,893 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

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

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{F_e}{[F]} + \frac{M}{[M]_{уст}} + \left( \frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0,15 / 0,172 + 9,893 \cdot 10^4 / 1,162 \cdot 10^7 + 1,926 \cdot 10^5 / 5,302 \cdot 10^6 + (2,581 \cdot 10^5 / 2,7 \cdot 10^6)^2 = 0,9263$$

$$0,9263 \leq 1,0$$

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, $\xi$ :	1
Плотность жидкости, $\rho_{ж}$ :	$1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$
Расчётное внутреннее избыточное давление, действующее в элементе над опорой, p:	0,258 МПа

Изгибающий момент над опорой, M:	$6,876 \cdot 10^4 \text{ Н м}$
Опорное усилие, F:	$1,676 \cdot 10^5 \text{ Н}$
Поперечное усилие в сечении оболочки над опорой, Q:	$1,002 \cdot 10^5 \text{ Н}$

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

Допускаемое наружное давление, [p]:	0,2495 МПа
Допускаемый изгибающий момент, $[M]_{уст}$ :	$8,553 \cdot 10^6 \text{ Н м}$
Допускаемая осевое сжимающее усилие, [F]:	$1,868 \cdot 10^7 \text{ Н}$
Допускаемая поперечное усилие, [Q]:	$4,282 \cdot 10^6 \text{ Н}$

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

### Опора с подкладным листом

Проверка условия:  $b_2 \geq K_{19} \cdot D + 1,5 \cdot b$

$$K_{19} = \frac{5}{6 \cdot 3 \cdot \sqrt{\frac{D}{s-c}} \cdot b_1} = 5 / [6 \cdot (1800 / (16 - 3))^{1/3} \cdot 2,094] = 0,07691$$

Подпись и дата		Инов. № дубл.		Взам. инв. №		Подпись и дата		Инов. № подл.	19785.4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР				Лист
					57				

$$K_{19} \cdot D + 1.5 \cdot b = 0,07691 \cdot 1800 + 1.5 \cdot 300 = 588,4 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, проводятся два расчёта

### Расчёт №1:

Подкладной лист рассматривают как седловую опору шириной  $b_2$  с углом охвата  $\delta_2$ . Во всех формулах принимают  $b = b_2 = 400 \text{ мм}$ ,  $\delta_1 = \delta_2 = 140^\circ (2,443 \text{ рад})$

$$K_{13} = \frac{\max \left\{ 1.7 - \frac{2.1 \cdot \delta_1}{\pi}; 0 \right\}}{\sin(0.5 \cdot \delta_1)} = \frac{\max \{ 1.7 - 2.1 \cdot 2,443 / 3,142; 0 \} / \sin(0.5 \cdot 2,443)}{ } = 0,07095$$

Параметр, определяемый расстоянием до днища:

$$\gamma = 2.83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s-c}{D}} = 2.83 \cdot 1,24 \cdot 10^3 / 1800 \cdot ((16-3) / 1800)^{1/2} = 0,1657$$

Коэффициенты, учитывающие влияние расстояния до днища ( $\delta_1$  подставляют в радианах):

$$K_{15} = \min \left\{ 1.0; \frac{0.8 \cdot \sqrt{\gamma} + 6 \cdot \gamma}{\delta_1} \right\} = \min \{ 1.0; (0.8 \cdot 0,1657^{1/2} + 6 \cdot 0,1657) / 2,443 \} = 0,5401$$

Коэффициенты, учитывающие влияние угла охвата опоры ( $\delta_1$  подставляют в радианах):

$$K_{12} = \frac{1.15 - 0.1432 \cdot \delta_1}{\sin(0.5 \cdot \delta_1)} = (1.15 - 0.1432 \cdot 2,443) / \sin(0.5 \cdot 2,443) = 0,8514$$

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta_1 = 0.91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s-c)}} = 0.91 \cdot 400 / (1800 \cdot (16-3))^{1/2} = 2,38$$

Коэффициенты, учитывающие влияние ширины пояса опоры ( $\delta_1$  подставляют в радианах):

$$K_{10} = \max \left\{ \frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0.25 \right\} = \max \{ e^{-2,38} \cdot \sin(2,38) / 2,38; 0.25 \} = 0,25$$

$$\vartheta_1 = - \frac{0.23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0.23 \cdot 0,07095 \cdot 0,5401 / (0,8514 \cdot 0,25) = (-0,04140)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{\text{мк}} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s-c)} = 4 \cdot 6,876 \cdot 10^4 / (3,142 \cdot 1800^2 \cdot (16-3)) = 2,079 \text{ МПа}$$

$$\vartheta_{21} = - \bar{\sigma}_{\text{мк}} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = -2,079 / (1,05 \cdot 272,7) = (-0,007258)$$

$$\vartheta_{22} = \left( \frac{p \cdot D}{4 \cdot (s-c)} - \bar{\sigma}_{\text{мк}} \right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = [0,258 \cdot 1800 / (4 \cdot (16-3)) - 2,079] / (1 \cdot 272,7) = 0,02512$$

Примечание: при  $\vartheta_{21} < 0$  в расчёте  $K_1$  знаки  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left( \frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right) + \sqrt{\left( \frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 1,493 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{22} \end{array} \right|$$

$$= 1,498$$

$$K_1 = \min \{ 1,493, 1,498 \} = 1,493$$

Изн. № подл.	19785.4	Подпись и дата		Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР	
						Лист
						58

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1,493 \cdot 1,05 \cdot 272,7 = 427,5 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0,7 \cdot [\sigma]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s-c) \cdot (s-c)}}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0,7 \cdot 427,5 \cdot (1800 \cdot (16-3))^{1/2} \cdot (16-3) / (0,25 \cdot 0,8514) = 2,796 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-2,38} \cdot \cos(2,38)) / 2,38 = 0,4484$$

$$K_{14} = \frac{1,45 - 0,43 \cdot \delta_1}{\sin(0,5 \cdot \delta_1)} = (1,45 - 0,43 \cdot 2,443) / \sin(0,5 \cdot 2,443) = 0,4249$$

$$K_{16} = 1 - \frac{0,65}{1 + (6 \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0,65 / (1 + (6 \cdot 0,1657)^2) \cdot [3,142 / (3 \cdot 2,443)]^{1/2} = 0,786$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0,6 \cdot 3 \sqrt{\frac{D}{s-c} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1}} = 1 / [1 + 0,6 \cdot (1800 / (16-3))^{1/3} \cdot 400 / 1800 \cdot 2,443] = 0,3724$$

$$\vartheta_1 = -\frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 \cdot 0,4484 / [0,4249 \cdot 0,786 \cdot 0,3724 \cdot \sin(0,5 \cdot 2,443)] = (-2,033)$$

$$\vartheta_{21} = 0$$

$$\vartheta_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s-c)} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = 0,258 \cdot 1800 / (2 \cdot (16-3)) \cdot 1 / (1,05 \cdot 272,7) = 0,06237$$

Примечание: при  $\vartheta_{2i} < 0$  в расчёте  $K_1$  знаки  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 0,4177 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{22} \end{array} \right|$$

$$= 0,4434$$

$$K_1 = \min\{0,4177, 0,4434\} = 0,4177$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_3 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,4177 \cdot 1,05 \cdot 272,7 = 119,6 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0,9 \cdot [\sigma]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s-c) \cdot (s-c)}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0,9 \cdot 119,6 \cdot (1800 \cdot (16-3))^{1/2} \cdot (16-3) / (0,4249 \cdot 0,786 \cdot 0,3724) = 1,721 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$s_{ef} = (s-c) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{s_2}{s-c}\right)^2} = (16-3) \cdot (1 + (16 / (16-3))^2)^{1/2} = 20,62 \text{ мм}$$

### Расчёт №2:

Подкладной лист рассматривают как усиление стенки сосуда. Во всех формулах принимают  $b = 300 \text{ мм}$ ,  $\delta_1 = 120^\circ$  (2,094 рад),  $s = s_{ef} + c = 20,62 + 3 = 23,62 \text{ мм}$ .

Изн. № подл.	19785.4	Подпись и дата		Взам. инв. №		Изн. № дубл.		Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР				Лист
					59				

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

Параметр, определяемый расстоянием до днища:

$$\gamma = 2.83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s-c}{D}} = 2.83 * 1.24 \cdot 10^3 / 1800 * ((23.62 - 3) / 1800)^{1/2} = 0.2086$$

Коэффициенты, учитывающие влияние расстояния до днища ( $\delta_1$  подставляют в радианах):

$$K_{15} = \min\left\{1.0; \frac{0.8 \cdot \sqrt{\gamma + 6 \cdot \gamma}}{\delta_1}\right\} = \min\{1.0; (0.8 * 0.2086^{1/2} + 6 * 0.2086) / 2.094\} = 0.7722$$

Коэффициенты, учитывающие влияние угла охвата опоры ( $\delta_1$  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:

$$\beta_1 = 0.91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s-c)}} = 0.91 * 300 / (1800 * (23.62 - 3))^{1/2} = 1.417$$

Коэффициенты, учитывающие влияние ширины пояса опоры ( $\delta_1$  подставляют в радианах):

$$K_{10} = \max\left\{\frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0.25\right\} = \max\{e^{-1.417} * \sin(1.417) / 1.417; 0.25\} = 0.25$$

$$\Phi_1 = -\frac{0.23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0.23 * 0.3464 * 0.7722 / (0.9816 * 0.25) = (-0.2507)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{\text{мк}} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s-c)} = 4 * 6.876 \cdot 10^4 / (3.142 * 1800^2 * (23.62 - 3)) = 1.311 \text{ МПа}$$

$$\Phi_{21} = -\bar{\sigma}_{\text{мк}} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = -1.311 / (1.05 * 272.7) = (-0.004577)$$

$$\Phi_{22} = \left(\frac{p \cdot D}{4 \cdot (s-c)} - \bar{\sigma}_{\text{мк}}\right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = [0.258 * 1800 / (4 * (23.62 - 3)) - 1.311] / (1 * 272.7) = 0.01584$$

Примечание: при  $\Phi_{2i} < 0$  в расчёте  $K_1$  знаки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \Phi_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \Phi_1 \cdot \Phi_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \Phi_1 \cdot \Phi_2\right)^2 + (1 - \Phi_2^2) \cdot \Phi_1}} = 1.329 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \Phi_2 = \Phi_{21} \\ \text{при } \Phi_2 = \Phi_{22} \end{array} \right|$$

$$= 1.345$$

$$K_1 = \min\{1.329, 1.345\} = 1.329$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1.329 * 1.05 * 272.7 = 380.5 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0.7 \cdot [\sigma]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s-c)} \cdot (s-c)}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0.7 * 380.5 * (1800 * (23.62 - 3))^{1/2} * (23.62 - 3) / (0.25 * 0.9816) = 4.311 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Инов. № подл. 19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Е-3.00.00.000 РР					Лист
										60
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-1,417} \cdot \cos(1,417)) / 1,417 = 0,6795$$

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

$$K_{16} = 1 - \frac{0,65}{1 + (\delta \cdot \gamma)^2} \cdot \frac{\pi}{\sqrt{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0,65 / (1 + (6 \cdot 0,2086)^2) \cdot [3,142 / (3 \cdot 2,094)]^{1/2} = 0,821$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0,6 \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{s-c} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1}} = 1 / [1 + 0,6 \cdot (1800 / (23,62 - 3))^{1/3} \cdot 300 / 1800 \cdot 2,094] = 0,5184$$

$$\vartheta_1 = - \frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 \cdot 0,6795 / [0,6344 \cdot 0,821 \cdot 0,5184 \cdot \sin(0,5 \cdot 2,094)] = (-1,54)$$

$$\vartheta_{21} = 0$$

$$\vartheta_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s-c) \cdot K_2 \cdot [\sigma]} = 0,258 \cdot 1800 / (2 \cdot (23,62 - 3)) \cdot 1 / (1,05 \cdot 272,7) = 0,03933$$

Примечание: при  $\vartheta_{2i} < 0$  в расчёте  $K_1$  знаки  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 0,5238 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{2,2} \end{array} \right|$$

$$= 0,5439$$

$$K_1 = \min\{0,5238, 0,5439\} = 0,5238$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_B = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,5238 \cdot 1,05 \cdot 272,7 = 150 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0,9 \cdot [\sigma]_B \cdot \sqrt{D \cdot (s-c)} \cdot (s-c)}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0,9 \cdot 150 \cdot (1800 \cdot (23,62 - 3))^{1/2} \cdot (23,62 - 3) / (0,6344 \cdot 0,821 \cdot 0,5184) = 1,986 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Условие прочности:

$$F \leq [F] = \min\{[F]_{2[1]}, [F]_{3[1]}, [F]_{2[2]}, [F]_{3[2]}\}$$

$$[F] = 1,721 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$1,676 \cdot 10^5 \text{ Н} \leq 1,721 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

### Проверка условия устойчивости

Эффективное осевое усилие от местных мембранных напряжений:

$$F_e = F \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{D}{(s-c)}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} = 1,676 \cdot 10^5 \cdot 3,142 / 4 \cdot (1800 / (16 - 3))^{1/2} \cdot 0,07095 \cdot 0,5401 = 5,936 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

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

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

Инов. № подл.	19785.4
Подпись и дата	
Взам. инв. №	
Инов. № дубл.	
Подпись и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР	Лист
						61

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{F_e}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{уст}}} + \left( \frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0 / 0,2495 + 5,936 \cdot 10^4 / 1,868 \cdot 10^7 + 6,876 \cdot 10^4 / 8,553 \cdot 10^6 + (1,002 \cdot 10^5 / 4,282 \cdot 10^6)^2 = 0,01176$$

$$0,01176 \leq 1.0$$

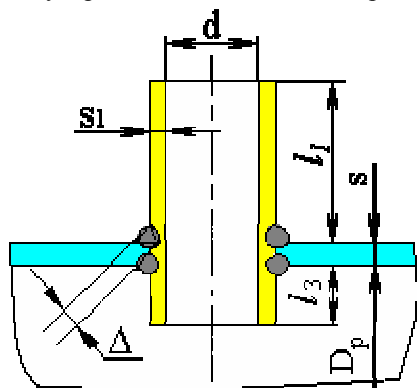
Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Инв. № подл.	Подпись и дата				Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
19785.4							
					Е-3.00.00.000 РР		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист		
					62		

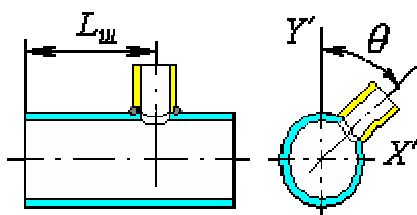
Штуцер МН DN800

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



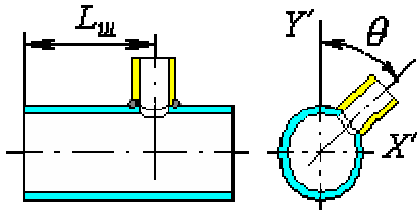
Материал несущего элемента: 09Г2С  
Толщина стенки несущего элемента, s: 16 мм  
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, с: 3 мм  
Материал штуцера: 09Г2С  
Внутренний диаметр штуцера, d: 800 мм  
Толщина стенки штуцера, s<sub>1</sub>: 16 мм  
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), с<sub>s</sub>: 3 мм  
Длина штуцера, l<sub>1</sub>: 1905 мм



Смещение штуцера, L<sub>ш</sub>: 3440 мм  
Угол поворота штуцера, θ: 0 °  
Длина внутр. части штуцера, l<sub>3</sub>: 0 мм  
Прибавка на коррозию, с<sub>s1</sub>: 0 мм  
Расчётные параметры размещения штуцера:  
Ближайший штуцер

Исх. № подл.	Исх. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата	
19785.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Е-3.00.00.000 РР				Лист
				63

Материал штуцера:	09Г2С
Внутренний диаметр штуцера, d:	800 мм
Толщина стенки штуцера, s <sub>1</sub> :	16 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c <sub>s</sub> :	3 мм
Длина штуцера, l <sub>1</sub> :	1905 мм



Смещение штуцера, L <sub>ш</sub> :	3440 мм
Угол поворота штуцера, ϑ:	0 °
Длина внутр. части штуцера, l <sub>3</sub> :	0 мм
Прибавка на коррозию, c <sub>s1</sub> :	0 мм
Расчётные параметры размещения штуцера:	
Ближайший штуцер	





$$D_p = D = 1800 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 0,3425 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 800 + 2 \cdot 3 = 806 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left( \frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((16 - 3) / 0,3425 - 0,8) \cdot (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 1,137 \cdot 10^4 \text{ мм}$$

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

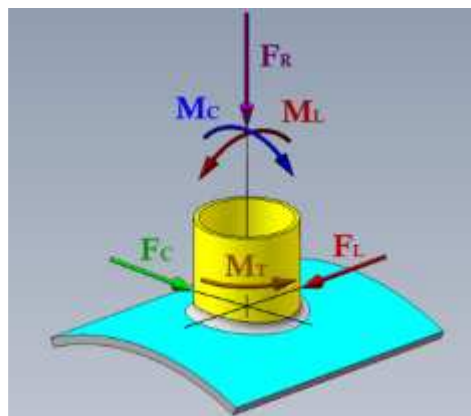
#### Условие взаимного влияния штуцеров

Если расстояние между наружными поверхностями ближайших штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} + (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 305,9 \text{ мм}$$

**Условие выполнено - Отверстие считается одиночным**

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



Радиальная нагрузка,  $F_R$ : 8684 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:

$$s_s = s - c = 16 - 3 = 13 \text{ мм}$$

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c = 1800 + 16 + 3 = 1819 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_s = 800 + 16 + 3 = 819 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_s}} = 819 / (1819 \cdot 13)^{1/2} = 5,326$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 400 \text{ мм}$$

Средний радиус обечайки у отверстия:

Изн.	№ подл.	19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР	
						Лист 65

$$R_c = \frac{D_c}{2} = 1819 / 2 = 909,5 \text{ mm}$$

Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \frac{|p|}{|p|} = |0,07000 / 1,277| = 0,05482$$

Условие прочности:  $\Phi_p \leq 1$

$0,05482 \leq 1.0$ . Условие прочности выполнено

Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$\mathbf{F}_z = -\mathbf{F}_R = -8684 \text{ H}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s - c)}} = 819 / (1819 \cdot (16 - 3)^{1/2}) = 5,326$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 5,326 + 0,005196 \cdot 5,326^2 + (-0,001406) \cdot 5,326^3 + 0 \cdot 5,326^4 = 5,606$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при отсутствии накладного кольца ( $\lambda_c = 5,326$ ):

$$[F_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1.81\} = 184 \cdot (16 - 3)^2 \cdot \max\{5,606; 1.81\} = 1,743 \cdot 10^5 \text{ H}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{F_x} \right| = |(-8684) / 1,743 \cdot 10^5| = 0,04982$$

Условие прочности:  $\Phi_r \leq 1$

$0,04982 \leq 1.0$ . Условие прочности выполнено

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_y = M_c + F_c \cdot l_1 = 0 + 0 \cdot 1905 = 0 \text{ H m}$$

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_y = M_L + F_L \cdot l_1 = 0 + 0 \cdot 1905 = 0 \text{ H}_M$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 5,326 + 0,1589 \cdot 5,326^2 + (-0,02142) \cdot 5,326^3 + 0,001035 \cdot 5,326^4 = 6,971$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ( $\lambda_c = 5,326$ ):

$$[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 184 \cdot (16 - 3)^2 \cdot 819 / 4 \cdot \max\{6,971; 4.9\} = 4,438 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 30,13$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ( $\lambda_c = 5,326$ ):

$$[M_y] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 184 \cdot (16 - 3)^2 \cdot 819 / 4 \cdot \max\{30, 13; 4.9\} = 1,918 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{M_x}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{M_y}\right)^2} = ((0/4,438 \cdot 10^4)^2 + (0/1,918 \cdot 10^5)^2)^{1/2} = 0$$

Условие прочности:  $\Phi_n \leq 1$

$0 \leq 1.0$ . Условие прочности выполнено

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right|, \left|\Phi_z\right|, \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z\right|\right)^2 + \Phi_b^2} = \left(\max(|0,05482/1 + (-0,04982)|; |(-0,04982)|; |0,05482/1 - 0.2 \cdot (-0,04982)|)^2 + 0^2\right)^{1/2} = 0,06478$$

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:
					$M_y = M_L + F_L \cdot l_1 = 0 + 0 \cdot 1905 = 0 \text{ Нм}$
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 5,326 + 0,1589 \cdot 5,326^2 + (-0,02142) \cdot 5,326^3 + 0,001035 \cdot 5,326^4 = 6,971$
					<p>Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца (<math>\lambda_c = 5,326</math>):</p> $[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 184 \cdot (16 - 3)^2 \cdot 819 / 4 \cdot \max\{6,971; 4.9\} = 4,438 \cdot 10^4 \text{ Нм}$
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 30,13$
					<p>Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца (<math>\lambda_c = 5,326</math>):</p> $[M_y] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 184 \cdot (16 - 3)^2 \cdot 819 / 4 \cdot \max\{30,13; 4.9\} = 1,918 \cdot 10^5 \text{ Нм}$
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p>Прочность от действия изгибающих моментов:</p> $\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((0 / 4,438 \cdot 10^4)^2 + (0 / 1,918 \cdot 10^5)^2)^{1/2} = 0$
					<p>Условие прочности: <math>\Phi_b \leq 1</math></p> <p><math>0 \leq 1.0</math>. <b>Условие прочности выполнено</b></p> <p>Прочность от совместного действия нагрузок:</p> $\sqrt{\left[\max\left(\left \frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right ; \left \Phi_z\right ; \left \frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z\right \right)\right]^2 + \Phi_b^2} = ([\max( 0,05482 / 1 + (-0,04982) ;  (-0,04982) ;  0,05482 / 1 - 0.2 \cdot (-0,04982) )]^2 + 0^2)^{1/2} = 0,06478$
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<div> <div> <div>19785.4</div> <div>Е-3.00.00.000 PP</div> </div> <div> <div>Лист</div> <div>66</div> </div> </div>
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

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

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

$0,06478 \leq 1,0$ . **Условие прочности выполнено**

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = \frac{0,07000 \cdot (800 + 16)}{(3,142 \cdot (800 + 16)^2 \cdot (16 - 3))} + \frac{4 \cdot (0^2 + 0^2)^{1/2}}{0 / (3,142 \cdot (800 + 16) \cdot (16 - 3))} + \frac{0}{(3,142 \cdot (800 + 16) \cdot (16 - 3))} = 1,098 \text{ МПа}$$

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

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

$1,098 \text{ МПа} \leq 184 \text{ МПа}$ . **Условие прочности выполнено**

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0 / 5,841 + (0^2 + 0^2)^{1/2} / 1,216 \cdot 10^6 + |(-8684)| / 4,698 \cdot 10^6 = 0,001848$$

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

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

$0,001848 \leq 1,0$ . **Условие устойчивости выполнено**

## Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

### Условия нагружения:

Расчётная температура,  $T$ :  $180 \text{ }^\circ\text{C}$

Расчётное наружное избыточное давление,  $p$ :  $0,15 \text{ МПа}$

## Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

### Свойства материала элемента, несущего штуцер

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

$[\sigma] = 167 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре  $180 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$E = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

### Свойства материала штуцера

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

$[\sigma]_1 = 167 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре  $180 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$E_1 = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 - p} = 0,15 \cdot (800 + 2 \cdot 3) / (2 \cdot 167 - 0,15) = 0,3621 \text{ мм}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$B_1 = \min \left\{ 1,0, 9,45 \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \sqrt{\frac{d}{100 \cdot (s_1 - c_s)}} \right\} = \min \{ 1,0, 9,45 \cdot 800 / 1905 \cdot (800 / (100 \cdot (16 - 3)))^{1/2} \} = 1$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия устойчивости:

Подпись и дата		Изн. № дубл.		Взам. инв. №		Подпись и дата		Изн. № подл.	19785.4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР				Лист
									67

$$[p]_e = \frac{20.8 \cdot 10^{-6} E_1}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s_1 - c_s)}{d} \right]^{2.5} = 20.8 \cdot 10^{-6} \cdot 1.83 \cdot 10^5 \cdot 800 / (2.4 \cdot 1 \cdot 1905) \cdot (100 \cdot (16 - 3) / 800)^{2.5} = 2,242 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия прочности:

$$[p]_{\pi} = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + (s_1 - c_s)} = 2 \cdot 167 \cdot (16 - 3) / (800 + 16 - 3) = 5,341 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[p]_{\pi}}{[p]_e} \right)^2}} = 5,341 / (1 + (5,341 / 2,242)^2)^{1/2} = 2,067 \text{ МПа}$$

2,067 МПа  $\geq$  0,15 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 1800 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 800 + 2 \cdot 3 = 806 \text{ мм}$$

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1.25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 1905; 1.25 \cdot ((800 + 2 \cdot 3) \cdot (16 - 3))^{1/2} \} = 128 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений:

- для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1.0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1.0, 167 / 167 \} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \{ l_3; 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \} = \min \{ 0; 0.5 \cdot ((800 + 2 \cdot 3) \cdot (16 - 3 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 153 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 3084 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 153 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 61,19 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (128 \cdot (16 - 3) \cdot 1 + 0 \cdot 16 \cdot 0 + 0 \cdot (0 - 2 \cdot 3) \cdot 1) / (153 \cdot (16 - 3))] / [1 + 0.5 \cdot (806 - 61,19) / 153 + 1 \cdot (800 + 2 \cdot 3) / 1800 \cdot 128 / 153] \} = 0,4821$$

$$= 0,4821$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (16 - 3) \cdot 167 \cdot 0,4821 / [1800 + (16 - 3) \cdot 0,4821] = 1,159 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление:

Инов. № подл.	19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 PP
					Лист 68

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_p}{[p]_E}\right)^2}} = 1,159 / (1 + (1,159 / 0,1724)^2)^{1/2} = 0,1705 \text{ МПа}$$

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

#### Условие взаимного влияния штуцеров

Если расстояние между наружными поверхностями ближайших штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} + (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 305,9 \text{ мм}$$

**Условие выполнено - Отверстие считается одиночным**

Допускаемое давление  $[p] = 0,1705 \text{ МПа}$

$0,1705 \text{ МПа} \geq 0,15 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

### Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

#### Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура,  $T$ : 20 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление,  $p$ : 0,2402 МПа

### Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

#### Свойства материала элемента, несущего штуцер

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

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,2402 \cdot (800 + 2 \cdot 3) / (2 \cdot 272,7 \cdot 1 - 0,2402) = 0,355 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 272,7 \cdot 1 \cdot (16 - 3) / (800 + 16 + 3) = 8,658 \text{ МПа}$$

$8,658 \text{ МПа} \geq 0,2402 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 1800 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 0,7929 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 800 + 2 \cdot 3 = 806 \text{ мм}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата
19785.4	
Изм.	Лист
№ докум.	Подп.
Дата	

Е-3.00.00.000 РР

Лист

69

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left( \frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 * ((16 - 3) / 0,7929 - 0.8) * (1800 * (16 - 3))^{1/2} = 4771 \text{ мм}$$

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

**Условие взаимного влияния штуцеров**

Если расстояние между наружными поверхностями ближайших штуцеров удовлетворяет условию:

$$b \geq \sqrt{D_p^I \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p^{II} \cdot (s - c)} = (1800 * (16 - 3))^{1/2} + (1800 * (16 - 3))^{1/2} = 305,9 \text{ мм}$$

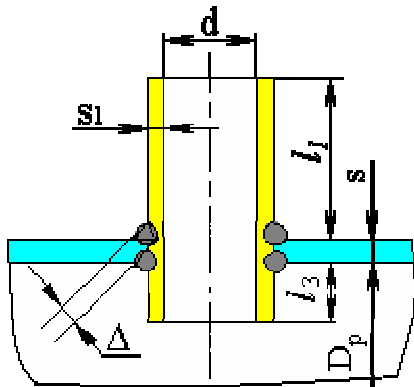
**Условие выполнено - Отверстие считается одиночным**

Инв. № подл. 19785.4	Подпись и дата		Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР	Лист
						70

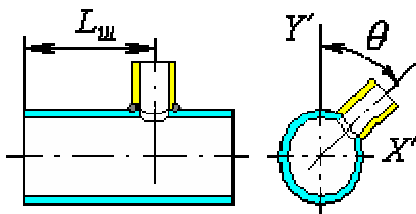
# Штуцер A1, A2 DN700

## Исходные данные

Элемент: Штуцер A1, A2 DN700  
Условное обозначение (метка) Штуцер A2  
Элемент, несущий штуцер: Обечайка цилиндрическая  
Тип элемента, несущего штуцер: Обечайка цилиндрическая  
Тип штуцера: Проходящий без укрепления



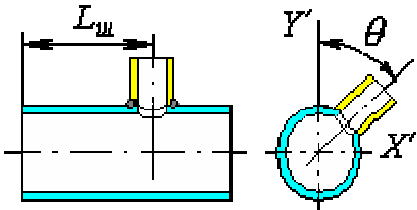
Материал несущего элемента: 09Г2С  
Толщина стенки несущего элемента, s: 16 мм  
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, с: 3 мм  
Материал штуцера: 09Г2С  
Внутренний диаметр штуцера, d: 692 мм  
Толщина стенки штуцера, s<sub>1</sub>: 16 мм  
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), с<sub>s</sub>: 3 мм  
Длина штуцера, l<sub>1</sub>: 1940 мм



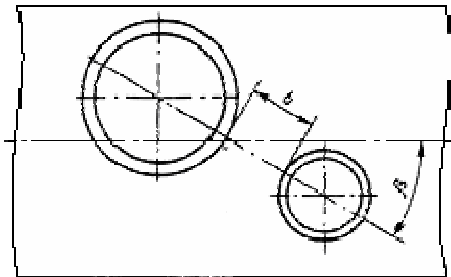
Смещение штуцера, L<sub>ш</sub>: 5740 мм  
Угол поворота штуцера,  $\vartheta$ : 0 °  
Длина внутр. части штуцера, l<sub>3</sub>: 0 мм  
Прибавка на коррозию, с<sub>s1</sub>: 0 мм  
Расчётные параметры размещения штуцера:  
Ближайший штуцер

Исх. № подл.	Исх. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата	
19785.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Е-3.00.00.000 РР				Лист
				71

Материал штуцера:	09Г2С
Внутренний диаметр штуцера, d:	692 мм
Толщина стенки штуцера, s <sub>1</sub> :	16 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c <sub>s</sub> :	3 мм
Длина штуцера, l <sub>1</sub> :	1940 мм



Смещение штуцера, L <sub>ш</sub> :	5740 мм
Угол поворота штуцера, ϑ:	0 °
Длина внутр. части штуцера, l <sub>3</sub> :	0 мм
Прибавка на коррозию, c <sub>s1</sub> :	0 мм
Расчётные параметры размещения штуцера:	
Ближайший штуцер	



Название штуцера: Штуцер I3 DN150

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 254 мм

Угол  $\beta$ : 0 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$$\phi_1 = 1$$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$$\varphi = 1$$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

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

## Расчёт в рабочих условиях

### Условия нагружения:

Расчётная температура, Т: 70 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,07000 МПа

## Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

### Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре  $T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рабочие условия):

$[\sigma] = 184 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 70 °С:

$$E = 1,94 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

### Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре  $T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рабочие условия):

$$[\sigma]_1 = 184 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 70 °С:

$$E_1 = 1,94 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_{bp} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma_h \cdot \varphi_1 - p]} = 0,07000 \cdot (692 + 2 \cdot 3) / (2 \cdot 184 \cdot 1 - 0,07000) = 0,1328 \text{ mm}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_\varepsilon)}{d + s_1 + c_\varepsilon} = 2 * 184 * 1 * (16 - 3) / (692 + 16 + 3) = 6,729 \text{ МПа}$$

$$6,729 \text{ МПа} \geq 0,07000 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

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

## Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

### Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 70 °С (рабочие условия):

[σ] = 184 МПа

Модуль продольной упругости при температуре 70 °С:

E = 1,94·10<sup>5</sup> МПа

### Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 70 °С (рабочие условия):

[σ]<sub>1</sub> = 184 МПа

Модуль продольной упругости при температуре 70 °С:

E<sub>1</sub> = 1,94·10<sup>5</sup> МПа

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,07000 \cdot (692 + 2 \cdot 3) / (2 \cdot 184 \cdot 1 - 0,07000) = 0,1328 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 184 \cdot 1 \cdot (16 - 3) / (692 + 16 + 3) = 6,729 \text{ МПа}$$

6,729 МПа ≥ 0,07000 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

Инв. № подл.
--------------

Изм.
Лист
№ докум.
Подп.
Дата

E-3.00.00.000 PP

Лист
------

72



$$D_p = D = 1800 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 0,3425 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 692 + 2 \cdot 3 = 698 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left( \frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((16 - 3) / 0,3425 - 0,8) \cdot (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 1,137 \cdot 10^4 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 1940; 1,25 \cdot ((692 + 2 \cdot 3) \cdot (16 - 3))^{1/2} \} = 119,1 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений:

- для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma_1]}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 184 / 184 \} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((692 + 2 \cdot 3) \cdot (16 - 3 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 153 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 878 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 153 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{op} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 61,19 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (119,1 \cdot (16 - 3) \cdot 1 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (16 - 3 - 0) \cdot 1) / (153 \cdot (16 - 3))] / [1 + 0,5 \cdot (698 - 61,19) / 153 + 1 \cdot (692 + 2 \cdot 3) / 1800 \cdot 1 / 1 \cdot 119,1 / 153] \} = 0,5256$$

$$= 0,5256$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (16 - 3) \cdot 1 \cdot 184 \cdot 0,5256 / [1800 + (16 - 3) \cdot 0,5256] = 1,392 \text{ МПа}$$

**Условие взаимного влияния штуцеров**

Если расстояние между наружными поверхностями ближайших штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} + (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 305,9 \text{ мм}$$

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

Изн. № подл. 19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Е-3.00.00.000 PP					Лист 73
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

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

$$V_1 = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l'_{1p} \cdot (s'_1 - c'_s) \cdot \chi'_1 + l'_{2p} \cdot s'_2 \cdot \chi'_2 + l'_{3p} \cdot (s'_3 - c'_s - c'_{s1}) \cdot \chi'_3 + l'_{1p} \cdot (s''_1 - c_s) \cdot \chi''_1 + l'_{2p} \cdot s''_2 \cdot \chi''_2 + l'_{3p} \cdot (s''_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi''_3}{b \cdot (s - c)}}{K_3 \left( 0.8 + \frac{d'_p + d''_p}{2 \cdot b} \right) + K_1 \left( \frac{d' + 2 \cdot c'_s}{D'_p} \cdot \frac{\varphi'_1}{\varphi'_1} \cdot \frac{l'_{1p}}{b} + \frac{d'' + 2 \cdot c''_s}{D''_p} \cdot \frac{\varphi''_1}{\varphi''_1} \cdot \frac{l''_{1p}}{b} \right)} \right\}$$

$$= \min \{ 1; (1 + [(119,1 \cdot (16 - 3) \cdot 1 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (16 - 3 - 0) \cdot 1 + 42,34 \cdot (12 - 4,5) \cdot 0,9158 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (12 - 4,5 - 0) \cdot 0,9158) / (254 \cdot (16 - 3))] / (1 \cdot (0,8 + (698 + 153) / (2 \cdot 254) + 1 \cdot [(692 + 2 \cdot 3) / 1800 \cdot 1 / 1 \cdot 119,1 / 254 + [(144 + 2 \cdot 4,5) / 1800 \cdot 1 / 1 \cdot 42,34 / 254] ])) = 0,5828 \}$$

$$= 0,5828$$

$$[p] = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{0,5 \cdot (D'_p + D''_p) + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2 \cdot 1 \cdot (16 - 3) \cdot 1 \cdot 184 / [0,5 \cdot (1800 + 1800) + (16 - 3) \cdot 0,5828] \cdot 0,5828 = 1,543 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление  $[p] = \min \{ 1,392; 1,543 \}$  МПа

1,392 МПа  $\geq 0,07000$  МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5(d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (698 - 61,19) \cdot 0,3425 = 0,109 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

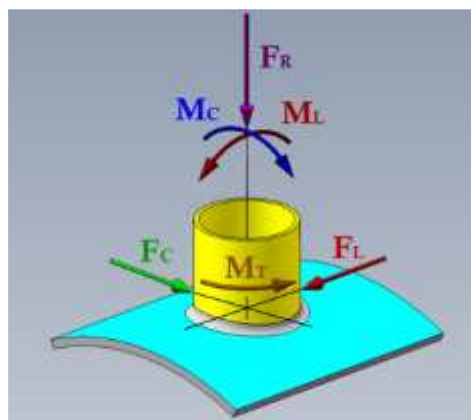
$$= 119,1 \cdot (16 - 0,1328 - 3) \cdot 1 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (16 - 3 - 0) \cdot 1 + 153 \cdot (16 - 0,3425 - 3)$$

$$= 0,003468 \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,109 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \leq 0,003468 \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

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



Радиальная нагрузка,  $F_R$ : 7131 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:

Подпись и дата

Инов. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инов. № подл.

19785.4

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

Е-3.00.00.000 РР

Лист

74

$$s_2 = s - c = 16 - 3 = 13 \text{ mm}$$

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c = 1800 + 16 + 3 = 1819 \text{ mm}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_r = d + s_1 + c_s = 692 + 16 + 3 = 711 \text{ MM}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_2}} = 711 / (1819 \cdot 13)^{1/2} = 4,624$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_n = 254 \text{ mm}$$

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D_c}{2} = 1819 / 2 = 909,5 \text{ mm}$$

Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{|p|} \right| = |0,07000 / 1,392| = 0,05030$$

Условие прочности:  $\Phi_p \leq 1$

$0,05030 \leq 1,0$ . Условие прочности выполнено

Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$\mathbf{F}_I = -\mathbf{F}_R = (-7131) \text{ H}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot [s-c]}} = 711 / (1819 \cdot (16-3)^{1/2}) = 4,624$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 4,624 + 0,005196 \cdot 4,624^2 + (-0,001406) \cdot 4,624^3 + 0 \cdot 4,624^4 = 4,974$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при отсутствии накладного кольца ( $\lambda_c = 4,624$ ):

$$[F_r] = [\sigma] \cdot (s-c)^2 \cdot \max\{C_1; 1.81\} = 184 \cdot (16-3)^2 \cdot \max\{4,974; 1.81\} = 1,547 \cdot 10^5 \text{ H}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_x = \left| \frac{F_z}{F_x} \right| = |(-7131) / 1,547 \cdot 10^5| = 0,04610$$

Условие прочности:  $\Phi_{\tau} \leq 1$

$0,04610 \leq 1.0$ . Условие прочности выполнено

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_x = M_r + F_r \cdot l_1 = 0 + 0 \cdot 1940 = 0 \text{ H m}$$

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_y = M_L + F_L \cdot l_1 = 0 + 0 \cdot 1940 = 0 \text{ H}_M$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 4,624 + 0,1589 \cdot 4,624^2 + (-0,02142) \cdot 4,624^3 + 0,001035 \cdot 4,624^4 = 6,575$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ( $\lambda_c = 4,624$ ):

$$[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 184 \cdot (16 - 3)^2 \cdot 711 / 4 \cdot \max\{6,575; 4.9\} = 3,634 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 26,93$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ( $\lambda_c = 4,624$ ):

Инв. № подл.	19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 4,624 + 0,005196 \cdot 4,624^2 + (-0,001406) \cdot 4,624^3 + 0 \cdot 4,624^4 = 4,974$	
						Допускаемое осевое усилие на штуцер при отсутствии накладного кольца( $\lambda_c = 4,624$ ):	
						$[F_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1.81\} = 184 \cdot (16 - 3)^2 \cdot \max\{4,974; 1.81\} = 1,547 \cdot 10^5 \text{ Н}$	
						Прочность от действия осевой нагрузки:	
						$\Phi_x = \left  \frac{F_x}{[F_x]} \right  =  (-7131) / 1,547 \cdot 10^5  = 0,04610$	
Инв. № подл.	19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Условие прочности: $\Phi_x \leq 1$	
						$0,04610 \leq 1.0$ . <b>Условие прочности выполнено</b>	
						Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:	
						$M_x = M_c + F_c \cdot l_1 = 0 + 0 \cdot 1940 = 0 \text{ Н м}$	
						Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:	
Инв. № подл.	19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$M_y = M_L + F_L \cdot l_1 = 0 + 0 \cdot 1940 = 0 \text{ Н м}$	
						$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 4,624 + 0,1589 \cdot 4,624^2 + (-0,02142) \cdot 4,624^3 + 0,001035 \cdot 4,624^4 = 6,575$	
						Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ( $\lambda_c = 4,624$ ):	
						$[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 184 \cdot (16 - 3)^2 \cdot 711 / 4 \cdot \max\{6,575; 4.9\} = 3,634 \cdot 10^4 \text{ Н м}$	
						$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 26,93$	
Инв. № подл.	19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ( $\lambda_c = 4,624$ ):	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 PP		Лист
							75

$$[M_y] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 184 \cdot (16 - 3)^2 \cdot 711 / 4 \cdot \max\{26,93; 4.9\} = 1,489 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((0 / 3,634 \cdot 10^4)^2 + (0 / 1,489 \cdot 10^5)^2)^{1/2} = 0$$

Условие прочности:  $\Phi_b \leq 1$

$0 \leq 1.0$ . **Условие прочности выполнено**

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right|, \left|\Phi_z\right|, \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} = ([\max(|0,05030 / 1 + (-0,04610)|; |(-0,04610)|; |0,05030 / 1 - 0.2 \cdot (-0,04610)|)]^2 + 0^2)^{1/2} = 0,05952$$

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

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

$0,05952 \leq 1.0$ . **Условие прочности выполнено**

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = 0,07000 \cdot (692 + 16) / (4 \cdot (16 - 3)) + 4 \cdot (0^2 + 0^2)^{1/2} / (3,142 \cdot (692 + 16)^2 \cdot (16 - 3)) + 0 / (3,142 \cdot (692 + 16) \cdot (16 - 3)) = 0,9531 \text{ МПа}$$

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

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

$0,9531 \text{ МПа} \leq 184 \text{ МПа}$ . **Условие прочности выполнено**

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0 / 6,729 + (0^2 + 0^2)^{1/2} / 9,136 \cdot 10^5 + |(-7131)| / 3,558 \cdot 10^6 = 0,002004$$

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

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

$0,002004 \leq 1.0$ . **Условие устойчивости выполнено**

## Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

### Условия нагружения:

Расчётная температура, Т: 180 °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 = 180 °С (расчётные условия (наружное давление)):

$[\sigma] = 167 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °С:

$E = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

### Свойства материала штуцера

Изн.	Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
Изн.	19785.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
Е-3.00.00.000 РР					Лист
					76

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

$$[\sigma]_1 = 167\text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$E_1 = 1,83 \cdot 10^5\text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 - p} = 0,15 \cdot (692 + 2 \cdot 3) / (2 \cdot 167 - 0,15) = 0,3136\text{ мм}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$B_1 = \min \left\{ 1,0, 9,45 \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \sqrt{\frac{d}{100 \cdot (s_1 - c_s)}} \right\} = \min \{ 1,0, 9,45 \cdot 692 / 1940 \cdot (692 / (100 \cdot (16 - 3)))^{1/2} \} = 1$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия устойчивости:

$$[p]_e = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E_1}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s_1 - c_s)}{d} \right]^{2,5} = 20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 692 / (2,4 \cdot 1 \cdot 1940) \cdot (100 \cdot (16 - 3) / 692)^{2,5} = 2,737\text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия прочности:

$$[p]_n = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + (s_1 - c_s)} = 2 \cdot 167 \cdot (16 - 3) / (692 + 16 - 3) = 6,159\text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left( \frac{[p]_n}{[p]_e} \right)^2}} = 6,159 / (1 + (6,159 / 2,737)^2)^{1/2} = 2,501\text{ МПа}$$

$$2,501\text{ МПа} \geq 0,15\text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 1800\text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 692 + 2 \cdot 3 = 698\text{ мм}$$

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 1940; 1,25 \cdot ((692 + 2 \cdot 3) \cdot (16 - 3))^{1/2} \} = 119,1\text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений:

- для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 167 / 167 \} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((692 + 2 \cdot 3) \cdot (16 - 3 - 0))^{1/2} \} = 0\text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 153\text{ мм}$$

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

$$L_k = 878\text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 153\text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 61,19\text{ мм}$$

Инов. № подл. 19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР



## Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

### Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, T: 20 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,2402 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):

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

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):

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

Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:

$$E_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,2402 \cdot (692 + 2 \cdot 3) / (2 \cdot 272,7 \cdot 1 - 0,2402) = 0,3075 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 272,7 \cdot 1 \cdot (16 - 3) / (692 + 16 + 3) = 9,973 \text{ МПа}$$

$$9,973 \text{ МПа} \geq 0,2402 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 1800 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 0,7929 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 692 + 2 \cdot 3 = 698 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left( \frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((16 - 3) / 0,7929 - 0,8) \cdot (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 4771 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 1940; 1,25 \cdot ((692 + 2 \cdot 3) \cdot (16 - 3))^{1/2} \} = 119,1 \text{ мм}$$

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:

Подпись и дата	Изн. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата	Изн. № подл.
				19785.4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Е-3.00.00.000 РР				Лист
				79

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0.5 \cdot ((692 + 2 \cdot 3) \cdot (16 - 3 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 153 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 878 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 153 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{op} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 61,19 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (119,1 \cdot (16 - 3) \cdot 1 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (16 - 3 - 0) \cdot 1) / (153 \cdot (16 - 3))] / [1 + 0.5 \cdot (698 - 61,19) / 153 + 1 \cdot (692 + 2 \cdot 3) / 1800 \cdot 1 / 1 \cdot 119,1 / 153] \} = 0,5256$$

$$= 0,5256$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} = 2 \cdot 1 \cdot (16 - 3) \cdot 1 \cdot 272,7 \cdot 0,5256 / [1800 + (16 - 3) \cdot 0,5256] = 2,063 \text{ МПа}$$

**Условие взаимного влияния штуцеров**

Если расстояние между наружными поверхностями ближайших штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} + (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 305,9 \text{ мм}$$

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

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

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

$$= \min \{ 1; (1 + [(119,1 \cdot (16 - 3) \cdot 1 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (16 - 3 - 0) \cdot 1 + 42,34 \cdot (12 - 4,5) \cdot 0,9333 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (12 - 4,5 - 0) \cdot 0,9333) / (254 \cdot (16 - 3))] / (1 \cdot (0.8 + (698 + 153) / (2 \cdot 254) + 1 \cdot [(692 + 2 \cdot 3) / 1800 \cdot 1 / 1 \cdot 119,1 / 254 + [(144 + 2 \cdot 4,5) / 1800 \cdot 1 / 1 \cdot 42,34 / 254] \cdot 0,5835]) \cdot 0,5835 \} = 0,5835$$

$$= 0,5835$$

$$[p]_1 = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{0.5 \cdot (D_p' + D_p'') + (s - c) \cdot V_1} = 2 \cdot 1 \cdot (16 - 3) \cdot 1 \cdot 272,7 / [0.5 \cdot (1800 + 1800) + (16 - 3) \cdot 0,5835] \cdot 0,5835 = 2,289 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление  $[p] = \min \{ 2,063; 2,289 \} \text{ МПа}$

$$2,063 \text{ МПа} \geq 0,2402 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

Инов. № подл. 19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Е-3.00.00.000 РР					Лист	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						80	



$$A_r = 0.5(d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0.5 \cdot (698 - 61,19) \cdot 0,7929 = 0,2525 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

$$= 119,1 \cdot (16 - 0,3075 - 3) \cdot 1 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (12 - 3 - 0) \cdot 1 + 153 \cdot (16 - 0,7929 - 3)$$

$$= 0,003379 \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,2525 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \leq 0,003379 \text{ м}^2$$

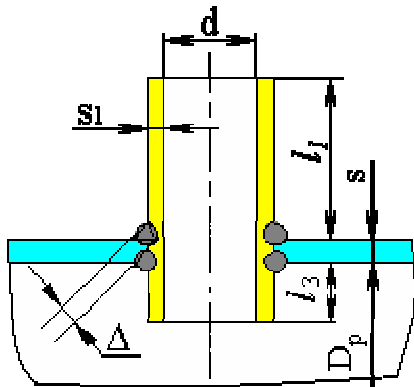
Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл. 19785.4	Подпись и дата		Инов. № дубл.		Подпись и дата		
Взам. инв. №		Инов. №				Лист 81	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР		

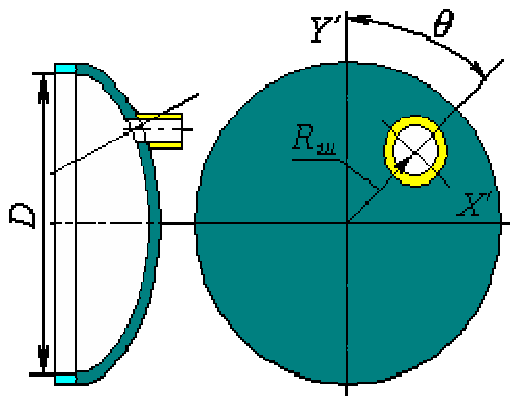
**Штуцер I1, I2 DN150**

**Исходные данные**

Элемент: Штуцер I1, I2 DN150  
Условное обозначение (метка) Штуцер I1  
Элемент, несущий штуцер: Днище эллиптическое правое  
Тип элемента, несущего штуцер: Днище эллиптическое  
Тип штуцера: Проходящий без укрепления



Материал несущего элемента: 09Г2С  
Толщина стенки несущего элемента, s: 16 мм  
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, с: 6,2 мм  
Материал штуцера: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281  
Внутренний диаметр штуцера, d: 144 мм  
Толщина стенки штуцера, s<sub>1</sub>: 12 мм  
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), с<sub>s</sub>: 4,5 мм  
Длина штуцера, l<sub>1</sub>: 215 мм



Смещение штуцера, R<sub>ш</sub>: 600 мм  
Угол поворота штуцера,  $\vartheta$ : 0 °  
Полученный угол наклона штуцера,  $\gamma$ : (-23,8) °  
Длина внутр. части штуцера, l<sub>3</sub>: 0 мм  
Прибавка на коррозию, с<sub>s1</sub>: 0 мм  
Коэффициенты прочности сварных швов:  
Продольный шов штуцера:

Исх. № подл.	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19785.4									
E-3.00.00.000 PP						Лист			
						82			

$$\varphi_1 = 1$$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$$\varphi = 1$$

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища:

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{\text{ш}}^2} = 1800^2 / (2 \cdot 450) \cdot (1 - 4 \cdot (1800^2 - 4 \cdot 450^2) \cdot 600^2 / 1800^4)^{1/2} = 2939 \text{ мм}$$

## Расчёт в рабочих условиях

### Условия нагружения:

Расчётная температура, Т: 70 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,07000 МПа

## Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

### Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре Т = 70 °С (рабочие условия):

[σ] = 184 МПа

Модуль продольной упругости при температуре 70 °С:

Е = 1,94·10<sup>5</sup> МПа

### Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре Т = 70 °С (рабочие условия):

[σ]<sub>1</sub> = 168,5 МПа

Модуль продольной упругости при температуре 70 °С:

Е<sub>1</sub> = 1,94·10<sup>5</sup> МПа

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_{\text{ш}} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,07000 \cdot (144 + 2 \cdot 4,5) / (2 \cdot 168,5 \cdot 1 - 0,07000) = 0,03179 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 168,5 \cdot 1 \cdot (12 - 4,5) / (144 + 12 + 4,5) = 15,75 \text{ МПа}$$

15,75 МПа ≥ 0,07000 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища:

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{\text{ш}}^2} = 1800^2 / (2 \cdot 450) \cdot (1 - 4 \cdot (1800^2 - 4 \cdot 450^2) \cdot 600^2 / 1800^4)^{1/2} = 2939 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

s<sub>p</sub> = 0,2796 мм

Расчётный диаметр отверстия (смещённый штуцер на эллиптическом днище):

$$d_p = \frac{d + 2 \cdot c_s}{\sqrt{1 - \left( \frac{2 \cdot R_{\text{ш}}}{D_p} \right)^2}} = (144 + 2 \cdot 4,5) / [1 - (2 \cdot 600 / 2939)^2]^{1/2} = 167,6 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

Инов. № подл. 19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	$[\sigma]_1 = 168,5 \text{ МПа}$ Модуль продольной упругости при температуре 70 °С: $E_1 = 1,94 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ Расчётная толщина стенки штуцера: $s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,07000 \cdot (144 + 2 \cdot 4,5) / (2 \cdot 168,5 \cdot 1 - 0,07000) = 0,03179 \text{ мм}$ Допускаемое давление для патрубка штуцера: $[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 168,5 \cdot 1 \cdot (12 - 4,5) / (144 + 12 + 4,5) = 15,75 \text{ МПа}$ $15,75 \text{ МПа} \geq 0,07000 \text{ МПа}$ Заключение: <b>Условие прочности и устойчивости выполнено</b> Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища: $D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{\text{ш}}^2} = 1800^2 / (2 \cdot 450) \cdot (1 - 4 \cdot (1800^2 - 4 \cdot 450^2) \cdot 600^2 / 1800^4)^{1/2} = 2939 \text{ мм}$ Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера: $s_p = 0,2796 \text{ мм}$ Расчётный диаметр отверстия (смещённый штуцер на эллиптическом днище): $d_p = \frac{d + 2 \cdot c_s}{\sqrt{1 - \left(\frac{2 \cdot R_{\text{ш}}}{D_p}\right)^2}} = (144 + 2 \cdot 4,5) / [1 - (2 \cdot 600 / 2939)^2]^{1/2} = 167,6 \text{ мм}$ Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР	Лист
						83

$$d_0 = 2 \cdot \left( \frac{s-c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = 2 \cdot ((16-6,2)/0,2796 - 0,8) \cdot (2939 \cdot (16-6,2))^{1/2} = 1,163 \cdot 10^4 \text{ мм}$$

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

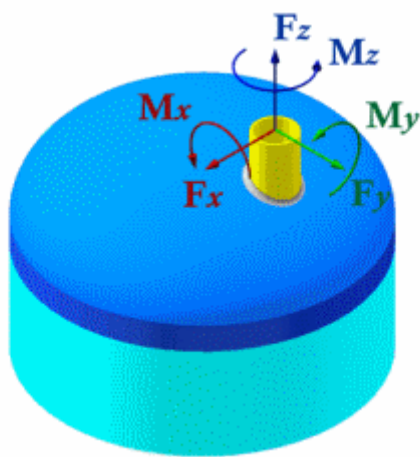
## Расчет на прочность по МКЭ в рабочих условиях

### Условия нагружения:

Расчётная температура, Т: 70 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,07000 МПа

### Нагрузки на штуцер (в системе координат аппарата):



$F_x$ , Н	$F_y$ , Н	$F_z$ , Н	$M_x$ , Н м	$M_y$ , Н м	$M_z$ , Н м
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 70 °С:

$$[s] = \frac{[\sigma]_s}{K_m} = 184 / 1,3 = 141,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 70 °С:

$$E = 1,94 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

#### Свойства материала штуцера

Номинальные допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре 70 °С:

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19785.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Е-3.00.00.000 РР				Лист
				84

$$[s]_1 = \frac{[\sigma]_s}{K_m} = 168,5 / 1,3 = 129,6 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 70 °С:

$$E_1 = 1,94 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

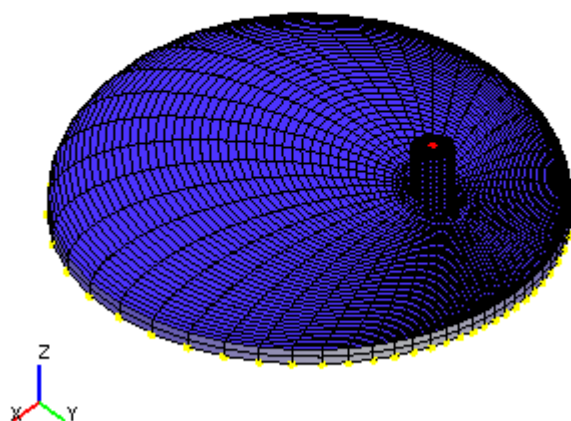


Рис. 1. Конечно-элементная модель узла врезки

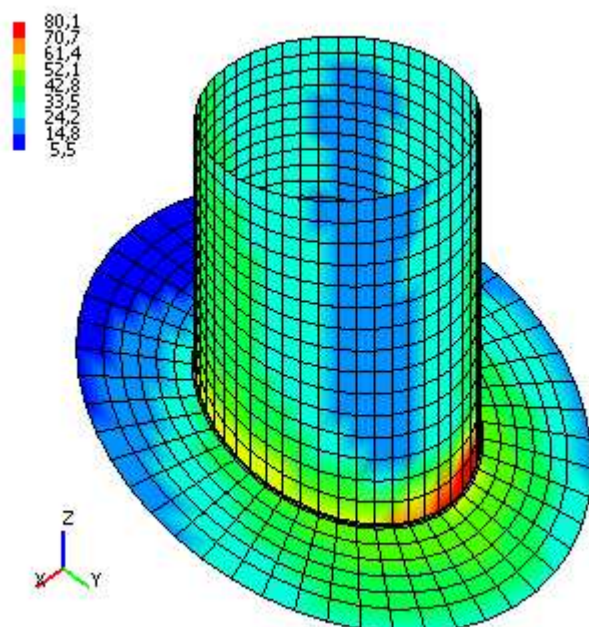


Рис. 2. Эквивалентные мембранные напряжения от совместного действия сил и давления, МПа.  
Заключение:

Для несущего элемента  $\sigma_{1max} = 53,94 \text{ МПа} \leq 1.5[s] = 212,4 \text{ МПа}$ .

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19785.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Е-3.00.00.000 РР				Лист
				85

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Для штуцера  $\sigma_{\text{нл. max}} = 80,06 \text{ МПа} \leq 1.5[s]_1 = 195 \text{ МПа}$ .

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

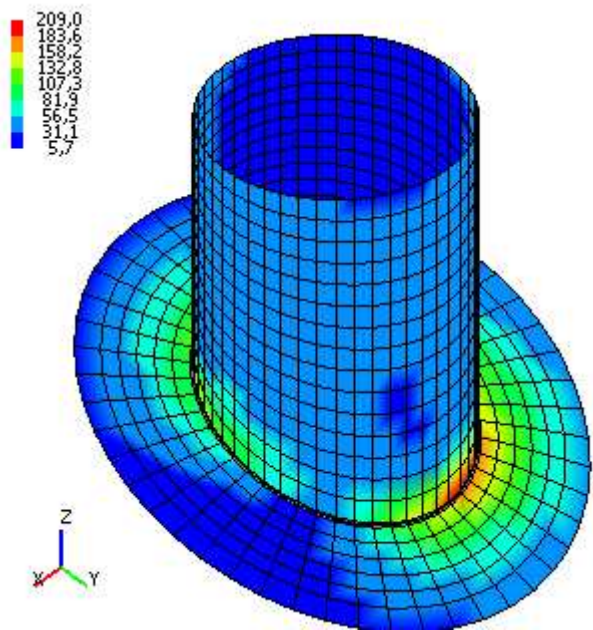


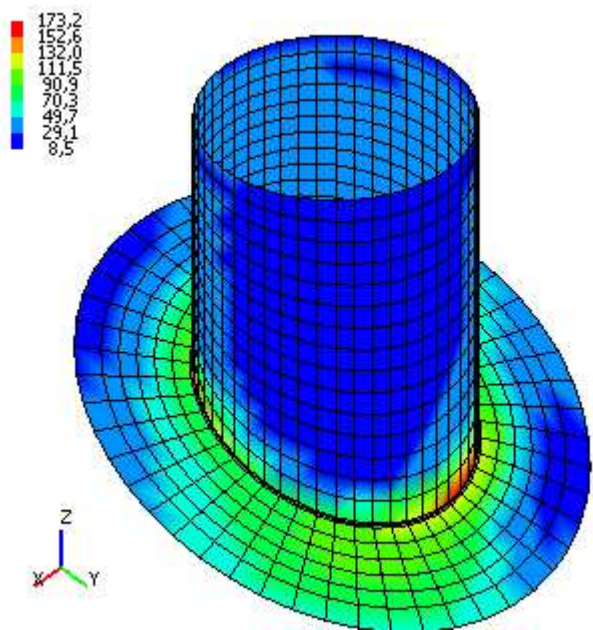
Рис. 3. Общие (мембранные и изгибные) напряжения на внешней поверхности, МПа.  
Заключение:

Для несущего элемента  $\sigma_{\text{нб. max}} = 166,3 \text{ МПа} \leq 3[s] = 424,9 \text{ МПа}$ .

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Для штуцера  $\sigma_{\text{нб. max}} = 209 \text{ МПа} \leq 3[s]_1 = 390 \text{ МПа}$ .

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.



Подпись и дата

Инов. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инов. № подл.  
19785.4

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Е-3.00.00.000 РР

Лист

86

**Заключение:**

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

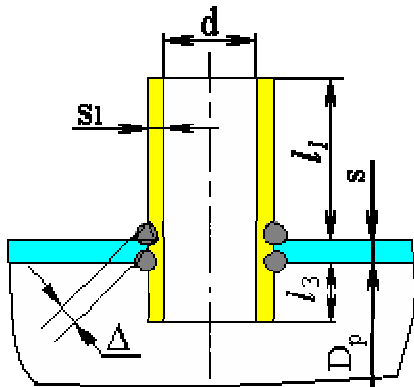
**Общее заключение:** Условия прочности выполнены.

Инва. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
19785.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Е-3.00.00.000 РР				Лист
				87

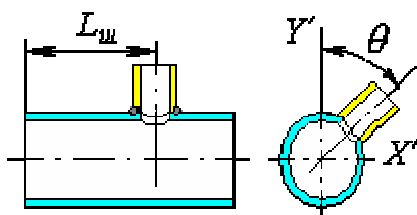
# Штуцер I3 DN150

## Исходные данные

Элемент: Штуцер I3 DN150  
Условное обозначение (метка) Штуцер I3  
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,  $c$ : 3 мм  
Материал штуцера: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281  
Внутренний диаметр штуцера,  $d$ : 144 мм  
Толщина стенки штуцера,  $s_1$ : 12 мм  
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию),  $c_s$ : 4,5 мм  
Длина штуцера,  $l_1$ : 1915 мм



Смещение штуцера,  $L_{ш}$ : 6440 мм  
Угол поворота штуцера,  $\vartheta$ : 0 °  
Длина внутр. части штуцера,  $l_3$ : 0 мм  
Прибавка на коррозию,  $c_{s1}$ : 0 мм  
Расчётные параметры размещения штуцера:  
Ближайший штуцер

Исх. № подл.	Исх. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата	
19785.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Е-3.00.00.000 РР				Лист
				88





$$D_p = D = 1800 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 0,3425 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 144 + 2 \cdot 4,5 = 153 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left( \frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((16 - 3) / 0,3425 - 0,8) \cdot (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 1,137 \cdot 10^4 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 1915; 1,25 \cdot ((144 + 2 \cdot 4,5) \cdot (12 - 4,5))^{1/2} \} = 42,34 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений:

- для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma_1]}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 168,5 / 184 \} = 0,9158$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((144 + 2 \cdot 4,5) \cdot (12 - 4,5 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 153 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 456 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 153 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{op} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 61,19 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (42,34 \cdot (12 - 4,5) \cdot 0,9158 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (12 - 4,5 - 0) \cdot 0,9158) / (153 \cdot (16 - 3))] / [1 + 0,5 \cdot (153 - 61,19) / 153 + 1 \cdot (144 + 2 \cdot 4,5) / 1800 \cdot 1 / 1 \cdot 42,34 / 153] = 0,866 \}$$

$$= 0,866$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (16 - 3) \cdot 1 \cdot 184 \cdot 0,866 / [1800 + (16 - 3) \cdot 0,866] = 2,287 \text{ МПа}$$

**Условие взаимного влияния штуцеров**

Если расстояние между наружными поверхностями ближайших штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} + (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 305,9 \text{ мм}$$

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

Инов. № подл. 19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
Е-3.00.00.000 РР					Лист 90

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

$$V_1 = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l'_{1p} \cdot (s'_1 - c'_s) \cdot \chi'_1 + l'_{2p} \cdot s'_2 \cdot \chi'_2 + l'_{3p} \cdot (s'_3 - c'_s - c'_{s1}) \cdot \chi'_3 + l'_{1p} \cdot (s''_1 - c_s) \cdot \chi''_1 + l'_{2p} \cdot s''_2 \cdot \chi''_2 + l'_{3p} \cdot (s''_3 - c'_s - c'_{s1}) \cdot \chi''_3}{b \cdot (s - c)}}{K_3 \left( 0.8 + \frac{d'_p + d''_p}{2 \cdot b} \right) + K_1 \left( \frac{d' + 2 \cdot c'_s}{D'_p} \cdot \frac{\varphi'_1}{\varphi'_1} \cdot \frac{l'_{1p}}{b} + \frac{d'' + 2 \cdot c'_s}{D'_p} \cdot \frac{\varphi''}{\varphi''_1} \cdot \frac{l''_{1p}}{b} \right)} \right\}$$

$$= \min \{ 1; (1 + [ (42,34 * (12 - 4,5) * 0,9158 + 0 * 0 * 0 + 0 * (12 - 4,5 - 0) * 0,9158 + 119,1 * (16 - 3) * 1 + 0 * 0 * 0 + 0 * (16 - 3 - 0) * 1) / (254 * (16 - 3))] ) / ( 1 * (0.8 + (153 + 698) / (2 * 254) + 1 * [(144 + 2 * 4,5) / 1800 * 1 / 1 * 42,34 / 254 + [(692 + 2 * 3) / 1800 * 1 / 1 * 119,1 / 254] ] ) ) = 0,5828 \}$$

$$= 0,5828$$

$$[p] = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{0.5 \cdot (D'_p + D''_p) + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2 * 1 * (16 - 3) * 1 * 184 / [0.5 * (1800 + 1800) + (16 - 3) * 0,5828] * 0,5828 = 1,543 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление  $[p] = \min \{ 2,287; 1,543 \}$  МПа

1,543 МПа  $\geq 0,07000$  МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0.5(d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0.5 * (153 - 61,19) * 0,3425 = 0,1572 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

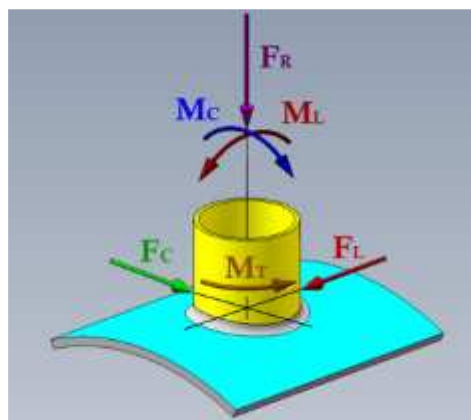
$$= 42,34 * (12 - 0,03179 - 4,5) * 0,9158 + 0 * 0 * 0 + 0 * (12 - 4,5 - 0) * 0,9158 + 153 * (16 - 0,3425 - 3)$$

$$= 0,002226 \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,1572 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \leq 0,002226 \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

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



Радиальная нагрузка,  $F_R$ : (-4800) Н

Окружной момент,  $M_C$ : 2400 Н м

Продольный момент,  $M_L$ : 2400 Н м

Крутящий момент,  $M_T$ : 3400 Н м

Сдвиговая нагрузка,  $F_C$ : 3400 Н

Сдвиговая нагрузка,  $F_L$ : 3400 Н

Эквивалентная толщина обечайки около штуцера:

Подпись и дата

Инов. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инов. № подл.

19785.4

Лист

Е-3.00.00.000 РР

91

Изм. Лист № докум. Подп. Дата



$$[M_y] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 184 \cdot (16 - 3)^2 \cdot 160,5 / 4 \cdot \max\{6,529; 4.9\} = 8147 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((2400 / 6114)^2 + (2400 / 8147)^2)^{1/2} = 0,4908$$

Условие прочности:  $\Phi_b \leq 1$

0,4908 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right|; \left|\Phi_z\right|; \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} = \left(\max\left(|0,03060 / 1 + 0,08528|; |0,08528|; |0,03060 / 1 - 0.2 \cdot 0,08528|\right)\right)^2 + 0,4908^2 = 0,5043$$

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

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

0,5043 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = 0,07000 \cdot (144 + 12) / (4 \cdot (12 - 4,5)) + 4 \cdot (2400^2 + 2400^2)^{1/2} / (3,142 \cdot (144 + 12)^2 \cdot (12 - 4,5)) + 4800 / (3,142 \cdot (144 + 12) \cdot (12 - 4,5)) = 25,35 \text{ МПа}$$

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

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

25,35 МПа ≤ 168,5 МПа. **Условие прочности выполнено**

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0 / 15,75 + (2400^2 + 2400^2)^{1/2} / 2,165 \cdot 10^4 + |0| / 6,015 \cdot 10^5 = 0,1568$$

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

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

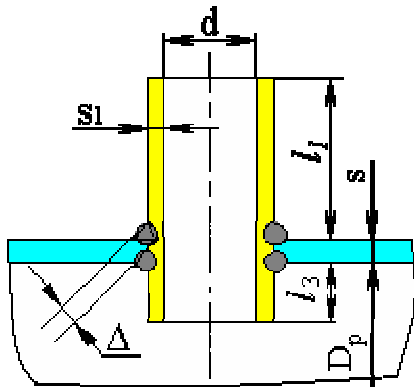
0,1568 ≤ 1.0. **Условие устойчивости выполнено**

Инов. № подл. 19785.4	Подпись и дата				
	Взам. инв. №				
	Инов. № дубл.				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР
					Лист
					93

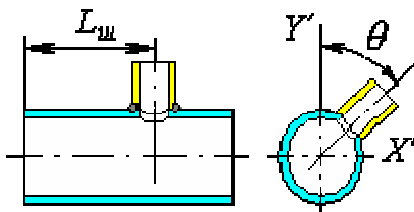
## Штуцер V DN80

## Исходные данные

Элемент:	Штуцер V DN80
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, с:	3 мм
Материал штуцера:	09Г2С Gr.ГОСТ 19281
Внутренний диаметр штуцера, d:	77 мм
Толщина стенки штуцера, s <sub>1</sub> :	9 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), с <sub>с</sub> :	4,13 мм
Длина штуцера, l <sub>1</sub> :	112 мм



Смещение штуцера, $L_{шт}$ :	1800 мм
Угол поворота штуцера, $\vartheta$ :	270 °
Длина внутр. части штуцера, $l_3$ :	0 мм
Прибавка на коррозию, $c_{s1}$ :	0 мм
Расчётные параметры размещения штуцера:	
Ближайший штуцер	







$$R_c = \frac{D_c}{2} = 819/2 = 409,5 \text{ mm}$$
$$\Phi_p = \frac{p}{p} = |0,07000 / 5,143| = 0,01361$$

Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$\mathbf{F}_z = -\mathbf{F}_R = -(2900) = 2900 \text{ H}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s-c)}} = 90,13 / (819 \cdot (16-3)^{1/2}} = 0,8735$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 0,8735 + 0,005196 \cdot 0,8735^2 + (-0,001406) \cdot 0,8735^3 + 0 \cdot 0,8735^4 = 1,435$$

$$[F_x] = [\sigma] \cdot (s-c)^2 \cdot \max\{C_1; 1.81\} = 184 \cdot (16-3)^2 \cdot \max\{1,435; 1.81\} = 5,628 \cdot 10^4 \text{ H}$$
$$\Phi_I = \frac{|F_I|}{|F_x|} = |2900 / 5,628 \cdot 10^4| = 0,05152$$

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_y = M_L = 700 \text{ H}_M$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 0,8735 + 0,1589 \cdot 0,8735^2 + (-0,02142) \cdot 0,8735^3 + 0,001035 \cdot 0,8735^4 = 4,69$$

$$[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 184 \cdot (16 - 3)^2 \cdot 90.13 / 4 \cdot \max\{4.69; 4.9\} = 3433 \text{ Н м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 6,039$$

$$[M_y] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 184 \cdot (16 - 3)^2 \cdot 90,13 / 4 \cdot \max\{6,039; 4.9\} = 4232 \text{ H M}$$
$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((700/3433)^2 + (700/4232)^2)^{1/2} = 0,2626$$

Прочность от совместного действия нагрузок:

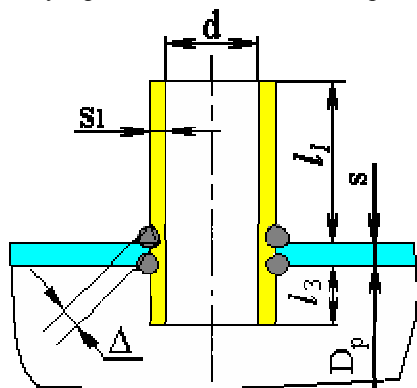
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$M_x = M_c = 700 \text{ Н м}$ Продольный приведенный момент, действующий на штуцер: $M_y = M_L = 700 \text{ Н м}$ $C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 0,8735 + 0,1589 \cdot 0,8735^2 + (-0,02142) \cdot 0,8735^3 + 0,001035 \cdot 0,8735^4 = 4,69$ Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ( $\lambda_c = 0,8735$ ): $[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4,9\} = 184 \cdot (16 - 3)^2 \cdot 90,13 / 4 \cdot \max\{4,69; 4,9\} = 3433 \text{ Н м}$ $C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 6,039$ Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ( $\lambda_c = 0,8735$ ): $[M_y] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4,9\} = 184 \cdot (16 - 3)^2 \cdot 90,13 / 4 \cdot \max\{6,039; 4,9\} = 4232 \text{ Н м}$ Прочность от действия изгибающих моментов: $\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((700 / 3433)^2 + (700 / 4232)^2)^{1/2} = 0,2626$ Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$ $0,2626 \leq 1,0$ . <b>Условие прочности выполнено</b> Прочность от совместного действия нагрузок:							
					<table><tr><td>Изм.</td><td>Лист</td><td>№ докум.</td><td>Подп.</td><td>Дата</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата								



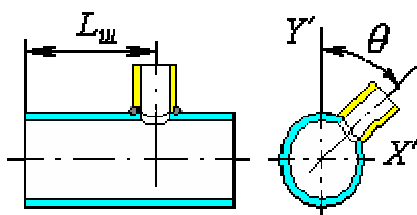
Штуцер UC1, UC2 DN50

Исходные данные

Элемент: Штуцер UC1, UC2 DN50  
Условное обозначение (метка) Штуцер UC2  
Элемент, несущий штуцер: Штуцер A1, A2 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, с: 3 мм  
Материал штуцера: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281  
Внутренний диаметр штуцера, d: 48 мм  
Толщина стенки штуцера, s<sub>1</sub>: 10 мм  
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), с<sub>s</sub>: 4,25 мм  
Длина штуцера, l<sub>1</sub>: 118 мм



Смещение штуцера, L<sub>ш</sub>: 1800 мм  
Угол поворота штуцера, θ: 90 °  
Длина внутр. части штуцера, l<sub>3</sub>: 0 мм  
Прибавка на коррозию, с<sub>s1</sub>: 0 мм  
Коэффициенты прочности сварных швов:  
Продольный шов штуцера:  
φ<sub>1</sub> = 1

Исх. № подл.	Исх. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата
19785.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
Е-3.00.00.000 РР			Лист 99

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$\phi = 1$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 692 \text{ мм}$

Расчёт в рабочих условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 70 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,07000 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 70 °C (рабочие условия):

$[\sigma] = 184 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 70 °C:

$E = 1,94 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 70 °C (рабочие условия):

$[\sigma]_1 = 168,5 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 70 °C:

$E_1 = 1,94 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \phi_1 - p} = 0,07000 \cdot (48 + 2 \cdot 4,25) / (2 \cdot 168,5 \cdot 1 - 0,07000) = 0,01174 \text{ мм}$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \phi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 168,5 \cdot 1 \cdot (10 - 4,25) / (48 + 10 + 4,25) = 31,13 \text{ МПа}$

$31,13 \text{ МПа} \geq 0,07000 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 692 \text{ мм}$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$s_p = 0,1328 \text{ мм}$

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

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

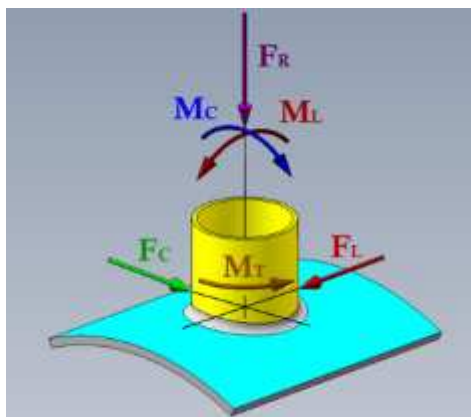
Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$d_0 = 2 \cdot \left( \frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((16 - 3) / 0,1328 - 0,8) \cdot (692 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 1,842 \cdot 10^4 \text{ мм}$

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

Подпись и дата		Инва. № дубл.		Взам. инв. №		Подпись и дата		Инва. № подл.	19785.4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР				Лист
									100

# 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:

$$s_s = s - c = 16 - 3 = 13 \text{ мм}$$

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c = 692 + 16 + 3 = 711 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_s = 48 + 10 + 4,25 = 62,25 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_s}} = 62,25 / (711 \cdot 13)^{1/2} = 0,6475$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 106 \text{ мм}$$

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D_c}{2} = 711 / 2 = 355,5 \text{ мм}$$

Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |0,07000 / 6,66| = 0,01051$$

Условие прочности:  $\Phi_p \leq 1$

0,01051 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_x = -F_R = -(-1500) = 1500 \text{ Н}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s - c)}} = 62,25 / (711 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 0,6475$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 0,6475 + 0,005196 \cdot 0,6475^2 + (-0,001406) \cdot 0,6475^3 + 0 \cdot 0,6475^4 = 1,219$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при отсутствии накладного кольца ( $\lambda_c = 0,6475$ ):

$$[F_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1,81\} = 184 \cdot (16 - 3)^2 \cdot \max\{1,219; 1,81\} = 5,628 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Изнв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изнв. № дубл.	Подпись и дата
19785.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Е-3.00.00.000 РР				Лист
				101

$$\Phi_x = \left| \frac{F_x}{F_y} \right| = |1500 / 5,628 \cdot 10^4| = 0,02665$$

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 * 0,6475 + 0,1589 * 0,6475^2 + (-0,02142) * 0,6475^3 + 0,001035 * 0,6475^4 = 4,629$$

$$[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 184 \cdot (16 - 3)^2 \cdot 62,25 / 4 \cdot \max\{4,629; 4.9\} = 2371 \text{ H M}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 5,623$$

$$[M_y] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 184 \cdot (16 - 3)^2 \cdot 62,25 / 4 \cdot \max\{5,623; 4.9\} = 2721 \text{ H M}$$
$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{M_{xL}}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{M_{yL}}\right)^2} = ((200/2371)^2 + (200/2721)^2)^{1/2} = 0,1119$$

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[ \max \left( \left| \frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_x \right|, \left| \Phi_x \right|, \left| \frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_x \right| \right) + \Phi_b \right]^2} = ([\max(|0,01051/1 + 0,02665|; |0,02665|; |0,01051/1 - 0.2 * 0,02665|)^2 + 0,1119^2]^{1/2} = 0,1179$$

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

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_x)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_x)} + \frac{F_x}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_x)} = 0,07000 \cdot (48 + 10) / (4 \cdot (10 - 4,25)) + 4 \cdot (200^2 + 200^2)^{1/2} / (3,142 \cdot (48 + 10)^2 \cdot (10 - 4,25)) + 1500 / (3,142 \cdot (48 + 10) \cdot (10 - 4,25)) = 20,23 \text{ МПа}$$

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

$$\frac{|p|}{|p|} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{|M|} + \frac{|F_z|}{|F|} = 0,31,13 + (200^2 + 200^2)^{1/2} / 1963 + |0| / 1,636 \cdot 10^5 = 0,1441$$

Инв. № подл.	19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p>Условие прочности: <math>\Phi_b \leq 1</math></p> <p><math>0,1119 \leq 1.0</math>. <b>Условие прочности выполнено</b></p> <p>Прочность от совместного действия нагрузок:</p> $\sqrt{\left[ \max \left( \left  \frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z \right ; \left  \Phi_z \right ; \left  \frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z \right  \right) \right]^2 + \Phi_b^2} = (\max(  0,01051 / 1 + 0,02665 ;  0,02665 ;  0,01051 / 1 - 0.2 * 0,02665  )^2 + 0,1119^2)^{1/2} = 0,1179$ <p>Если <math>F_z &lt; 0</math>, то знак <math>\Phi_z</math> меняется на противоположный.</p> <p>Условие прочности: <math>\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</math></p> <p><math>0,1179 \leq 1.0</math>. <b>Условие прочности выполнено</b></p> <p>Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:</p> $\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = 0,07000 \cdot (48 + 10) / (4 \cdot (10 - 4,25)) + 4 \cdot (200^2 + 200^2)^{1/2} / (3,142 \cdot (48 + 10)^2 \cdot (10 - 4,25)) + 1500 / (3,142 \cdot (48 + 10) \cdot (10 - 4,25)) = 20,23 \text{ МПа}$ <p>Если <math>F_z</math> создает сжимающее напряжение, ее следует принять равной нулю.</p> <p>Условие прочности: <math>\sigma_1 \leq [\sigma]_1</math></p> <p><math>20,23 \text{ МПа} \leq 168,5 \text{ МПа}</math>. <b>Условие прочности выполнено</b></p> $\frac{ p }{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{ F_z }{[F]} = 0 / 31,13 + (200^2 + 200^2)^{1/2} / 1963 +  0  / 1,636 \cdot 10^5 = 0,1441$ <p>Если <math>F_z</math> растягивающая продольная сила, а <math>p</math> – внутреннее избыточное давление, то <math>F_z</math> и <math>p</math> следует принять равными нулю.</p>				
						<table border="1"> <tr> <td>Изм.</td><td>Лист</td><td>№ докум.</td><td>Подп.</td><td>Дата</td></tr> <tr> <td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </table>	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

Е-3.00.00.000 PP

Лист 102

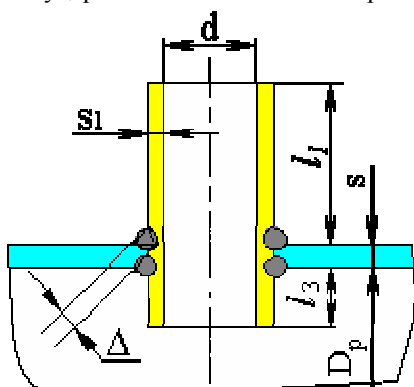
Условие устойчивости штуцера:  $\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_x|}{[F]} \leq 1.0$   
 $0,1441 \leq 1.0$ . **Условие устойчивости выполнено**

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР	Лист 103
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

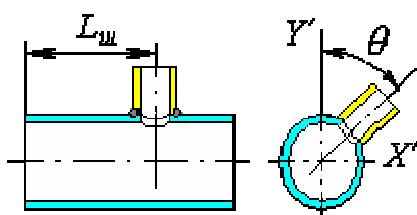
## Штуцер LT1, LT2 DN80

### Исходные данные

Элемент: Штуцер LT1, LT2 DN80  
 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,  $c$ : 3 мм  
 Материал штуцера: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281  
 Внутренний диаметр штуцера,  $d$ : 77 мм  
 Толщина стенки штуцера,  $s_1$ : 9 мм  
 Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию),  $c_s$ : 4,13 мм  
 Длина штуцера,  $l_1$ : 1930 мм



Смещение штуцера,  $L_{ш}$ : 4665 мм  
 Угол поворота штуцера,  $\vartheta$ : 0 °  
 Длина внутр. части штуцера,  $l_3$ : 0 мм  
 Прибавка на коррозию,  $c_{s1}$ : 0 мм  
 Расчётные параметры размещения штуцера:  
 Ближайший штуцер

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19785.4				

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Е-3.00.00.000 РР





$$D_p = D = 1800 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 0,3425 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 77 + 2 \cdot 4,13 = 85,26 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left( \frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((16 - 3) / 0,3425 - 0,8) \cdot (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 1,137 \cdot 10^4 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 1930; 1,25 \cdot ((77 + 2 \cdot 4,13) \cdot (9 - 4,13))^{1/2} \} = 25,47 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений:

- для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma_1]}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 168,5 / 184 \} = 0,9158$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((77 + 2 \cdot 4,13) \cdot (9 - 4,13 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 153 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 2267 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 153 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{op} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 61,19 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (25,47 \cdot (9 - 4,13) \cdot 0,9158 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (9 - 4,13 - 0) \cdot 0,9158) / (153 \cdot (16 - 3))] / [1 + 0,5 \cdot (85,26 - 61,19) / 153 + 1 \cdot (77 + 2 \cdot 4,13) / 1800 \cdot 1 / 1 \cdot 25,47 / 153] \} = 0,9729$$

$$= 0,9729$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (16 - 3) \cdot 1 \cdot 184 \cdot 0,9729 / [1800 + (16 - 3) \cdot 0,9729] = 2,568 \text{ МПа}$$

**Условие взаимного влияния штуцеров**

Если расстояние между наружными поверхностями ближайших штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} + (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 305,9 \text{ мм}$$

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

Изн. № подл. 19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
Е-3.00.00.000 РР					Лист
					106

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

$$V_1 = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l'_{1p} \cdot (s'_1 - c'_s) \cdot \chi'_1 + l'_{2p} \cdot s'_2 \cdot \chi'_2 + l'_{3p} \cdot (s'_3 - c'_s - c'_{s1}) \cdot \chi'_3 + l'_{1p} \cdot (s''_1 - c_s) \cdot \chi''_1 + l'_{2p} \cdot s''_2 \cdot \chi''_2 + l'_{3p} \cdot (s''_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi''_3}{b \cdot (s - c)}}{K_3 \left( 0.8 + \frac{d'_p + d''_p}{2 \cdot b} \right) + K_1 \left( \frac{d' + 2 \cdot c'_s}{D'_p} \cdot \frac{\varphi'}{\varphi'_1} \cdot \frac{l'_{1p}}{b} + \frac{d'' + 2 \cdot c''_s}{D''_p} \cdot \frac{\varphi''}{\varphi''_1} \cdot \frac{l''_{1p}}{b} \right)}$$

$$= \min \{ 1; (1 + [ (25,47 * (9 - 4,13) * 0,9158 + 0 * 0 * 0 + 0 * (9 - 4,13 - 0) * 0,9158 + 22,53 * (10 - 4,25) * 0,9158 + 0 * 0 * 0 + 0 * (10 - 4,25 - 0) * 0,9158) / (293,5 * (16 - 3))] ) / ( 1 * (0,8 + (85,26 + 56,5) / (2 * 293,5) + 1 * [(77 + 2 * 4,13) / 1800 * 1 / 1 * 25,47 / 293,5 + [(48 + 2 * 4,25) / 1800 * 1 / 1 * 22,53 / 293,5] ] ) ) = 1,012 \}$$

$$= 1$$

$$[p]_{\Sigma} = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{0.5 \cdot (D'_p + D''_p) + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2 * 1 * (16 - 3) * 1 * 184 / [0.5 * (1800 + 1800) + (16 - 3) * 1] * 1 = 2,639 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление  $[p] = \min \{ 2,568; 2,639 \}$  МПа

2,568 МПа  $\geq 0,07000$  МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0.5(d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0.5 * (85,26 - 61,19) * 0,3425 = 0,4122 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

$$= 25,47 * (9 - 0,01771 - 4,13) * 0,9158 + 0 * 0 * 0 + 0 * (9 - 4,13 - 0) * 0,9158 + 153 * (16 - 0,3425 - 3)$$

$$= 0,002049 \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,4122 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \leq 0,002049 \text{ м}^2$$

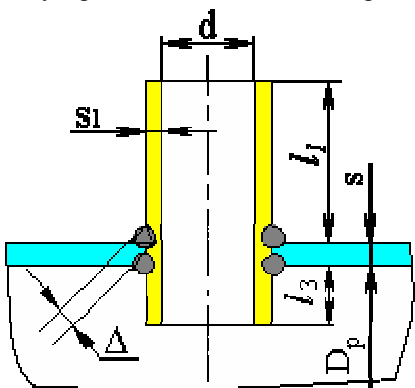
Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Е-3.00.00.000 РР					Лист
19785.4										107
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

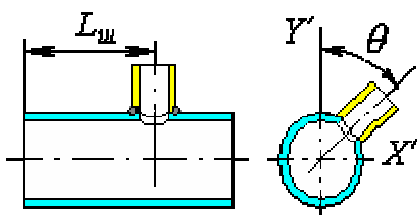
### **Штуцер T1, T2, LT3 DN50**

## Исходные данные

Элемент:	Штуцер Т1, Т2, LT3 DN50
Условное обозначение (метка)	Штуцер Т1
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:	3 мм
Материал штуцера:	09Г2С Gr.ГОСТ 19281
Внутренний диаметр штуцера, d:	48 мм
Толщина стенки штуцера, s <sub>1</sub> :	10 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), с <sub>с</sub> :	4,25 мм
Длина штуцера, l <sub>1</sub> :	1938 мм



Смещение штуцера,  $L_{шт}$ : 2590 мм  
 Угол поворота штуцера,  $\vartheta$ : 0 °  
 Длина внутр. части штуцера,  $l_3$ : 0 мм  
 Прибавка на коррозию,  $c_{s1}$ : 0 мм  
 Расчётные параметры размещения штуцера:  
 Ближайший штуцер



$$D_p = D = 1800 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 0,3425 \text{ мм}$$

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

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

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left( \frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((16 - 3) / 0,3425 - 0,8) \cdot (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 1,137 \cdot 10^4 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 1938; 1,25 \cdot ((48 + 2 \cdot 4,25) \cdot (10 - 4,25))^{1/2} \} = 22,53 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений:

- для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma_1]}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 168,5 / 184 \} = 0,9158$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

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

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 153 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 2616 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 153 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{op} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 61,19 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (22,53 \cdot (10 - 4,25) \cdot 0,9158 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 4,25 - 0) \cdot 0,9158) / (153 \cdot (16 - 3))] / [1 + 0,5 \cdot (56,5 - 61,19) / 153 + 1 \cdot (48 + 2 \cdot 4,25) / 1800 \cdot 1 / 1 \cdot 22,53 / 153] = 1,071 \}$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} = 2 \cdot 1 \cdot (16 - 3) \cdot 1 \cdot 184 \cdot 1 / [1800 + (16 - 3) \cdot 1] = 2,639 \text{ МПа}$$

**Условие взаимного влияния штуцеров**

Если расстояние между наружными поверхностями ближайших штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} + (1800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 305,9 \text{ мм}$$

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

Изн. № подл.	19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
Е-3.00.00.000 РР					Лист
					110

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

$$V_1 = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l'_{1p} \cdot (s'_1 - c'_s) \cdot \chi'_1 + l'_{2p} \cdot s'_2 \cdot \chi'_2 + l'_{3p} \cdot (s'_3 - c'_s - c'_{s1}) \cdot \chi'_3 + l'_{1p} \cdot (s''_1 - c_s) \cdot \chi''_1 + l'_{2p} \cdot s''_2 \cdot \chi''_2 + l'_{3p} \cdot (s''_3 - c_s - c'_{s1}) \cdot \chi''_3}{b \cdot (s - c)}}{K_3 \left( 0.8 + \frac{d'_p + d''_p}{2 \cdot b} \right) + K_1 \left( \frac{d' + 2 \cdot c'_s}{D'_p} \cdot \frac{\varphi'_1}{\varphi'_1} \cdot \frac{l'_{1p}}{b} + \frac{d'' + 2 \cdot c''_s}{D''_p} \cdot \frac{\varphi''_1}{\varphi''_1} \cdot \frac{l''_{1p}}{b} \right)}$$

$$= \min \{ 1; (1 + [ (22,53 \cdot (10 - 4,25) \cdot 0,9158 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 4,25 - 0) \cdot 0,9158 + 25,47 \cdot (9 - 4,13) \cdot 0,9158 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (9 - 4,13 - 0) \cdot 0,9158) / (293,5 \cdot (16 - 3))] / (1 \cdot (0,8 + (56,5 + 85,26) / (2 \cdot 293,5) + 1 \cdot [(48 + 2 \cdot 4,25) / 1800 \cdot 1 / 1 \cdot 22,53 / 293,5 + [(77 + 2 \cdot 4,13) / 1800 \cdot 1 / 1 \cdot 25,47 / 293,5] ])) = 1,012 \}$$

$$= 1$$

$$[p]_{\text{н}} = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{0.5 \cdot (D'_p + D''_p) + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2 \cdot 1 \cdot (16 - 3) \cdot 1 \cdot 184 / [0.5 \cdot (1800 + 1800) + (16 - 3) \cdot 1] \cdot 1 = 2,639 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление  $[p] = \min \{ 2,639; 2,639 \}$  МПа

$2,639 \text{ МПа} \geq 0,07000 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0.5(d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0.5 \cdot (56,5 - 61,19) \cdot 0,3425 = (-0,8028 \cdot 10^{-6}) \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

$$= 22,53 \cdot (10 - 0,01174 - 4,25) \cdot 0,9158 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 4,25 - 0) \cdot 0,9158 + 153 \cdot (16 - 0,3425 - 3)$$

$$= 0,002055 \text{ м}^2$$

$$A_r = (-0,8028 \cdot 10^{-6}) \text{ м}^2 \leq 0,002055 \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл. 19785.4	Подпись и дата		Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР	Лист
						111

– 0,002055 м

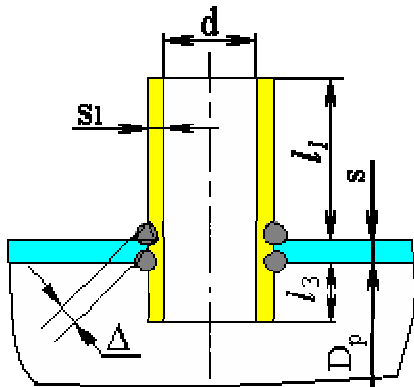
$A_r = (-0,8028 \cdot 10^{-6}) \text{ м}^2 \leq 0,002055 \text{ м}^2$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

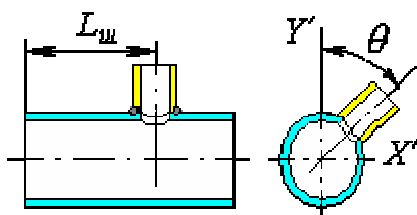
# Штуцер НО1, НО2, НН1, НН2 DN25

## Исходные данные

Элемент: Штуцер НО1, НО2, НН1, НН2 DN25  
Условное обозначение (метка) Штуцер НО1  
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,  $c$ : 3 мм  
Материал штуцера: 09Г2С (КП245)  
Внутренний диаметр штуцера,  $d$ : 25 мм  
Толщина стенки штуцера,  $s_1$ : 10 мм  
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию),  $c_s$ : 3 мм  
Длина штуцера,  $l_1$ : 140 мм



Смещение штуцера,  $L_{ш}$ : 1800 мм  
Угол поворота штуцера,  $\vartheta$ : 80 °  
Длина внутр. части штуцера,  $l_3$ : 0 мм  
Прибавка на коррозию,  $c_{s1}$ : 0 мм  
Расчётные параметры размещения штуцера:  
Ближайший штуцер

Подпись и дата

Инов. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инов. № подл.  
19785.4

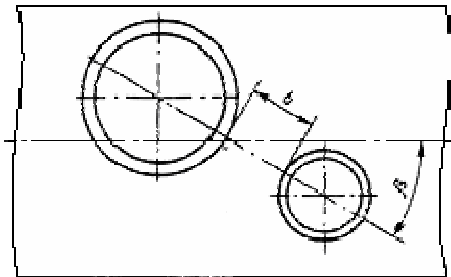
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

Е-3.00.00.000 РР

Лист

112





Название штуцера: - Штуцер НО2 DN25

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 100,2 мм

Угол  $\beta$ :  $90^\circ$

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$$\phi_1 = 1$$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$$\emptyset = 1$$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 800 \text{ mm}$$

## Расчёт в рабочих условиях

### Условия нагружения:

Расчётная температура, Т: 150 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,07 МПа

Расчётное внутреннее избыточное давление в штуцере, р: 0,8 МПа

## Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

*Свойства материала элемента, несущего штуцер*

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре  $T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рабочие условия):

$$[\sigma] = 184 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 70 °С:

$$E = 1,94 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

### *Свойства материала штуцера*

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре  $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рабочие условия):

$$[\sigma]_I = \eta^* \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B; R_{m/10n/t} / n_{II}; R_{p1.0/10n/t} / n_{II}) = 1^* \min\{202,1 / 1,5; 430 / 2,4; - / -; - / -\} = 134,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 150 °С:

$$E_1 = 1,86 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_{lp} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma_h \cdot \varphi_1 - p]} = 0,8 \cdot (25 + 2 \cdot 3) / (2 \cdot 134,7 \cdot 1 - 0,8) = 0,09231 \text{ mm}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 134,7 \cdot 1 \cdot (10 - 3) / (25 + 10 + 3) = 49,64 \text{ МПа}$$

$$49,64 \text{ МПа} \geq 0,07000 \text{ МПа}$$

**Заключение: Условие прочности и устойчивости выполнено**

Инв. № подл.

19785.4

Подпись и дата

Взам. инв. №

Инв. № дубл.

Подпись и дата

Расчётное внутреннее избыточное давление в штуцере, р: 0,07 МПа

**Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007**

***Свойства материала элемента, несущего штуцер***

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре Т = 70 °С (рабочие условия):

[σ]= 184 МПа

Модуль продольной упругости при температуре 70 °С:

E = 1,94·10<sup>5</sup> МПа

***Свойства материала штуцера***

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре Т = 150 °С (рабочие условия):

[σ]<sub>1</sub>= η\*min( R<sub>e/t</sub> / n<sub>T</sub>; R<sub>m/t</sub> / n<sub>B</sub>; R<sub>m/10<sup>n</sup>/t</sub> / n<sub>D</sub>; R<sub>p1,0/10<sup>n</sup>/t</sub> / n<sub>n</sub>) = 1\*min{202,1 / 1,5; 430 / 2,4; - / -; - / -}= 134,7 МПа

Модуль продольной упругости при температуре 150 °С:

E<sub>1</sub> = 1,86·10<sup>5</sup> МПа

Расчётная толщина стенки штуцера:

$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_1 - p} = 0,8 \cdot (25 + 2 \cdot 3) / (2 \cdot 134,7 \cdot 1 - 0,8) = 0,09231 \text{ мм}$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 134,7 \cdot 1 \cdot (10 - 3) / (25 + 10 + 3) = 49,64 \text{ МПа}$

49,64 МПа ≥ 0,07000 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

					E-3.00.00.000 PP	Лист
						113
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 800 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 0,1533 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 25 + 2 \cdot 3 = 31 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left( \frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((16 - 3) / 0,1533 - 0,8) \cdot (800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 1,713 \cdot 10^4 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 140; 1,25 \cdot ((25 + 2 \cdot 3) \cdot (10 - 3))^{1/2} \} = 18,41 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений:

- для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma_1]}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 134,7 / 184 \} = 0,7322$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

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

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 102 \text{ мм}$$

Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (Крышка с фланцем DN800):

$$L_k = 112,5 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 102 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{op} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 40,79 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (18,41 \cdot (10 - 3) \cdot 0,7322 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 3 - 0) \cdot 0,7322) / (102 \cdot (16 - 3))] / [1 + 0,5 \cdot (31 - 40,79) / 102 + 1 \cdot (25 + 2 \cdot 3) / 800 \cdot 1 / 1 \cdot 18,41 / 102] = 1,117 \}$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} = 2 \cdot 1 \cdot (16 - 3) \cdot 1 \cdot 184 \cdot 1 / [800 + (16 - 3) \cdot 1] = 5,884 \text{ МПа}$$

**Условие взаимного влияния штуцеров**

Если расстояние между наружными поверхностями ближайших штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (800 \cdot (16 - 3))^{1/2} + (800 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 204 \text{ мм}$$

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

Инов. № подл. 19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Е-3.00.00.000 PP					Лист
										114
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

$$K_3 = \frac{1 + \cos^2 \beta}{2} = [1 + \cos^2(90)] / 2 = 0,5$$

$$V_1 = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l'_p \cdot (s'_1 - c'_s) \cdot \chi'_1 + l'_{2p} \cdot s'_2 \cdot \chi'_2 + l'_{3p} \cdot (s'_3 - c'_s - c'_{s1}) \cdot \chi'_3 + l''_p \cdot (s''_1 - c'_s) \cdot \chi''_1 + l''_{2p} \cdot s''_2 \cdot \chi''_2 + l''_{3p} \cdot (s''_3 - c'_s - c'_{s1}) \cdot \chi''_3}{b \cdot (s - c)}}{K_3 \left( 0,8 + \frac{d'_p + d''_p}{2 \cdot b} \right) + K_1 \left( \frac{d' + 2 \cdot c'_s}{D'_p} \cdot \frac{\varphi'}{\varphi'_1} \cdot \frac{l'_p}{b} + \frac{d'' + 2 \cdot c'_s}{D'_p} \cdot \frac{\varphi''}{\varphi'_1} \cdot \frac{l''_p}{b} \right)} \right\}$$

$$= \min \{ 1; (1 + [ (18,41 \cdot (10 - 3) \cdot 0,7322 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 3 - 0) \cdot 0,7322 + 18,41 \cdot (10 - 3) \cdot 0,8084 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 3 - 0) \cdot 0,8084) / (100,2 \cdot (16 - 3))] / (0,5 \cdot (0,8 + (31 + 31) / (2 \cdot 100,2) + 1 \cdot ((25 + 2 \cdot 3) / 800 \cdot 1 / 1 \cdot 18,41 / 100,2 + [(25 + 2 \cdot 3) / 800 \cdot 1 / 1 \cdot 18,41 / 100,2] \cdot 1)) = 2,026) \}$$

$$= 1$$

$$[p]_k = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{0,5 \cdot (D'_p + D''_p) + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2 \cdot 1 \cdot (16 - 3) \cdot 1 \cdot 184 / [0,5 \cdot (800 + 800) + (16 - 3) \cdot 1] \cdot 1 = 5,884 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление  $[p] = \min \{ 5,884; 5,884 \}$  МПа

5,884 МПа  $\geq$  0,07000 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5 \cdot (d_p - d_{0p}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (31 - 40,79) \cdot 0,1533 = (-0,7508 \cdot 10^{-6}) \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

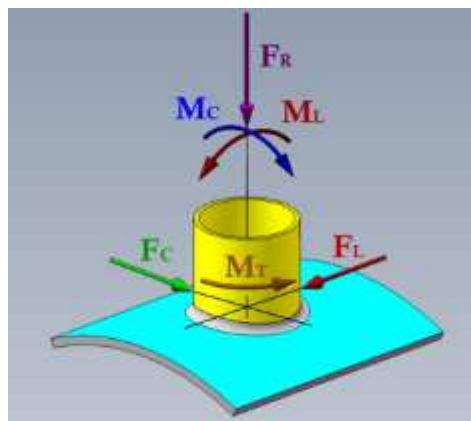
$$= 18,41 \cdot (10 - 0,008055 - 3) \cdot 0,7322 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 3 - 0) \cdot 0,7322 + 102 \cdot (16 - 0,1533 - 3)$$

$$= 0,001404 \text{ м}^2$$

$$A_r = (-0,7508 \cdot 10^{-6}) \text{ м}^2 \leq 0,001404 \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

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



Радиальная нагрузка,  $F_R$ : (-1200) Н

Окружной момент,  $M_C$ : 200 Н м

Продольный момент,  $M_L$ : 200 Н м

Крутящий момент,  $M_T$ : 300 Н м

Сдвиговая нагрузка,  $F_C$ : 900 Н

Сдвиговая нагрузка,  $F_L$ : 900 Н

Эквивалентная толщина обечайки около штуцера:

Инов. № подл.	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19785.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
Е-3.00.00.000 РР			Лист
			115

$$s_3 = s - c = 16 - 3 = 13 \text{ мм}$$

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c = 800 + 16 + 3 = 819 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_s = 25 + 10 + 3 = 38 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} = 38 / (819 \cdot 13)^{1/2} = 0,3683$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 82,5 \text{ мм}$$

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D_c}{2} = 819 / 2 = 409,5 \text{ мм}$$

Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |0,07000 / 5,884| = 0,01190$$

Условие прочности:  $\Phi_p \leq 1$

0,01190 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_x = -F_R = -(-1200) = 1200 \text{ Н}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s - c)}} = 38 / (819 \cdot (16 - 3))^{1/2} = 0,3683$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 0,3683 + 0,005196 \cdot 0,3683^2 + (-0,001406) \cdot 0,3683^3 + 0 \cdot 0,3683^4 = 0,9519$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при отсутствии накладного кольца ( $\lambda_c = 0,3683$ ):

$$[F_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1,81\} = 184 \cdot (16 - 3)^2 \cdot \max\{0,9519; 1,81\} = 5,628 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_x = \left| \frac{F_x}{[F_x]} \right| = |1200 / 5,628 \cdot 10^4| = 0,02132$$

Условие прочности:  $\Phi_x \leq 1$

0,02132 ≤ 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:

$$M_y = M_L = 200 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 0,3683 + 0,1589 \cdot 0,3683^2 + (-0,02142) \cdot 0,3683^3 + 0,001035 \cdot 0,3683^4 = 4,57$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ( $\lambda_c = 0,3683$ ):

$$[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4,9\} = 184 \cdot (16 - 3)^2 \cdot 38 / 4 \cdot \max\{4,57; 4,9\} = 1448 \text{ Н м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 5,541$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ( $\lambda_c = 0,3683$ ):

Изн. № подл. 19785.4	Подпись и дата				
	Изн. № дубл.				
	Взам. инв. №				
	Подпись и дата				
<div> <div>Изм.</div> <div>Лист</div> <div>№ докум.</div> <div>Подп.</div> <div>Дата</div> </div>					<div>Е-3.00.00.000 PP</div> <div>Лист</div> <div>116</div>

$$[M_y] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 184 \cdot (16 - 3)^2 \cdot 38 / 4 \cdot \max\{5,541; 4.9\} = 1637 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((200 / 1448)^2 + (200 / 1637)^2)^{1/2} = 0,1844$$

Условие прочности:  $\Phi_b \leq 1$

0,1844 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right|; \left|\Phi_z\right|; \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} = \left(\left[\max(|0,01190 / 1 + 0,02132|; |0,02132|; |0,01190 / 1 - 0.2 \cdot 0,02132|)\right]^2 + 0,1844^2\right)^{1/2} = 0,1874$$

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

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

0,1874 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = 0,07000 \cdot (25 + 10) / (4 \cdot (10 - 3)) + 4 \cdot (200^2 + 200^2)^{1/2} / (3,142 \cdot (25 + 10)^2 \cdot (10 - 3)) + 1200 / (3,142 \cdot (25 + 10) \cdot (10 - 3)) = 43,64 \text{ МПа}$$

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

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

43,64 МПа ≤ 134,7 МПа. **Условие прочности выполнено**

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0 / 49,64 + (200^2 + 200^2)^{1/2} / 592,6 + |0| / 9,481 \cdot 10^4 = 0,4773$$

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

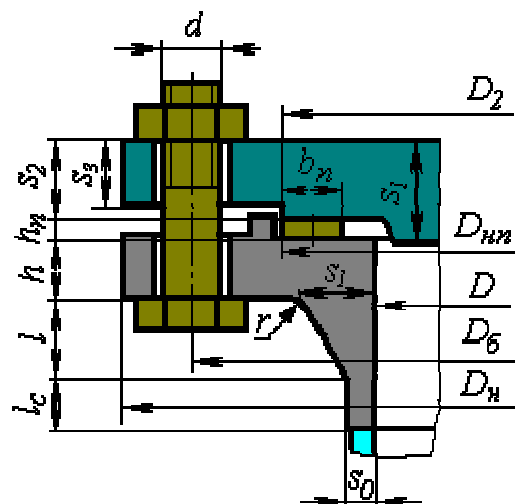
$$\text{Условие устойчивости штуцера: } \frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} \leq 1.0$$

0,4773 ≤ 1.0. **Условие устойчивости выполнено**

Инов. № подл. 19785.4	Подпись и дата				
	Взам. инв. №				
	Инов. № дубл.				
Изм.	Подпись и дата				
	Взам. инв. №				
	Инов. № дубл.				
Е-3.00.00.000 РР					Лист 117

## 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, $s_1$ :	40 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, $c_1$ :	3 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, $c_2$ :	0 мм
Прибавка технологическая, $c_3$ :	0 мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, $c$ :	3 мм
Толщина в месте прокладки, $s_2$ :	36 мм
Толщина вне уплотнения, $s_3$ :	30 мм
Наименьший диаметр наружной утоненной части, $D_2$ :	865 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)
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, $h$ :	35 мм
Сумма прибавок, $c$ :	3 мм
Длина конической части втулки, $l$ :	30 мм

Изнв. № подл.	Изнв. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата					
19785.4								
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				
					Е-3.00.00.000 PP			
					Лист			118



$E_{\phi} = 1,943 \cdot 10^5 \text{ МПа}$   
Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С (КП245) при температуре  $T = 67,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ :  
 $\alpha_{\phi} = 0,116 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}$   
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре  $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (рабочие условия):  
 $[\sigma]_{\phi}^{20} = \eta \cdot \min(R_{eL} / n_T; R_{mT} / n_B; R_{m10^6T} / n_D; R_{p1.0/10^6T} / n_H) = 1 \cdot \min(245 / 1,5; 440 / 2,4; - / -; - / -) = 163,3 \text{ МПа}$   
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) при температуре  $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ :  
 $E_{\phi}^{20} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

**Свойства материала крышки**

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре  $T = 67,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (рабочие условия):  
 $[\sigma]_{кр} = 169 \text{ МПа}$   
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре  $T = 67,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ :  
 $E_{кр} = 1,943 \cdot 10^5 \text{ МПа}$   
Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С при температуре  $T = 67,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ :  
 $\alpha_{кр} = 0,116 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}$   
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре  $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (рабочие условия):  
 $[\sigma]_{кр}^{20} = 183 \text{ МПа}$   
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре  $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ :  
 $E_{кр}^{20} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

**Характеристики прокладки:**

Тип и материал про- кладки	Коэффициент m	Удельное давле- ние обжатия $q_{обж}$ , МПа	Допускаемое удель- ное давление $[q]$ , МПа	Коэффи-циент обжатия K	Условный мо- дуль сжатия $E_n$ , МПа
Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали	3	69	-	-	-

Эффективная ширина прокладки:  
 $b_0 = 12 \text{ мм}$

Примечание: 
$$\begin{cases} b_0 = b_{пр} & \text{при } b_{пр} \leq 15,0 \text{ мм} \\ b_0 = 3,8 \cdot \sqrt{b_{пр}} & \text{при } b_{пр} > 15,0 \text{ мм} \end{cases}$$

Рабочий наружный диаметр прокладки:

$D_{пр} = 865 \text{ мм}$

Средний эффективный диаметр прокладки:

$D_{\text{ср}} = D_{пр} - b_0 = 865 - 12 = 853 \text{ мм}$

Для металлических и асбометаллических прокладок  $y_n = 0$ .

**Расчётные параметры болтов (шпилек):**

Рабочая длина болта (шпильки):

$L_{\text{б0}} = h + s_2 + h_n = 36 + 35 + 4,5 = 75,5 \text{ мм}$

Площадь сечения шпильки (по внутреннему диаметру резьбы):

$f_6 = 0,225 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$

Эффективная длина шпильки:

$L_{\text{с}} = L_{\text{б0}} + 0,56 \cdot d = 75,5 + 0,56 \cdot 20 = 86,7 \text{ мм}$

Податливость шпилек:

Изн.	№ подл.	19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-3.00.00.000 PP	Лист
													120



$$y_{\phi} = \frac{L_{\phi}}{E_{\phi}^{20} \cdot f_{\phi} \cdot n} = 86,7 / (2,18 \cdot 10^5 * 0,225 \cdot 10^{-3} * 40) = 0,4419 \cdot 10^{-7} \text{ мм/Н}$$

### Расчётные параметры крышки:

$$K_{кр} = \frac{D_{\kappa}}{D_{\text{кр}}} = 945 / 853 = 1,108$$

$$x_{кр} = \frac{0,67 \cdot [K_{кр}^2 \cdot (1 + 8,55 \cdot \lg K_{кр}) - 1]}{(K_{кр} - 1) \cdot [K_{кр}^2 - 1 + (1,857 \cdot K_{кр}^2 + 1) \cdot \left(\frac{s_1}{s_2}\right)^3]} = \frac{0,67 \cdot (1,108^2 \cdot (1 + 8,55 \cdot \lg(1,108)) - 1)}{(1,108 - 1) \cdot [1,108^2 - 1 + (1,857 \cdot 1,108^2 + 1) \cdot (40/36)^3]} = 0,9125$$

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

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

Угловая податливость крышки:

$$y_{кр} = \frac{x_{кр}}{E_{кр}^{20} \cdot s_2^3} = 0,9125 / (1,99 \cdot 10^5 * 36^3) = 0,5631 \cdot 10^{-5} \text{ °/Н м}$$

### Расчётные параметры фланца:

$$l_0 = \sqrt{D \cdot s_0} = (800 * 9)^{1/2} = 84,85 \text{ мм}$$

$$\beta_F = 0,8574$$

$$K = \frac{D_{\kappa}}{D + 2 \cdot c} = 945 / (800 + 2 * 0) = 1,181$$

$$\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8,55 \cdot \lg K) - 1}{(1,05 + 1,945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (1,181^2 \cdot (1 + 8,55 \cdot \lg 1,181) - 1) / ((1,05 + 1,945 \cdot 1,181^2) \cdot (1,181 - 1)) = 1,845$$

$$\beta_V = 0,2675$$

$$\beta_U = \frac{K^2 (1 + 8,55 \cdot \lg K) - 1}{1,36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (1,181^2 \cdot (1 + 8,55 \cdot \lg 1,181) - 1) / (1,36 \cdot (1,181^2 - 1) \cdot (1,181 - 1)) = 12,91$$

$$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot s_0^2} = (0,8574 \cdot 35 + 84,85) / (1,845 \cdot 84,85) + 0,2675 \cdot 35^3 / (12,91 \cdot 84,85 \cdot 9^2) = 0,8631$$

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_{\phi} = \frac{0,91 \cdot \beta_V}{E_{\phi}^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot l_0} = 0,91 \cdot 0,2675 / (1,99 \cdot 10^5 * 0,8631 \cdot 9^2 \cdot 84,85) = 0,1182 \cdot 10^{-4} \text{ °/Н м}$$

Плечи моментов:

$$a = 0$$

$$b = 0,5 \cdot (D_{\phi} - D_{\text{кр}}) = 0,5 \cdot (905 - 853) = 26 \text{ мм}$$

Инв. № подл. 19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<div>Е-3.00.00.000 РР</div> <div>Лист 121</div>				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата					

$$\beta = \frac{s_1}{s_0} = 19/9 = 2,111$$

$$x = \frac{1}{\sqrt{(D+2c) \cdot (s_0 - c)}} = 30 / ((800 + 2 \cdot 0) \cdot (9 - 0))^{1/2} = 0,3536$$

$$\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (2,111 - 1) \cdot 0,3536 / (0,3536 + (1 + 2,111) / 4) = 1,347$$

Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:

$$s_s = \kappa \cdot (s_0 - c) = 1,347 \cdot (9 - 0) = 12,13 \text{ мм}$$

$$e = 0,5 \cdot (D_{\text{вн}} - (D + 2 \cdot c) - s_s) = 0,5 \cdot (853 - (800 + 2 \cdot 0) - 12,13) = 20,44 \text{ мм}$$

### Расчёт нагрузок:

Равнодействующая давления:

$$Q_{\text{ж}} = 0,785 \cdot D_{\text{вн}}^2 \cdot p = 0,785 \cdot 853^2 \cdot 0,07000 = 3,998 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Усилие на прокладке в рабочих условиях, необходимое для обеспечения герметичности:

$$R_{\text{ж}} = \pi \cdot D_{\text{вн}} \cdot b_0 \cdot m \cdot |p| = 3,142 \cdot 853 \cdot 12 \cdot 3 \cdot |0,07000| = 6753 \text{ Н}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке:

$$F_{\text{обж}} = 0,5 \cdot \pi \cdot D_{\text{вн}} \cdot b_0 \cdot q_{\text{обж}} = 0,5 \cdot 3,142 \cdot 853 \cdot 12 \cdot 69 = 1,109 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$\eta = y_{\text{ж}} + y_{\text{с}} + y_{\text{ф}}' \cdot b'^2 + y_{\text{ф}}'' \cdot b''^2 = 0 + 0,4419 \cdot 10^{-7} + 0,5631 \cdot 10^{-5} \cdot 26^2 + 0,1182 \cdot 10^{-4} \cdot 26^2 = 0,25 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения с крышкой, нагруженного внутренним давлением:

$$\alpha = 1 - \frac{y_{\text{ж}} - (y_{\text{ф}}' \cdot b' + y_{\text{ф}}'' \cdot b'') \cdot b}{\eta} = 1 - (0 - (0,1182 \cdot 10^{-4} \cdot 20,44 + 0,5631 \cdot 10^{-5} \cdot 26) \cdot 26) / 0,25 \cdot 10^{-6} = 1,704$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях:

$$F_{\text{с1}} = \alpha \cdot Q_{\text{ж}} + R_{\text{ж}} = 1,704 \cdot 3,998 \cdot 10^4 + 6753 = 7,488 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или сечению наименьшего диаметра:

$$A_{\text{с}} = n \cdot f_{\text{с}} = 40 \cdot 0,225 \cdot 10^{-3} = 0,009000 \text{ м}^2$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов:

$$F_{\text{с2}} = \max \{ F_{\text{обж}}; 0,4 \cdot A_{\text{с}} \cdot [\sigma]_{\text{с}}^{20} \} = \max \{ 1,109 \cdot 10^6; 0,4 \cdot 0,009000 \cdot 230 = 8,28 \cdot 10^5 \} = 1,109 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

### Расчёт без учета стесненности температурных деформаций

#### Расчёт болтов(шпилек):

Коэффициент увеличения допускаемых напряжений при затяжке:  $\xi = 1,2$

Коэффициент условий работы:  $K_{\text{уп}} = 1$

Коэффициент условий затяжки:  $K_{\text{уз}} = 1$

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при затяжке:

$$[\sigma]_{\text{с}}^{\text{ж}} = \xi \cdot K_{\text{уп}} \cdot K_{\text{уз}} \cdot K_{\text{ут}} \cdot [\sigma]_{\text{с}}^{20} = 1,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 276 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в условиях затяжки:

Инов. № подл. 19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	<div>Е-3.00.00.000 РР</div> <div>Лист 122</div>				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата					

$$P_6^m = \max\{P_{b1}; P_{b2}\} = \max\{7,488 \cdot 10^4; 1,109 \cdot 10^6\} = 1,109 \cdot 10^6 \text{ H}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{61} = \frac{p_6^{\pi}}{A_6} \leq [\sigma]_6^{\pi}$$

$$\sigma_{\epsilon 1} = \frac{P_{\epsilon}^M}{A_{\epsilon}} = 1,109 \cdot 10^6 / 0,009000 = 123,3 \text{ МПа}$$

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при  $\sigma_{61} \geq 120$  МПа выбирается по рис. Л.1 ГОСТ 52857.4–2007:

$$M_{\text{KH}} = 137 \text{ H}_M$$

При наличии смазки величина  $M_{кр}$  снижается на 25% и составляет  $0.75 \cdot M_{кр} = 102,8 \text{ Н м}$

$$123,3 \text{ МПа} \leq 276 \text{ МПа, Условие прочности выполнено}$$

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при рабочих условиях:

$$[\sigma]_6^p = K_{yp} \cdot K_{y3} \cdot K_{yt} \cdot [\sigma]_6 = 1 * 1 * 1 * 230 = 230 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в рабочих условиях:

$$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot Q_H = 1,109 \cdot 10^6 + (1 - 1,704) * 3,998 \cdot 10^4 = 1,081 \cdot 10^6 \text{ H}$$

Условие прочности в рабочих условиях:

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^p}{A_6} \leq [\sigma]_6^p$$

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^p}{A_6} = 1,081 \cdot 10^6 / 0,009000 = 120,1 \text{ МПа}$$

$120,1 \text{ МПа} \leq 230 \text{ МПа}$ , **Условие прочности выполнено**

Болтовая нагрузка в условиях затяжки:

$$P_6^m = \max\{P_{b1}; P_{b2}\} = \max\{7,488 \cdot 10^4; 1,109 \cdot 10^6\} = 1,109 \cdot 10^6 \text{ H}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^\pi}{A_6} \leq [\sigma]_6^\pi$$

$$\sigma_{\epsilon 1} = \frac{P_6^M}{A_{\epsilon}} = 1,109 \cdot 10^6 / 0,009000 = 123,3 \text{ МПа}$$

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при  $\sigma_{61} \geq 120$  МПа выбирается по рис. Л.1 ГОСТ 52857.4–2007:

$$M_{\text{KH}} = 137 \text{ H}_M$$

При наличии смазки величина  $M_{кр}$  снижается на 25% и составляет  $0.75 \cdot M_{кр} = 102,8 \text{ Н м}$

**Расчёт ответного фланца:**

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:

$$C_F = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_6}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}}} \right\} = \max \{ 1; (3,142 \cdot 905 / 40 / (2 \cdot 20 + 6 \cdot 35 / (3 + 0.5)))^{1/2} \} = 1$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке:

$$M^{\pi} = C_F \cdot P_6^{\pi} \cdot b = 1 * 1,109 \cdot 10^6 * 26 = 2,885 \cdot 10^4 \text{ H}_M$$

$$D^* = (D + 2 \cdot c)_{\text{при } (D + 2 \cdot c) \geq 20 \cdot (s_1 - c)} = 800 + 2 \cdot 0 \text{ при } (800 + 2 \cdot 0) \geq 20 \cdot (19 - 0) = 800 \text{ мм}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_1$ :

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p>Условие прочности при затяжке:</p> $\sigma_{\text{с1}} = \frac{P_{\text{с}}^{\text{н}}}{A_{\text{с}}} \leq [\sigma]_{\text{с}}^{\text{н}}$ $\sigma_{\text{с1}} = \frac{P_{\text{с}}^{\text{н}}}{A_{\text{с}}} = 1,109 \cdot 10^6 / 0,009000 = 123,3 \text{ МПа}$ <p>Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при <math>\sigma_{\text{с1}} \geq 120 \text{ МПа}</math> выбирается по рис. Л.1 ГОСТ 52857.4-2007:</p> <p><math>M_{\text{кр}} = 137 \text{ Н м}</math></p> <p>При наличии смазки величина <math>M_{\text{кр}}</math> снижается на 25% и составляет <math>0.75 \cdot M_{\text{кр}} = 102,8 \text{ Н м}</math></p> <p style="text-align: center;"><b>Расчёт ответного фланца:</b></p> <p>Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:</p> $C_{\text{F}} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_{\text{с}}}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}}} \right\} = \max \{ 1; (3,142 \cdot 905 / 40 / (2 \cdot 20 + 6 \cdot 35 / (3 + 0.5)))^{1/2} \} = 1$ <p>Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке:</p> $M^{\text{н}} = C_{\text{F}} \cdot P_{\text{с}}^{\text{н}} \cdot b = 1 \cdot 1,109 \cdot 10^6 \cdot 26 = 2,885 \cdot 10^4 \text{ Н м}$ $D^* = (D + 2 \cdot c)_{\text{при } (D + 2 \cdot c) \geq 20 \cdot (s_1 - c)} = 800 + 2 \cdot 0 \text{ при } (800 + 2 \cdot 0) \geq 20 \cdot (19 - 0) = 800 \text{ мм}$ <p>Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении <math>s_1</math>:</p>
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	19785.4

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-3.00.00.000 PP	Лист 123
------	------	----------	-------	------	------------------	-------------

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 2,885 \cdot 10^4 / (0,8631 \cdot (19 - 3)^2 \cdot 800) = 163,2 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_R^M = \frac{1,33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^M = (1,33 \cdot 0,8574 \cdot 35 + 84,85) / (0,8631 \cdot 35^2 \cdot 84,85 \cdot 800) \cdot 2,885 \cdot 10^4 = 50,14 \text{ МПа}$$

$$\beta_Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left( 0,69 + 5,72 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (1,181 - 1) \cdot (0,69 + 5,72 \cdot 1,181^2 \cdot \lg 1,181 / (1,181^2 - 1)) = 11,86$$

$$\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (1,181^2 + 1) / (1,181^2 - 1) = 6,059$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 11,86 \cdot 2,885 \cdot 10^4 / (35^2 \cdot 800) - 6,059 \cdot 50,14 = 45,41 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|; |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \} \leq K_T \cdot [\sigma]_M^{20}$$

$$\max \{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|; |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \} = \max \{ |163,2 + 50,14|; |163,2 + 45,41| \} = 213,3 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1):

$$[\sigma]_M^{20} = 1,5 \cdot [\sigma]_B^{20} = 1,5 \cdot 163,3 = 245 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_M^{20} = 1 \cdot 245 = 245 \text{ МПа}$$

213,3 МПа ≤ 245 МПа, **Условие прочности выполнено**

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \{ P_E^P \cdot b + Q_K \cdot e; |Q_K| \cdot e \} = 1 \cdot \max \{ 1,081 \cdot 10^6 \cdot 26 + 3,998 \cdot 10^4 \cdot 20,44; |3,998 \cdot 10^4| \cdot 20,44 \} = 2,893 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 2,893 \cdot 10^4 / (0,8631 \cdot (19 - 3)^2 \cdot 800) = 163,7 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях:

$$\sigma_R^P = \frac{1,33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^P = (1,33 \cdot 0,8574 \cdot 35 + 84,85) / (0,8631 \cdot 35^2 \cdot 84,85 \cdot 800) \cdot 2,893 \cdot 10^4 = 50,29 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях:

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 11,86 \cdot 2,893 \cdot 10^4 / (35^2 \cdot 800) - 6,059 \cdot 50,29 = 45,55 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_{mm}^P = \frac{Q_K}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = 3,998 \cdot 10^4 / (3,142 \cdot (800 + 19) \cdot (19 - 3)) = 0,9712 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

$$\max \{ |\sigma_1^P - \sigma_{mm}^P + \sigma_R^P|; |\sigma_1^P - \sigma_{mm}^P + \sigma_T^P|; |\sigma_1^P + \sigma_{mm}^P| \} \leq K_T \cdot [\sigma]_M$$

$$\max \{ |\sigma_1^P - \sigma_{mm}^P + \sigma_R^P|; |\sigma_1^P - \sigma_{mm}^P + \sigma_T^P|; |\sigma_1^P + \sigma_{mm}^P| \} = \max \{ |163,7 - 0,9712 + 50,29|; |163,7 - 0,9712 + 45,55|; |163,7 + 0,9712| \} = 213 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1):

$$[\sigma]_M = 1,5 \cdot [\sigma]_B = 1,5 \cdot 149,6 = 224,3 \text{ МПа}$$

Инов. № подл.	19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
Е-3.00.00.000 РР					Лист
					124

$$K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}} = 1 \cdot 224,3 = 224,3 \text{ МПа}$$

213 МПа ≤ 224,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$f = \max \left\{ \frac{C_{36}}{1+A}, 1.0 \right\} = \max \{ 4,283 / (1 + 1,111); 1.0 \} = 2,029$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^{\text{м}} = f \cdot \sigma_1^{\text{м}} = 2,029 \cdot 163,2 = 331,1 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^{\text{м}} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_{\text{R}}^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1):

$$[\sigma]_{\text{R}}^{20} = 3 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 3 \cdot 163,3 = 490 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_{\text{R}}^{20} = 1.3 \cdot 490 = 637 \text{ МПа}$$

331,1 МПа ≤ 637 МПа, **Условие прочности выполнено**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^{\text{Р}} = f \cdot \sigma_1^{\text{Р}} = 2,029 \cdot 163,7 = 332,1 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0\text{м}}^{\text{Р}} = \frac{Q_{\text{н}}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = 3,998 \cdot 10^4 / (3,142 \cdot (800 + 9) \cdot (9 - 3)) = 2,622 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0\text{мо}}^{\text{Р}} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 0,07000 \cdot 800 / (2 \cdot (9 - 3)) = 4,667 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^{\text{Р}} \pm \sigma_{0\text{м}}^{\text{Р}} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^{\text{Р}} \pm \sigma_{0\text{мо}}^{\text{Р}} \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^{\text{Р}} \pm (\sigma_{0\text{м}}^{\text{Р}} - \sigma_{0\text{мо}}^{\text{Р}}) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_{\text{R}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^{\text{Р}} \pm \sigma_{0\text{м}}^{\text{Р}} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^{\text{Р}} \pm \sigma_{0\text{мо}}^{\text{Р}} \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^{\text{Р}} \pm (\sigma_{0\text{м}}^{\text{Р}} - \sigma_{0\text{мо}}^{\text{Р}}) \right| \right\} = \max \{ |332,1 \pm 2,622|; |0.3 \cdot 332,1 \pm 4,667|; |0.7 \cdot 332,1 \pm (2,622 - 4,667)| \} = 334,7 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1):

$$[\sigma]_{\text{R}} = 3 \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 3 \cdot 149,6 = 448,7 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_{\text{R}} = 1.3 \cdot 448,7 = 583,3 \text{ МПа}$$

334,7 МПа ≤ 583,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0\text{мо}}^{\text{Р}} \right|; \left| \sigma_{0\text{м}}^{\text{Р}} \right| \right\} \leq [\sigma]_{\text{ф}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0\text{мо}}^{\text{Р}} \right|; \left| \sigma_{0\text{м}}^{\text{Р}} \right| \right\} = \max \{ |4,667|; |2,622| \} = 4,667 \text{ МПа}$$

4,667 МПа ≤ 149,6 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_{\text{R}}^{\text{м}} \right|; \left| \sigma_{\text{T}}^{\text{м}} \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{\text{R}}^{\text{м}} \right|; \left| \sigma_{\text{T}}^{\text{м}} \right| \right\} = \max \{ |50,14|; |45,41| \} = 50,14 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 1 \cdot 163,3 = 163,3 \text{ МПа}$$

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19785.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Е-3.00.00.000 РР				Лист
				125

50,14 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^p \right|; \left| \sigma_T^p \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^p \right|; \left| \sigma_T^p \right| \right\} = \max\{50,29; 45,55\} = 50,29 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_\Phi = 1 \cdot 149,6 = 149,6 \text{ МПа}$$

50,29 МПа ≤ 149,6 МПа, **Условие прочности выполнено**

### **Жёсткость фланца:**

Угол поворота фланца в рабочих условиях:

$$\Theta = M^p \cdot y_\Phi \cdot \frac{E^{20}}{E} = 2,893 \cdot 10^4 \cdot 0,1182 \cdot 10^{-4} \cdot 1,99 \cdot 10^5 / 1,943 \cdot 10^5 = 0,3501^\circ$$

Допускаемый угол поворота фланца:

$$[\Theta] = 0,444^\circ$$

Коэффициент увеличения допускаемого угла поворота фланцев:  $K_\Theta = 1$

Условие выполнения жесткости фланцев:

$$\Theta \leq K_\Theta \cdot [\Theta] = 1 \cdot 0,444 = 0,444^\circ$$

**Условие жёсткости выполнено**

В соответствии с п. 4.7 ГОСТ Р 52857.4–2007 допускается не учитывать нагрузку от температурных деформаций при выполнении условия:

$$\max \{t_\Phi; t_{\Phi p}; t_\Phi\} \leq 100^\circ \text{C}$$

$$\max \{t_\Phi; t_{\Phi p}; t_\Phi\} = \max\{67,2; 67,2; 59,5\} = 67,2^\circ \text{C}$$

Расчет с учетом усилий от температурных деформаций не производится.

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С при температуре  $T = 67,2^\circ \text{C}$ :

$$\alpha_{\text{кр}} = 0,116 \cdot 10^{-4}^\circ \text{C}$$

Относительное удлинение:

$$\delta_t = \frac{\alpha_\Phi' \cdot h' \cdot (t_{\Phi 1} - 20^\circ \text{C}) + \alpha_\Phi'' \cdot h'' \cdot (t_{\Phi 2} - 20^\circ \text{C})}{\alpha_\Phi \cdot (h' + h'') \cdot (t_\Phi - 20^\circ \text{C})} = \frac{[0,116 \cdot 10^{-4} \cdot 36 \cdot (67,2 - 20^\circ \text{C}) + 0,116 \cdot 10^{-4} \cdot 35 \cdot (67,2 - 20^\circ \text{C})]}{[0,134 \cdot 10^{-4} \cdot (36 + 35) \cdot (59,5 - 20^\circ \text{C})]} = 1,034$$

В соответствии с п. 4.7 ГОСТ Р 52857.4–2007 при  $T_{\text{max}} < 100^\circ \text{C}$  допускается не учитывать нагрузку от температурных деформаций при выполнении условия:

$$\delta_t > 1$$

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),  $t_\Phi$ :  $67,2^\circ \text{C}$

### **Днища и крышки с дополнительным краевым моментом, нагруженные избыточным давлением**

Равнодействующая давления:

$$\gamma = \frac{1}{y_\Pi + y_\Phi \cdot \frac{E_\Phi^{20}}{E_\Phi} + \left( y_\Phi \cdot \frac{E_\Phi^{20}}{E_\Phi} + y_{\Phi p} \cdot \frac{E_{\Phi p}^{20}}{E_{\Phi p}} \right) \cdot b^2} = \frac{1 / (0 + 0,4419 \cdot 10^{-7} \cdot 2,18 \cdot 10^5 / 2,165 \cdot 10^5 + (0,1182 \cdot 10^{-4} \cdot 1,99 \cdot 10^5 / 1,943 \cdot 10^5) \cdot 26^2)}{1,943 \cdot 10^5 + 0,5631 \cdot 10^{-5} \cdot 1,99 \cdot 10^5 / 1,943 \cdot 10^5} = 3,916 \cdot 10^6 \text{ Н/мм}$$

Нагрузка от температурных деформаций:

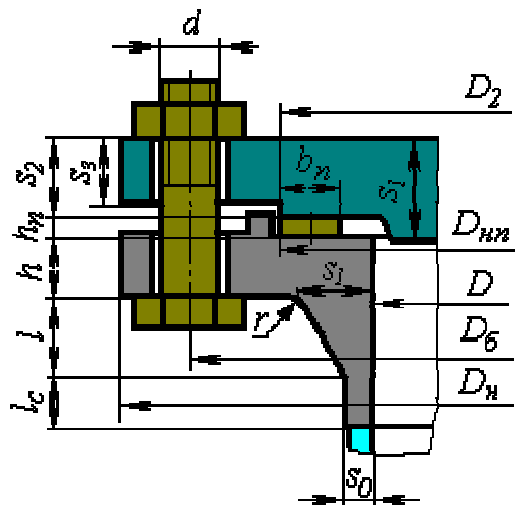
$$Q_t = \gamma \cdot \left( \alpha_\Phi' \cdot h' \cdot (t_{\Phi 1} - 20^\circ \text{C}) + \alpha_\Phi'' \cdot h'' \cdot (t_{\Phi 2} - 20^\circ \text{C}) - \alpha_\Phi \cdot (h' + h'') \cdot (t_\Phi - 20^\circ \text{C}) \right) = \frac{3,916 \cdot 10^6 \cdot (0,116 \cdot 10^{-4} \cdot 36 \cdot (67,2 - 20^\circ \text{C}) + 0,116 \cdot 10^{-4} \cdot 35 \cdot (67,2 - 20^\circ \text{C}) - 0,134 \cdot 10^{-4} \cdot (36 + 35) \cdot (67,2 - 20^\circ \text{C}))}{1} = 5066 \text{ Н}$$

Подпись и дата		Инва. № дубл.		Взам. инв. №		Подпись и дата		Инва. № подл.	19785.4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР				Лист
									126



## 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,  $s_1$ : 35 мм

Прибавка для компенсации коррозии и эрозии,  $c_1$ : 3 мм

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

Прибавка технологическая, с<sub>3</sub>: 0 мм

Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, с: 3 мм

Толщина в месте прокладки,  $s_2$ : 30 мм

Толщина вне уплотнения,  $s_3$ : 24 мм

Наименьший диаметр наружной утоненной части,  $D_2$ : 763 мм

Наружный диаметр крышки, D<sub>н</sub>: 860 мм

### Параметры фланца:

Тип фланца: Приварные встык

Исполнение фланца: Выступ-впадина

Диаметр болтовой окружности,  $D_6$ : 810 мм

Материал фланца: 09Г2С (КП245)

Смежный элемент: Штуцер A1, A2 DN700

Материал смежного элемента: 09Г2С

Толщина стенки смежного элемента: 16 мм

Внутренний диаметр фланца, D: 692 мм

Наружный диаметр фланца, D<sub>н</sub>: 860 мм

Толщина фланца, h: 22 мм

Сумма прибавок, с: 3 мм

Длина конической части втулки, l: 17,5 мм

Изн. № подл. 19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, $c_1$ :	0 мм	
					Прибавка технологическая, $c_3$ :	0 мм	
					Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, $c$ :	3 мм	
					Толщина в месте прокладки, $s_2$ :	30 мм	
					Толщина вне уплотнения, $s_3$ :	24 мм	
					Наименьший диаметр наружной утоненной части, $D_2$ :	763 мм	
					Наружный диаметр крышки, $D_H$ :	860 мм	
					<b>Параметры фланца:</b>		
					Тип фланца:	Приварные встык	
					Исполнение фланца:	Выступ-впадина	
Диаметр болтовой окружности, $D_6$ :		810 мм					
Изн. № подл. 19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	Материал фланца:	09Г2С (КП245)	
					Смежный элемент:	Штуцер А1, А2 DN700	
					Материал смежного элемента:	09Г2С	
					Толщина стенки смежного элемента:	16 мм	
					Внутренний диаметр фланца, $D$ :	692 мм	
					Наружный диаметр фланца, $D_H$ :	860 мм	
					Толщина фланца, $h$ :	22 мм	
					Сумма прибавок, $c$ :	3 мм	
					Длина конической части втулки, $l$ :		17,5 мм
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			
					Лист 128		



Длина цилиндрической части втулки,  $l_c$ : 18,5 мм

Толщина цилиндрической части втулки,  $s_0$ : 17 мм

Толщина конической части втулки,  $s_1$ : 24 мм

Радиус перехода, г: 5 мм

## Шпильки:

Материал: 35X

Наружный диаметр, d: 24 мм

Количество, n: 24

Контроль затяжки: Нет

**Прокладка:**

Материал прокладки:      Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали

Толщина,  $h_{\text{п}}$ : 3,2 мм

Наружный диаметр,  $D_{н.п.}$ : 762 мм

Ширина,  $b_{\text{п}}$ : 5,5 мм

Коэффициент прочности сварного шва:

$$\varphi_p = 1$$

## Расчёт в рабочих условиях

**Условия нагружения:**

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,07000 МПа

### Расчёт фланца по ГОСТ Р 52857.4-2007:

### **Свойства материала болтов (шпилек)**

Температура болтов (шпилек),  $t_b$ : 59,5 °C

Номинальные допускаемые напряжения для материала 35Х при температуре  $T = 59,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  :

$$[\sigma]_6 = 230 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 35Х при температуре  $T = 59,5^\circ\text{C}$ :

$$E_6 = 2,165 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 35Х при температуре  $T = 59,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\alpha_6 = 0,134 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$$

Номинальные допускаемые напряжения для материала 35Х при температуре  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  :

$$[\sigma]_{\epsilon=20}^{20} = 230 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 35Х при температуре  $T = 20^\circ\text{C}$ :

$$E_{\bar{6}}^{20} = 2,18 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

*Свойства материала смежного элемента фланца 2 Штуцер A1, A2 DN700*

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре  $T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рабочие условия):

$$[\sigma]_{III} = 184 \text{ МПа}$$

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

$$[\sigma]_{III}^{20} = 196 \text{ МПа}$$

### *Свойства материала фланца*

Температура фланца (кольца),  $t_{\text{ф}}$ : 67,2 °C

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре  $T = 67,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рабочие условия):

$$[\sigma]_{\Phi} = \eta^* \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B; R_{m/10n/t} / n_{II}; R_{p1,0/10n/t} / n_{II}) = 1^* \min\{224,3 / 1,5; 407,5 / 2,4; -/-; -/-\} = 149,6 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) при температуре  $T = 67,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p>Температура болтов (шпилек), <math>t_b</math>: 59,5 °C</p> <p>Номинальные допускаемые напряжения для материала 35X при температуре <math>T = 59,5</math> °C :</p> <p><math>[\sigma]_b = 230</math> МПа</p> <p>Модуль продольной упругости для материала 35X при температуре <math>T = 59,5</math> °C:</p> <p><math>E_b = 2,165 \cdot 10^5</math> МПа</p> <p>Коэффициент линейного расширения для материала 35X при температуре <math>T = 59,5</math> °C:</p> <p><math>\alpha_b = 0,134 \cdot 10^{-4}</math> °C</p> <p>Номинальные допускаемые напряжения для материала 35X при температуре <math>T = 20</math> °C :</p> <p><math>[\sigma]_b^{20} = 230</math> МПа</p> <p>Модуль продольной упругости для материала 35X при температуре <math>T = 20</math> °C:</p> <p><math>E_b^{20} = 2,18 \cdot 10^5</math> МПа</p>
					<p align="center"><b>Свойства материала смежного элемента фланца 2 Штуцер А1, А2 DN700</b></p> <p>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре <math>T = 70</math> °C (рабочие условия):</p> <p><math>[\sigma]_{ш} = 184</math> МПа</p> <p>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре <math>T = 20</math> °C (рабочие условия):</p> <p><math>[\sigma]_{ш}^{20} = 196</math> МПа</p>
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p align="center"><b>Свойства материала фланца</b></p> <p>Температура фланца (кольца), <math>t_f</math>: 67,2 °C</p> <p>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре <math>T = 67,2</math> °C (рабочие условия):</p> <p><math>[\sigma]_ф = \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\{224,3 / 1,5; 407,5 / 2,4; - / -; - / -\} = 149,6</math> МПа</p> <p>Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) при температуре <math>T = 67,2</math> °C:</p>
					<p align="center">E-3.00.00.000 PP</p>
19785.4					<p>Изм. Лист № докум. Подп. Дата</p>



$$y_{\sigma} = \frac{L_{\sigma}}{E_{\sigma}^{20} \cdot f_{\sigma} \cdot n} = 68,64 / (2,18 \cdot 10^5 * 0,324 \cdot 10^{-3} * 24) = 0,4049 \cdot 10^{-7} \text{ мм/Н}$$

### Расчётные параметры крышки:

$$K_{кр} = \frac{D_{кр}}{D_{оп}} = 860 / 756,5 = 1,137$$

$$x_{кр} = \frac{0,67 \cdot [K_{кр}^2 \cdot (1 + 8,55 \cdot \lg K_{кр}) - 1]}{(K_{кр} - 1) \cdot [K_{кр}^2 - 1 + (1,857 \cdot K_{кр}^2 + 1) \cdot \left(\frac{s_1}{s_2}\right)^3]} = \frac{(0,67 * (1,137^2 * (1 + 8,55 * \lg(1,137)) - 1)) / ((1,137 - 1) * [1,137^2 - 1 + (1,857 * 1,137^2 + 1) * (35 / 30)^3])}{0,781}$$

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

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

Угловая податливость крышки:

$$y_{кр} = \frac{x_{кр}}{E_{кр}^{20} \cdot s_2^3} = 0,781 / (1,99 \cdot 10^5 * 30^3) = 0,8329 \cdot 10^{-5} \text{ °/Н м}$$

### Расчётные параметры фланца:

$$l_0 = \sqrt{D \cdot s_0} = (692 * 17)^{1/2} = 108,5 \text{ мм}$$

$$\beta_F = 0,8993$$

$$K = \frac{D_{кр}}{D + 2 \cdot c} = 860 / (692 + 2 * 0) = 1,243$$

$$\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8,55 \cdot \lg K) - 1}{(1,05 + 1,945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (1,243^2 * (1 + 8,55 * \lg 1,243) - 1) / ((1,05 + 1,945 * 1,243^2) * (1,243 - 1)) = 1,82$$

$$\beta_V = 0,4472$$

$$\beta_U = \frac{K^2 (1 + 8,55 \cdot \lg K) - 1}{1,36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (1,243^2 * (1 + 8,55 * \lg 1,243) - 1) / (1,36 * (1,243^2 - 1) * (1,243 - 1)) = 9,962$$

$$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot s_0^2} = (0,8993 * 22 + 108,5) / (1,82 * 108,5) + 0,4472 * 22^3 / (9,962 * 108,5 * 17^2) = 0,665$$

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_{\Phi} = \frac{0,91 \cdot \beta_V}{E_{\sigma}^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot l_0} = 0,91 * 0,4472 / (1,99 \cdot 10^5 * 0,665 * 17^2 * 108,5) = 0,5621 \cdot 10^{-5} \text{ °/Н м}$$

Плечи моментов:

$$a = 0$$

$$b = 0,5 \cdot (D_{\sigma} - D_{оп}) = 0,5 * (810 - 756,5) = 26,75 \text{ мм}$$

Инв. № подл. 19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР
					Лист 131

$$\beta = \frac{s_1}{s_0} = 24 / 17 = 1,412$$

$$x = \frac{1}{\sqrt{(D+2c) \cdot (s_0 - c)}} = 17,5 / ((692 + 2 \cdot 0) \cdot (17 - 0))^{1/2} = 0,1613$$

$$\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (1,412 - 1) \cdot 0,1613 / (0,1613 + (1 + 1,412) / 4) = 1,087$$

Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:

$$s_s = \kappa \cdot (s_0 - c) = 1,087 \cdot (17 - 0) = 18,48 \text{ мм}$$

$$e = 0,5 \cdot (D_{\text{вн}} - (D + 2 \cdot c) - s_s) = 0,5 \cdot (756,5 - (692 + 2 \cdot 0) - 18,48) = 23,01 \text{ мм}$$

### Расчёт нагрузок:

Равнодействующая давления:

$$Q_{\text{д}} = 0,785 \cdot D_{\text{вн}}^2 \cdot p = 0,785 \cdot 756,5^2 \cdot 0,07000 = 3,145 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Усилие на прокладке в рабочих условиях, необходимое для обеспечения герметичности:

$$R_{\text{п}} = \pi \cdot D_{\text{вн}} \cdot b_0 \cdot m \cdot |p| = 3,142 \cdot 756,5 \cdot 5,5 \cdot 3 \cdot |0,07000| = 2745 \text{ Н}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке:

$$F_{\text{обж}} = 0,5 \cdot \pi \cdot D_{\text{вн}} \cdot b_0 \cdot q_{\text{обж}} = 0,5 \cdot 3,142 \cdot 756,5 \cdot 5,5 \cdot 69 = 4,51 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

$$\eta = y_{\text{п}} + y_{\text{с}} + y_{\text{ф}}' \cdot b'^2 + y_{\text{ф}}'' \cdot b''^2 = 0 + 0,4049 \cdot 10^{-7} + 0,8329 \cdot 10^{-5} \cdot 26,75^2 + 0,5621 \cdot 10^{-5} \cdot 26,75^2 = 0,2147 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения с крышкой, нагруженного внутренним давлением:

$$\alpha = 1 - \frac{y_{\text{п}} - (y_{\text{ф}}' \cdot b' + y_{\text{ф}}'' \cdot b'') \cdot b}{\eta} = 1 - (0 - (0,5621 \cdot 10^{-5} \cdot 23,01 + 0,8329 \cdot 10^{-5} \cdot 26,75) \cdot 26,75) / 0,2147 \cdot 10^{-6} = 1,766$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях:

$$F_{\text{с1}} = \alpha \cdot Q_{\text{д}} + R_{\text{п}} = 1,766 \cdot 3,145 \cdot 10^4 + 2745 = 5,827 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или сечению наименьшего диаметра:

$$A_{\text{с}} = n \cdot f_{\text{с}} = 24 \cdot 0,324 \cdot 10^{-3} = 0,007776 \text{ м}^2$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов:

$$F_{\text{с2}} = \max \{ F_{\text{обж}}; 0,4 \cdot A_{\text{с}} \cdot [\sigma]_{\text{с}}^{20} \} = \max \{ 4,51 \cdot 10^5; 0,4 \cdot 0,007776 \cdot 230 = 7,154 \cdot 10^5 \} = 7,154 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

### 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:

$$[\sigma]_{\text{с}}^{\text{т}} = \xi \cdot K_{\text{уп}} \cdot K_{\text{уз}} \cdot K_{\text{ут}} \cdot [\sigma]_{\text{с}}^{20} = 1,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 276 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в условиях затяжки:

Изн. № подл. 19785.4	Подпись и дата				
	Взам. инв. №				
	Изн. № дубл.				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР
					Лист 132

$$P_6^M = \max\{P_{b1}; P_{b2}\} = \max\{5,827 \cdot 10^4; 7,154 \cdot 10^5\} = 7,154 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} \leq [\sigma]_6^M$$

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} = 7,154 \cdot 10^5 / 0,007776 = 92 \text{ МПа}$$

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при  $\sigma_{61} < 120$  МПа:

$$M_{\text{зп}} = 0,3 \cdot \frac{P_6^M \cdot d}{n} = 0,3 \cdot 7,154 \cdot 10^5 \cdot 24 / 24 = 214,6 \text{ Н м}$$

При наличии смазки величина  $M_{\text{кр}}$  снижается на 25% и составляет  $0,75 \cdot M_{\text{кр}} = 161 \text{ Н м}$

92 МПа  $\leq$  276 МПа, **Условие прочности выполнено**

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при рабочих условиях:

$$[\sigma]_6^P = K_{\text{уп}} \cdot K_{\text{уз}} \cdot K_{\text{ут}} \cdot [\sigma] = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 230 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в рабочих условиях:

$$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot Q_{\text{н}} = 7,154 \cdot 10^5 + (1 - 1,766) \cdot 3,145 \cdot 10^4 = 6,913 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности в рабочих условиях:

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} \leq [\sigma]_6^P$$

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} = 6,913 \cdot 10^5 / 0,007776 = 88,9 \text{ МПа}$$

88,9 МПа  $\leq$  230 МПа, **Условие прочности выполнено**

Болтовая нагрузка в условиях затяжки:

$$P_6^M = \max\{P_{b1}; P_{b2}\} = \max\{5,827 \cdot 10^4; 7,154 \cdot 10^5\} = 7,154 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} \leq [\sigma]_6^M$$

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} = 7,154 \cdot 10^5 / 0,007776 = 92 \text{ МПа}$$

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при  $\sigma_{61} < 120$  МПа:

$$M_{\text{зп}} = 0,3 \cdot \frac{P_6^M \cdot d}{n} = 0,3 \cdot 7,154 \cdot 10^5 \cdot 24 / 24 = 214,6 \text{ Н м}$$

При наличии смазки величина  $M_{\text{кр}}$  снижается на 25% и составляет  $0,75 \cdot M_{\text{кр}} = 161 \text{ Н м}$

### Расчёт ответного фланца:

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:

$$C_F = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_6}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0,5}}} \right\} = \max \{ 1; (3,142 \cdot 810 / 24 / (2 \cdot 24 + 6 \cdot 22 / (3 + 0,5)))^{1/2} \} = 1,112$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке:

$$M^M = C_F \cdot P_6^M \cdot b = 1,112 \cdot 7,154 \cdot 10^5 \cdot 26,75 = 2,128 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

$$D^* = (D + 2 \cdot c)_{\text{при } (D + 2 \cdot c) \geq 20 \cdot (s_1 - c)} = 692 + 2 \cdot 0 \text{ при } (692 + 2 \cdot 0) \geq 20 \cdot (24 - 0) = 692 \text{ мм}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_1$ :

Изн. № подл.	19785.4	Подпись и дата		Взам. инв. №		Изн. № дубл.		Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР				Лист
									133

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 2,128 \cdot 10^4 / (0,665 \cdot (24 - 3)^2 \cdot 692) = 104,9 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_R^M = \frac{1,33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^M = (1,33 \cdot 0,8993 \cdot 22 + 108,5) / (0,665 \cdot 22^2 \cdot 108,5 \cdot 692) \cdot 2,128 \cdot 10^4 = 118,7 \text{ МПа}$$

$$\beta_Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left( 0,69 + 5,72 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (1,243 - 1) \cdot (0,69 + 5,72 \cdot 1,243^2 \cdot \lg 1,243 / (1,243^2 - 1)) = 9,151$$

$$\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (1,243^2 + 1) / (1,243^2 - 1) = 4,673$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 9,151 \cdot 2,128 \cdot 10^4 / (22^2 \cdot 692) - 4,673 \cdot 118,7 = 26,62 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|; |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \} \leq K_T \cdot [\sigma]_M^{20}$$

$$\max \{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|; |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \} = \max \{ |104,9 + 118,7|; |104,9 + 26,62| \} = 223,6 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1):

$$[\sigma]_M^{20} = 1,5 \cdot [\sigma]_B^{20} = 1,5 \cdot 163,3 = 245 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_M^{20} = 1 \cdot 245 = 245 \text{ МПа}$$

223,6 МПа ≤ 245 МПа, **Условие прочности выполнено**

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \{ P_6^P \cdot b + Q_K \cdot e; |Q_K| \cdot e \} = 1,112 \cdot \max \{ 6,913 \cdot 10^5 \cdot 26,75 + 3,145 \cdot 10^4 \cdot 23,01; |3,145 \cdot 10^4| \cdot 23,01 \} = 2,137 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 2,137 \cdot 10^4 / (0,665 \cdot (24 - 3)^2 \cdot 692) = 105,3 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях:

$$\sigma_R^P = \frac{1,33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^P = (1,33 \cdot 0,8993 \cdot 22 + 108,5) / (0,665 \cdot 22^2 \cdot 108,5 \cdot 692) \cdot 2,137 \cdot 10^4 = 119,2 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях:

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 9,151 \cdot 2,137 \cdot 10^4 / (22^2 \cdot 692) - 4,673 \cdot 119,2 = 26,73 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_{mm}^P = \frac{Q_K}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = 3,145 \cdot 10^4 / (3,142 \cdot (692 + 24) \cdot (24 - 3)) = 0,6657 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

$$\max \{ |\sigma_1^P - \sigma_{mm}^P + \sigma_R^P|; |\sigma_1^P - \sigma_{mm}^P + \sigma_T^P|; |\sigma_1^P + \sigma_{mm}^P| \} \leq K_T \cdot [\sigma]_M$$

$$\max \{ |\sigma_1^P - \sigma_{mm}^P + \sigma_R^P|; |\sigma_1^P - \sigma_{mm}^P + \sigma_T^P|; |\sigma_1^P + \sigma_{mm}^P| \} = \max \{ |105,3 - 0,6657 + 119,2|; |105,3 - 0,6657 + 26,73|; |105,3 + 0,6657| \} = 223,9 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1):

$$[\sigma]_M = 1,5 \cdot [\sigma]_B = 1,5 \cdot 149,6 = 224,3 \text{ МПа}$$

Изн. № подл.	19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	223,6 МПа ≤ 245 МПа, Условие прочности при рабочих условиях: Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях: $M^P = C_F \cdot \max \left\{ P_6^P \cdot b + Q_{\pi} \cdot e;  Q_{\pi}  \cdot e \right\} = 1,112 \cdot \max \{ 6,913 \cdot 10^5 \cdot 26,75 + 3,145 \cdot 10^4 \cdot 23,01;  3,145 \cdot 10^4  \cdot 23,01 \} = 2,137 \cdot 10^4 \text{ Н м}$ Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении s <sub>1</sub> : $\sigma_I^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 2,137 \cdot 10^4 / (0,665 \cdot (24 - 3)^2 \cdot 692) = 105,3 \text{ МПа}$ Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях: $\sigma_R^P = \frac{1,33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M^P = (1,33 \cdot 0,8993 \cdot 22 + 108,5) / (0,665 \cdot 22^2 \cdot 108,5 \cdot 692) \cdot 2,137 \cdot 10^4 = 119,2 \text{ МПа}$ Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях: $\sigma_T^P = \frac{\beta_V \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 9,151 \cdot 2,137 \cdot 10^4 / (22^2 \cdot 692) - 4,673 \cdot 119,2 = 26,73 \text{ МПа}$ Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении s <sub>1</sub> : $\sigma_{\text{лм}}^P = \frac{Q_{\pi}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = 3,145 \cdot 10^4 / (3,142 \cdot (692 + 24) \cdot (24 - 3)) = 0,6657 \text{ МПа}$ Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении s <sub>1</sub> : $\max \left\{ \left  \sigma_I^P - \sigma_{\text{лм}}^P + \sigma_R^P \right ; \left  \sigma_I^P - \sigma_{\text{лм}}^P + \sigma_T^P \right ; \left  \sigma_I^P + \sigma_{\text{лм}}^P \right  \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\text{ж}}$ $\max \left\{ \left  \sigma_I^P - \sigma_{\text{лм}}^P + \sigma_R^P \right ; \left  \sigma_I^P - \sigma_{\text{лм}}^P + \sigma_T^P \right ; \left  \sigma_I^P + \sigma_{\text{лм}}^P \right  \right\} = \max \{  105,3 - 0,6657 + 119,2 ;  105,3 - 0,6657 + 26,73 ;  105,3 + 0,6657  \} = 223,9 \text{ МПа}$ Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1): $[\sigma]_{\text{ж}} = 1,5 \cdot [\sigma]_0 = 1,5 \cdot 149,6 = 224,3 \text{ МПа}$
						Изм.
						134

$$K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}} = 1 \cdot 224,3 = 224,3 \text{ МПа}$$

223,9 МПа ≤ 224,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$f = \max \left\{ \frac{C_{36}}{1+A}, 1.0 \right\} = \max \{ 2,019 / (1 + 0,4118); 1.0 \} = 1,43$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^{\text{м}} = f \cdot \sigma_1^{\text{м}} = 1,43 \cdot 104,9 = 150 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^{\text{м}} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_{\text{R}}^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1):

$$[\sigma]_{\text{R}}^{20} = 3 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 3 \cdot 163,3 = 490 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_{\text{R}}^{20} = 1.3 \cdot 490 = 637 \text{ МПа}$$

150 МПа ≤ 637 МПа, **Условие прочности выполнено**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^{\text{Р}} = f \cdot \sigma_1^{\text{Р}} = 1,43 \cdot 105,3 = 150,6 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0\text{мм}}^{\text{Р}} = \frac{Q_{\text{п}}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = 3,145 \cdot 10^4 / (3,142 \cdot (692 + 17) \cdot (17 - 3)) = 1,008 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0\text{мо}}^{\text{Р}} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 0,07000 \cdot 692 / (2 \cdot (17 - 3)) = 1,73 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^{\text{Р}} \pm \sigma_{0\text{мм}}^{\text{Р}} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^{\text{Р}} \pm \sigma_{0\text{мо}}^{\text{Р}} \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^{\text{Р}} \pm (\sigma_{0\text{мм}}^{\text{Р}} - \sigma_{0\text{мо}}^{\text{Р}}) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_{\text{R}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^{\text{Р}} \pm \sigma_{0\text{мм}}^{\text{Р}} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^{\text{Р}} \pm \sigma_{0\text{мо}}^{\text{Р}} \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^{\text{Р}} \pm (\sigma_{0\text{мм}}^{\text{Р}} - \sigma_{0\text{мо}}^{\text{Р}}) \right| \right\} = \max \{ |150,6 \pm 1,008|; |0.3 \cdot 150,6 \pm 1,73|; |0.7 \cdot 150,6 \pm (1,008 - 1,73)| \} = 151,6 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1):

$$[\sigma]_{\text{R}} = 3 \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 3 \cdot 149,6 = 448,7 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_{\text{R}} = 1.3 \cdot 448,7 = 583,3 \text{ МПа}$$

151,6 МПа ≤ 583,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0\text{мо}}^{\text{Р}} \right|; \left| \sigma_{0\text{мм}}^{\text{Р}} \right| \right\} \leq [\sigma]_{\text{ф}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0\text{мо}}^{\text{Р}} \right|; \left| \sigma_{0\text{мм}}^{\text{Р}} \right| \right\} = \max \{ |1,73|; |1,008| \} = 1,73 \text{ МПа}$$

1,73 МПа ≤ 149,6 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_{\text{R}}^{\text{м}} \right|; \left| \sigma_{\text{T}}^{\text{м}} \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{\text{R}}^{\text{м}} \right|; \left| \sigma_{\text{T}}^{\text{м}} \right| \right\} = \max \{ |118,7|; |26,62| \} = 118,7 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 1 \cdot 163,3 = 163,3 \text{ МПа}$$

Инв. № подл. 19785.4	Подпись и дата			
	Взам. инв. №			
	Инв. № дубл.			
	Подпись и дата			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Е-3.00.00.000 РР				Лист 135

118,7 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^p \right|; \left| \sigma_T^p \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_p$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^p \right|; \left| \sigma_T^p \right| \right\} = \max \{119,2; 26,73\} = 119,2 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_p = 1 \cdot 149,6 = 149,6 \text{ МПа}$$

119,2 МПа ≤ 149,6 МПа, **Условие прочности выполнено**

### Жёсткость фланца:

Угол поворота фланца в рабочих условиях:

$$\Theta = M^p \cdot y_p \cdot \frac{E^{20}}{E} = 2,137 \cdot 10^4 \cdot 0,5621 \cdot 10^{-5} \cdot 1,99 \cdot 10^5 / 1,943 \cdot 10^5 = 0,123^\circ$$

Допускаемый угол поворота фланца:

$$[\Theta] = 0,417^\circ$$

Коэффициент увеличения допускаемого угла поворота фланцев:  $K_\Theta = 1$

Условие выполнения жесткости фланцев:

$$\Theta \leq K_\Theta \cdot [\Theta] = 1 \cdot 0,417 = 0,417^\circ$$

**Условие жёсткости выполнено**

В соответствии с п. 4.7 ГОСТ Р 52857.4–2007 допускается не учитывать нагрузку от температурных деформаций при выполнении условия:

$$\max \{t_\Phi; t_{xp}; t_\Sigma\} \leq 100^\circ \text{C}$$

$$\max \{t_\Phi; t_{xp}; t_\Sigma\} = \max \{67,2; 67,2; 59,5\} = 67,2^\circ \text{C}$$

Расчет с учетом усилий от температурных деформаций не производится.

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С при температуре  $T = 67,2^\circ \text{C}$ :

$$\alpha_{кр} = 0,116 \cdot 10^{-4}^\circ \text{C}$$

Относительное удлинение:

$$\delta_t = \frac{\alpha_\Phi' \cdot h' \cdot (t_{\Phi 1} - 20^\circ \text{C}) + \alpha_\Phi'' \cdot h'' \cdot (t_{\Phi 2} - 20^\circ \text{C})}{\alpha_\Sigma \cdot (h' + h'') \cdot (t_\Sigma - 20^\circ \text{C})} = \frac{[0,116 \cdot 10^{-4} \cdot 30 \cdot (67,2 - 20^\circ \text{C}) + 0,116 \cdot 10^{-4} \cdot 22 \cdot (67,2 - 20^\circ \text{C})]}{[0,134 \cdot 10^{-4} \cdot (30 + 22) \cdot (59,5 - 20^\circ \text{C})]} = 1,034$$

В соответствии с п. 4.7 ГОСТ Р 52857.4–2007 при  $T_{\max} < 100^\circ \text{C}$  допускается не учитывать нагрузку от температурных деформаций при выполнении условия:

$$\delta_t > 1$$

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),  $t_\Phi$ :  $67,2^\circ \text{C}$

### Днища и крышки с дополнительным краевым моментом, нагруженные избыточным давлением

Равнодействующая давления:

$$\gamma = \frac{1}{y_\Pi + y_\Sigma \cdot \frac{E_\Sigma^{20}}{E_\Sigma} + \left( y_\Phi \cdot \frac{E_\Phi^{20}}{E_\Phi} + y_{xp} \cdot \frac{E_{xp}^{20}}{E_{xp}} \right) \cdot b^2} = \frac{1 / (0 + 0,4049 \cdot 10^{-7} \cdot 2,18 \cdot 10^5 / 2,165 \cdot 10^5 + (0,5621 \cdot 10^{-5} \cdot 1,99 \cdot 10^5 / 1,943 \cdot 10^5 + 0,8329 \cdot 10^{-5} \cdot 1,99 \cdot 10^5 / 1,943 \cdot 10^5) \cdot 26,75^2)}{4,562 \cdot 10^6} = 4,562 \cdot 10^6 \text{ Н/мм}$$

Нагрузка от температурных деформаций:

$$Q_t = \gamma \cdot \left( \alpha_\Phi' \cdot h' \cdot (t_{\Phi 1} - 20^\circ \text{C}) + \alpha_\Phi'' \cdot h'' \cdot (t_{\Phi 2} - 20^\circ \text{C}) - \alpha_\Sigma \cdot (h' + h'') \cdot (t_\Sigma - 20^\circ \text{C}) \right) = \frac{4,562 \cdot 10^6 \cdot (0,116 \cdot 10^{-4} \cdot 30 \cdot (67,2 - 20^\circ \text{C}) + 0,116 \cdot 10^{-4} \cdot 22 \cdot (67,2 - 20^\circ \text{C}) - 0,134 \cdot 10^{-4} \cdot (30 + 22) \cdot (59,5 - 20^\circ \text{C}))}{4322} = 4322 \text{ Н}$$

Изнв. № подл.	19785.4	Подпись и дата		Взам. инв. №	Изнв. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР	
						Лист
						136



$$+ 22) * (59,5 - 20^0C))$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях:

$$P_{61} = \max \left\{ \begin{array}{l} \alpha \cdot Q_{\pi} + R_{\pi} \\ \alpha \cdot Q_{\pi} + R_{\pi} - Q_t \end{array} \right\} = \max \{ 1,766 * 3,145 \cdot 10^4 + 2745 = 5,827 \cdot 10^4; 1,766 * 3,145 \cdot 10^4 + 2745 - 4322 = 5,395 \cdot 10^4 \} = 5,827 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Болтовая нагрузка в рабочих условиях:

$$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot Q_{\pi} + Q_t = 7,154 \cdot 10^5 + (1 - 1,766) * 3,145 \cdot 10^4 + 4322 = 6,956 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

$$\psi = \frac{P_6^P}{Q_{\pi}} = 6,956 \cdot 10^5 / 3,146 \cdot 10^4 = 22,11$$

$$K_6 = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{1 + 3 \cdot \psi \cdot \left( \frac{D_3}{D_{\text{сн}}} - 1 \right)}{\frac{D_3}{D_{\text{сн}}}}} = 0,41 * [(1 + 3 * 22,11 * (810 / 756,5 - 1)) / (810 / 756,5)]^{1/2} = 0,9452$$

Поправочный коэффициент для допускаемого давления  $K_p = 1.0$

Допускаемое давление:

$$[p] = \left( \frac{s_1 - c}{K_0 \cdot K_6 \cdot D_p} \right)^2 \cdot [\sigma] \cdot \phi \cdot K_p = ([35 - 3] / [1 * 0,9452 * 756,5])^2 * 169 * 1 * 1 = 0,3385 \text{ МПа}$$

$$0,3385 \text{ МПа} \geq 0,07000 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

### Днища и крышки, нагруженные избыточным давлением

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_{2p} + c = K_6 \cdot K_0 \cdot D_p \cdot \sqrt{\frac{p}{\phi \cdot [\sigma] \cdot K_p}} + c = 0,9452 * 1 * 756,5 * (0,07000 / [1 * 169 * 1])^{1/2} + 3 = 17,55 \text{ мм}$$

$$17,55 \text{ мм} \leq 35 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

$$K_7 = 0,8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_{\text{сн}}} - 1} = 0,8 * [810 / 756,5 - 1]^{1/2} = 0,2127$$

$$\Phi = \max \left\{ \frac{P_6^P}{[\sigma]}; \frac{P_6^M}{[\sigma]^{20}} \right\} = \max \{ 6,956 \cdot 10^5 / 169; 7,154 \cdot 10^5 / 183 \} = 0,004116 \text{ м}^2$$

Расчётная толщина крышки в месте уплотнения с учётом прибавок:

$$s_{2p} + c = \max \left\{ K_7 \cdot \sqrt{\Phi}; \frac{0,6}{D_{\text{сн}}} \cdot \Phi \right\} + c = \max \{ 0,2127 * 0,004116^{1/2}; 0,6 * 0,004116 / 756,5 \} + 3 = 16,65 \text{ мм}$$

$$16,65 \text{ мм} \leq 30 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

$$K_7' = 0,8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_2} - 1} = 0,8 * [810 / 763 - 1]^{1/2} = 0,1986$$

Расчётная толщина вне зоны уплотнения с учётом прибавок:

$$s_{2p} + c = \max \left\{ K_7' \cdot \sqrt{\Phi}; \frac{0,6}{D_2} \cdot \Phi \right\} + c = \max \{ 0,1986 * 0,004116^{1/2}; 0,6 * 0,004116 / 763 \} + 3 = 15,74 \text{ мм}$$

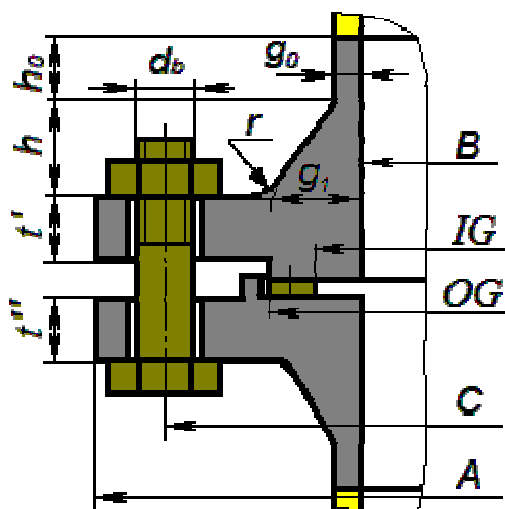
$$15,74 \text{ мм} \leq 24 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Изн. № подл. 19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Е-3.00.00.000 РР					Лист
										137
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

## Фланцевое соединение DN150

## Расчёт на прочность и герметичность по ASME VIII-2



## Исходные данные

Тип фланца: Приварные встык

Исполнение: Выступ-впадина

Теплоизоляция: Нет

Свободный/интегральный: -

Диаметр болтовой окружности, С: 250 мм

**Данные первого фланца (кольца):**

Смежный элемент: Штуцер I3 DN150

Материал смежного элемента: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281

Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245)

Наружный диаметр фланца (кольца), А: 300 мм

Толщина фланца (кольца), t: 25 мм

Сумма прибавок, с: 3 мм

Внешняя коррозия фланца,  $c_f$ : 0 мм

Внутренний диаметр фланца, В: 146 мм

Длина конической части втулки, h: 31,25 мм

Длина цилиндрической части втулки,  $h_0$ : 11,75 мм

Толщина цилиндрической части втулки,  $g_0$ : 7,5 мм

Толщина конической части втулки,  $g_1$ : 20 мм

Радиус перехода, г: 5 мм

**Данные второго фланца (кольца):**

Смежный элемент:

Материал смежного элемента: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281

Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245)

Наружный диаметр фланца (кольца), А: 300 мм

Толщина фланца (кольца), t: 25 мм

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Свободный/интегральный: -
					Диаметр болтовой окружности, С: 250 мм <b>Данные первого фланца (кольца):</b> Смежный элемент: Штуцер I3 DN150 Материал смежного элемента: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245) Наружный диаметр фланца (кольца), А: 300 мм Толщина фланца (кольца), t: 25 мм Сумма прибавок, с: 3 мм Внешняя коррозия фланца, с <sub>г</sub> : 0 мм Внутренний диаметр фланца, В: 146 мм Длина конической части втулки, h: 31,25 мм Длина цилиндрической части втулки, h <sub>0</sub> : 11,75 мм Толщина цилиндрической части втулки, g <sub>0</sub> : 7,5 мм Толщина конической части втулки, g <sub>1</sub> : 20 мм Радиус перехода, г: 5 мм <b>Данные второго фланца (кольца):</b> Смежный элемент: Материал смежного элемента: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245) Наружный диаметр фланца (кольца), А: 300 мм Толщина фланца (кольца), t: 25 мм
19785.4					<div> <div>Изм.</div> <div>Лист</div> <div>№ докум.</div> <div>Подп.</div> <div>Дата</div> </div> <div>Е-3.00.00.000 PP</div> <div> <div>Лист</div> <div>138</div> </div>



Свойства материала смежного элемента фланца 2

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 67,2 °С (рабочие условия):  
 $S_{no2} = 169,4 \text{ МПа}$   
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 20 °С (рабочие условия):  
 $S_{ng2} = 183 \text{ МПа}$

Свойства материала фланца (кольца) 1

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 67,2 °С (рабочие условия):  
 $S_{fo1} = \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{224,3 / 1,5; 440 / 2,4\} = 149,6 \text{ МПа}$   
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 67,2 °С:  
 $E_1 = 1,943 \cdot 10^5 \text{ МПа}$   
Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 67,2 °С:  
 $\alpha_1 = 0,116 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$   
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 20 °С (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) при температуре T = 20 °С:  
 $E^{20}_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала фланца (кольца) 2

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 67,2 °С (рабочие условия):  
 $S_{fo2} = \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{224,3 / 1,5; 440 / 2,4\} = 149,6 \text{ МПа}$   
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 67,2 °С:  
 $E_2 = 1,943 \cdot 10^5 \text{ МПа}$   
Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 67,2 °С:  
 $\alpha_2 = 0,116 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$   
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 20 °С (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) при температуре T = 20 °С:  
 $E^{20}_2 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётные параметры первого фланца:

Внутренний диаметр фланца (с учетом коррозии):  
 $B = B + 2 \cdot c = 146 + 2 \cdot 3 = 152 \text{ мм}$   
Диаметр втулки с учетом коррозии (для фланцев, приварных встык):  
 $\xi_0 = \xi_0 - c = 7,5 - 3 = 4,5 \text{ мм}$   
Больший диаметр конической втулки с учетом коррозии:  
 $\xi_1 = \xi_1 - c = 20 - 3 = 17 \text{ мм}$   
Толщина фланца, с учетом коррозии:  
 $t = t - c_f = 25 - 0 = 25 \text{ мм}$

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 <sub>n</sub> , МПа
Спирально-навитая с	3	69	-	-	-

Изн. № подл.	19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата						
						Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
						Е-3.00.00.000 РР					Лист
											140



$$A_b = n \cdot f_b = 8 * 0,324 \cdot 10^{-3} = 0,002592 \text{ м}^2$$

### Расчёт болтов(шпилек):

Условие прочности болтов:

$$A_m \leq A_b$$

$$0,001421 \text{ м}^2 \leq 0,002592 \text{ м}^2$$

Условие прочности выполнено

### Расчёт напряжений первого фланца:

Равнодействующая давления на внутренней поверхности фланца:

$$H_D = 0,785 \cdot B^2 \cdot p = 0,785 * 152^2 * 0,07000 = 1270 \text{ Н}$$

Плечо момента для силы  $H_D$  (фланцы интегрального типа, или другие, рассчитываемые аналогично):

$$h_D = \frac{C - B - g_1}{2} = (250 - 152 - 17) / 2 = 40,5 \text{ мм}$$

Равнодействующая давления:

$$H = 0,785 \cdot G^2 \cdot p = 0,785 * 193^2 * 0,07000 = 2047 \text{ Н}$$

Разница между общей равнодействующей давления и равнодействующей на внутренней поверхности фланца:

$$H_T = H - H_D = 2047 - 1270 = 777,3 \text{ Н}$$

Радиальное расстояние от реакции прокладки до болтовой окружности:

$$h_G = \frac{C - G}{2} = (250 - 193) / 2 = 28,5 \text{ мм}$$

Плечо для нагрузки  $H_T$  (интегральные фланцы, а также иные, рассчитываемые аналогично):

$$h_T = \frac{1}{2} \left[ \frac{C - B}{2} + h_G \right] = 1/2 * [(250 - 152) / 2 + 28,5] = 38,75 \text{ мм}$$

Нагрузка на прокладку (разница между проектной болтовой нагрузкой и равнодействующей давления), в рабочих:

$$H_G = W_0 - H = 3320 - 2047 = 1273 \text{ Н}$$

Болтовой интервал:

$$B_s = \frac{\pi \cdot C}{n} = 3,142 * 250 / 8 = 98,17 \text{ мм}$$

Номинальный диаметр болта:

$$a = d_b = 24 \text{ мм}$$

Коэффициент болтового интервала:

$$B_{sc} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{B_s}{2 \cdot a + t}} \right\} = \max \{ 1; (98,17 / (2 * 24 + 25))^{1/2} \} = 1,16$$

$$X_g = \frac{g_1}{g_0} = 17 / 4,5 = 3,778$$

Коэффициент

$$h_0 = \sqrt{B \cdot g_0} = (152 * 4,5)^{1/2} = 26,15 \text{ мм}$$

$$X_h = \frac{h}{h_0} = 31,25 / 26,15 = 1,195$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$F = 0,6426$$

Расчетные коэффициенты:

$$e = \frac{F}{h_0} = 0,6426 / 26,15 = 0,02457 \text{ 1/мм}$$

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19785.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Е-3.00.00.000 РР				Лист
				142

$$K = \frac{A}{B} = 300 / 152 = 1,974$$

$$T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg K) - 1}{(1,0472 + 1,9448 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (1,974^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg 1,974) - 1) / ((1,0472 + 1,9448 \cdot 1,974^2) \cdot (1,974 - 1)) = 1,517$$

$$U = \frac{K^2 (1 + 8,55246 \cdot \lg K) - 1}{1,36136 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (1,974^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg 1,974) - 1) / (1,36136 \cdot (1,974^2 - 1) \cdot (1,974 - 1)) = 3,318$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$V = 0,04937$$

Коэффициент d для интегральных фланцев:

$$d = \frac{U}{V} \cdot h_0 \cdot g_0^2 = 3,318 / 0,04937 \cdot 26,15 \cdot 4,5^2 = 0,3559 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$$

$$L = \frac{t \cdot e + 1}{T} + \frac{t^3}{d} = (25 \cdot 0,02457 + 1) / 1,517 + 25^3 / 0,3559 \cdot 10^{-4} = 1,503$$

Момент инерции сечения фланца при изгибе (интегральные фланцы с втулкой):

$$I = \frac{0,0874 \cdot L \cdot g_0^2 \cdot h_0 \cdot B}{V} = 0,0874 \cdot 1,503 \cdot 4,5 \cdot 26,15 \cdot 152 / 0,04937 = 0,2143 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$$

$$G_{wg} = 0,5 \cdot (g_0 + g_1) = 0,5 \cdot (4,5 + 17) = 10,75 \text{ мм}$$

$$A_R = 0,5 \cdot (A - B) = 0,5 \cdot (300 - 152) = 74 \text{ мм}$$

Так как  $t \geq G_{wg}$ ,

$$A_A = A_R = 74 \text{ мм}$$

$$B_B = t = 25 \text{ мм}$$

$$K_{AB} = (A_A \cdot B_B^3) \cdot \left[ \frac{1}{3} - 0,21 \cdot \left( \frac{B_B}{A_A} \right) \cdot \left( 1 - \frac{1}{12} \cdot \left\{ \frac{B_B}{A_A} \right\}^4 \right) \right] = (74 \cdot 25^3) \cdot [1/3 - 0,21 \cdot (25/74) \cdot (1 - 1/12 \cdot (25/74)^4)] = 0,3035 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$$

$$C_c = h = 31,25 \text{ мм}$$

$$D_{DG} = G_{wg} = 10,75 \text{ мм}$$

$$K_{CD} = (C_c \cdot D_{DG}^3) \cdot \left[ \frac{1}{3} - 1,05 \cdot \left( \frac{D_{DG}}{C_c} \right) \cdot \left( 1 - \frac{1}{192} \cdot \left\{ \frac{D_{DG}}{C_c} \right\}^4 \right) \right] = (31,25 \cdot 10,75^3) \cdot [1/3 - 1,05 \cdot (10,75/31,25) \cdot (1 - 1/192 \cdot (10,75/31,25)^4)] = (-0,1081 \cdot 10^{-8}) \text{ м}^4$$

Полярный момент сечения фланца (интегральные фланцы, плоские фланцы с втулкой):

$$I_P = K_{AB} + K_{CD} = 0,3035 \cdot 10^{-6} + (-0,1081 \cdot 10^{-8}) = 0,3024 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$$

Компонент проектного момента на фланце, как результат действия внешнего изгибающего момента и/или осевой силы:

$$M_{oe} = 4 \cdot M_E \cdot \left[ \frac{I}{0,3846 \cdot I_P + I} \right] \cdot \left[ \frac{h_D}{C - 2 \cdot h_D} \right] + F_A \cdot h_D = 4 \cdot 3394 \cdot [0,2143 \cdot 10^{-6} / (0,3846 \cdot 0,3024 \cdot 10^{-6} + 0,2143 \cdot 10^{-6})] \cdot [40,5 / (250 - 2 \cdot 40,5)] + 4800 \cdot 40,5 = 2303 \text{ Н м}$$

Коэффициент момента для расчета свободных колец:

$$F_g = 1$$

Изгибающий момент в рабочих условиях (внутреннее давление):

$$M_o = [(H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G) \cdot B_{sc} + M_{oe}] \cdot F_g = [(1270 \cdot 40,5 + 777,3 \cdot 38,75 + 1273 \cdot 28,5) \cdot 1,16 + 2303] \cdot 1 = 2440 \text{ Н м}$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$f = 1$$

Продольные напряжения во втулке, в рабочих условиях:

Изн. № подл. 19785.4	Подпись и дата				
	Изн. № дубл.				
	Взам. инв. №				
Изн. № подл. 19785.4	Подпись и дата				
	Изн. № дубл.				
	Взам. инв. №				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 PP
					Лист 143

$$S_H = \frac{f \cdot M_o}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 2440 / (1,503 \cdot 17^2 \cdot 152) = 36,94 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min\{1,5 \cdot S_{\sigma}; 2,5 \cdot S_{\sigma 0}\}$$

$$\min\{1,5 \cdot S_{\sigma}; 2,5 \cdot S_{\sigma 0}\} = \min\{1,5 \cdot 149,6; 2,5 \cdot 168,6\} = 224,3 \text{ МПа}$$

36,94 МПа ≤ 224,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, рабочие условия:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_o}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 \cdot 25 \cdot 0,02457 + 1) \cdot 2440 / (1,503 \cdot 25^2 \cdot 152) = 31,04 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{\sigma}$$

31,04 МПа ≤ 149,6 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left( 0,66845 + 5,7169 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (1,974 - 1) \cdot (0,66845 + 5,7169 \cdot 1,974^2 \cdot \lg 1,974 / (1,974^2 - 1)) = 3,019$$

$$Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (1,974^2 + 1) / (1,974^2 - 1) = 1,691$$

Касательные напряжения во фланце, рабочие условия:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_o}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 3,019 \cdot 2440 / (25^2 \cdot 152) - 1,691 \cdot 31,04 = 25,06 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{\sigma}$$

25,06 МПа ≤ 149,6 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (36,94 + 31,04) / 2 = 33,99 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\sigma}$$

33,99 МПа ≤ 149,6 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (36,94 + 25,06) / 2 = 31 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\sigma}$$

31 МПа ≤ 149,6 МПа, **Условие прочности выполнено**

Болтовая нагрузка в условиях монтажа:

$$W_{\xi} = \left( \frac{A_m + A_b}{2} \right) \cdot S_{b\xi} = (0,001421 + 0,002592) / 2 \cdot 147,2 = 2,954 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Изгибающий момент в условиях монтажа (внутреннее давление):

$$M_{\xi} = \frac{W_{\xi} \cdot (C - G) \cdot B_{sc} \cdot F_s}{2} = 2,954 \cdot 10^5 \cdot (250 - 193) \cdot 1,16 \cdot 1 / 2 = 9762 \text{ Н м}$$

Продольные напряжения во втулке, в условиях монтажа:

$$S_H = \frac{f \cdot M_{\xi}}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 9762 / (1,503 \cdot 17^2 \cdot 152) = 147,8 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min\{1,5 \cdot S_{\xi}; 2,5 \cdot S_{\sigma \xi}\}$$

$$\min\{1,5 \cdot S_{\xi}; 2,5 \cdot S_{\sigma \xi}\} = \min\{1,5 \cdot 163,3; 2,5 \cdot 183\} = 245 \text{ МПа}$$

147,8 МПа ≤ 245 МПа, **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл. 19785.4	Подпись и дата				
	Взам. инв. №				
	Инов. № дубл.				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 PP
					Лист 144



Радиальные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_{\Sigma}}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 \cdot 25 \cdot 0,02457 + 1) \cdot 9762 / (1,503 \cdot 25^2 \cdot 152) = 124,2 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{\Sigma}$$

124,2 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Касательные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_{\Sigma}}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 3,019 \cdot 9762 / (25^2 \cdot 152) - 1,691 \cdot 124,2 = 100,3 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{\Sigma}$$

100,3 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (147,8 + 124,2) / 2 = 136 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\Sigma}$$

136 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (147,8 + 100,3) / 2 = 124 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\Sigma}$$

124 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):

$$J = \frac{52,14 \cdot V \cdot M_{\Sigma}}{L \cdot E_{\Sigma} \cdot \sigma_0^2 \cdot K_R \cdot h_0} = (52,14 \cdot 0,04937 \cdot 2440) / (1,503 \cdot 1,943 \cdot 10^5 \cdot 4,5^2 \cdot 0,3 \cdot 26,15) = 0,1353$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1,0$$

$$0,1353 \leq 1,0$$

**Условие жёсткости выполнено**

- для условий монтажа:

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, условия монтажа):

$$J = \frac{52,14 \cdot V \cdot M_{\Sigma}}{L \cdot E_{\Sigma} \cdot \sigma_0^2 \cdot K_R \cdot h_0} = (52,14 \cdot 0,04937 \cdot 9762) / (1,503 \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot 4,5^2 \cdot 0,3 \cdot 26,15) = 0,5286$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1,0$$

$$0,5286 \leq 1,0$$

**Условие жёсткости выполнено**

### **Расчёт напряжений второго фланца:**

Параметры первого и второго фланцев полностью совпадают, расчёт второго фланца не проводится

**Условие прочности выполнено**

### **Жесткость фланца**

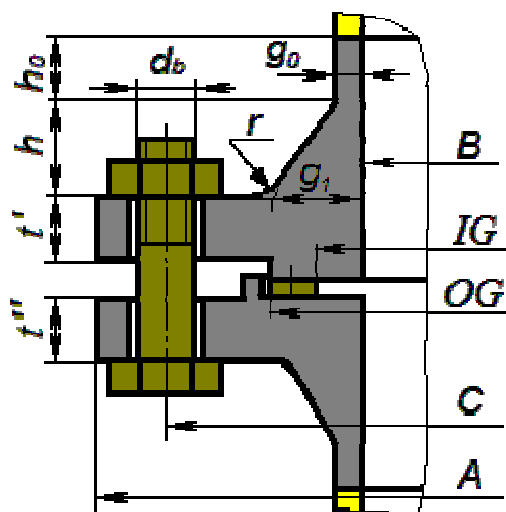
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19785.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Е-3.00.00.000 РР				Лист
				145

Параметры первого и второго фланцев полностью совпадают, расчёт второго фланца не проводится

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19785.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Е-3.00.00.000 РР				
Лист				
146				

## **Фланцевое соединение DN80**

## 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: 160 мм

**Данные первого фланца (кольца):**

Смежный элемент: Штуцер V DN80

Материал смежного элемента: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281

Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245)

Наружный диаметр фланца (кольца), А: 195 мм

Толщина фланца (кольца), t: 21 мм

Сумма прибавок, с: 3 мм

Внешняя коррозия фланца, с<sub>ф</sub>: 0 мм

Внутренний диаметр фланца, В: 78 мм

Длина конической части втулки, h: 27,5 мм

Длина цилиндрической части втулки,  $h_0$ : 6,5 мм

Толщина цилиндрической части втулки,  $g_0$ : 6 мм

Толщина конической части втулки,  $g_1$ : 17 мм

Радиус перехода, г: 5 мм

**Данные второго фланца (кольца):**

Смежный элемент:

Материал смежного элемента: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281

Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245)

Наружный диаметр фланца (кольца), А: 195 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: 160 мм
19785.4					<b>Данные первого фланца (кольца):</b>
					Смежный элемент: Штуцер V DN80
					Материал смежного элемента: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281
					Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245)
					Наружный диаметр фланца (кольца), А: 195 мм
					Толщина фланца (кольца), t: 21 мм
					Сумма прибавок, с: 3 мм
					Внешняя коррозия фланца, с <sub>г</sub> : 0 мм
					Внутренний диаметр фланца, В: 78 мм
					Длина конической части втулки, h: 27,5 мм
					Длина цилиндрической части втулки, h <sub>0</sub> : 6,5 мм
					Толщина цилиндрической части втулки, g <sub>0</sub> : 6 мм
					Толщина конической части втулки, g <sub>1</sub> : 17 мм
					Радиус перехода, г: 5 мм
					<b>Данные второго фланца (кольца):</b>
					Смежный элемент:
					Материал смежного элемента: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281
					Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245)
					Наружный диаметр фланца (кольца), А: 195 мм
					Толщина фланца (кольца), t: 21 мм
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	E-3.00.00.000 PP
19785.4					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист
					147



Свойства материала смежного элемента фланца 2

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 67,2 °С (рабочие условия):  
 $S_{no2} = 169,4 \text{ МПа}$   
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 20 °С (рабочие условия):  
 $S_{ng2} = 183 \text{ МПа}$

Свойства материала фланца (кольца) 1

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 67,2 °С (рабочие условия):  
 $S_{fo1} = \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{224,3 / 1,5; 440 / 2,4\} = 149,6 \text{ МПа}$   
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 67,2 °С:  
 $E_1 = 1,943 \cdot 10^5 \text{ МПа}$   
Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 67,2 °С:  
 $\alpha_1 = 0,116 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$   
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 20 °С (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) при температуре T = 20 °С:  
 $E^{20}_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала фланца (кольца) 2

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 67,2 °С (рабочие условия):  
 $S_{fo2} = \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{224,3 / 1,5; 440 / 2,4\} = 149,6 \text{ МПа}$   
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 67,2 °С:  
 $E_2 = 1,943 \cdot 10^5 \text{ МПа}$   
Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 67,2 °С:  
 $\alpha_2 = 0,116 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$   
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 20 °С (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) при температуре T = 20 °С:  
 $E^{20}_2 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётные параметры первого фланца:

Внутренний диаметр фланца (с учетом коррозии):  
 $B = B + 2 \cdot c = 78 + 2 \cdot 3 = 84 \text{ мм}$   
Диаметр втулки с учетом коррозии (для фланцев, приварных встык):  
 $\xi_0 = \xi_0 - c = 6 - 3 = 3 \text{ мм}$   
Больший диаметр конической втулки с учетом коррозии:  
 $\xi_1 = \xi_1 - c = 17 - 3 = 14 \text{ мм}$   
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 <sub>n</sub> , МПа
Спирально-навитая с	3	69	-	-	-

Изн. № подл. 19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата						Лист 149
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР					



$$A_b = n \cdot f_b = 8 \cdot 0,144 \cdot 10^{-3} = 0,001152 \text{ m}^2$$

**Расчёт болтов(шпилек):**

Условие прочности болтов:

$$A_{m^-} \leq A_b$$

$$0,5824 \cdot 10^{-3} \text{ M}^2 \leq 0,001152 \text{ M}^2$$

**Условие прочности выполнено**

*Расчёт напряжений первого фланца:*

Равнодействующая давления на внутренней поверхности фланца:

$$H_D = 0.785 \cdot B^2 \cdot p = 0.785 \cdot 84^2 \cdot 0,07000 = 387,7 \text{ H}$$

Плечо момента для силы  $H_D$  (фланцы интегрального типа, или другие, рассчитываемые аналогично):

$$h_D = \frac{C - B - g_1}{2} = (160 - 84 - 14) / 2 = 31 \text{ mm}$$

Равнодействующая давления:

$$H = 0.785 \cdot G^2 \cdot p = 0.785 \cdot 113^2 \cdot 0,07000 = 701,7 \text{ H}$$

Разница между общей равнодействующей давления и равнодействующей на внутренней поверхности фланца:

$$H_T = H - H_D = 701,7 - 387,7 = 313,9 \text{ H}$$

Радиальное расстояние от реакции прокладки до болтовой окружности:

$$h_G = \frac{C-G}{2} = (160-113)/2 = 23,5 \text{ mm}$$

Плечо для нагрузки  $N_T$  (интегральные фланцы, а также иные, рассчитываемые аналогично):

$$h_T = \frac{1}{2} \left[ \frac{C-B}{2} + h_G \right] = 1/2 * [(160-84)/2 + 23,5] = 30,75 \text{ mm}$$

Нагрузка на прокладку (разница между проектной болтовой нагрузкой и равнодействующей давления), в рабочих:

$$H_G = W_0 - H = 1224 - 701,7 = 521,8 \text{ H}$$

Болтовой интервал:

$$B_s = \frac{\pi \cdot C}{n} = 3,142 \cdot 160 / 8 = 62,83 \text{ mm}$$

Номинальный диаметр болта:

$$a = d_p = 16 \text{ mm}$$

Коэффициент болтового интервала:

$$B_{sc} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{B_s}{2 \cdot a + t}} \right\} = \max \{ 1; (62,83 / (2 \cdot 16 + 21))^{1/2} \} = 1,089$$

$$X_c = \frac{g_1}{g_0} = 14/3 = 4,667$$

Коэффициент

$$h_0 = \sqrt{B \cdot s_0} = (84 \cdot 3)^{1/2} = 15,87 \text{ mm}$$

$$X_h = \frac{h}{h_0} = 27,5 / 15,87 = 1,732$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$F = 0.5389$$

Расчетные коэффициенты:

$$e = \frac{F}{h_s} = 0,5389 / 15,87 = 0,03395 \text{ 1/MM}$$

Инв. № подл.	19785.4	Подпись и дата		Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p>Нагрузка на прокладку (разница между проектной нагрузкой и равнодействующей давления), в рабочих:</p> $H_{\text{г}} = W_0 - H = 1224 - 701,7 = 521,8 \text{ Н}$ <p>Болтовой интервал:</p> $B_s = \frac{\pi \cdot C}{n} = 3,142 \cdot 160 / 8 = 62,83 \text{ мм}$ <p>Номинальный диаметр болта:</p> $a = d_b = 16 \text{ мм}$ <p>Коэффициент болтового интервала:</p> $B_{sc} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{B_s}{2 \cdot a + t}} \right\} = \max \{ 1; (62,83 / (2 \cdot 16 + 21))^{1/2} \} = 1,089$ $X_{\text{г}} = \frac{g_1}{g_0} = 14 / 3 = 4,667$ <p>Коэффициент</p> $h_o = \sqrt{B \cdot g_0} = (84 \cdot 3)^{1/2} = 15,87 \text{ мм}$ $X_h = \frac{h}{h_o} = 27,5 / 15,87 = 1,732$ <p>Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):</p> $F = 0,5389$ <p>Расчетные коэффициенты:</p> $e = \frac{F}{h_o} = 0,5389 / 15,87 = 0,03395 \text{ 1/мм}$
							<div> <div>Изм.</div> <div>Лист</div> <div>№ докум.</div> <div>Подп.</div> <div>Дата</div> </div> <div>Е-3.00.00.000 РР</div> <div>Лист 151</div>

$$K = \frac{A}{B} = 195 / 84 = 2,321$$

$$T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg K) - 1}{(1,0472 + 1,9448 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (2,321^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg 2,321) - 1) / ((1,0472 + 1,9448 \cdot 2,321^2) \cdot (2,321 - 1)) = 1,395$$

$$U = \frac{K^2 (1 + 8,55246 \cdot \lg K) - 1}{1,36136 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (2,321^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg 2,321) - 1) / (1,36136 \cdot (2,321^2 - 1) \cdot (2,321 - 1)) = 2,691$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$V = 0,02399$$

Коэффициент d для интегральных фланцев:

$$d = \frac{U}{V} \cdot h_0 \cdot g_0^2 = 2,691 / 0,02399 \cdot 15,87 \cdot 3^2 = 0,1603 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$$

$$L = \frac{t \cdot e + 1}{T} + \frac{t^3}{d} = (21 \cdot 0,03395 + 1) / 1,395 + 21^3 / 0,1603 \cdot 10^{-4} = 1,806$$

Момент инерции сечения фланца при изгибе (интегральные фланцы с втулкой):

$$I = \frac{0,0874 \cdot L \cdot g_0^2 \cdot h_0 \cdot B}{V} = 0,0874 \cdot 1,806 \cdot 3 \cdot 15,87 \cdot 84 / 0,02399 = 0,7897 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

$$G_{wg} = 0,5 \cdot (g_0 + g_1) = 0,5 \cdot (3 + 14) = 8,5 \text{ мм}$$

$$A_R = 0,5 \cdot (A - B) = 0,5 \cdot (195 - 84) = 55,5 \text{ мм}$$

Так как  $t \geq G_{wg}$ ,

$$A_A = A_R = 55,5 \text{ мм}$$

$$B_B = t = 21 \text{ мм}$$

$$K_{AB} = (A_A \cdot B_B^3) \cdot \left[ \frac{1}{3} - 0,21 \cdot \left( \frac{B_B}{A_A} \right) \cdot \left( 1 - \frac{1}{12} \cdot \left\{ \frac{B_B}{A_A} \right\}^4 \right) \right] = (55,5 \cdot 21^3) \cdot [1/3 - 0,21 \cdot (21/55,5) \cdot (1 - 1/12 \cdot (21/55,5)^4)] = 0,1306 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$$

$$C_c = h = 27,5 \text{ мм}$$

$$D_{DG} = G_{wg} = 8,5 \text{ мм}$$

$$K_{CD} = (C_c \cdot D_{DG}^3) \cdot \left[ \frac{1}{3} - 1,05 \cdot \left( \frac{D_{DG}}{C_c} \right) \cdot \left( 1 - \frac{1}{192} \cdot \left\{ \frac{D_{DG}}{C_c} \right\}^4 \right) \right] = (27,5 \cdot 8,5^3) \cdot [1/3 - 1,05 \cdot (8,5/27,5) \cdot (1 - 1/192 \cdot (8,5/27,5)^4)] = 0,1487 \cdot 10^{-9} \text{ м}^4$$

Полярный момент сечения фланца (интегральные фланцы, плоские фланцы с втулкой):

$$I_p = K_{AB} + K_{CD} = 0,1306 \cdot 10^{-6} + 0,1487 \cdot 10^{-9} = 0,1307 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$$

Компонент проектного момента на фланце, как результат действия внешнего изгибающего момента и/или осевой силы:

$$M_{oe} = 4 \cdot M_E \cdot \left[ \frac{I}{0,3846 \cdot I_p + I} \right] \cdot \left[ \frac{h_D}{C - 2 \cdot h_D} \right] + F_A \cdot h_D = 4 \cdot 989,9 \cdot [0,7897 \cdot 10^{-7} / (0,3846 \cdot 0,1307 \cdot 10^{-6} + 0,7897 \cdot 10^{-7})] \cdot [31 / (160 - 2 \cdot 31)] + 2900 \cdot 31 = 855,3 \text{ Н м}$$

Коэффициент момента для расчета свободных колец:

$$F_g = 1$$

Изгибающий момент в рабочих условиях (внутреннее давление):

$$M_o = [(H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G) \cdot B_{sc} + M_{oe}] \cdot F_g = [(387,7 \cdot 31 + 313,9 \cdot 30,75 + 521,8 \cdot 23,5) \cdot 1,089 + 855,3] \cdot 1 = 892,2 \text{ Н м}$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$f = 1$$

Продольные напряжения во втулке, в рабочих условиях:

Подпись и дата					
Инв. № дубл.					
Взам. инв. №					
Подпись и дата					
Инв. № подл.	19785.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
Е-3.00.00.000 PP					Лист
					152



$$S_H = \frac{f \cdot M_o}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 892,2 / (1,806 \cdot 14^2 \cdot 84) = 30,01 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min\{1,5 \cdot S_{\sigma}; 2,5 \cdot S_{\sigma 0}\}$$

$$\min\{1,5 \cdot S_{\sigma}; 2,5 \cdot S_{\sigma 0}\} = \min\{1,5 \cdot 149,6; 2,5 \cdot 168,6\} = 224,3 \text{ МПа}$$

30,01 МПа ≤ 224,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, рабочие условия:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_o}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 \cdot 21 \cdot 0,03395 + 1) \cdot 892,2 / (1,806 \cdot 21^2 \cdot 84) = 25,98 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{\sigma}$$

25,98 МПа ≤ 149,6 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left( 0,66845 + 5,7169 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (2,321 - 1) \cdot (0,66845 + 5,7169 \cdot 2,321^2 \cdot \lg 2,321 / (2,321^2 - 1)) = 2,449$$

$$Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (2,321^2 + 1) / (2,321^2 - 1) = 1,456$$

Касательные напряжения во фланце, рабочие условия:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_o}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 2,449 \cdot 892,2 / (21^2 \cdot 84) - 1,456 \cdot 25,98 = 21,16 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{\sigma}$$

21,16 МПа ≤ 149,6 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (30,01 + 25,98) / 2 = 27,99 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\sigma}$$

27,99 МПа ≤ 149,6 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (30,01 + 21,16) / 2 = 25,58 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\sigma}$$

25,58 МПа ≤ 149,6 МПа, **Условие прочности выполнено**

Болтовая нагрузка в условиях монтажа:

$$W_{\xi} = \left( \frac{A_m + A_b}{2} \right) \cdot S_{b \xi} = (0,5824 \cdot 10^{-3} + 0,001152) / 2 \cdot 147,2 = 1,277 \cdot 10^{-5} \text{ Н}$$

Изгибающий момент в условиях монтажа (внутреннее давление):

$$M_{\xi} = \frac{W_{\xi} \cdot (C - G) \cdot B_{sc} \cdot F_s}{2} = 1,277 \cdot 10^{-5} \cdot (160 - 113) \cdot 1,089 \cdot 1 / 2 = 3266 \text{ Н м}$$

Продольные напряжения во втулке, в условиях монтажа:

$$S_H = \frac{f \cdot M_{\xi}}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 3266 / (1,806 \cdot 14^2 \cdot 84) = 109,8 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min\{1,5 \cdot S_{\xi}; 2,5 \cdot S_{\xi 0}\}$$

$$\min\{1,5 \cdot S_{\xi}; 2,5 \cdot S_{\xi 0}\} = \min\{1,5 \cdot 163,3; 2,5 \cdot 183\} = 245 \text{ МПа}$$

109,8 МПа ≤ 245 МПа, **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$\frac{S_H + S_R}{2} = (30,01 + 25,98) / 2 = 27,99 \text{ МПа}$ <p>Условие прочности:</p> $\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_b$ <p>27,99 МПа ≤ 149,6 МПа, <b>Условие прочности выполнено</b></p> $\frac{S_H + S_T}{2} = (30,01 + 21,16) / 2 = 25,58 \text{ МПа}$ <p>Условие прочности:</p> $\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_b$ <p>25,58 МПа ≤ 149,6 МПа, <b>Условие прочности выполнено</b></p> <p>Болтовая нагрузка в условиях монтажа:</p> $W_g = \left( \frac{A_m + A_b}{2} \right) \cdot S_{bg} = (0,5824 \cdot 10^{-3} + 0,001152) / 2 \cdot 147,2 = 1,277 \cdot 10^5 \text{ Н}$ <p>Изгибающий момент в условиях монтажа (внутреннее давление):</p> $M_g = \frac{W_g \cdot (C - G) \cdot B_{sc} \cdot F_s}{2} = 1,277 \cdot 10^5 \cdot (160 - 113) \cdot 1,089 \cdot 1 / 2 = 3266 \text{ Н м}$ <p>Продольные напряжения во втулке, в условиях монтажа:</p> $S_H = \frac{f \cdot M_g}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 3266 / (1,806 \cdot 14^2 \cdot 84) = 109,8 \text{ МПа}$ <p>Условие прочности:</p> $S_H \leq \min\{1,5 \cdot S_{tg}; 2,5 \cdot S_{ng}\}$ $\min\{1,5 \cdot S_{tg}; 2,5 \cdot S_{ng}\} = \min\{1,5 \cdot 163,3; 2,5 \cdot 183\} = 245 \text{ МПа}$ <p>109,8 МПа ≤ 245 МПа, <b>Условие прочности выполнено</b></p>

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 PP	Лист
						153

Радиальные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_{\Sigma}}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 \cdot 21 \cdot 0,03395 + 1) \cdot 3266 / (1,806 \cdot 21^2 \cdot 84) = 95,12 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{\Sigma}$$

95,12 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Касательные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_{\Sigma}}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 2,449 \cdot 3266 / (21^2 \cdot 84) - 1,456 \cdot 95,12 = 77,45 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{\Sigma}$$

77,45 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (109,8 + 95,12) / 2 = 102,5 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\Sigma}$$

102,5 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (109,8 + 77,45) / 2 = 93,65 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\Sigma}$$

93,65 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):

$$J = \frac{52,14 \cdot V \cdot M_{\Sigma}}{L \cdot E_{\Sigma} \cdot \sigma_0^2 \cdot K_R \cdot h_0} = (52,14 \cdot 0,02399 \cdot 892,2) / (1,806 \cdot 1,943 \cdot 10^5 \cdot 3^2 \cdot 0,3 \cdot 15,87) = 0,07421$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1,0$$

$$0,07421 \leq 1,0$$

**Условие жёсткости выполнено**

- для условий монтажа:

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, условия монтажа):

$$J = \frac{52,14 \cdot V \cdot M_{\Sigma}}{L \cdot E_{\Sigma} \cdot \sigma_0^2 \cdot K_R \cdot h_0} = (52,14 \cdot 0,02399 \cdot 3266) / (1,806 \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot 3^2 \cdot 0,3 \cdot 15,87) = 0,2652$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1,0$$

$$0,2652 \leq 1,0$$

**Условие жёсткости выполнено**

### **Расчёт напряжений второго фланца:**

Параметры первого и второго фланцев полностью совпадают, расчёт второго фланца не проводится

**Условие прочности выполнено**

### **Жесткость фланца**

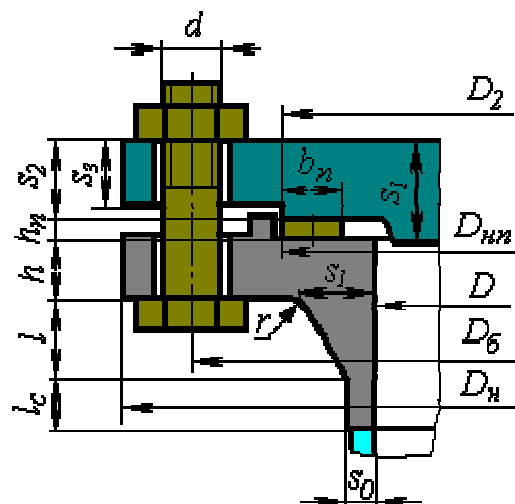
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19785.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Е-3.00.00.000 РР				Лист
				154

Параметры первого и второго фланцев полностью совпадают, расчёт второго фланца не проводится

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19785.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Е-3.00.00.000 РР				
Лист				
155				

## Крышка DN80

**Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.4-2007 и ГОСТ Р 52857.2-2007**



### Исходные данные

#### Параметры крышки:

Материал: 09Г2С (КП245)

Толщина стенки,  $s_1$ : 22 мм

Прибавка для компенсации коррозии и эрозии,  $c_1$ : 3 мм

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

Прибавка технологическая,  $c_3$ : 0 мм

Сумма прибавок к расчётной толщине стенки,  $c$ : 3 мм

Толщина в месте прокладки,  $s_2$ : 20 мм

Толщина вне уплотнения,  $s_3$ : 16 мм

Наименьший диаметр наружной утоненной части,  $D_2$ : 120 мм

Наружный диаметр крышки,  $D_n$ : 195 мм

#### Шпильки:

Материал: 35Х

Наружный диаметр,  $d$ : 16 мм

Количество,  $n$ : 8

Контроль затяжки: Нет

#### Прокладка:

Материал прокладки: Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали

Толщина,  $h_n$ : 3,2 мм

Наружный диаметр,  $D_{n.p.}$ : 120 мм

Ширина,  $b_n$ : 7 мм

Коэффициент прочности сварного шва:

$$\varphi_p = 1$$

### Расчёт в рабочих условиях

Изнв. № подл.	19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изнв. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<div>Е-3.00.00.000 РР</div> <div>Лист 156</div>

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
19785.4				

### Расчёт фланца по ГОСТ Р 52857.4-2007:

Температура болтов (шпилек),  $t_6$ : 59,5 °C  
 Номинальные допускаемые напряжения для материала 35Х при температуре  $T = 59,5$  °C :  
 $[\sigma]_6 = 230$  МПа  
 Модуль продольной упругости для материала 35Х при температуре  $T = 59,5$  °C:  
 $E_6 = 2,165 \cdot 10^5$  МПа  
 Коэффициент линейного расширения для материала 35Х при температуре  $T = 59,5$  °C:  
 $\alpha_6 = 0,134 \cdot 10^{-4}$  °C  
 Номинальные допускаемые напряжения для материала 35Х при температуре  $T = 20$  °C :  
 $[\sigma]^{20}_6 = 230$  МПа  
 Модуль продольной упругости для материала 35Х при температуре  $T = 20$  °C:  
 $E^{20}_6 = 2,18 \cdot 10^5$  МПа

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре  $T = 67,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рабочие условия):

$$[\sigma]_{\text{кр}} = \eta \cdot \min(R_{\text{e}t} / n_T; R_{\text{m}t} / n_B; R_{\text{m}t/10^{0.5}t} / n_d; R_{\text{p}1,0/10^{0.5}t} / n_n) = 1 \cdot \min\{224,3 / 1,5; 407,5 / 2,4; - / -; - / -\} = 149,6 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) при температуре  $T = 67,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$E_{\text{кр}} = 1,943 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С (КП245) при температуре  $T = 67,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\alpha_{\text{кр}} = 0,116 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рабочие условия):

$$[\sigma]_{\text{кр}}^{20} = \eta \cdot \min(R_{\text{e}t} / n_T; R_{\text{m}t} / n_B; R_{\text{m}t/10^{0.5}t} / n_d; R_{\text{p}1,0/10^{0.5}t} / n_n) = 1 \cdot \min\{245 / 1,5; 440 / 2,4; - / -; - / -\} = 163,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) при температуре  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

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

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			

$$b_0 = 7 \text{ mm}$$

$$\begin{cases} b_0 = b_{np} & \text{при } b_{np} \leq 15.0 \text{ мм} \\ b_0 = 3.8 \cdot \sqrt{b_{np}} & \text{при } b_{np} > 15.0 \text{ мм} \end{cases}$$

Рабочий наружный диаметр прокладки:

$$D_{\text{HP}} = 120 \text{ mm}$$

Средний эффективный диаметр прокладки:

$$D_{\text{eff}} = D_{\text{зад}} - b_0 = 120 - 7 = 113 \text{ мм}$$

Для металлических и асбометаллических прокладок  $y_n = 0$ .

### Расчётные параметры болтов (шпилек):

Рабочая длина болта (шпильки):

$$L_{\text{б0}} = h + s_2 + h_n = 20 + 21 + 3,2 = 44,2 \text{ мм}$$

Площадь сечения шпильки (по внутреннему диаметру резьбы):

$$f_0 = 0,144 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Эффективная длина шпильки:

$$L_{\text{е}} = L_{\text{б0}} + 0,56 \cdot d = 44,2 + 0,56 \cdot 16 = 53,16 \text{ мм}$$

Податливость шпилек:

$$y_{\text{е}} = \frac{L_{\text{е}}}{E_{\text{е}}^{20} \cdot f_{\text{е}} \cdot n} = 53,16 / (2,18 \cdot 10^5 \cdot 0,144 \cdot 10^{-3} \cdot 8) = 0,2117 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

### Расчётные параметры крышки:

$$K_{\text{кр}} = \frac{D_{\text{к}}}{D_{\text{м}}} = 195 / 113 = 1,726$$

$$x_{\text{кр}} = \frac{0,67 \cdot [K_{\text{кр}}^2 \cdot (1 + 8,55 \cdot \lg K_{\text{кр}}) - 1]}{(K_{\text{кр}} - 1) \cdot \left[ K_{\text{кр}}^2 - 1 + (1,857 \cdot K_{\text{кр}}^2 + 1) \cdot \left( \frac{s_1}{s_2} \right)^3 \right]} = \frac{0,67 \cdot (1,726^2 \cdot (1 + 8,55 \cdot \lg(1,726)) - 1)}{(1,726 - 1) \cdot [1,726^2 - 1 + (1,857 \cdot 1,726^2 + 1) \cdot (22/20)^3]} = 0,6933$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) при температуре  $T = 20^\circ\text{C}$ :

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

Угловая податливость крышки:

$$y_{\text{кр}} = \frac{x_{\text{кр}}}{E_{\text{кр}}^{20} \cdot s_2^3} = 0,6933 / (1,99 \cdot 10^5 \cdot 20^3) = 0,2495 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{Н м}$$

### Расчёт нагрузок:

Равнодействующая давления:

$$Q_{\text{к}} = 0,785 \cdot D_{\text{м}}^2 \cdot p = 0,785 \cdot 113^2 \cdot 0,07000 = 701,7 \text{ Н}$$

Усилие на прокладке в рабочих условиях, необходимое для обеспечения герметичности:

$$R_{\text{к}} = \pi \cdot D_{\text{м}} \cdot b_0 \cdot m \cdot |p| = 3,142 \cdot 113 \cdot 7 \cdot 3 \cdot |0,07000| = 521,8 \text{ Н}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке:

$$F_{\text{обж}} = 0,5 \cdot \pi \cdot D_{\text{м}} \cdot b_0 \cdot q_{\text{обж}} = 0,5 \cdot 3,142 \cdot 113 \cdot 7 \cdot 69 = 8,573 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

$$\eta = y_n + y_{\text{е}} + y_{\text{ф}}' \cdot b'^2 + y_{\text{ф}}'' \cdot b''^2 = 0 + 0,2117 \cdot 10^{-6} + 0,2495 \cdot 10^{-4} \cdot 23,5^2 + 0,1571 \cdot 10^{-4} \cdot 23,5^2 = 0,6036 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения с крышкой, нагруженного внутренним давлением:

$$\alpha = 1 - \frac{y_n - (y_{\text{ф}}' \cdot b' + y_{\text{кр}} \cdot b) \cdot b}{\eta} = 1 - (0 - (0,1571 \cdot 10^{-4} \cdot 11,36 + 0,2495 \cdot 10^{-4} \cdot 23,5) \cdot 23,5) / 0,6036 \cdot 10^{-6} = 1,52$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях:

$$F_{\text{с1}} = \alpha \cdot Q_{\text{к}} + R_{\text{к}} = 1,52 \cdot 701,7 + 521,8 = 1588 \text{ Н}$$

Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или сечению наименьшего диаметра:

$$A_{\text{е}} = n \cdot f_{\text{е}} = 8 \cdot 0,144 \cdot 10^{-3} = 0,001152 \text{ м}^2$$

Изн. № подл. 19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Е-3.00.00.000 РР					Лист
										158
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов:

$$P_{б2} = \max \{ P_{обж}; 0.4 \cdot A_b \cdot [\sigma]_b^{20} \} = \max \{ 8,573 \cdot 10^4; 0.4 \cdot 0,001152 \cdot 230 = 1,06 \cdot 10^5 \} = 1,06 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

## 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),  $t_{\phi}$ : 67,2 °C

### Днища и крышки с дополнительным краевым моментом, нагруженные избыточным давлением

Равнодействующая давления:

$$\gamma = \frac{1}{y_{\pi} + y_{\phi} \cdot \frac{E_{\phi}^{20}}{E_{\phi}} + \left( y_{\psi} \cdot \frac{E_{\psi}^{20}}{E_{\psi}} + y_{\pi\psi} \cdot \frac{E_{\pi\psi}^{20}}{E_{\pi\psi}} \right) \cdot b^2} = \frac{1 / (0 + 0,2117 \cdot 10^{-6} \cdot 2,18 \cdot 10^5 / 2,165 \cdot 10^5 + (0,1571 \cdot 10^{-4} \cdot 1,99 \cdot 10^5 / 1,943 \cdot 10^5) \cdot 23,5^2)}{1,943 \cdot 10^5 + 0,2495 \cdot 10^{-4} \cdot 1,99 \cdot 10^5 / 1,943 \cdot 10^5} = 1,627 \cdot 10^6 \text{ Н/мм}$$

Нагрузка от температурных деформаций:

$$Q_t = \gamma \cdot \left( \alpha_{\psi}' \cdot h' \cdot (t_{\psi 1} - 20^{\circ}\text{C}) + \alpha_{\psi}'' \cdot h'' \cdot (t_{\psi 2} - 20^{\circ}\text{C}) - \alpha_{\phi} \cdot (h' + h'') \cdot (t_{\phi} - 20^{\circ}\text{C}) \right) = \frac{1,627 \cdot 10^6 \cdot (0,116 \cdot 10^{-4} \cdot 20 \cdot (67,2 - 20^{\circ}\text{C}) + 0,116 \cdot 10^{-4} \cdot 21 \cdot (67,2 - 20^{\circ}\text{C}) - 0,134 \cdot 10^{-4} \cdot (20 + 21) \cdot (59,5 - 20^{\circ}\text{C}))}{(67,2 - 20^{\circ}\text{C}) - 0,134 \cdot 10^{-4} \cdot (20 + 21) \cdot (59,5 - 20^{\circ}\text{C})} = 1216 \text{ Н}$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях:

$$P_{б1} = \max \left\{ \begin{array}{l} \alpha \cdot Q_{\pi} + R_{\pi} \\ \alpha \cdot Q_{\pi} + R_{\pi} - Q_t \end{array} \right\} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,52 \cdot 701,7 + 521,8 = 1588 \\ 1,52 \cdot 701,7 + 521,8 - 1216 = 372,7 \end{array} \right\} = 1588 \text{ Н}$$

Болтовая нагрузка в рабочих условиях:

$$P_{\phi}^P = P_{\phi}^M + (1 - \alpha) \cdot Q_{\pi} + Q_t = 1,06 \cdot 10^5 + (1 - 1,52) \cdot 701,7 + 1216 = 1,068 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

$$\psi = \frac{P_{\phi}^P}{Q_{\pi}} = 1,068 \cdot 10^5 / 702 = 152,2$$

$$K_{\phi} = 0.41 \cdot \sqrt{\frac{1 + 3 \cdot \psi \cdot \left( \frac{D_3}{D_{\phi\Pi}} - 1 \right)}{\frac{D_3}{D_{\phi\Pi}}}} = 0.41 \cdot [(1 + 3 \cdot 152,2 \cdot (160 / 113 - 1)) / (160 / 113)]^{1/2} = 4,761$$

Нарушено условие применимости расчётных формул:

$$\frac{s_1 - c}{D_p} \leq 0.11$$

В этом случае поправочный коэффициент для допускаемого давления:

$$K_p = \frac{2.2}{1 + \sqrt{1 + \left( 6 \cdot \frac{s_1 - c}{D_p} \right)^2}} = 2.2 / [1 + (6 \cdot [22 - 3] / 113)^2]^{1/2} = 0,9089$$

Допускаемое давление:

$$[p] = \left( \frac{s_1 - c}{K_0 \cdot K_{\phi} \cdot D_p} \right)^2 \cdot [\sigma] \cdot \phi \cdot K_p = ([22 - 3] / [1 \cdot 4,761 \cdot 113])^2 \cdot 149,6 \cdot 1 \cdot 0,9089 = 0,1696 \text{ МПа}$$

0,1696 МПа  $\geq$  0,07000 МПа

Заключение: **Условие прочности выполнено**

### Днища и крышки, нагруженные избыточным давлением

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

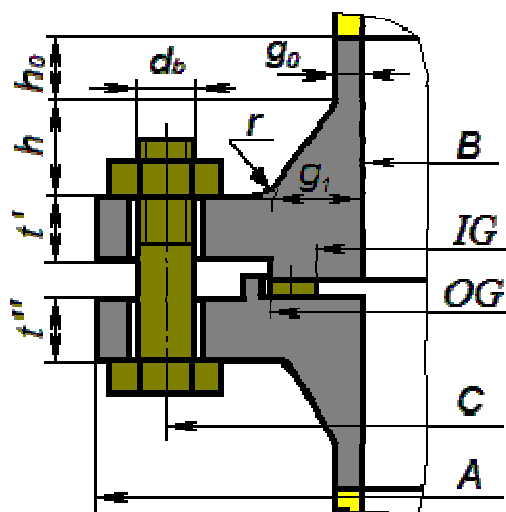
Изн.	№ подл.	19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР	
						Лист
						159





## 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 UC1, UC2 DN50

Материал смежного элемента: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281

Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245)

Наружный диаметр фланца (кольца), А: 160 мм

Толщина фланца (кольца), t: 17 мм

Сумма прибавок, с: 3 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)

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: -
					<p>Диаметр болтовой окружности, С: 125 мм</p> <p><b>Данные первого фланца (кольца):</b></p> <p>Смежный элемент: Штуцер UC1, UC2 DN50</p> <p>Материал смежного элемента: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281</p> <p>Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245)</p> <p>Наружный диаметр фланца (кольца), А: 160 мм</p> <p>Толщина фланца (кольца), t: 17 мм</p> <p>Сумма прибавок, с: 3 мм</p> <p>Внешняя коррозия фланца, с<sub>г</sub>: 0 мм</p> <p>Внутренний диаметр фланца, В: 48 мм</p> <p>Длина конической части втулки, h: 22,5 мм</p> <p>Длина цилиндрической части втулки, h<sub>0</sub>: 5,5 мм</p> <p>Толщина цилиндрической части втулки, g<sub>0</sub>: 5 мм</p> <p>Толщина конической части втулки, g<sub>1</sub>: 14 мм</p> <p>Радиус перехода, г: 5 мм</p> <p><b>Данные второго фланца (кольца):</b></p> <p>Смежный элемент:</p> <p>Материал смежного элемента: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281</p> <p>Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245)</p> <p>Наружный диаметр фланца (кольца), А: 160 мм</p> <p>Толщина фланца (кольца), t: 17 мм</p>
19785.4					<div> <div>Изм.</div> <div>Лист</div> <div>№ докум.</div> <div>Подп.</div> <div>Дата</div> </div> <div>E-3.00.00.000 PP</div>
					<div>Лист</div> <div>161</div>

Сумма прибавок, с: 3 мм  
Внешняя коррозия фланца, с<sub>г</sub>: 0 мм  
Внутренний диаметр фланца, В: 48 мм  
Длина конической части втулки, h: 22,5 мм  
Длина цилиндрической части втулки, h<sub>0</sub>: 5,5 мм  
Толщина цилиндрической части втулки, g<sub>0</sub>: 5 мм  
Толщина конической части втулки, g<sub>1</sub>: 14 мм  
Радиус перехода, г: 5 мм

**Шпильки:**

Материал: 35Х  
Наружный диаметр, d<sub>б</sub>: 16 мм  
Количество, n: 4  
Радиальная коррозия крепежа, с<sub>б</sub>: 0 мм

**Прокладка:**

Материал прокладки: Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали  
Толщина, h<sub>п</sub>: 3,2 мм  
Наружный диаметр, OG: 87 мм  
Внутренний диаметр, IG: 74 мм

**Расчёт в рабочих условиях**

**Условия нагружения:**

Расчётное осевое растягивающее усилие, F: 1500 Н  
Расчётный изгибающий момент, M: 282,8 Н м  
Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,07000 МПа  
Расчётная температура элементов соединения:  
Температура фланца (кольца), t<sub>ф</sub>: 67,2 °С  
Температура фланца (кольца), t<sub>ф</sub>: 67,2 °С  
Температура болтов (шпилек), t<sub>б</sub>: 59,5 °С

**Свойства материала болтов (шпилек)**

Допускаемые напряжения для материала 35Х при температуре T = 59,5 °С (рабочие условия):

$S_b = \min\{R_e^{20} / n_{T20}; R_m^{20} / n_{B20}; R_e / n_T; R_m / n_B\} = \min(590 / 4; 736 / 5; 577,1 / 1,5; 726 / 5) = 145,2 \text{ МПа}$   
Модуль продольной упругости для материала 35Х при температуре T = 59,5 °С:

$E_b = 2,116 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Коэффициент линейного расширения для материала 35Х при температуре T = 59,5 °С:

$\alpha_b = 0,1158 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$

Допускаемые напряжения для материала 35Х при температуре T = 20 °С (рабочие 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 UC1, UC2 DN50**

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 70 °С (рабочие условия):

$S_{n01} = 168,6 \text{ МПа}$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 20 °С (рабочие условия):

Изн. № подл. 19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Расчётный изгибающий момент, М: 282,8 Н м
					Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,07000 МПа
					Расчётная температура элементов соединения:
					Температура фланца (кольца), t <sub>ф</sub> : 67,2 °С
					Температура фланца (кольца), t <sub>ф</sub> : 67,2 °С
					Температура болтов (шпилек), t <sub>б</sub> : 59,5 °С
<b>Свойства материала болтов (шпилек)</b>					
Допускаемые напряжения для материала 35Х при температуре Т = 59,5 °С (рабочие условия):					
S <sub>b</sub> =min{R <sub>e</sub> <sup>20</sup> / n <sub>T20</sub> ; R <sub>m</sub> <sup>20</sup> / n <sub>B20</sub> ; R <sub>e</sub> / n <sub>T</sub> ; R <sub>m</sub> / n <sub>B</sub> }=min (590 / 4; 736 / 5; 577,1 / 1,5; 726 / 5)= 145,2 МПа					
Модуль продольной упругости для материала 35Х при температуре Т = 59,5 °С:					
E <sub>б</sub> = 2,116·10 <sup>5</sup> МПа					
Коэффициент линейного расширения для материала 35Х при температуре Т = 59,5 °С:					
α <sub>б</sub> = 0,1158·10 <sup>-4</sup> °С					
Допускаемые напряжения для материала 35Х при температуре Т = 20 °С (рабочие условия):					
S <sub>a</sub> =min{R <sub>e</sub> <sup>20</sup> / n <sub>T20</sub> ; R <sub>m</sub> <sup>20</sup> / n <sub>B20</sub> ; R <sub>e</sub> <sup>20</sup> / n <sub>T</sub> }=min (590 / 4; 736 / 5; 590 / 1,5)= 147,2 МПа					
Модуль продольной упругости для материала 35Х при температуре Т = 20 °С:					
E <sub>б</sub> <sup>20</sup> = 2,15·10 <sup>5</sup> МПа					
<b>Свойства материала смежного элемента фланца 1 Штуцер UC1, UC2 DN50</b>					
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре Т = 70 °С (рабочие условия):					
S <sub>но1</sub> = 168,6 МПа					
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре Т = 20 °С (рабочие условия):					
					Е-3.00.00.000 РР
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист
					162

$S_{ng1}= 183 \text{ МПа}$

**Свойства материала смежного элемента фланца 2**

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 67,2 °С (рабочие условия):

$S_{no2}= 169,4 \text{ МПа}$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 20 °С (рабочие условия):

$S_{ng2}= 183 \text{ МПа}$

**Свойства материала фланца (кольца) 1**

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 67,2 °С (рабочие условия):

$S_{fo1}= \min( R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{224,3 / 1,5; 440 / 2,4\}= 149,6 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 67,2 °С:

$E_1= 1,943 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 67,2 °С:

$\alpha_1= 0,116 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 20 °С (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) при температуре T = 20 °С:

$E^{20}_1= 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

**Свойства материала фланца (кольца) 2**

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 67,2 °С (рабочие условия):

$S_{fo2}= \min( R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{224,3 / 1,5; 440 / 2,4\}= 149,6 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 67,2 °С:

$E_2= 1,943 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 67,2 °С:

$\alpha_2= 0,116 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре T = 20 °С (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) при температуре T = 20 °С:

$E^{20}_2= 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

**Расчётные параметры первого фланца:**

Внутренний диаметр фланца (с учетом коррозии):

$B = B + 2 \cdot c = 48 + 2 \cdot 3 = 54 \text{ мм}$

Диаметр втулки с учетом коррозии (для фланцев, приварных встык):

$\xi_0 = \xi_0 - c = 5 - 3 = 2 \text{ мм}$

Больший диаметр конической втулки с учетом коррозии:

$\xi_1 = \xi_1 - c = 14 - 3 = 11 \text{ мм}$

Толщина фланца, с учетом коррозии:

$t = t - c_f = 17 - 0 = 17 \text{ мм}$

**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 К	Условный модуль сжатия $E_m$ , МПа
--------------------------	-----------------------------	--------------------------	--	-----------------------	------------------------------------

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19785.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Е-3.00.00.000 РР				Лист
				163



$$f_6 = 0,144 \cdot 10^{-3} \text{ M}^2$$

Площадь поперечного сечения болтов по внутреннему диаметру резьбы или минимальному диаметру стержня:

$$A_b = n \cdot f_b = 4 \cdot 0,144 \cdot 10^{-3} = 0,576 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

**Расчёт болтов(шпилек):**

Условие прочности болтов:

$$A_{m^-} \leq A_b$$

$$0,3853 \cdot 10^{-3} \text{ M}^2 \leq 0,576 \cdot 10^{-3} \text{ M}^2$$

**Условие прочности выполнено**

**Расчёт напряжений первого фланца:**

Равнодействующая давления на внутренней поверхности фланца:

$$H_D = 0.785 \cdot B^2 \cdot p = 0.785 \cdot 54^2 \cdot 0,07000 = 160,2 \text{ H}$$

Плечо момента для силы  $H_D$  (фланцы интегрального типа, или другие, рассчитываемые аналогично):

$$h_D = \frac{C - B - g_1}{2} = (125 - 54 - 11) / 2 = 30 \text{ mm}$$

Равнодействующая давления:

$$H = 0,785 \cdot G^2 \cdot p = 0,785 * 80,5^2 * 0,07000 = 356,1 \text{ H}$$

Разница между общей равнодействующей давления и равнодействующей на внутренней поверхности фланца:

$$H_T = H - H_D = 356,1 - 160,2 = 195,9 \text{ H}$$

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):

$$h_T = \frac{1}{2} \left[ \frac{C-B}{2} + h_G \right] = 1/2 * [(125 - 54)/2 + 22,25] = 28,87 \text{ mm}$$

Нагрузка на прокладку (разница между проектной болтовой нагрузкой и равнодействующей давления), в рабочих:

$$H_{\text{H}_2} = W_{\text{H}_2} - H = 701,3 - 356,1 = 345,2 \text{ H}$$

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:

$$B_{sc} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{B_s}{2 \cdot a + t}} \right\} = \max \{ 1; (98,17 / (2 \cdot 16 + 17))^{1/2} \} = 1,415$$

$$X_g = \frac{g_1}{g_0} = 11/2 = 5,5$$

Коэффициент

$$h_0 = \sqrt{B \cdot g_0} = (54 \cdot 2)^{1/2} = 10,39 \text{ mm}$$

$$X_h = \frac{h}{h_0} = 22,5 / 10,39 = 2,165$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$F = 0.4625$$

Расчетные коэффициенты:

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$h_T = \frac{1}{2} \left[ \frac{C-B}{2} + h_G \right] = 1/2 * [(125 - 54) / 2 + 22,25] = 28,87 \text{ мм}$ <p>Нагрузка на прокладку (разница между проектной болтовой нагрузкой и равнодействующей давления), в рабочих:</p> $H_G = W_G - H = 701,3 - 356,1 = 345,2 \text{ Н}$ <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> $B_{SC} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{B_S}{2 \cdot a + t}} \right\} = \max \{ 1; (98,17 / (2 * 16 + 17))^{1/2} \} = 1,415$ $X_g = \frac{g_1}{g_0} = 11 / 2 = 5,5$ <p>Коэффициент</p> $h_o = \sqrt{B \cdot g_0} = (54 * 2)^{1/2} = 10,39 \text{ мм}$ $X_h = \frac{h}{h_o} = 22,5 / 10,39 = 2,165$ <p>Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):</p> <p>F = 0,4625</p> <p>Расчетные коэффициенты:</p>
					<div> <div>19785.4</div> <div> <div>Изм.</div> <div>Лист</div> <div>№ докум.</div> <div>Подп.</div> <div>Дата</div> </div> </div> <div> <div>E-3.00.00.000 PP</div> <div>Лист</div> <div>165</div> </div>

$$e = \frac{F}{h_p} = 0,4625 / 10,39 = 0,04450 \text{ 1/MM}$$

$$K = \frac{A}{B} = 160 / 54 = 2,963$$

$$T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55246 \cdot \lg K) - 1}{(1.0472 + 1.9448 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (2,963^2 \cdot (1 + 8.55246 \cdot \lg 2,963) - 1) / ((1.0472 + 1.9448 \cdot 2,963^2) \cdot (2,963 - 1)) = 1,214$$

$$U = \frac{K^2(1 + 8.55246 \cdot \lg K) - 1}{1.36136 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (2,963^2 \cdot (1 + 8.55246 \cdot \lg 2,963) - 1) / (1.36136 \cdot (2,963^2 - 1) \cdot (2,963 - 1)) = 2,078$$

Коэффициент d для интегральных фланцев:

$$d = \frac{U}{V} \cdot h_o \cdot g_o^2 = 2,078 / 0,01481 \cdot 10,39 \cdot 2^2 = 0,5833 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$L = \frac{t \cdot e + 1}{T} + \frac{t^3}{d} = (17 \cdot 0,04450 + 1) / 1,214 + 17^3 / 0,5833 \cdot 10^{-5} = 2,289$$

Момент инерции сечения фланца при изгибе (интегральные фланцы с втулкой):

$$I = \frac{0,0874 \cdot L \cdot \epsilon_0^2 \cdot h_0 \cdot B}{V} = 0,0874 \cdot 2,289 \cdot 2 \cdot 10,39 \cdot 54 / 0,01481 = 0,3032 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$$

$$G_{avg} = 0.5 \cdot (g_0 + g_1) = 0.5 \cdot (2 + 11) = 6,5 \text{ MM}$$

$$A_p = 0.5 \cdot (A - B) = 0.5 \cdot (160 - 54) = 53 \text{ mm}$$

Так как  $t \geq G_{\text{avg}}$ ,

$$A_A = A_B = 53 \text{ mm}$$

$$B_B = t = 17 \text{ mm}$$

$$K_{AB} = \left( A_A \cdot B_B^3 \right) \cdot \left[ \frac{1}{3} - 0.21 \cdot \left( \frac{B_B}{A_A} \right) \cdot \left( 1 - \frac{1}{12} \cdot \left\{ \frac{B_B}{A_A} \right\}^4 \right) \right] = (53 \cdot 17^3) \cdot [1/3 - 0.21 \cdot (17/53) \cdot (1 - 1/12 \cdot \{17/53\}^4)] = 0,6927 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$$

$$C_F = h = 22,5 \text{ mm}$$

$$D_{DG} = G_{\text{wg}} = 6,5 \text{ mm}$$

$$K_{CD} = \left\{ C_c \cdot D_{DG}^3 \right\} \cdot \left[ \frac{1}{3} - 1.05 \cdot \left( \frac{D_{DG}}{C_c} \right) \cdot \left( 1 - \frac{1}{192} \cdot \left\{ \frac{D_{DG}}{C_c} \right\}^4 \right) \right] = (22,5 * 6,5^3) * [1/3 - 1.05 * (6,5 / 22,5) * (1 - 1/192 * \{6,5 / 22,5\}^4)] = 0,1854 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$$

Полярный момент сечения фланца (интегральные фланцы, плоские фланцы с втулкой):

$$I_n = K_{AB} + K_{CD} = 0,6927 \cdot 10^{-7} + 0,1854 \cdot 10^{-9} = 0,6946 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$$

Компонент проектного момента на фланце, как результат действия внешнего изгибающего момента и/или осевой силы:

$$M_{oe} = 4 \cdot M_E \cdot \left[ \frac{I}{0,3846 \cdot I_D + I} \right] \cdot \left[ \frac{h_D}{C - 2 \cdot h_D} \right] + F_A \cdot h_D = 4 \cdot 282,8 \cdot [0,3032 \cdot 10^{-7} / (0,3846 \cdot 0,6946 \cdot 10^{-7} + 0,3032 \cdot 10^{-7})] \cdot [30 / (125 - 2 \cdot 30)] + 1500 \cdot 30 = 322,6 \text{ H}_M$$

Коэффициент момента для расчета свободных колец:

$$F_S = 1$$

Изгибающий момент в рабочих условиях (внутреннее давление):

$$M_o = \left[ (H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G) \cdot B_{sc} + M_{oe} \right] \cdot F_s \Big|_{1/} = \frac{((160,2 \cdot 30 + 195,9 \cdot 28,87 + 345,2 \cdot 22,25) \cdot 1,415 + 322,6) \cdot 1}{H_M} = 348,3$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$f = 1$$

Продольные напряжения во втулке, в рабочих условиях:

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$K_{AB} = \left( A_A \cdot B_B^3 \right) \cdot \left[ \frac{1}{3} - 0.21 \cdot \left( \frac{B_B}{A_A} \right) \cdot \left( 1 - \frac{1}{12} \cdot \left\{ \frac{B_B}{A_A} \right\}^4 \right) \right] = (53 \cdot 17^3) \cdot [1/3 - 0.21 \cdot (17/53) \cdot (1 - 1/12 \cdot \{17/53\}^4)] = 0,6927 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$
					$C_C = h = 22,5 \text{ мм}$
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$D_{DG} = G_{wg} = 6,5 \text{ мм}$
					$K_{CD} = \left( C_C \cdot D_{DG}^3 \right) \cdot \left[ \frac{1}{3} - 1.05 \cdot \left( \frac{D_{DG}}{C_C} \right) \cdot \left( 1 - \frac{1}{192} \cdot \left\{ \frac{D_{DG}}{C_C} \right\}^4 \right) \right] = (22,5 \cdot 6,5^3) \cdot [1/3 - 1.05 \cdot (6,5/22,5) \cdot (1 - 1/192 \cdot \{6,5/22,5\}^4)] = 0,1854 \cdot 10^{-9} \text{ м}^4$
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p>Полярный момент сечения фланца (интегральные фланцы, плоские фланцы с втулкой):</p> $I_p = K_{AB} + K_{CD} = 0,6927 \cdot 10^{-7} + 0,1854 \cdot 10^{-9} = 0,6946 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$
					<p>Компонент проектного момента на фланце, как результат действия внешнего изгибающего момента и/или осевой силы:</p> $M_{oe} = 4 \cdot M_E \cdot \left[ \frac{I}{0.3846 \cdot I_p + I} \right] \cdot \left[ \frac{h_D}{C - 2 \cdot h_D} \right] + F_A \cdot h_D = 4 \cdot 282,8 \cdot [0,3032 \cdot 10^{-7} / (0,3846 \cdot 0,6946 \cdot 10^{-7} + 0,3032 \cdot 10^{-7})] \cdot [30 / (125 - 2 \cdot 30)] + 1500 \cdot 30 = 322,6 \text{ Н м}$
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p>Коэффициент момента для расчета свободных колец:</p> $F_S = 1$
					<p>Изгибающий момент в рабочих условиях (внутреннее давление):</p> $M_o = \left[ (H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G) \cdot B_{sc} + M_{oe} \right] \cdot F_S = [(160,2 \cdot 30 + 195,9 \cdot 28,87 + 345,2 \cdot 22,25) \cdot 1,415 + 322,6] \cdot 1 = 348,3 \text{ Н м}$
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p>Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):</p> $f = 1$
					<p>Продольные напряжения во втулке, в рабочих условиях:</p>
19785.4					<div>E-3.00.00.000 PP</div> <div>Лист 166</div>
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

$$S_H = \frac{f \cdot M_o}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 348,3 / (2,289 \cdot 11^2 \cdot 54) = 23,29 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min\{1,5 \cdot S_b; 2,5 \cdot S_{no}\}$$

$$\min\{1,5 \cdot S_b; 2,5 \cdot S_{no}\} = \min\{1,5 \cdot 149,6; 2,5 \cdot 168,6\} = 224,3 \text{ МПа}$$

23,29 МПа ≤ 224,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, рабочие условия:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_o}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 \cdot 17 \cdot 0,04450 + 1) \cdot 348,3 / (2,289 \cdot 17^2 \cdot 54) = 19,56 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_b$$

19,56 МПа ≤ 149,6 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left( 0,66845 + 5,7169 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (2,963 - 1) \cdot (0,66845 + 5,7169 \cdot 2,963^2 \cdot \lg 2,963 / (2,963^2 - 1)) = 1,891$$

$$Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (2,963^2 + 1) / (2,963^2 - 1) = 1,257$$

Касательные напряжения во фланце, рабочие условия:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_o}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 1,891 \cdot 348,3 / (17^2 \cdot 54) - 1,257 \cdot 19,56 = 17,61 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_b$$

17,61 МПа ≤ 149,6 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (23,29 + 19,56) / 2 = 21,43 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_b$$

21,43 МПа ≤ 149,6 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (23,29 + 17,61) / 2 = 20,45 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_b$$

20,45 МПа ≤ 149,6 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:

$$S_H = \frac{f \cdot M_g}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 2228 / (2,289 \cdot 11^2 \cdot 54) = 149 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min\{1,5 \cdot S_g; 2,5 \cdot S_{ng}\}$$

$$\min\{1,5 \cdot S_g; 2,5 \cdot S_{ng}\} = \min\{1,5 \cdot 163,3; 2,5 \cdot 183\} = 245 \text{ МПа}$$

149 МПа ≤ 245 МПа, **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл. 19785.4	Подпись и дата				
	Взам. инв. №				
	Инов. № дубл.				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 PP
					Лист
					167

Радиальные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_{\Sigma}}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 \cdot 17 \cdot 0,04450 + 1) \cdot 2228 / (2,289 \cdot 17^2 \cdot 54) = 125,2 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{\Sigma}$$

125,2 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Касательные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_{\Sigma}}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 1,891 \cdot 2228 / (17^2 \cdot 54) - 1,257 \cdot 125,2 = 112,7 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{\Sigma}$$

112,7 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (149 + 125,2) / 2 = 137,1 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\Sigma}$$

137,1 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (149 + 112,7) / 2 = 130,8 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\Sigma}$$

130,8 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):

$$J = \frac{52,14 \cdot V \cdot M_{\Sigma}}{L \cdot E_{\Sigma} \cdot \sigma_0^2 \cdot K_R \cdot h_0} = (52,14 \cdot 0,01481 \cdot 348,3) / (2,289 \cdot 1,943 \cdot 10^5 \cdot 2^2 \cdot 0,3 \cdot 10,39) = 0,04850$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1,0$$

$$0,04850 \leq 1,0$$

**Условие жёсткости выполнено**

- для условий монтажа:

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, условия монтажа):

$$J = \frac{52,14 \cdot V \cdot M_{\Sigma}}{L \cdot E_{\Sigma} \cdot \sigma_0^2 \cdot K_R \cdot h_0} = (52,14 \cdot 0,01481 \cdot 2228) / (2,289 \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot 2^2 \cdot 0,3 \cdot 10,39) = 0,3029$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1,0$$

$$0,3029 \leq 1,0$$

**Условие жёсткости выполнено**

### **Расчёт напряжений второго фланца:**

Параметры первого и второго фланцев полностью совпадают, расчёт второго фланца не проводится

**Условие прочности выполнено**

### **Жесткость фланца**

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19785.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Е-3.00.00.000 РР				Лист
				168

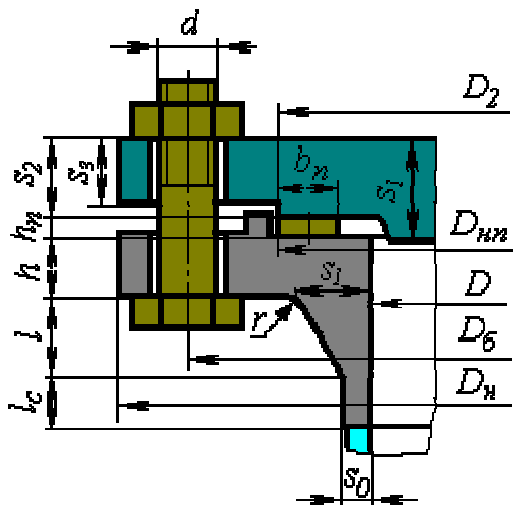


Параметры первого и второго фланцев полностью совпадают, расчёт второго фланца не проводится

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19785.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-3.00.00.000 PP				
Лист				
169				

## Крышка DN50

## Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.4-2007 и ГОСТ Р 52857.2-2007



## Исходные данные

### Параметры крышки:

Материал: 09Г2С (КП245)

Толщина стенки,  $s_1$ : 20 мм

Прибавка для компенсации коррозии и эрозии,  $c_1$ : 3 мм

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

Прибавка технологическая, с<sub>3</sub>: 0 мм

Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, с: 3 мм

Толщина в месте прокладки,  $s_2$ : 19 мм

Толщина вне уплотнения,  $s_3$ : 15 мм

Наименьший диаметр наружной утоненной части,  $D_2$ : 87 мм

Наружный диаметр крышки, D<sub>н</sub>: 160 мм

## Шпильки:

Материал: 35X

Наружный диаметр, d: 16 мм

Количество, n: 4

Контроль затяжки: Нет

### Прокладка:

Материал прокладки:      Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали

Толщина,  $h_{\text{п}}$ : 3,2 мм

Наружный диаметр,  $D_{н.п}$ : 87 мм

Ширина,  $b_{\text{п}}$ : 6,5 мм

Коэффициент прочности сварного шва:

$$\varphi_P = 1$$

## Расчёт в рабочих условиях

Изнв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, с <sub>р</sub> :	0 мм
					Прибавка технологическая, с <sub>з</sub> :	0 мм
Изнв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, с:	3 мм
					Толщина в месте прокладки, s <sub>2</sub> :	19 мм
Изнв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Толщина вне уплотнения, s <sub>3</sub> :	15 мм
					Наименьший диаметр наружной утоненной части, D <sub>2</sub> :	87 мм
Изнв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Наружный диаметр крышки, D <sub>н</sub> :	160 мм
					<b>Шпильки:</b>	
Изнв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Материал:	35X
					Наружный диаметр, d:	16 мм
Изнв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Количество, n:	4
					Контроль затяжки:	Нет
Изнв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<b>Прокладка:</b>	
					Материал прокладки:	Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали
Изнв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Толщина, h <sub>п</sub> :	3,2 мм
					Наружный диаметр, D <sub>н.п</sub> :	87 мм
Изнв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Ширина, b <sub>п</sub> :	6,5 мм
					Коэффициент прочности сварного шва:	
Изнв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$\varphi_p = 1$	
					<b>Расчёт в рабочих условиях</b>	
Изнв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Е-3.00.00.000 PP	
Изнв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	№ докум.	Подп.
					Дата	
Изнв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Лист	

## Условия нагружения:

Расчётное внутреннее избыточное давление,  $p$ : 0,07000 МПа

## Расчёт фланца по ГОСТ Р 52857.4-2007:

### Свойства материала болтов (шпилек)

Температура болтов (шпилек),  $t_b$ : 59,5 °C

Номинальные допускаемые напряжения для материала 35Х при температуре  $T = 59,5$  °C :

$[\sigma]_b = 230$  МПа

Модуль продольной упругости для материала 35Х при температуре  $T = 59,5$  °C:

$E_b = 2,165 \cdot 10^5$  МПа

Коэффициент линейного расширения для материала 35Х при температуре  $T = 59,5$  °C:

$\alpha_b = 0,134 \cdot 10^{-4}$  °C

Номинальные допускаемые напряжения для материала 35Х при температуре  $T = 20$  °C :

$[\sigma]_b^{20} = 230$  МПа

Модуль продольной упругости для материала 35Х при температуре  $T = 20$  °C:

$E_b^{20} = 2,18 \cdot 10^5$  МПа

### Свойства материала крышки

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре  $T = 67,2$  °C (рабочие условия):

$[\sigma]_{кр} = \eta \cdot \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B; R_{m/10n/t} / n_D; R_{p1,0/10n/t} / n_n) = 1 \cdot \min\{224,3 / 1,5; 407,5 / 2,4; - / -; - / -\} = 149,6$  МПа

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) при температуре  $T = 67,2$  °C:

$E_{кр} = 1,943 \cdot 10^5$  МПа

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С (КП245) при температуре  $T = 67,2$  °C:

$\alpha_{кр} = 0,116 \cdot 10^{-4}$  °C

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре  $T = 20$  °C (рабочие условия):

$[\sigma]_{кр}^{20} = \eta \cdot \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B; R_{m/10n/t} / n_D; R_{p1,0/10n/t} / n_n) = 1 \cdot \min\{245 / 1,5; 440 / 2,4; - / -; - / -\} = 163,3$  МПа

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) при температуре  $T = 20$  °C:

$E_{кр}^{20} = 1,99 \cdot 10^5$  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:

$b_0 = 6,5$  мм

Примечание: 
$$\begin{cases} b_0 = b_{np} & \text{при } b_{np} \leq 15,0 \text{ мм} \\ b_0 = 3,8 \cdot \sqrt{b_{np}} & \text{при } b_{np} > 15,0 \text{ мм} \end{cases}$$

Рабочий наружный диаметр прокладки:

$D_{np} = 87$  мм

Средний эффективный диаметр прокладки:

$D_{eff} = D_{np} - b_0 = 87 - 6,5 = 80,5$  мм

Изн. № подл.	Подпись и дата
19785.4	
Изн. № дубл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Подпись и дата

Изн. № подл.	Изн. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата	Подпись и дата
19785.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

E-3.00.00.000 PP

Лист

171

Для металлических и асбометаллических прокладок  $y_n = 0$ .

### Расчётные параметры болтов (шпилек):

Рабочая длина болта (шпильки):

$$L_{\text{б0}} = h + s_2 + h_{\text{п}} = 19 + 17 + 3,2 = 39,2 \text{ мм}$$

Площадь сечения шпильки (по внутреннему диаметру резьбы):

$$f_0 = 0,144 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Эффективная длина шпильки:

$$L_{\text{е}} = L_{\text{б0}} + 0,56 \cdot d = 39,2 + 0,56 \cdot 16 = 48,16 \text{ мм}$$

Податливость шпилек:

$$y_{\text{е}} = \frac{L_{\text{е}}}{E_{\text{е}}^{20} \cdot f_{\text{е}} \cdot n} = 48,16 / (2,18 \cdot 10^5 \cdot 0,144 \cdot 10^{-3} \cdot 4) = 0,3835 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

### Расчётные параметры крышки:

$$K_{\text{кр}} = \frac{D_{\text{к}}}{D_{\text{м}}} = 160 / 80,5 = 1,988$$

$$x_{\text{кр}} = \frac{0,67 \cdot [K_{\text{кр}}^2 \cdot (1 + 8,55 \cdot \lg K_{\text{кр}}) - 1]}{(K_{\text{кр}} - 1) \cdot \left[ K_{\text{кр}}^2 - 1 + (1,857 \cdot K_{\text{кр}}^2 + 1) \cdot \left( \frac{s_1}{s_2} \right)^3 \right]} = \frac{0,67 \cdot (1,988^2 \cdot (1 + 8,55 \cdot \lg(1,988)) - 1)}{(1,988 - 1) \cdot [1,988^2 - 1 + (1,857 \cdot 1,988^2 + 1) \cdot (20/19)^3]} = 0,6974$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) при температуре  $T = 20^\circ\text{C}$ :

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

Угловая податливость крышки:

$$y_{\text{кр}} = \frac{x_{\text{кр}}}{E_{\text{кр}}^{20} \cdot s_2^3} = 0,6974 / (1,99 \cdot 10^5 \cdot 19^3) = 0,2927 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{Н м}$$

### Расчёт нагрузок:

Равнодействующая давления:

$$Q_{\text{к}} = 0,785 \cdot D_{\text{м}}^2 \cdot p = 0,785 \cdot 80,5^2 \cdot 0,07000 = 356,1 \text{ Н}$$

Усилие на прокладке в рабочих условиях, необходимое для обеспечения герметичности:

$$R_{\text{к}} = \pi \cdot D_{\text{м}} \cdot b_0 \cdot m \cdot |p| = 3,142 \cdot 80,5 \cdot 6,5 \cdot 3 \cdot |0,07000| = 345,2 \text{ Н}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке:

$$F_{\text{обж}} = 0,5 \cdot \pi \cdot D_{\text{м}} \cdot b_0 \cdot q_{\text{обж}} = 0,5 \cdot 3,142 \cdot 80,5 \cdot 6,5 \cdot 69 = 5,671 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

$$\eta = y_n + y_{\text{е}} + y_{\text{ф}}' \cdot b'^2 + y_{\text{ф}}'' \cdot b''^2 = 0 + 0,3835 \cdot 10^{-6} + 0,2927 \cdot 10^{-4} \cdot 22,25^2 + 0,2366 \cdot 10^{-4} \cdot 22,25^2 = 0,8409 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения с крышкой, нагруженного внутренним давлением:

$$\alpha = 1 - \frac{y_n - (y_{\text{ф}}' \cdot b' + y_{\text{кр}} \cdot b) \cdot b}{\eta} = 1 - (0 - (0,2366 \cdot 10^{-4} \cdot 11,03 + 0,2927 \cdot 10^{-4} \cdot 22,25) \cdot 22,25) / 0,8409 \cdot 10^{-6} = 1,421$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях:

$$F_{\text{б1}} = \alpha \cdot Q_{\text{к}} + R_{\text{к}} = 1,421 \cdot 356,1 + 345,2 = 851,3 \text{ Н}$$

Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или сечению наименьшего диаметра:

$$A_{\text{е}} = n \cdot f_{\text{е}} = 4 \cdot 0,144 \cdot 10^{-3} = 0,576 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Изн. № подл. 19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	Е-3.00.00.000 РР					Лист
										172
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов:

$$P_{б2} = \max \{ P_{обж}; 0.4 \cdot A_b \cdot [\sigma]_b^{20} \} = \max \{ 5,671 \cdot 10^4; 0.4 \cdot 0,576 \cdot 10^{-3} \cdot 230 = 5,299 \cdot 10^4 \} = 5,671 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

## 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),  $t_{\phi}$ : 67,2 °C

### Днища и крышки с дополнительным краевым моментом, нагруженные избыточным давлением

Равнодействующая давления:

$$\gamma = \frac{1}{y_{\pi} + y_{\phi} \cdot \frac{E_{\phi}^{20}}{E_{\phi}} + \left( y_{\psi} \cdot \frac{E_{\psi}^{20}}{E_{\psi}} + y_{\pi\psi} \cdot \frac{E_{\pi\psi}^{20}}{E_{\pi\psi}} \right) \cdot b^2} = \frac{1 / (0 + 0,3835 \cdot 10^{-6} \cdot 2,18 \cdot 10^5 / 2,165 \cdot 10^5 + (0,2366 \cdot 10^{-4} \cdot 1,99 \cdot 10^5 / 1,943 \cdot 10^5 + 0,2927 \cdot 10^{-4} \cdot 1,99 \cdot 10^5 / 1,943 \cdot 10^5) \cdot 22,25^2)}{= 1,17 \cdot 10^6 \text{ Н/мм}}$$

Нагрузка от температурных деформаций:

$$Q_t = \gamma \cdot \left( \alpha_{\psi}' \cdot h' \cdot (t_{\psi 1} - 20^{\circ}\text{C}) + \alpha_{\psi}'' \cdot h'' \cdot (t_{\psi 2} - 20^{\circ}\text{C}) - \alpha_{\phi} \cdot (h' + h'') \cdot (t_{\phi} - 20^{\circ}\text{C}) \right) = \frac{1,17 \cdot 10^6 \cdot (0,116 \cdot 10^{-4} \cdot 19 \cdot (67,2 - 20^{\circ}\text{C}) + 0,116 \cdot 10^{-4} \cdot 17 \cdot (67,2 - 20^{\circ}\text{C}) - 0,134 \cdot 10^{-4} \cdot (19 + 17) \cdot (59,5 - 20^{\circ}\text{C}))}{= 767,5 \text{ Н}}$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях:

$$P_{б1} = \max \left\{ \frac{\alpha \cdot Q_{\pi} + R_{\pi}}{\alpha \cdot Q_{\pi} + R_{\pi} - Q_t} \right\} = \max \left\{ \frac{1,421 \cdot 356,1 + 345,2 = 851,3}{1,421 \cdot 356,1 + 345,2 - 767,5 = 83,86} \right\} = 851,3 \text{ Н}$$

Болтовая нагрузка в рабочих условиях:

$$P_{\phi}^P = P_{\phi}^M + (1 - \alpha) \cdot Q_{\pi} + Q_t = \frac{5,671 \cdot 10^4}{767,5} + (1 - 1,421) \cdot 356,1 + 767,5 = 5,733 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

$$\psi = \frac{P_{\phi}^P}{Q_{\pi}} = \frac{5,733 \cdot 10^4}{356,3} = 160,9$$

$$K_{\phi} = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{1 + 3 \cdot \psi \cdot \left( \frac{D_3}{D_{\phi\Pi}} - 1 \right)}{\frac{D_3}{D_{\phi\Pi}}}} = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{1 + 3 \cdot 160,9 \cdot (125 / 80,5 - 1)}{(125 / 80,5)^{1/2}}} = 5,385$$

Нарушено условие применимости расчётных формул:

$$\frac{s_1 - c}{D_p} \leq 0,11$$

В этом случае поправочный коэффициент для допускаемого давления:

$$K_p = \frac{2,2}{1 + \sqrt{1 + \left( 6 \cdot \frac{s_1 - c}{D_p} \right)^2}} = 2,2 / [1 + (6 \cdot [20 - 3] / 80,5)^2]^{1/2} = 0,8416$$

Допускаемое давление:

$$[p] = \left( \frac{s_1 - c}{K_0 \cdot K_{\phi} \cdot D_p} \right)^2 \cdot [\sigma] \cdot \phi \cdot K_p = ([20 - 3] / [1 \cdot 5,385 \cdot 80,5])^2 \cdot 149,6 \cdot 1 \cdot 0,8416 = 0,1936 \text{ МПа}$$

0,1936 МПа  $\geq$  0,07000 МПа

Заключение: **Условие прочности выполнено**

### Днища и крышки, нагруженные избыточным давлением

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

Изн.	№ подл.	19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР	
						Лист
						173

$$s_{2p} + c = K_6 \cdot K_0 \cdot D_p \cdot \sqrt{\frac{p}{\varphi \cdot [\sigma] \cdot K_p}} + c = 5,385 \cdot 1 \cdot 80,5 \cdot (0,07000 / [1 \cdot 149,6 \cdot 0,8416])^{1/2} + 3 = 13,22 \text{ мм}$$

$$13,22 \text{ мм} \leq 20 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

$$K_7 = 0,8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_{\text{сн}}} - 1} = 0,8 \cdot [125 / 80,5 - 1]^{1/2} = 0,5948$$

$$\Phi = \max \left\{ \frac{P_6^p}{[\sigma]}, \frac{P_6^m}{[\sigma]^{20}} \right\} = \max \{ 5,733 \cdot 10^4 / 149,6; 5,671 \cdot 10^4 / 163,3 \} = 0,3833 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Расчётная толщина крышки в месте уплотнения с учётом прибавок:

$$s_{2p} + c = \max \left\{ K_7 \cdot \sqrt{\Phi}; \frac{0,6}{D_{\text{сн}}} \cdot \Phi \right\} + c = \max \{ 0,5948 \cdot 0,3833 \cdot 10^{-3 \cdot 1/2}; 0,6 \cdot 0,3833 \cdot 10^{-3} / 80,5 \} + 3 = 14,65 \text{ мм}$$

$$14,65 \text{ мм} \leq 19 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

$$K'_7 = 0,8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_2} - 1} = 0,8 \cdot [125 / 87 - 1]^{1/2} = 0,5287$$

Расчётная толщина вне зоны уплотнения с учётом прибавок:

$$s_{2p} + c = \max \left\{ K'_7 \cdot \sqrt{\Phi}; \frac{0,6}{D_2} \cdot \Phi \right\} + c = \max \{ 0,5287 \cdot 0,3833 \cdot 10^{-3 \cdot 1/2}; 0,6 \cdot 0,3833 \cdot 10^{-3} / 87 \} + 3 = 13,35 \text{ мм}$$

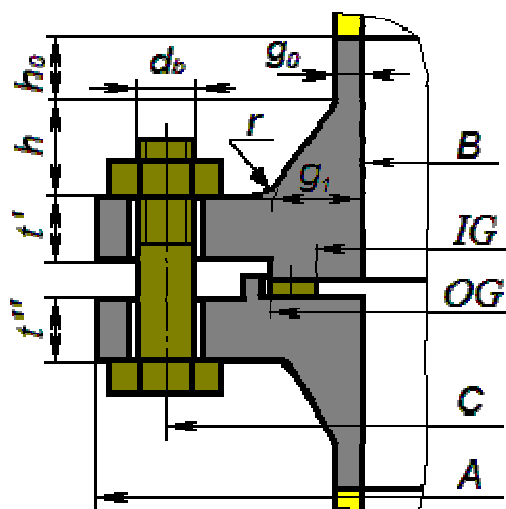
$$13,35 \text{ мм} \leq 15 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл. 19785.4	Подпись и дата		Инов. № дубл.		Взам. инв. №		Подпись и дата		<div>Е-3.00.00.000 РР</div>					Лист
														174
Изм.	Лист	№ докум.		Подп.	Дата									

### Фланцевое соединение DN25 (H01, H02, H11, H12)

## 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 НО1, НО2, НН1, НН2 DN25

Материал смежного элемента: 09Г2С (КП245)

Материал фланца (кольца): 09Г2С (КП245)

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: 20 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)

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Свободный/интегральный:	-
					Диаметр болтовой окружности, С:	85 мм
19785.4					<b>Данные первого фланца (кольца):</b>	
					Смежный элемент:	Штуцер НО1, НО2, НН1, НН2 DN25
					Материал смежного элемента:	09Г2С (КП245)
					Материал фланца (кольца):	09Г2С (КП245)
					Наружный диаметр фланца (кольца), А:	115 мм
					Толщина фланца (кольца), t:	14 мм
					Сумма прибавок, с:	2 мм
					Внешняя коррозия фланца, с <sub>г</sub> :	0 мм
					Внутренний диаметр фланца, В:	25 мм
					Длина конической части втулки, h:	20 мм
					Длина цилиндрической части втулки, h <sub>0</sub> :	7 мм
					Толщина цилиндрической части втулки, g <sub>0</sub> :	10 мм
					Толщина конической части втулки, g <sub>1</sub> :	10 мм
					Радиус перехода, r:	5 мм
Смежный элемент:						
Материал смежного элемента:	09Г2С Gr.ГОСТ 19281					
					Материал фланца (кольца):	09Г2С (КП245)
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР	
					Лист 175	

Наружный диаметр фланца (кольца), A: 115 мм  
Толщина фланца (кольца), t: 14 мм  
Сумма прибавок, с: 2 мм  
Внешняя коррозия фланца, с<sub>г</sub>: 0 мм  
Внутренний диаметр фланца, B: 25 мм  
Длина конической части втулки, h: 15 мм  
Длина цилиндрической части втулки, h<sub>0</sub>: 7 мм  
Толщина цилиндрической части втулки, g<sub>0</sub>: 4 мм  
Толщина конической части втулки, g<sub>1</sub>: 10 мм  
Радиус перехода, r: 5 мм

**Шпильки:**

Материал: 35X  
Наружный диаметр, d<sub>б</sub>: 12 мм  
Количество, n: 4  
Радиальная коррозия крепежа, с<sub>б</sub>: 0 мм

**Прокладка:**

Материал прокладки: Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали  
Толщина, h<sub>п</sub>: 3,2 мм  
Наружный диаметр, OG: 57 мм  
Внутренний диаметр, IG: 43 мм

**Расчёт в рабочих условиях**

**Условия нагружения:**

Расчётное осевое растягивающее усилие, F: 1200 Н  
Расчётный изгибающий момент, M: 282,8 Н м  
Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,8 МПа  
Расчётная температура элементов соединения:  
Температура фланца (кольца), t<sub>ф</sub>: 144 °C  
Температура фланца (кольца), t<sub>ф</sub>: 144 °C  
Температура болтов (шпилек), t<sub>б</sub>: 127,5 °C

**Свойства материала болтов (шпилек)**

Допускаемые напряжения для материала 35X при температуре T = 127,5 °C (рабочие условия):  
 $S_b = \min\{R_e^{20} / n_{T20}; R_m^{20} / n_{B20}; R_e / n_T; R_m / n_B\} = \min(590 / 4; 736 / 5; 558 / 1,5; 715 / 5) = 143 \text{ МПа}$   
Модуль продольной упругости для материала 35X при температуре T = 127,5 °C:  
 $E_6 = 2,083 \cdot 10^5 \text{ МПа}$   
Коэффициент линейного расширения для материала 35X при температуре T = 127,5 °C:  
 $\alpha_6 = 0,1206 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$   
Допускаемые напряжения для материала 35X при температуре T = 20 °C (рабочие 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 35X при температуре T = 20 °C:  
 $E^{20}_6 = 2,15 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Изн. № подл. 19785.4		Подпись и дата		Взам. инв. №		Инв. № дубл.		Подпись и дата											
<div>Рассчет в рабочих условиях</div> <div>Условия нагружения:</div> <div>Рассчётное осевое растягивающее усилие, F: 1200 Н</div> <div>Рассчётный изгибающий момент, M: 282,8 Н м</div> <div>Рассчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,8 МПа</div> <div>Рассчётная температура элементов соединения:</div> <div>Температура фланца (кольца), t<sub>ф</sub>: 144 °C</div> <div>Температура фланца (кольца), t<sub>ф</sub>: 144 °C</div> <div>Температура болтов (шпилек), t<sub>б</sub>: 127,5 °C</div> <div>Свойства материала болтов (шпилек)</div> <div>Допускаемые напряжения для материала 35Х при температуре T = 127,5 °C (рабочие условия):</div> <div>S<sub>b</sub>=min{R<sub>e</sub><sup>20</sup> / n<sub>T20</sub>; R<sub>m</sub><sup>20</sup> / n<sub>B20</sub>; R<sub>e</sub> / n<sub>T</sub>; R<sub>m</sub> / n<sub>B</sub>}=min (590 / 4; 736 / 5; 558 / 1,5; 715 / 5)= 143 МПа</div> <div>Модуль продольной упругости для материала 35Х при температуре T = 127,5 °C:</div> <div>E<sub>б</sub>= 2,083·10<sup>5</sup> МПа</div> <div>Коэффициент линейного расширения для материала 35Х при температуре T = 127,5 °C:</div> <div>α<sub>б</sub>= 0,1206·10<sup>-4</sup> °C</div> <div>Допускаемые напряжения для материала 35Х при температуре T = 20 °C (рабочие условия):</div> <div>S<sub>a</sub>=min{R<sub>e</sub><sup>20</sup> / n<sub>T20</sub>; R<sub>m</sub><sup>20</sup> / n<sub>B20</sub>; R<sub>e</sub><sup>20</sup> / n<sub>T</sub>}=min (590 / 4; 736 / 5; 590 / 1,5)= 147,2 МПа</div> <div>Модуль продольной упругости для материала 35Х при температуре T = 20 °C:</div> <div>E<sub>б</sub><sup>20</sup>= 2,15·10<sup>5</sup> МПа</div>																			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №				Инв. № дубл.				Подпись и дата			
Изн. № подл. 19785.4				Подпись и дата				Взам. инв. №											



## Свойства материала смежного элемента фланца 1 Штуцер НО1, НО2, Н11, Н12 DN25

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) при температуре  $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рабочие условия):

$$S_{n01} = \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{202,1 / 1,5; 440 / 2,4\} = 134,7 \text{ МПа}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) 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  $T = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рабочие условия):

$$S_{n02} = 154,7 \text{ МПа}$$

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) при температуре  $T = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рабочие условия):

$$S_{f01} = \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{203 / 1,5; 440 / 2,4\} = 135,4 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) при температуре  $T = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$E_1 = 1,866 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С (КП245) при температуре  $T = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\alpha_1 = 0,1248 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) 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) 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) при температуре  $T = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рабочие условия):

$$S_{f02} = \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{203 / 1,5; 440 / 2,4\} = 135,4 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С (КП245) при температуре  $T = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$E_2 = 1,866 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С (КП245) при температуре  $T = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\alpha_2 = 0,1248 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С (КП245) 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) 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):

$$\xi_0 = \xi_0 - c = 10 - 2 = 8 \text{ мм}$$

Больший диаметр конической втулки с учетом коррозии:

$$\xi_1 = \xi_1 - c = 10 - 2 = 8 \text{ мм}$$

Толщина фланца, с учетом коррозии:

$$t = t - c_f = 14 - 0 = 14 \text{ мм}$$

Подпись и дата		Изнв. № дубл.		Взам. инв. №		Подпись и дата		Изнв. № подл.	19785.4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 РР				
					Лист				
					177				

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):

$\xi_0 = \xi_0 - c = 4 - 2 = 2 \text{ мм}$

Больший диаметр конической втулки с учетом коррозии:

$\xi_1 = \xi_1 - c = 10 - 2 = 8 \text{ мм}$

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 обжатияК	Условный модуль сжатия E <sub>m</sub> , МПа
Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали	3	69	—	—	—

Ширина, используемая для определения базовой контактной ширины прокладки через b<sub>0</sub>, 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 b<sub>0</sub> ≤ 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 b<sub>0</sub>, 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 b<sub>0</sub> ≤ 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 несамонуплотняющихся прокладок):

$$W_o = 0.785 \cdot G^2 \cdot p + 2 \cdot b \cdot \pi \cdot G \cdot m \cdot p = 0.785 \cdot 50^2 \cdot 0,8 + 2 \cdot 3,5 \cdot 3,142 \cdot 50 \cdot 3 \cdot 0,8 = 4209 \text{ Н}$$

Величина растягивающей внешней силы:

$$F_A = 1200 \text{ Н}$$

Сжимающими нагрузками пренебрегают, и в этом случае  $F_A$  приравнивается нулю.

Внешний изгибающий момент:

$$M_E = 282,8 \text{ Н м}$$

$$W_{\text{с}} = \pi \cdot b \cdot G \cdot y = 3,142 \cdot 3,5 \cdot 50 \cdot 69 = 3,793 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Общая расчетная площадь сечения болтов:

$$A_m = \max \left[ \frac{W_o + F_A + \frac{4 \cdot M_E}{G}}{S_{bo}}; \frac{W_{\text{с}}}{S_{bs}} \right] = \max[(4209 + 1200 + 4 \cdot 282,8 / 50) / 143; 3,793 \cdot 10^4 / 147,2] = 0,2577 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Диаметр сечения болта (шпильки) с учетом коррозии:

$$d_{bc} = 12 \text{ мм}$$

Площадь сечения болта (шпильки) (по внутреннему диаметру резьбы с учетом коррозии):

$$f_b = 0,762 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Площадь поперечного сечения болтов по внутреннему диаметру резьбы или минимальному диаметру стержня:

$$A_b = n \cdot f_b = 4 \cdot 0,762 \cdot 10^{-4} = 0,3048 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

### **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:

$$H_D = 0.785 \cdot B^2 \cdot p = 0.785 \cdot 29^2 \cdot 0,8 = 528,1 \text{ Н}$$

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:

$$H = 0.785 \cdot G^2 \cdot p = 0.785 \cdot 50^2 \cdot 0,8 = 1570 \text{ Н}$$

Разница между общей равнодействующей давления и равнодействующей на внутренней поверхности фланца:

$$H_T = H - H_D = 1570 - 528,1 = 1042 \text{ Н}$$

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:

$$H_G = W_o - H = 4209 - 1570 = 2639 \text{ Н}$$

Болтовой интервал:

$$B_S = \frac{\pi \cdot C}{n} = 3,142 \cdot 85 / 4 = 66,76 \text{ мм}$$

Номинальный диаметр болта:

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	<div>Е-3.00.00.000 РР</div> <div>Лист</div> <div>179</div>
19785.4					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

$$a = d_b = 12 \text{ мм}$$

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

$$h_o = \sqrt{B \cdot g_0} = (29 \cdot 8)^{1/2} = 15,23 \text{ мм}$$

$$X_h = \frac{h}{h_o} = 20 / 15,23 = 1,313$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$F = 0,9032$$

Расчетные коэффициенты:

$$e = \frac{F}{h_o} = 0,9032 / 15,23 = 0,05930 \text{ 1/мм}$$

$$K = \frac{A}{B} = 115 / 29 = 3,966$$

$$T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg K) - 1}{(1,0472 + 1,9448 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (3,966^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg 3,966) - 1) / ((1,0472 + 1,9448 \cdot 3,966^2) \cdot (3,966 - 1)) = 1,015$$

$$U = \frac{K^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg K) - 1}{1,36136 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (3,966^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg 3,966) - 1) / (1,36136 \cdot (3,966^2 - 1) \cdot (3,966 - 1)) = 1,601$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$V = 0,55$$

Коэффициент d для интегральных фланцев:

$$d = \frac{U}{V} \cdot h_o \cdot g_0^2 = 1,601 / 0,55 \cdot 15,23 \cdot 8^2 = 0,2838 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$$

$$L = \frac{t \cdot e + 1}{T} + \frac{t^3}{d} = (14 \cdot 0,05930 + 1) / 1,015 + 14^3 / 0,2838 \cdot 10^{-5} = 2,77$$

Момент инерции сечения фланца при изгибе (интегральные фланцы с втулкой):

$$I = \frac{0,0874 \cdot L \cdot g_0^2 \cdot h_o \cdot B}{V} = 0,0874 \cdot 2,77 \cdot 8 \cdot 15,23 \cdot 29 / 0,55 = 0,1245 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

$$G_{wg} = 0,5 \cdot (g_0 + g_1) = 0,5 \cdot (8 + 8) = 8 \text{ мм}$$

$$A_R = 0,5 \cdot (A - B) = 0,5 \cdot (115 - 29) = 43 \text{ мм}$$

Так как  $t \geq G_{wg}$ ,

$$A_A = A_R = 43 \text{ мм}$$

$$B_B = t = 14 \text{ мм}$$

$$K_{AB} = \left( A_A \cdot B_B^3 \right) \cdot \left[ \frac{1}{3} - 0,21 \cdot \left( \frac{B_B}{A_A} \right) \cdot \left( 1 - \frac{1}{12} \cdot \left\{ \frac{B_B}{A_A} \right\}^4 \right) \right] = (43 \cdot 14^3) \cdot [1/3 - 0,21 \cdot (14/43) \cdot (1 - 1/12 \cdot \{14/43\}^4)] = 0,3127 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

$$C_c = h = 20 \text{ мм}$$

$$D_{DG} = G_{wg} = 8 \text{ мм}$$

Инов. № подл.	19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):
						$V = 0,55$
						Коэффициент d для интегральных фланцев:
						$d = \frac{U}{V} \cdot h_o \cdot g_o^2 = 1,601 / 0,55 * 15,23 * 8^2 = 0,2838 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$
						$L = \frac{t \cdot e + 1}{T} + \frac{t^3}{d} = (14 * 0,05930 + 1) / 1,015 + 14^3 / 0,2838 \cdot 10^{-5} = 2,77$
						Момент инерции сечения фланца при изгибе (интегральные фланцы с втулкой):
						$I = \frac{0.0874 \cdot L \cdot g_o^2 \cdot h_o \cdot B}{V} = 0.0874 * 2,77 * 8 * 15,23 * 29 / 0,55 = 0,1245 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$
						$G_{wg} = 0.5 \cdot (g_o + g_1) = 0.5 * (8 + 8) = 8 \text{ мм}$
						$A_R = 0.5 \cdot (A - B) = 0.5 * (115 - 29) = 43 \text{ мм}$
						Так как $t \geq G_{wg}$ ,
						$A_A = A_R = 43 \text{ мм}$
						$B_B = t = 14 \text{ мм}$
						$K_{AB} = (A_A \cdot B_B^3) \cdot \left[ \frac{1}{3} - 0.21 \cdot \left( \frac{B_B}{A_A} \right) \cdot \left( 1 - \frac{1}{12} \cdot \left\{ \frac{B_B}{A_A} \right\}^4 \right) \right] = (43 * 14^3) * [1/3 - 0.21 * (14 / 43) * (1 - 1/12 * \{14 / 43\}^4)] = 0,3127 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$
						$C_C = h = 20 \text{ мм}$
						$D_{DG} = G_{wg} = 8 \text{ мм}$
Инов. № подл.	19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	E-3.00.00.000 PP
						Лист 180

$$K_{CD} = \left( C_c \cdot D_{DG}^3 \right) \cdot \left[ \frac{1}{3} - 1,05 \cdot \left( \frac{D_{DG}}{C_c} \right) \cdot \left( 1 - \frac{1}{192} \cdot \left\{ \frac{D_{DG}}{C_c} \right\}^4 \right) \right] = (20 \cdot 8^3) \cdot [1/3 - 1,05 \cdot (8/20) \cdot (1 - 1/192 \cdot (8/20)^4)] = (-0,8869 \cdot 10^{-9}) \text{ м}^4$$

Полярный момент сечения фланца (интегральные фланцы, плоские фланцы с втулкой):

$$I_p = K_{AB} + K_{CD} = 0,3127 \cdot 10^{-7} + (-0,8869 \cdot 10^{-9}) = 0,3038 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

Компонент проектного момента на фланце, как результат действия внешнего изгибающего момента и/или осевой силы:

$$M_{oe} = 4 \cdot M_E \cdot \left[ \frac{I}{0,3846 \cdot I_p + I} \right] \cdot \left[ \frac{h_D}{C - 2 \cdot h_D} \right] + F_A \cdot h_D = 4 \cdot 282,8 \cdot [0,1245 \cdot 10^{-7} / (0,3846 \cdot 0,3038 \cdot 10^{-7} + 0,1245 \cdot 10^{-7})] \cdot [24 / (85 - 2 \cdot 24)] + 1200 \cdot 24 = 407,3 \text{ Н м}$$

Коэффициент момента для расчета свободных колец:

$$F_s = 1$$

Изгибающий момент в рабочих условиях (внутреннее давление):

$$M_o = [(H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G) \cdot B_{sc} + M_{o1}] \cdot F_s = [(528,1 \cdot 24 + 1042 \cdot 22,75 + 2639 \cdot 17,5) \cdot 1,325 + 407,3] \cdot 1 = 516,7 \text{ Н м}$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$f = 1$$

Продольные напряжения во втулке, в рабочих условиях:

$$S_H = \frac{f \cdot M_o}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 516,7 / (2,77 \cdot 8^2 \cdot 29) = 100,5 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min \{ 1,5 \cdot S_{\sigma}; 2,5 \cdot S_{\sigma 0} \}$$

$$\min \{ 1,5 \cdot S_{\sigma}; 2,5 \cdot S_{\sigma 0} \} = \min \{ 1,5 \cdot 135,4; 2,5 \cdot 134,7 \} = 203 \text{ МПа}$$

100,5 МПа ≤ 203 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, рабочие условия:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_o}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 \cdot 14 \cdot 0,05930 + 1) \cdot 516,7 / (2,77 \cdot 14^2 \cdot 29) = 69,05 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{\sigma}$$

69,05 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left( 0,66845 + 5,7169 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (3,966 - 1) \cdot (0,66845 + 5,7169 \cdot 3,966^2 \cdot \lg 3,966 / (3,966^2 - 1)) = 1,457$$

$$Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (3,966^2 + 1) / (3,966^2 - 1) = 1,136$$

Касательные напряжения во фланце, рабочие условия:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_o}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 1,457 \cdot 516,7 / (14^2 \cdot 29) - 1,136 \cdot 69,05 = 54,04 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{\sigma}$$

54,04 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (100,5 + 69,05) / 2 = 84,77 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\sigma}$$

84,77 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	19785.4	Подпись и дата	
Взам. инв. №		Подпись и дата	
Инов. № дубл.		Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
Дата			
Е-3.00.00.000 РР			
Лист			
181			

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (100,5 + 54,04) / 2 = 77,27 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_b$$

77,27 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

Болтовая нагрузка в условиях монтажа:

$$W_g = \left( \frac{A_m + A_b}{2} \right) \cdot S_{bg} = (0,2577 \cdot 10^{-3} + 0,3048 \cdot 10^{-3}) / 2 \cdot 147,2 = 4,14 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Изгибающий момент в условиях монтажа (внутреннее давление):

$$M_g = \frac{W_g \cdot (C - G) \cdot B_{sc} \cdot F_s}{2} = 4,14 \cdot 10^4 \cdot (85 - 50) \cdot 1,325 \cdot 1 / 2 = 960,3 \text{ Н м}$$

Продольные напряжения во втулке, в условиях монтажа:

$$S_H = \frac{f \cdot M_g}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 960,3 / (2,77 \cdot 8^2 \cdot 29) = 186,8 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min\{1,5 \cdot S_{tg}; 2,5 \cdot S_{ng}\}$$

$$\min\{1,5 \cdot S_{tg}; 2,5 \cdot S_{ng}\} = \min\{1,5 \cdot 163,3; 2,5 \cdot 163,3\} = 245 \text{ МПа}$$

186,8 МПа ≤ 245 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_g}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 \cdot 14 \cdot 0,05930 + 1) \cdot 960,3 / (2,77 \cdot 14^2 \cdot 29) = 128,3 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{tg}$$

128,3 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Касательные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_g}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 1,457 \cdot 960,3 / (14^2 \cdot 29) - 1,136 \cdot 128,3 = 100,4 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{tg}$$

100,4 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (186,8 + 128,3) / 2 = 157,6 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{tg}$$

157,6 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (186,8 + 100,4) / 2 = 143,6 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{tg}$$

143,6 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

**Условие прочности выполнено**

### **Жесткость фланца**

- для рабочих условий:

Коэффициент жесткости для интегральных фланцев:

$K_R = 0,3$

Изн. № подл. 19785.4	Подпись и дата					Лист 182
	Изн. № дубл.					
	Взам. инв. №					
	Подпись и дата					
	Изн. № подл.					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-3.00.00.000 PP	

128,3 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**  
Касательные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_{\xi}}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 1,457 \cdot 960,3 / (14^2 \cdot 29) - 1,136 \cdot 128,3 = 100,4 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{\xi}$$

100,4 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (186,8 + 128,3) / 2 = 157,6 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\xi}$$

157,6 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (186,8 + 100,4) / 2 = 143,6 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\xi}$$

143,6 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**  
**Условие прочности выполнено**

**Жесткость фланца**

- для рабочих условий:  
Коэффициент жесткости для интегральных фланцев:  
K<sub>R</sub> = 0.3

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, рабочие условия):

$$J = \frac{52.14 \cdot V \cdot M_o}{L \cdot E_{\gamma o} \cdot g_o^2 \cdot K_R \cdot h_o} = (52.14 * 0.55 * 516,7) / (2,77 * 1,866 \cdot 10^5 * 8^2 * 0,3 * 15,23) = 0,09801$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1.0$$

$$0,09801 \leq 1.0$$

**Условие жёсткости выполнено**

- для условий монтажа:

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, условия монтажа):

$$J = \frac{52.14 \cdot V \cdot M_{\epsilon}}{L \cdot E_{\gamma g} \cdot g_o^2 \cdot K_R \cdot h_o} = (52.14 * 0.55 * 960,3) / (2,77 * 1,99 \cdot 10^5 * 8^2 * 0,3 * 15,23) = 0,1708$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1.0$$

$$0,1708 \leq 1.0$$

**Условие жёсткости выполнено**

**Расчёт напряжений второго фланца:**

Равнодействующая давления на внутренней поверхности фланца:

$$H_D = 0.785 \cdot B^2 \cdot p = 0.785 * 29^2 * 0,8 = 528,1 \text{ Н}$$

Плечо момента для силы  $H_D$  (фланцы интегрального типа, или другие, рассчитываемые аналогично):

$$h_D = \frac{C - B - g_1}{2} = (85 - 29 - 8) / 2 = 24 \text{ мм}$$

Разница между общей равнодействующей давления и равнодействующей на внутренней поверхности фланца:

$$H_T = H - H_D = 1570 - 528,1 = 1042 \text{ Н}$$

Плечо для нагрузки  $H_T$  (интегральные фланцы, а также иные, рассчитываемые аналогично):

$$h_T = \frac{1}{2} \left[ \frac{C - B}{2} + h_g \right] = 1/2 * [(85 - 29) / 2 + 17,5] = 22,75 \text{ мм}$$

Коэффициент болтового интервала:

$$B_{SC} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{B_S}{2 \cdot a + t}} \right\} = \max \{ 1; (66,76 / (2 * 12 + 14))^{1/2} \} = 1,325$$

$$X_g = \frac{g_1}{g_o} = 8 / 2 = 4$$

Коэффициент

$$h_o = \sqrt{B \cdot g_o} = (29 * 2)^{1/2} = 7,616 \text{ мм}$$

$$X_h = \frac{h}{h_o} = 15 / 7,616 = 1,97$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$F = 0,531$$

Расчетные коэффициенты:

$$e = \frac{F}{h_o} = 0,531 / 7,616 = 0,06973 \text{ 1/мм}$$

$$K = \frac{A}{B} = 115 / 29 = 3,966$$

$$T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55246 \cdot \lg K) - 1}{(1.0472 + 1.9448 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (3,966^2 * (1 + 8.55246 * \lg 3,966) - 1) / ((1.0472 + 1.9448 * 3,966^2) * (3,966 - 1)) = 1,015$$

Инов. № подл. 19785.4	Подпись и дата				
	Взам. инв. №				
	Инов. № дубл.				
Изм.	Подпись и дата				
	Взам. инв. №				
	Инов. № дубл.				
Е-3.00.00.000 РР					Лист
					183

$$U = \frac{K^2(1 + 8.55246 \cdot \lg K) - 1}{1.36136 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (3,966^2 \cdot (1 + 8.55246 \cdot \lg 3,966) - 1) / (1.36136 \cdot (3,966^2 - 1) \cdot (3,966 - 1)) = 1,601$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$V = 0,02872$$

Коэффициент d для интегральных фланцев:

$$d = \frac{U}{V} \cdot h_o \cdot g_o^2 = 1,601 / 0,02872 \cdot 7,616 \cdot 2^2 = 0,1699 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$$

$$L = \frac{t \cdot e + 1}{T} + \frac{t^3}{d} = (14 \cdot 0,06973 + 1) / 1,015 + 14^3 / 0,1699 \cdot 10^{-5} = 3,563$$

Момент инерции сечения фланца при изгибе (интегральные фланцы с втулкой):

$$I = \frac{0.0874 \cdot L \cdot g_o^2 \cdot h_o \cdot B}{V} = 0.0874 \cdot 3,563 \cdot 2 \cdot 7,616 \cdot 29 / 0,02872 = 0,9579 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4$$

$$G_{\text{мг}} = 0.5 \cdot (g_o + g_1) = 0.5 \cdot (2 + 8) = 5 \text{ мм}$$

$$A_R = 0.5 \cdot (A - B) = 0.5 \cdot (115 - 29) = 43 \text{ мм}$$

Так как  $t \geq G_{\text{мг}}$ ,

$$A_A = A_R = 43 \text{ мм}$$

$$B_B = t = 14 \text{ мм}$$

$$K_{AB} = (A_A \cdot B_B^3) \cdot \left[ \frac{1}{3} - 0.21 \cdot \left( \frac{B_B}{A_A} \right) \cdot \left( 1 - \frac{1}{12} \cdot \left\{ \frac{B_B}{A_A} \right\}^4 \right) \right] = (43 \cdot 14^3) \cdot [1/3 - 0.21 \cdot (14/43) \cdot (1 - 1/12 \cdot \{14/43\}^4)] = 0,3127 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

$$C_C = h = 15 \text{ мм}$$

$$D_{DG} = G_{\text{мг}} = 5 \text{ мм}$$

$$K_{CD} = (C_C \cdot D_{DG}^3) \cdot \left[ \frac{1}{3} - 1.05 \cdot \left( \frac{D_{DG}}{C_C} \right) \cdot \left( 1 - \frac{1}{192} \cdot \left\{ \frac{D_{DG}}{C_C} \right\}^4 \right) \right] = (15 \cdot 5^3) \cdot [1/3 - 1.05 \cdot (5/15) \cdot (1 - 1/192 \cdot \{5/15\}^4)] = (-0,3121 \cdot 10^{-10}) \text{ м}^4$$

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:

$$M_{oe} = 4 \cdot M_E \cdot \left[ \frac{I}{0.3846 \cdot I_P + I} \right] \cdot \left[ \frac{h_D}{C - 2 \cdot h_D} \right] + F_A \cdot h_D = 4 \cdot 282,8 \cdot [0,9579 \cdot 10^{-8} / (0.3846 \cdot 0,3124 \cdot 10^{-7} + 0,9579 \cdot 10^{-8})] \cdot [24 / (85 - 2 \cdot 24)] + 1200 \cdot 24 = 354,3 \text{ Н м}$$

Изгибающий момент в рабочих условиях (внутреннее давление):

$$M_o = [(H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G) \cdot B_{SC} + M_{oe}] \cdot F_s = [(528,1 \cdot 24 + 1042 \cdot 22,75 + 2639 \cdot 17,5) \cdot 1,325 + 354,3] \cdot 1 = 463,8 \text{ Н м}$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$f = 1$$

Продольные напряжения во втулке, в рабочих условиях:

$$S_H = \frac{f \cdot M_o}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 463,8 / (3,563 \cdot 8^2 \cdot 29) = 70,14 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min \{1.5 \cdot S_{\text{до}}; 2.5 \cdot S_{\text{но}}\}$$

$$\min \{1.5 \cdot S_{\text{до}}; 2.5 \cdot S_{\text{но}}\} = \min \{1.5 \cdot 135,4; 2.5 \cdot 154,7\} = 203 \text{ МПа}$$

$$70,14 \text{ МПа} \leq 203 \text{ МПа, Условие прочности выполнено}$$

Радиальные напряжения во фланце, рабочие условия:

Инв. № подл.	19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$D_{DG} = G_{mg}$	$= 5 \text{ мм}$	
						$K_{CD} = \left( C_c \cdot D_{DG}^3 \right) \cdot \left[ \frac{1}{3} - 1.05 \cdot \left( \frac{D_{DG}}{C_c} \right) \cdot \left( 1 - \frac{1}{192} \cdot \left\{ \frac{D_{DG}}{C_c} \right\}^4 \right) \right]$	$= (15 \cdot 5^3) \cdot [1/3 - 1.05 \cdot (5/15) \cdot (1 - 1/192 \cdot \{5/15\}^4)]$	$= (-0,3121 \cdot 10^{-10}) \text{ м}^4$
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:								
$M_{oe} = 4 \cdot M_E \cdot \left[ \frac{I}{0,3846 \cdot I_p + I} \right] \cdot \left[ \frac{h_D}{C - 2 \cdot h_D} \right] + F_A \cdot h_D$							$= 4 \cdot 282,8 \cdot [0,9579 \cdot 10^{-8} / (0,3846 \cdot 0,3124 \cdot 10^{-7} + 0,9579 \cdot 10^{-8})] \cdot [24 / (85 - 2 \cdot 24)] + 1200 \cdot 24$	$= 354,3 \text{ Н м}$
Изгибающий момент в рабочих условиях (внутреннее давление):								
$M_o = [(H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G) \cdot B_{SC} + M_{oe}] \cdot F_s$							$= [(528,1 \cdot 24 + 1042 \cdot 22,75 + 2639 \cdot 17,5) \cdot 1,325 + 354,3] \cdot 1$	$= 463,8 \text{ Н м}$
Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):								
$f = 1$								
Продольные напряжения во втулке, в рабочих условиях:								
$S_H = \frac{f \cdot M_o}{L \cdot g_1^2 \cdot B}$							$= 1 \cdot 463,8 / (3,563 \cdot 8^2 \cdot 29) = 70,14 \text{ МПа}$	
Условие прочности:								
$S_H \leq \min \{ 1,5 \cdot S_{\sigma}; 2,5 \cdot S_{\sigma o} \}$								
$\min \{ 1,5 \cdot S_{\sigma}; 2,5 \cdot S_{\sigma o} \} = \min \{ 1,5 \cdot 135,4; 2,5 \cdot 154,7 \} = 203 \text{ МПа}$								
70,14 МПа ≤ 203 МПа, <b>Условие прочности выполнено</b>								
Радиальные напряжения во фланце, рабочие условия:								
Инв. № подл.	19785.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Е-3.00.00.000 PP		
						Лист 184		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				



$$S_R = \frac{(1.33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_o}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1.33 \cdot 14 \cdot 0.06973 + 1) \cdot 463.8 / (3.563 \cdot 14^2 \cdot 29) = 52.64 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_b$$

52,64 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left( 0.66845 + 5.7169 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (3.966 - 1) \cdot (0.66845 + 5.7169 \cdot 3.966^2 \cdot \lg 3.966 / (3.966^2 - 1)) = 1.457$$

$$Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (3.966^2 + 1) / (3.966^2 - 1) = 1.136$$

Касательные напряжения во фланце, рабочие условия:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_o}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 1.457 \cdot 463.8 / (14^2 \cdot 29) - 1.136 \cdot 52.64 = 59.11 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_b$$

59,11 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (70.14 + 52.64) / 2 = 61.39 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_b$$

61,39 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (70.14 + 59.11) / 2 = 64.62 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_b$$

64,62 МПа ≤ 135,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

Изгибающий момент в условиях монтажа (внутреннее давление):

$$M_g = \frac{W_g \cdot (C - G) \cdot B_{sc} \cdot F_s}{2} = 4.14 \cdot 10^4 \cdot (85 - 50) \cdot 1.325 \cdot 1 / 2 = 960.3 \text{ Н м}$$

Продольные напряжения во втулке, в условиях монтажа:

$$S_H = \frac{f \cdot M_g}{L \cdot g_I^2 \cdot B} = 1 \cdot 960.3 / (3.563 \cdot 8^2 \cdot 29) = 145.2 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min\{1.5 \cdot S_{Hg}; 2.5 \cdot S_{ng}\}$$

$$\min\{1.5 \cdot S_{Hg}; 2.5 \cdot S_{ng}\} = \min\{1.5 \cdot 163.3; 2.5 \cdot 183\} = 245 \text{ МПа}$$

145,2 МПа ≤ 245 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_R = \frac{(1.33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_g}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1.33 \cdot 14 \cdot 0.06973 + 1) \cdot 960.3 / (3.563 \cdot 14^2 \cdot 29) = 109 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{Rg}$$

109 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Касательные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_g}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 1.457 \cdot 960.3 / (14^2 \cdot 29) - 1.136 \cdot 109 = 122.4 \text{ МПа}$$

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19785.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Е-3.00.00.000 РР				Лист
				185



## **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 <sup>3</sup>
Теоретический собственный вес сосуда	$G =$	$11,5 \cdot 10^4$	Н
Внутренний диаметр аппарата	$D =$	1800	мм
Расчетная длина аппарат	$L =$	7900	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 <sup>2</sup>
Расчетное сопротивление болта (по СП 16.13330.2011 Таблица Г.7, Таблица Г.8)	$R_{bt} =$	245	Н/мм <sup>2</sup>
Коэффициент условий работы	$\gamma_c =$	0,9	

## Результаты расчета на прочность фундаментных болтов

Результирующая вертикальная нагрузка, вызванная всплытием подземного сосуда

$$N = 1,25 \gamma_B \frac{\pi D^2 L}{4} - 0,9G = 1,48 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

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

$$N_{bt} = R_{bt} \cdot A_{bn} \cdot \gamma_c = 7,78 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Минимальное необходимое количество болтов	$\frac{N}{N_{bt}} =$	1,9
---	----------------------	-----

Условие прочности	$n \geq \frac{N}{N_{bt}}$	Выполнено
-------------------	---------------------------	-----------

Инв. № подл. 19785.4	Подпись и дата	<h2 style="text-align: center;">Результаты расчета на прочность фундаментных болтов</h2>				
		Результирующая вертикальная нагрузка, вызван- ная всплытием подземного сосуда		$N = 1,25 \gamma_B \frac{\pi D^2 L}{4} - 0.9 G = 1,48 \cdot 10^5 \text{ Н}$		
		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		$N_{bt} = R_{bt} \cdot A_{bn} \cdot \gamma_c = 7,78 \cdot 10^4 \text{ Н}$		
		Минимальное необходимое количество болтов		$\frac{N}{N_{bt}} = 1,9$		
Взам. инв. №	Подпись и дата	Условие прочности		$n \geq \frac{N}{N_{bt}}$ <div style="color: blue; font-weight: bold; font-size: 1.2em;">Выполнено</div>		
Инв. № дубл.	Подпись и дата					

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

### Е-3.00.00.000 РР

Лист
187

## Список литературы

- 1) ГОСТ Р 52630-2012. Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия
- 2) ГОСТ Р 52857.1-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования.
- 3) ГОСТ Р 52857.2-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек.
- 4) ГОСТ Р 52857.3-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и внешнем давлениях. Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер.
- 5) ГОСТ Р 52857.4-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений.
- 6) ГОСТ Р 52857.5-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет обечаек и днищ от воздействия опорных нагрузок
- 7) ASME VIII, Div 2, 2013.
- 8) СП 16.13330.2011 СП 16.13330.2011 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81
- 9) СП 43.13330.2012 Сооружения промышленных предприятий. Актуализированная редакция СНиП 2.09.03-85
- 10) 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
19785.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Е-3.00.00.000 РР				
				Лист
				188