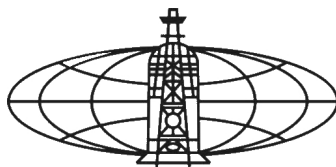


АО «ВНИИНЕФТЕМАШ»



ОАО "Славнефть-ЯНОС"

Установка АВТ-4 Цех №1

**ДРЕНАЖНАЯ ЕМКОСТЬ ТЕМНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ
Е-10К**

Расчеты

Е-10К.00.00.000 РР

Зав. отделом №16

С. В. Салов

« ____ » _____ 2016 г.

Главный конструктор проекта

Е. Н. Логунова




« ____ » _____ 2016 г.

Москва, 2016 г.

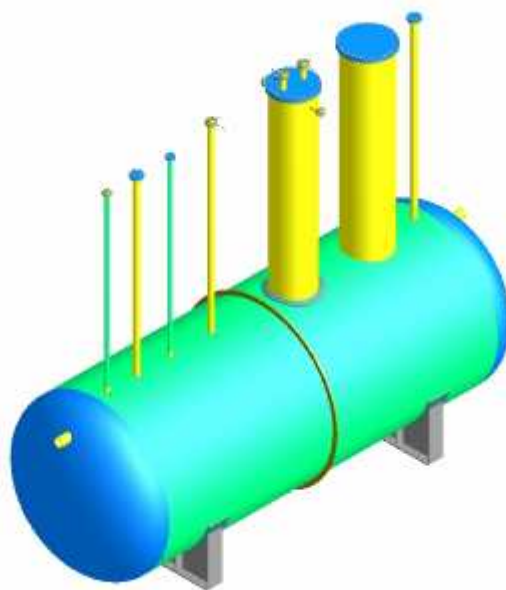
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				

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

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				

					Е-10К.00.00.000 РР						
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Дренажная емкость темных углеводородов Е-10К Расчеты			Лит.	Лист	Листов	
Разраб.	Иванов		03.2016	Т					2	302	
Пров.	Монахова		03.2016	АО «ВНИИНЕФТЕМАШ»							
Рук.											
Н.контр.	Копчикова		03.2016								
Утв.											

Расчёт на прочность сосуда



Наименование аппарата	Дренажная емкость темных углеводородов Е-10К
Название установки:	Установка АВТ-4 Цех №1
Наименование объекта:	ОАО "Славнефть-ЯНОС"
Сосуд, содержащий рабочую жидкость:	Да
Вид испытаний:	Гидроиспытания
Пробное давление:	0,49 МПа
Учёт сейсмических нагрузок:	Нет

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Вид испытаний:	Пробное давление:	Учёт сейсмических нагрузок:	Гидроиспытания	0,49 МПа	Нет	
E-10K.00.00.000 PP																			Лист
																			4

Сводные таблицы

Основные элементы

Исходные данные

Элемент	Материал	Диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Длина (высота), мм	Суммарная прибавка, мм	Кoeff. прочности сварного шва
Днище эллиптическое	09Г2С	3000	22	852	8,1	1
Обечайка цилиндрическая	09Г2С	3000	22	6840	4,8	1

Результаты расчета

Расчётные условия

Элемент	Расчетная температура, °С	Расчетное давление, МПа	Допускаемые напряжения, МПа	Расчетная толщина с уч. прибавок, мм	Условие прочности
Днище эллиптическое	120	0,401	174,5	11,55	выполнено
Обечайка цилиндрическая	120	0,401	174,5	8,251	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	(-0,21)	167	17,48	выполнено
Обечайка цилиндрическая	180	(-0,21)	167	19,43	выполнено

Условия испытаний

Элемент	Расчетное давление, МПа	Допускаемые напряжения, МПа	Расчетная толщина с уч. прибавок, мм	Условие прочности
Днище эллиптическое	0,558	272,7	11,17	выполнено
Обечайка цилиндрическая	0,558	272,7	7,872	выполнено

Изн.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-10К.00.00.000 РР		Лист
19746.4							5

Штуцера

Исходные данные

Элемент	Метка	Тип	Материал	Диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Суммарная прибавка, мм
Штуцер П1 DN150	Штуцер П1	Проходящий без укрепления	09Г2С Gr.ГОСТ 19281	144	12	5,8
Штуцер МН DN800	Штуцер МН	Проходящий без укрепления	09Г2С	800	22	4,8
Штуцер НН1 DN25	Штуцер НН1	Проходящий без укрепления	09Г2С(КП265) Gr.	25	10	4
Штуцер НО1 DN25	Штуцер НО1	Проходящий без укрепления	09Г2С(КП265) Gr.	25	10	4
Штуцер А1 DN700	Штуцер А1	Проходящий с накладным кольцом	09Г2С	700	22	4,8
Штуцер V DN50	Штуцер V	Проходящий без укрепления	09Г2С Gr.ГОСТ 19281	48	10	5,5
Штуцер Р1 DN50	Штуцер Р1	Проходящий без укрепления	09Г2С Gr.ГОСТ 19281	48	10	5,5
Штуцер О1 DN80	Штуцер О1	Проходящий без укрепления	09Г2С Gr.ГОСТ 19281	78	12	5,8
Штуцер LT2 DN100	Штуцер LT2	Проходящий без укрепления	09Г2С Gr.ГОСТ 19281	94	10	5,35
Штуцер LT1 DN100	Штуцер LT1	Проходящий без укрепления	09Г2С Gr.ГОСТ 19281	94	10	5,35
Штуцер UC DN50	Штуцер UC	Проходящий без укрепления	09Г2С(КП265) Gr.	48	18	4
Штуцер О2 DN80	Штуцер О2	Проходящий без укрепления	09Г2С Gr.ГОСТ 19281	78	12	5,8
Штуцер TW DN50	Штуцер TW	Проходящий без укрепления	09Г2С(КП265) Gr.	48	16	4

Результаты расчета

Расчётные условия

Элемент	Расчетная температура, °С	Расчетное давление, МПа	Условие прочности
Штуцер П1 DN150	120	0,3824	выполнено
Штуцер МН DN800	120	0,3788	выполнено
Штуцер НН1 DN25	120	0,3539	выполнено
Штуцер НО1 DN25	120	0,3539	выполнено
Штуцер А1 DN700	120	0,3788	выполнено
Штуцер V DN50	120	0,3541	выполнено
Штуцер Р1 DN50	120	0,3541	выполнено
Штуцер О1 DN80	120	0,3522	выполнено
Штуцер LT2 DN100	120	0,3788	выполнено

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP	Лист
						6

Штуцер LT1 DN100	120	0,3788	выполнено
Штуцер UC DN50	120	0,3788	выполнено
Штуцер O2 DN80	120	0,3788	выполнено
Штуцер TW DN50	120	0,3788	выполнено

Расчётные условия (наружное давление)

Элемент	Расчетная температура, °C	Расчетное давление, МПа	Условие прочности
Штуцер I1 DN150	180	(-0,21)	выполнено
Штуцер MH DN800	180	(-0,21)	выполнено
Штуцер HI1 DN25	180	(-0,21)	выполнено
Штуцер HO1 DN25	180	(-0,21)	выполнено
Штуцер A1 DN700	180	(-0,21)	выполнено
Штуцер V DN50	180	(-0,21)	выполнено
Штуцер P1 DN50	180	(-0,21)	выполнено
Штуцер O1 DN80	180	(-0,21)	выполнено
Штуцер O1 (2)	180	(-0,21)	выполнено
Штуцер LT2 DN100	180	(-0,21)	выполнено
Штуцер LT1 DN100	180	(-0,21)	выполнено
Штуцер UC DN50	180	(-0,21)	выполнено
Штуцер O2 DN80	180	(-0,21)	выполнено
Штуцер TW DN50	180	(-0,21)	выполнено
Штуцер №15	180	(-0,21)	выполнено

Условия испытаний

Элемент	Расчетное давление, МПа	Условие прочности
Штуцер I1 DN150	0,5333	выполнено
Штуцер MH DN800	0,5284	выполнено
Штуцер HI1 DN25	0,4952	выполнено
Штуцер HO1 DN25	0,4952	выполнено
Штуцер A1 DN700	0,5284	выполнено
Штуцер V DN50	0,4955	выполнено
Штуцер P1 DN50	0,4955	выполнено
Штуцер O1 DN80	0,4929	выполнено
Штуцер LT2 DN100	0,5284	выполнено
Штуцер LT1 DN100	0,5284	выполнено
Штуцер UC DN50	0,5284	выполнено
Штуцер O2 DN80	0,5284	выполнено
Штуцер TW DN50	0,5284	выполнено

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP	Лист
						7

Определение давления испытания

Расчет давления испытания в соответствии с ГОСТ Р 52630-2012

Расчетные условия

Допускаемые напряжения для материала корпуса
при температуре 20 °С

$$[\sigma]^{20} = 196 \quad \text{МПа}$$

Допускаемые напряжения для материала корпуса
при расчетной температуре

$$[\sigma]^t = 174,5 \text{ МПа}$$

Расчетное давление

$$P_p = 0.35 \text{ МПа}$$

Расчетное давление гидроиспытания, вычисленное по ГОСТ Р 52630-2012 п.8.11.3

$$P_{IH} = 1,25 \cdot P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t} = 0,49 \quad \text{МПа}$$

Расчетные условия (условия пропарки)

Допускаемые напряжения для материала корпуса
при температуре 20 °С

$$[\sigma]^{20} = 196 \quad \text{МПа}$$

Допускаемые напряжения для материала корпуса
при расчетной температуре

$$[\sigma]^t =$$

Расчетное давление

$$P_p = 0.21 \text{ МПа}$$

Расчетное давление гидроиспытания, вычисленное по ГОСТ Р 52630-2012 п.8.11.3

$$P_{FH} = 1,25 \cdot P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t} = 0,31 \quad \text{МПа}$$

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

Проверка необходимости проведения расчетов на прочность в условиях испытания

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

Расчетное давление испытания

$$P_H = 0,49 \text{ МПа}$$

Гидростатическое давление при полном заполнении аппарата испытательной жидкостью

$$P_{cm} = 0.068 \text{ МПа}$$

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

$$P_H + P_{cm} = 0.558 \text{ МПа}$$

$$1,35 \cdot P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t} = 0,53 \quad \text{МПа}$$

$$0,558 \text{ МПа} > 0,53 \text{ МПа}$$

Заключение: Требуется проведение расчета на прочность в условиях испытания

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p>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.</p> <p>Проверка необходимости проведения расчетов на прочность в условиях испытания</p> <p>Проверка необходимости проведения расчетов на прочность цилиндрических обечаек и конических элементов, выпуклых и плоских днищ в условиях испытания по ГОСТ Р 52857.1-2007 п.8.4</p> <p>Расчетное давление испытания $P_{II} = 0,49$ МПа</p> <p>Гидростатическое давление при полном заполнении аппарата испытательной жидкостью $P_{cm} = 0,068$ МПа</p> $P_{II} + P_{cm} < 1,35 \cdot P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t}$ <p>$P_{II} + P_{cm} = 0,558$ МПа</p> <p>$1,35 \cdot P_p \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t} = 0,53$ МПа</p> <p>0,558 МПа > 0,53 МПа</p> <p>Заключение: Требуется проведение расчета на прочность в условиях испытания</p>
					<div> <div>Инв. № подл.</div> <div>19746.4</div> </div> <div> <div>Изм.</div> <div>Лист</div> <div>№ докум.</div> <div>Подп.</div> <div>Дата</div> </div> <div> <div>E-10K.00.00.000 PP</div> <div>Лист 8</div> </div>

Расчет давления грунта на наружную поверхность сосуда

Исходные данные

Горизонтальный цилиндрический сосуд, заглубленный в траншее.

Удельный вес грунта	$\gamma_0 =$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	Н/мм ³
Коэффициент Пуассона грунта	$\mu =$	0,33	
Теоретический собственный вес сосуда	$G =$	$24 \cdot 10^4$	Н
Высота уровня засыпки грунта от верхней образующей сосуда	$H =$	3100	мм
Внутренний диаметр сосуда	$D =$	3000	мм
Расчетная длина сосуда	$L =$	7500	мм

Расчет давления грунта на основе СП 43.13330.2012

Вертикальное давление грунта с учетом собственного веса сосуда

$$p_v = \gamma_0 \left[H + \frac{D}{2} \right] + \frac{G}{LD} = 0,093 \text{ МПа}$$

Горизонтальное давление грунта

$$p_h = \frac{\gamma_0 \left[H + \frac{D}{2} \right] \mu}{1 - \mu} = 0,041 \text{ МПа}$$

Коэффициент надежности по СП 20.13330.2011

$$\gamma_f = 1,15$$

Расчетное давление грунта

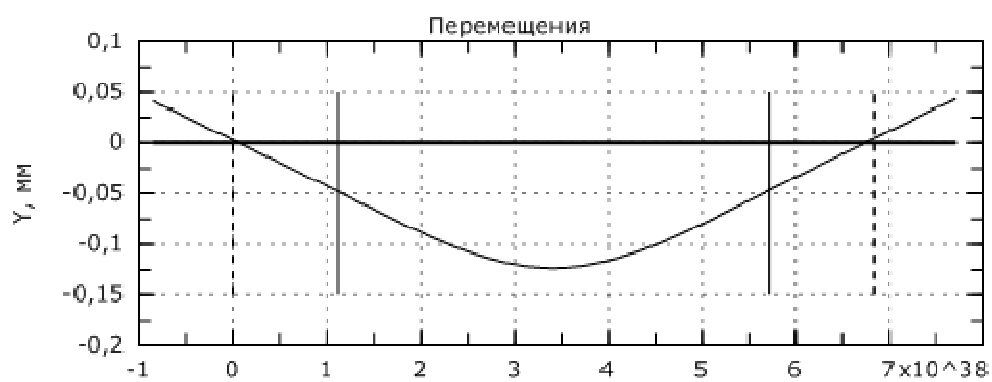
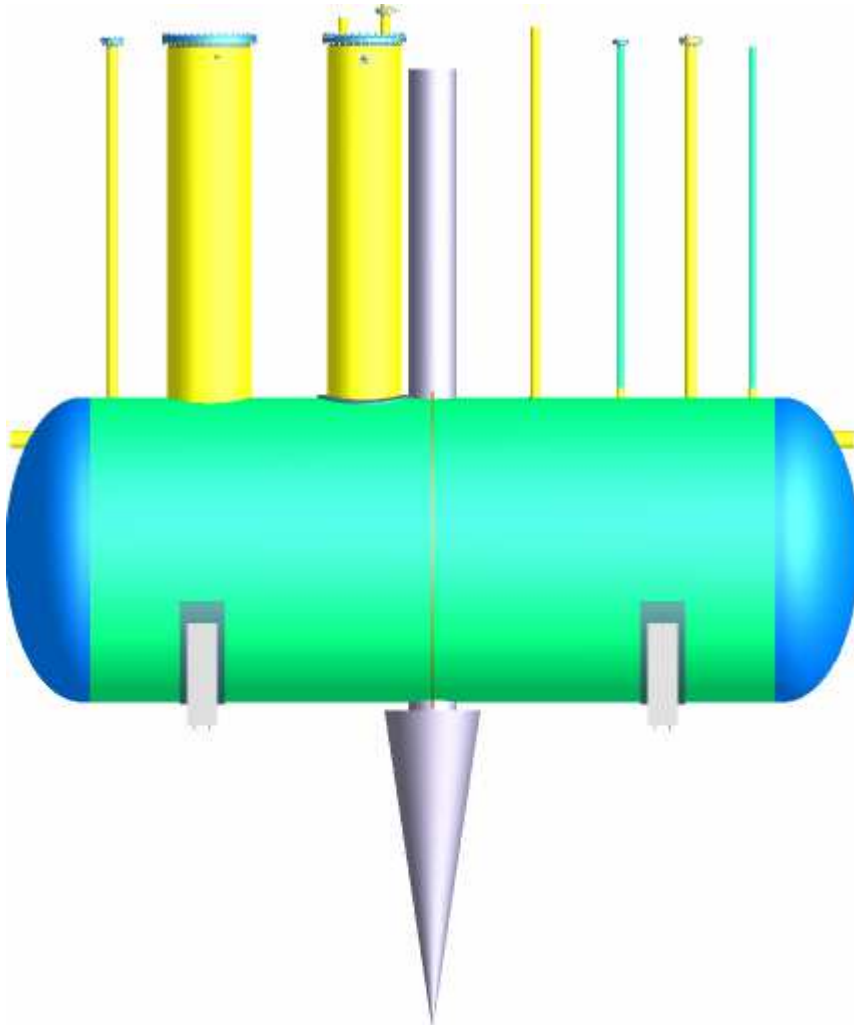
$$P = \gamma_f \max(p_v, p_h) = 0,11 \text{ МПа}$$

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	Кoeffициент надежности по СП 20.13330.2011					$\gamma_f =$	1,15						
<div>19746.4</div>										Расчетное давление грунта			$P = \gamma_f \max(p_v, p_h) =$	0,11	МПа		
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата													

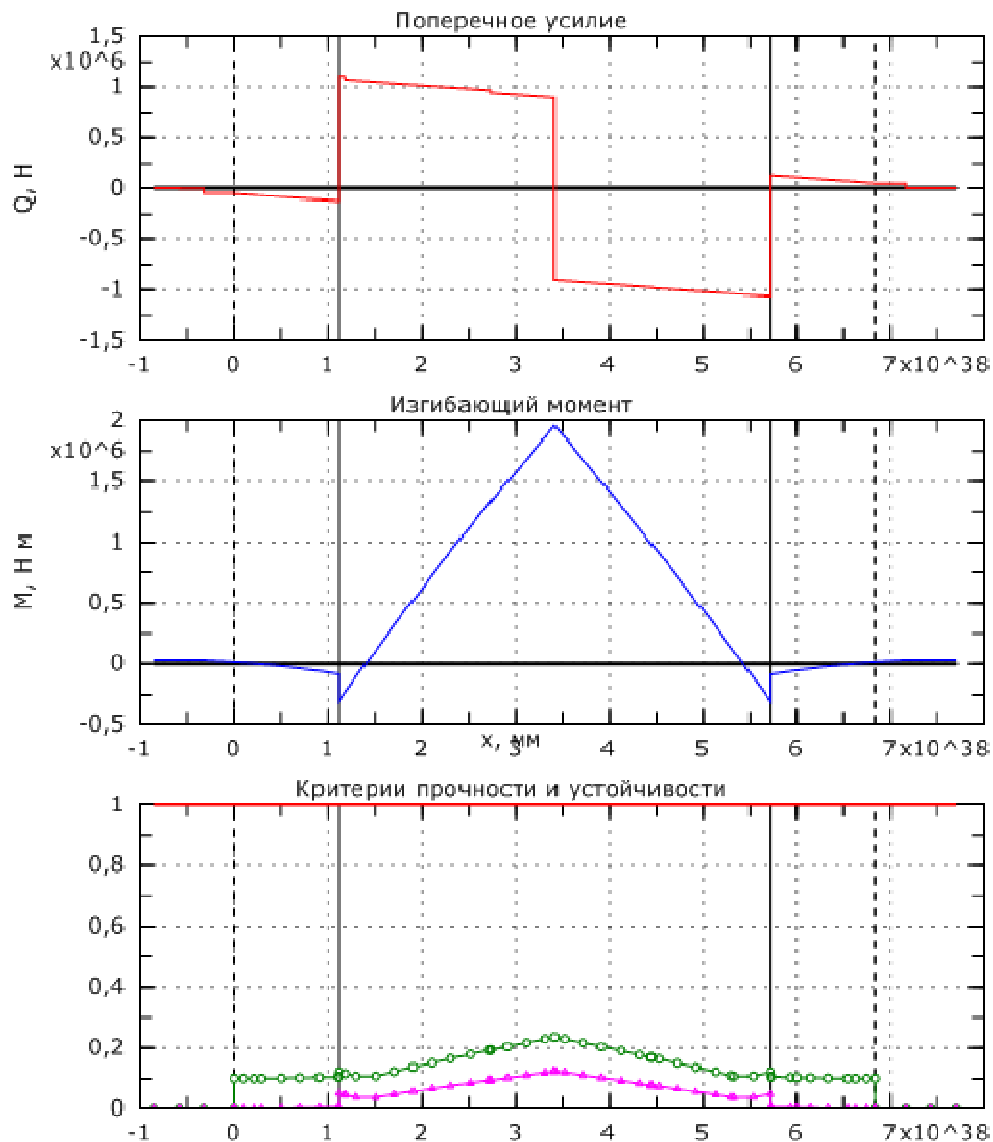
Эпюры сил и моментов

Расчёт в расчётных условиях

Результаты расчёта:



Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-10K.00.00.000 PP				
				Лист
				10



---○---○--- Критерий прочности

---△---△--- Критерий устойчивости

----- Предельное значение

Условие работоспособности выполнено

Общий вес:

$$\sum G_i = 2,42 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Дополнительные вертикальные нагрузки:

$$\sum F_{y_i} = (-400) \text{ Н}$$

Опорные нагрузки:

№ опоры	Название опоры	Опорное усилие, F, Н	Поперечное усилие в сечении оболочки над опорой, Q, Н	Изгибающий момент в сечении оболочки над опорой, M, Н м
1	Опора седловая (неподвижная)	$1,194 \cdot 10^6$	$1,066 \cdot 10^6$	$3,078 \cdot 10^5$
2	Опора седловая (подвижная)	$1,23 \cdot 10^6$	$1,105 \cdot 10^6$	$3,038 \cdot 10^5$

Подпись и дата

Инва. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инва. № подл.

19746.4

E-10K.00.00.000 PP

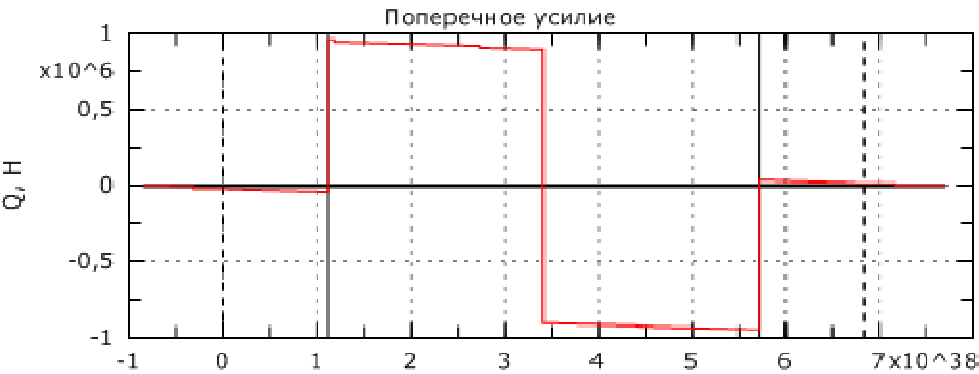
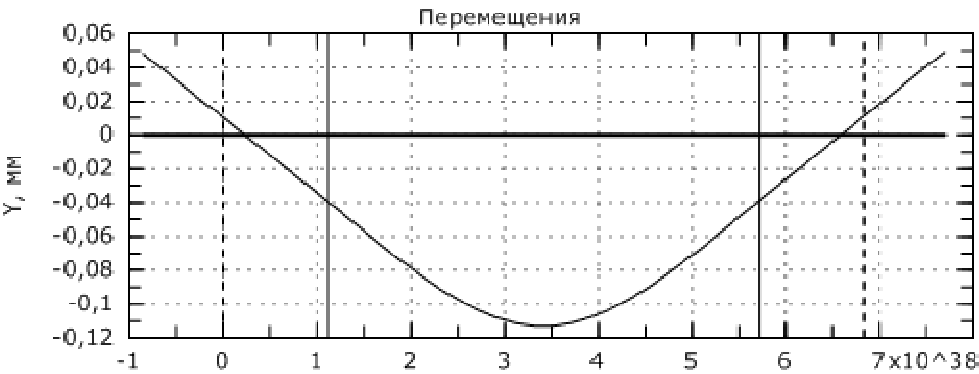
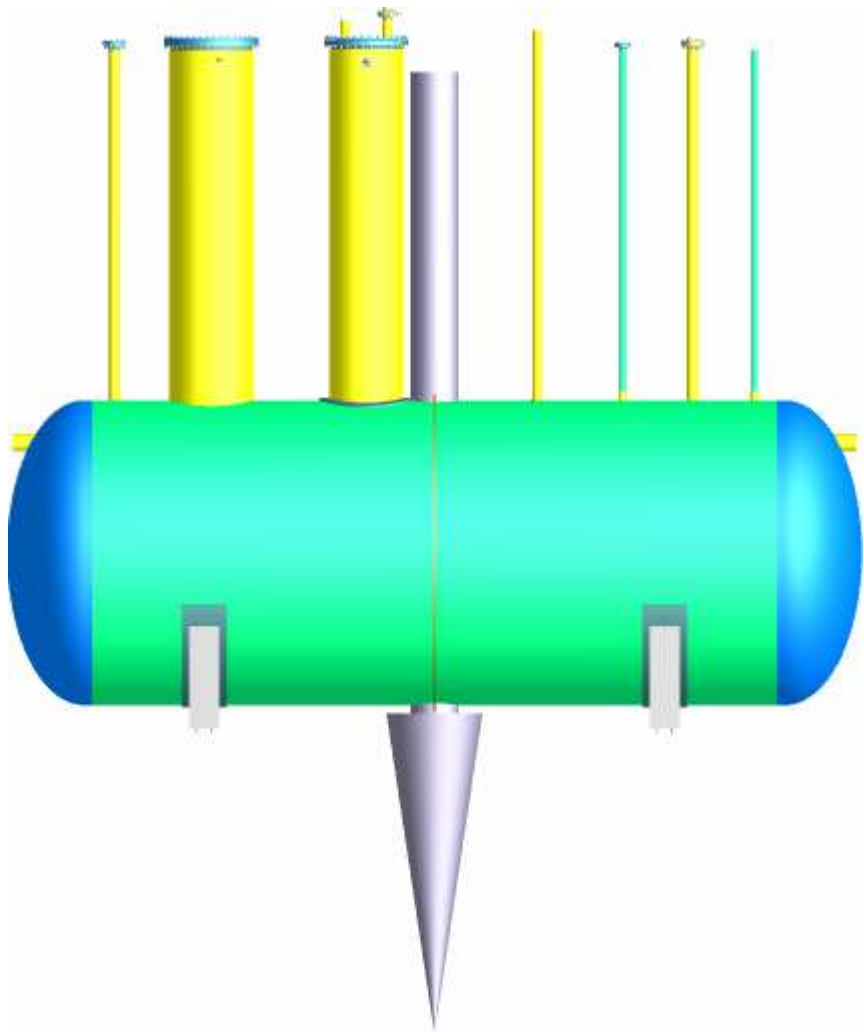
Лист

11

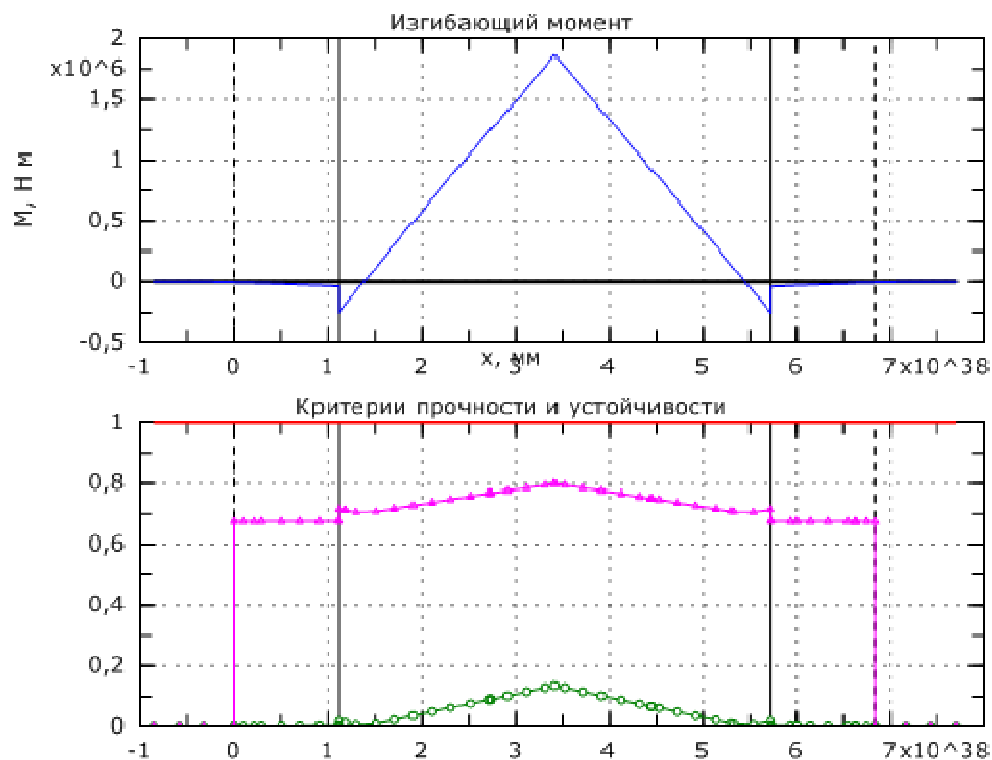
Изм. Лист № докум. Подп. Дата

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Результаты расчёта:



Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата



--o--o-- Критерий прочности

--Δ--Δ-- Критерий устойчивости

----- Предельное значение

Условие работоспособности выполнено

Общий вес:

$$\sum G_i = 1,98 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Дополнительные вертикальные нагрузки:

$$\sum F_{yi} = (-400) \text{ Н}$$

Опорные нагрузки:

№ опоры	Название опоры	Опорное усилие, F, Н	Поперечное усилие в сечении оболочки над опорой, Q, Н	Изгибающий момент в сечении оболочки над опорой, M, Н м
1	Опора седловая (неподвижная)	$9,819 \cdot 10^5$	$9,426 \cdot 10^5$	$2,556 \cdot 10^5$
2	Опора седловая (подвижная)	$1,003 \cdot 10^6$	$9,657 \cdot 10^5$	$2,52 \cdot 10^5$

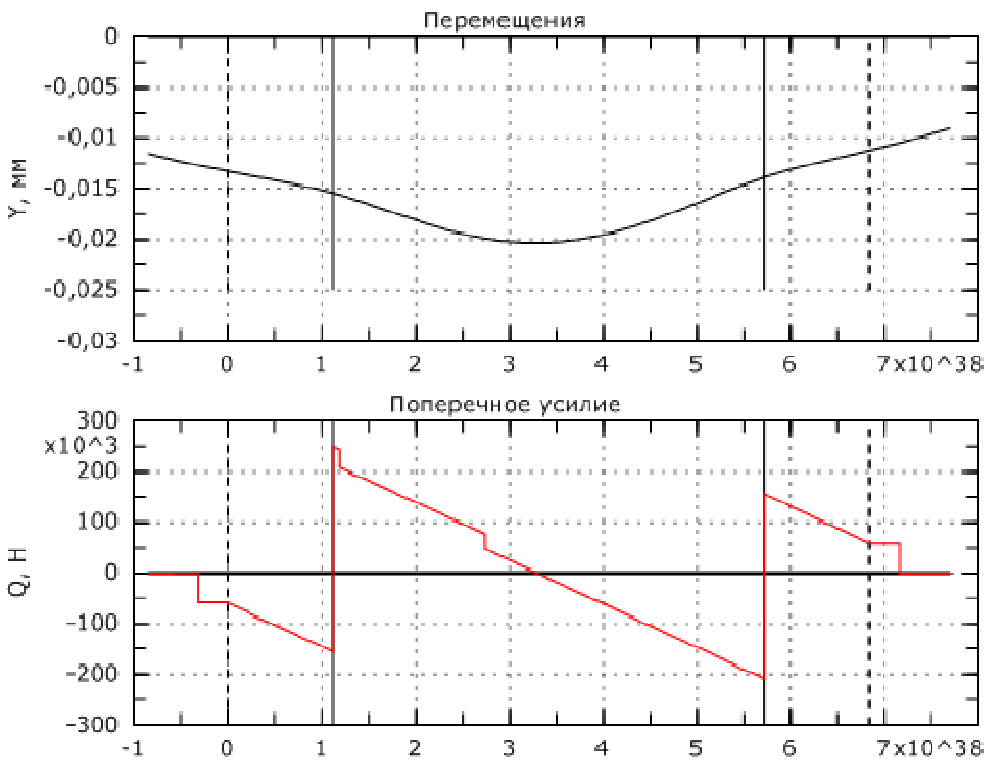
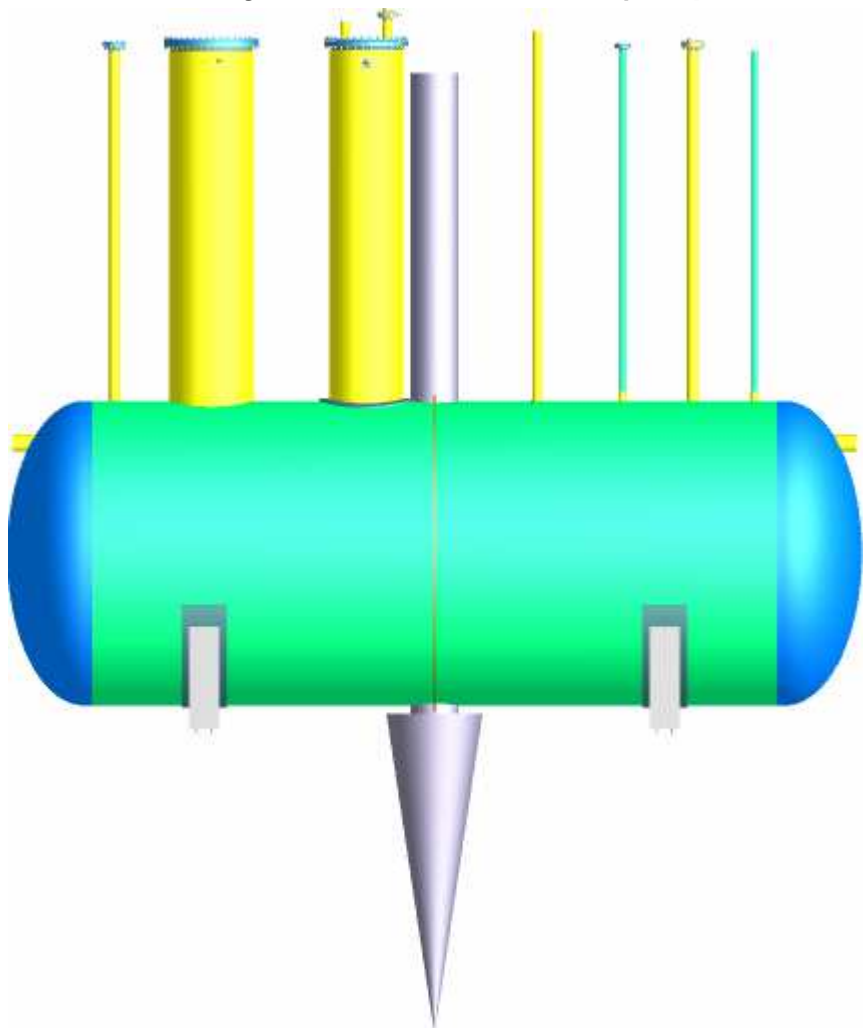
Инов. № подл.	Подпись и дата
19746.4	
Взам. инв. №	Инов. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата
Изм.	Лист

E-10K.00.00.000 PP

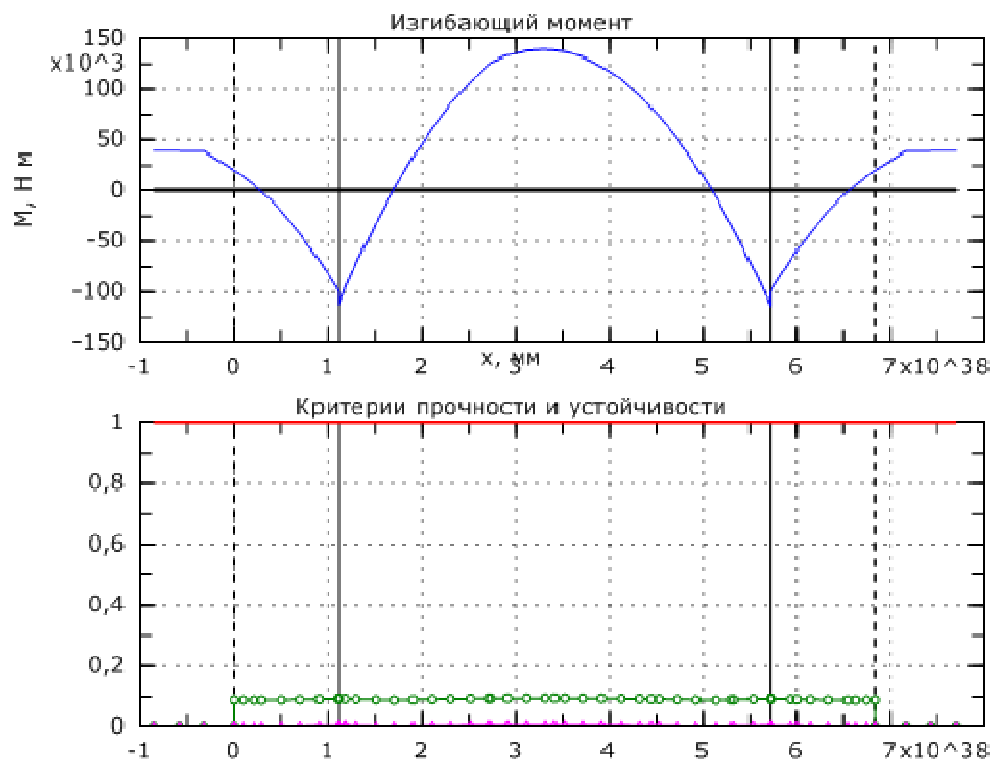
Лист

13

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)



Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-10K.00.00.000 PP				
Лист				
14				



--o--o-- Критерий прочности

--Δ--Δ-- Критерий устойчивости

----- Предельное значение

Условие работоспособности выполнено

Общий вес:

$$\sum G_i = 7,69 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Дополнительные вертикальные нагрузки:

$$\sum F_{yi} = 0 \text{ Н}$$

Опорные нагрузки:

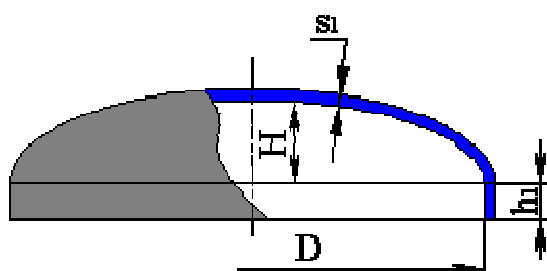
№ опоры	Название опоры	Опорное усилие, F, Н	Поперечное усилие в сечении оболочки над опорой, Q, Н	Изгибающий момент в сечении оболочки над опорой, M, Н м
1	Опора седловая (неподвижная)	$3,642 \cdot 10^5$	$2,085 \cdot 10^5$	$1,139 \cdot 10^5$
2	Опора седловая (подвижная)	$4,05 \cdot 10^5$	$2,498 \cdot 10^5$	$1,123 \cdot 10^5$

Инов. № подл.	Подпись и дата
19746.4	
Инов. № дубл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Подпись и дата
Инов. № подл.	Подпись и дата
19746.4	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

E-10K.00.00.000 PP

Днище эллиптическое (правое)



Исходные данные

Материал: 09Г2С
 Внутр. диаметр, D: 3000 мм
 Толщина стенки днища, s_1 : 22 мм
 Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c_1 : 4 мм
 Прибавка для компенсации минусового допуска, c_2 : 0,8 мм
 Прибавка технологическая, c_3 : 3,3 мм
 Суммарная прибавка к толщине стенки, c : 8,1 мм
 Высота днища, H: 750 мм
 Длина отбортовки, h_1 : 80 мм
 Радиус кривизны в вершине днища:

$$R = \frac{D^2}{4 \cdot H} = 3000^2 / (4 \cdot 750) = 3000 \text{ мм}$$

Коэффициент прочности сварного шва:

$$\varphi = 1$$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 120 °С
 Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,401 МПа

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 120 °С (расчётные условия):

$$[\sigma] = 174,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре T = 120 °С:

$$E = 1,89 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Днища, нагруженные внутренним избыточным давлением.

Радиус кривизны в вершине днища:

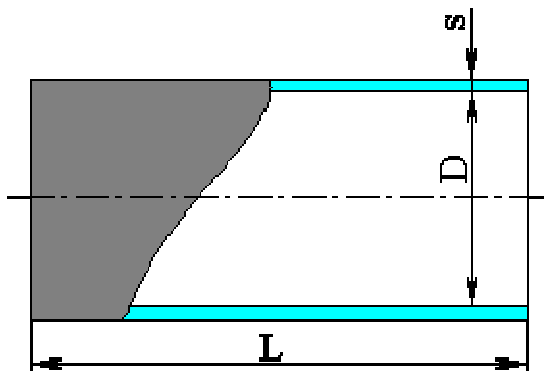
$$R = \frac{D^2}{4 \cdot H} = 3000^2 / (4 \cdot 750) = 3000 \text{ мм}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата
19746.4	
Взам. инв. №	Инов. № дубл.
Подпись и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

E-10K.00.00.000 PP

Обечайка цилиндрическая



Исходные данные

Материал:	09Г2С
Внутр. диаметр, D:	3000 мм
Толщина стенки, s:	22 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c_1 :	4 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, c_2 :	0,8 мм
Прибавка технологическая, c_3 :	0 мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, с:	4,8 мм
Длина обечайки, L:	6840 мм
Коэффициенты прочности сварных швов:	
Продольный шов:	

$$\varphi_p = 1$$

Окружной шов:

$$\varphi_T = 1$$

Сопряжённые элементы жёсткости:

№	Название элемента	Расстояние от начала координат до оси, l_i , мм	Ширина, b_i , мм	Площадь сечения, A_{ki} , м^2	Момент инерции, I_{ki} , м^4	Коэффициент жёсткости обечайки, подкреплённой этим кольцом, k
1	Кольцо жёсткости №1	3420	22	0,001760	$0,9387 \cdot 10^{-6}$	1,806

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T:	120 °C
Расчётное внутреннее избыточное давление, p:	0,401 МПа
Расчётный изгибающий момент, M:	$1,956 \cdot 10^6$ Н м
Расчётное поперечное усилие, Q:	$1,102 \cdot 10^6$ Н
Расчётное осевое растягивающее усилие, F:	3100 Н

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$[\sigma] = 174,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре $T = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$:

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

E-10K.00.00.000 PP

Лист

19

$$E = 1,89 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

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

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

$$s_p + c = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} + c = (0,401 \cdot 3000) / (2 \cdot 174,5 \cdot 1 - 0,401) + 4,8 = 8,251 \text{ мм}$$

$$8,251 \text{ мм} \leq 22 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие работоспособности выполнено**

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$$l = 3750 \text{ мм}$$

Допускаемое внутреннее давление из условия прочности всей обечайки:

$$[p]_1 = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c) + \frac{A_{K1}}{l} \cdot [\sigma]_{K1} \cdot \varphi_{K1} + \frac{A_{K2}}{l} \cdot [\sigma]_{K2} \cdot \varphi_{K2}}{D + (s - c)} = \frac{[2 \cdot 174,5 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) + 0 \cdot 0 \cdot 0 / 3750 + 0,001760 \cdot 174,5 \cdot 1 / 3750] / (3000 + 22 - 4,8)}{2,017 \text{ МПа}}$$

Расстояние между кольцами для расчёта от действия давления:

$$b = 3739 \text{ мм}$$

$$\lambda_{II}^2 = \frac{b^2}{D \cdot (s - c)} = 3739^2 / (3000 \cdot (22 - 4,8)) = 270,9$$

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

$$[p]_2 = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T \cdot (s - c)}{D + (s - c)} \cdot \frac{2 + \lambda_{II}^2}{1 + \frac{\varphi_T \cdot \lambda_{II}^2}{\varphi_p}} = 2 \cdot 174,5 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) / (3000 + 22 - 4,8) \cdot [2 + 270,9] / [1 + (1 \cdot 270,9) / 1] = 1,997 \text{ МПа}$$

Допускаемое внутреннее давление:

$$[p] = \min \{ [p]_1; [p]_2 \} = \min \{ 2,017; 1,997 \} = 1,997 \text{ МПа}$$

$$1,997 \text{ МПа} \geq 0,401 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Минимальное расстояние между “одиночными” штуцерами:

$$b_0 = 2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} = 2 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 454,3 \text{ мм}$$

Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием (п. 5.3.3)

Допускаемое осевое растягивающее усилие:

$$[F] = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = 3,142 \cdot (3000 + 22 - 4,8) \cdot (22 - 4,8) \cdot 174,5 \cdot 1 = 2,845 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

$$2,845 \cdot 10^7 \text{ Н} \geq 3100 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Обечайка, нагруженная изгибающим моментом (п. 5.3.5)

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$[F]_{II} = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3,142 \cdot (3000 + 22 - 4,8) \cdot (22 - 4,8) \cdot 174,5 = 2,845 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны сжатия:

$$[M]_{II} = \frac{D}{4} \cdot [F]_{II} = 3000 / 4 \cdot 2,845 \cdot 10^7 = 2,134 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:

$$[F]_{EI} = \frac{31,0 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2,5} = 310 \cdot 10^{-6} \cdot 1,89 \cdot 10^5 \cdot 3000^2 / (2,4) \cdot (100 \cdot (22 - 4,8) / 3000)^{2,5} = 5,469 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

Подпись и дата		Инов. № дубл.		Взам. инв. №		Подпись и дата		Инов. № подл.	19746.4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP				Лист
									20

$$[M]_{\text{E}} = \frac{D}{3.5} \cdot [F]_{\text{E}} = 3000 / 3.5 * 5,469 \cdot 10^7 = 4,687 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \frac{[M]_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\text{п}}}{[M]_{\text{E}}} \right)^2}} = 2,134 \cdot 10^7 / (1 + (2,134 \cdot 10^7 / 4,687 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 1,942 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

$$1,942 \cdot 10^7 \text{ Н м} \geq 1,956 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Обечайка, нагруженная поперечным усилием (п. 5.3.6)

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности:

$$[Q]_{\text{п}} = 0.25 \cdot \pi \cdot D \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 0.25 * 3,142 * 3000 * (22 - 4,8) * 174,5 = 7,072 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$$l_p = 3750 \text{ мм}$$

Расчётная длина для расчёта от действия поперечной силы:

$$l_Q = 3750 \text{ мм}$$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

$$[Q]_{\text{E}} = \frac{2.4 \cdot E \cdot (s - c)^2}{n_y} \cdot \left[0.18 + 3.3 \cdot \frac{D(s - c)}{l^2} \right] = \frac{2.4 * 1,89 \cdot 10^5 * (22 - 4,8)^2}{3750^2} / 2.4 * (0.18 + 3.3 * 3000 * (22 - 4,8) / 3750^2) = 1,074 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\text{п}}}{[Q]_{\text{E}}} \right)^2}} = 7,072 \cdot 10^6 / (1 + (7,072 \cdot 10^6 / 1,074 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 5,907 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$5,907 \cdot 10^6 \text{ Н} \geq 1,102 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

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

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

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

$$\frac{P}{[P]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0 / 0 + 0 / 0 + 1,956 \cdot 10^6 / 1,942 \cdot 10^7 + (1,102 \cdot 10^6 / 5,907 \cdot 10^6)^2 = 0,1355 \leq 1$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны растяжения:

$$[M]_{\text{тп}} = \frac{D}{4} \cdot [F] = 3000 / 4 * 2,845 \cdot 10^7 = 2,134 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

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

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

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата				
	Инов. № дубл.				
	Взам. инв. №				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	5,907·10 ⁶ Н ≥ 1,102·10 ⁶ Н
					Заключение: Условие прочности и устойчивости выполнено
					Обечайка, работающая под совместным действием нагрузок (п. 5.3.7)
					Обечайка, работающая под совместным действием наружного давления, осевого сжимающего усилия, изгибающего момента и поперечного усилия.
Проверка условия устойчивости: $\left(\frac{P}{[P]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2\right) \leq 1$					
$\frac{P}{[P]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 = 0/0 + 0/0 + 1,956 \cdot 10^6 / 1,942 \cdot 10^7 + (1,102 \cdot 10^6 / 5,907 \cdot 10^6)^2 = 0,1355 \leq 1$					
Заключение: Условие устойчивости выполнено					
Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны растяжения:					
$[M]_{\text{пр}} = \frac{D}{4} \cdot [F] = 3000 / 4 \cdot 2,845 \cdot 10^7 = 2,134 \cdot 10^7 \text{ Н м}$					
Обечайка, работающая под совместным действием внутреннего давления, осевого растягивающего усилия и изгибающего момента.					
Проверка условия прочности: $\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{пр}}} \leq 1,0$					
E-10K.00.00.000 PP					
Лист					
21					

$$\frac{F+p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{нп}}} = (3100 + 0,401 \cdot 3,142 \cdot 3000^2 / 4) / 2,845 \cdot 10^7 + 1,956 \cdot 10^6 / 2,134 \cdot 10^7 = 0,1914 \leq 1$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Для расчёта обечайки от действия седловых опор:

$$B_1 = \min \left\{ 1,0; 9,45 \cdot \frac{D}{1} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (s-c)}} \right\} = \min \{ 1,0, 9,45 \cdot 3000 / 3750 \cdot (3000 / (100 \cdot (22 - 4,8)))^{1/2} \} = 1$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости:

$$[p]_{\text{е}} = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D}{1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s-c)}{D} \right]^{2,5} = 20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,89 \cdot 10^5 \cdot 3000 / (2,4 \cdot 1 \cdot 3750) \cdot (100 \cdot (22 - 4,8) / 3000)^{2,5} = 0,3262 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$[p]_{\text{н}} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s-c)}{D + (s-c)} = 2 \cdot 174,5 \cdot (22 - 4,8) / (3000 + 22 - 4,8) = 1,99 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_{\text{н}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\text{н}}}{[p]_{\text{е}}} \right)^2}} = 1,99 / (1 + (1,99 / 0,3262)^2)^{1/2} = 0,3219 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление: $[p] = 0,3219 \text{ МПа}$

Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием (п. 2.3.4)

Допускаемое осевое сжимающее усилие:

$$[F] = \frac{[F]_{\text{н}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\text{н}}}{[F]_{\text{е1}}} \right)^2}} = 2,845 \cdot 10^7 / (1 + (2,845 \cdot 10^7 / 5,469 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 2,524 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости:

$$[M]_{\text{уст}} = \frac{[M]_{\text{н}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\text{н}}}{[M]_{\text{е}}} \right)^2}} = 2,134 \cdot 10^7 / (1 + (2,134 \cdot 10^7 / 4,687 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 1,942 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \min \{ M_{\text{нп}}, M_{\text{уст}} \} = \min \{ 2,134 \cdot 10^7, 1,942 \cdot 10^7 \} = 1,942 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

Расчётная длина для расчёта седловых опор:

$l_s = 4600 \text{ мм}$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

$$[Q]_{\text{е}} = \frac{2,4 \cdot E \cdot (s-c)^2}{n_y} \cdot \left[0,18 + 3,3 \frac{D(s-c)}{l_s^2} \right] = \frac{2,4 \cdot 1,89 \cdot 10^5 \cdot (22 - 4,8)^2}{4600^2} \cdot \left[0,18 + 3,3 \cdot 3000 \cdot (22 - 4,8) / 4600^2 \right] = 1,051 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_{\text{н}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\text{н}}}{[Q]_{\text{е}}} \right)^2}} = 7,072 \cdot 10^6 / (1 + (7,072 \cdot 10^6 / 1,051 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 5,868 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата				
	Инов. № дубл.				
	Взам. инв. №				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 180 °C
Расчётное наружное избыточное давление, p: 0,21 МПа
Расчётный изгибающий момент, M: $1,862 \cdot 10^6$ Н м
Расчётное поперечное усилие, Q: $9,651 \cdot 10^5$ Н
Расчётное осевое растягивающее усилие, F: 3100 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)):

$[\sigma] = 167$ МПа

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

$E = 1,83 \cdot 10^5$ МПа

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

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$l_p = 3750$ мм

$$B = \max \left\{ 1; 0,47 \cdot \left(\frac{p}{10^{-5} \cdot E} \right)^{0,067} \cdot \left(\frac{1}{D} \right)^{0,4} \right\} = \max \{ 1; 0,47 \cdot (0,21 / (10^{-5} \cdot 1,83 \cdot 10^5))^{0,067} \cdot (3750 / 3000)^{0,4} \} = 1$$

Расчётная толщина стенки с учетом прибавок:

$$s_p + c = \max \left\{ 1,06 \cdot \frac{10^{-2} \cdot D}{B} \cdot \left(\frac{p}{10^{-5} \cdot E} \cdot \frac{1}{D} \right)^{0,4} \cdot \frac{1,2 \cdot p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] - p} \right\} = \max \{ 1,06 \cdot 10^{-2} \cdot 3000 / 1 \cdot (0,21 / (10^{-5} \cdot 1,83 \cdot 10^5)) \cdot 3750 / 3000^{0,4}; 1,2 \cdot 0,21 \cdot 3000 / (2 \cdot 167 - 0,21) \} + 4,8 = 19,43 \text{ мм}$$

$19,43 \text{ мм} \leq 22 \text{ мм}$

Заключение: **Условие работоспособности выполнено**

Расчётная длина для расчёта устойчивости всей обечайки:

$L = 7500$ мм

$$B_2 = \min \left\{ 1,0; 9,45 \cdot \frac{D}{L} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot k \cdot (s - c)}} \right\} = \min \{ 1,0; 9,45 \cdot 3000 / 7500 \cdot (3000 / (100 \cdot 1,806 \cdot (22 - 4,8)))^{1/2} \} = 1$$

Допускаемое давление из условия устойчивости:

$$[p]_{\text{уст}} = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} \cdot E \cdot D}{k \cdot n_y \cdot B_2 \cdot L} \cdot \left[\frac{100 \cdot k \cdot (s - c)}{D} \right]^{2,5} = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 3000}{1,806 \cdot 2,4 \cdot 1 \cdot 7500} \cdot (100 \cdot 1,806 / ((22 - 4,8) / 3000)^{2,5}) = 0,3832 \text{ МПа}$$

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$l = 3750$ мм

Допускаемое давление из условия прочности:

$$[p]_{\text{пр}} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s - c) + \frac{A_{k1}}{1} \cdot [\sigma]_{k1} + \frac{A_{k2}}{1} \cdot [\sigma]_{k2}}{D + (s - c)} = \frac{2 \cdot 167 \cdot (22 - 4,8) + 0 \cdot 0 / 3750 + 0,001760 \cdot 167 / 3750}{3000 + 22 - 4,8} = 1,93 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости всей обечайки:

$$[p]_1 = \frac{[p]_{\text{пр}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\text{уст}}}{[p]_{\text{пр}}} \right)^2}} = 1,93 / (1 + (1,93 / 0,3832)^2)^{1/2} = 0,3759 \text{ МПа}$$

Расстояние между кольцами для расчёта от действия давления:

$l = 3739$ мм

Подпись и дата

Инов. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инов. № подл.

19746.4

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

E-10K.00.00.000 PP

Лист

23

$$B_1 = \min \left\{ 1.0; 9.45 \cdot \frac{D}{1} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (s - c)}} \right\} = \min \{ 1.0; 9.45 \cdot 3000 / 3739 \cdot (3000 / (100 \cdot (22 - 4.8)))^{1/2} \} = 1$$

Допускаемое давление из условия устойчивости:

$$[\text{P}]_{2\text{E}} = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} \cdot \text{E} \cdot \text{D}}{n_{\text{r}} \cdot \text{B}_1} \cdot \frac{1}{1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (\text{s} - \text{c})}{\text{D}} \right]^{2,5} = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 3000 / (2,4 \cdot 1 \cdot 3739) \cdot (100 \cdot (22 - 4,8) / 3000)}{1^{2,5}} = 0,3167 \text{ МПа}$$

$$\lambda_{\Pi}^2 = \frac{b^2}{D \cdot (s - c)} = 3739^2 / (3000 \cdot (22 - 4,8)) = 270,9$$

Допускаемое давление из условия прочности:

$$[\sigma]_{2\pi} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s - c)}{D + (s - c)} \cdot \frac{2 + \lambda \frac{2}{\Pi}}{1 + \frac{\varphi_T \cdot \lambda \frac{2}{\Pi}}{\varphi_D}} = 2 \cdot 167 \cdot (22 - 4,8) / (3000 + 22 - 4,8) \cdot [2 + 270,9] / [1 + (1,0 \cdot 270,9) / 1] = 1,911 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости обечайки между кольцами жёсткости:

$$[p]_2 = \frac{[p]_{2\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{2\Pi}}{[p]_{2E}}\right)^2}} = 1,911 / (1 + (1,911/0,3167)^2)^{1/2} = 0,3125 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление:

$$[p] = \min \{ [p]_1; [p]_2 \} = \min \{ 0,3759; 0,3125 \} = 0,3125 \text{ МПа}$$

$$0,3125 \text{ МПа} \geq 0,21 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Минимальное расстояние между “одинокими” штуцерами:

$$b_0 = 2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} = 2 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 454,3 \text{ mm}$$

Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием (п. 5.3.3)

Допускаемое осевое растягивающее усилие:

$$[F] = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = 3,142 \cdot (3000 + 22 - 4,8) \cdot (22 - 4,8) \cdot 167 \cdot 1 = 2,723 \cdot 10^7 \text{ H}$$

$$2,723 \cdot 10^7 \text{ H} \geq 3100 \text{ H}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Обечайка, нагруженная изгибающим моментом (п. 5.3.5)

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$[F]_{\pi} = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [C] = 3,142 \cdot (3000 + 22 - 4,8) \cdot (22 - 4,8) \cdot 167 = 2,723 \cdot 10^7 \text{ H}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны сжатия:

$$[M]_{\text{н}} = \frac{D}{A} \cdot [F]_{\text{н}} = 3000/4 \cdot 2,723 \cdot 10^7 = 2,042 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:

$$[F]_{E1} = \frac{31.0 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_v} \cdot D^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2.5} = 310 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 3000^2 / (2,4) \cdot (100 \cdot (22 - 4,8) / 3000)^{2.5} = 5,295 \cdot 10^7 \text{ H}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_{\text{E}} = \frac{D}{3.5} \cdot [F]_{\text{E}} = 3000 / 3.5 \cdot 5,295 \cdot 10^7 = 4,539 \cdot 10^7 \text{ H M}$$

Допускаемый изгибающий момент:

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<h3 style="margin: 0;">Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием (п. 5.3.3)</h3> <p style="margin: 0;">Допускаемое осевое растягивающее усилие:</p> $[F] = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = 3,142 \cdot (3000 + 22 - 4,8) \cdot (22 - 4,8) \cdot 167 \cdot 1 = 2,723 \cdot 10^7 \text{ Н}$ <p style="margin: 0;">$2,723 \cdot 10^7 \text{ Н} \geq 3100 \text{ Н}$</p> <p style="margin: 0;">Заключение: Условие прочности и устойчивости выполнено</p>				
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<h3 style="margin: 0;">Обечайка, нагруженная изгибающим моментом (п. 5.3.5)</h3> <p style="margin: 0;">Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:</p> $[F]_{\Pi} = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3,142 \cdot (3000 + 22 - 4,8) \cdot (22 - 4,8) \cdot 167 = 2,723 \cdot 10^7 \text{ Н}$ <p style="margin: 0;">Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны сжатия:</p> $[M]_{\Pi} = \frac{D}{4} \cdot [F]_{\Pi} = 3000 / 4 \cdot 2,723 \cdot 10^7 = 2,042 \cdot 10^7 \text{ Н м}$ <p style="margin: 0;">Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:</p> $[F]_{\text{Е1}} = \frac{31,0 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_{\gamma}} \cdot D^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2,5} = 310 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 3000^2 / (2,4) \cdot (100 \cdot (22 - 4,8) / 3000)^{2,5} = 5,295 \cdot 10^7 \text{ Н}$ <p style="margin: 0;">Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:</p> $[M]_{\text{Е}} = \frac{D}{3,5} \cdot [F]_{\text{Е1}} = 3000 / 3,5 \cdot 5,295 \cdot 10^7 = 4,539 \cdot 10^7 \text{ Н м}$ <p style="margin: 0;">Допускаемый изгибающий момент:</p>				
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Изм.</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Лист</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">№ докум.</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Подп.</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Дата</div> </div> <div style="flex-grow: 1; text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px auto; width: 80%;">E-10K.00.00.000 PP</div> </div> <div style="text-align: right;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Лист</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: 40px;">24</div> </div> </div>				

$$[M] = \frac{[M]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\Pi}}{[M]_{\text{E}}}\right)^2}} = 2,042 \cdot 10^7 / (1 + (2,042 \cdot 10^7 / 4,539 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 1,862 \cdot 10^7 \text{ H M}$$

$$1,862 \cdot 10^7 \text{ H}_M \geq 1,862 \cdot 10^6 \text{ H}_M$$

Заключение: Условие прочности и устойчивости выполнено

Обечайка, нагруженная поперечным усилием (п. 5.3.6)

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности:

$$[Q]_{\pi} = 0,25 \cdot \pi \cdot D \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 0,25 \cdot 3,142 \cdot 3000 \cdot (22 - 4,8) \cdot 167 = 6,768 \cdot 10^6 \text{ H}$$

Расчётная длина для расчёта от действия поперечной силы:

$$l_o = 3750 \text{ mm}$$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

$$[Q]_E = \frac{2.4 \cdot E \cdot (s-c)^2}{n_{\Psi}} \cdot \left[0.18 + 3.3 \cdot \frac{D(s-c)}{l^2} \right] = \frac{2.4 \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot (22-4,8)^2 / 2,4 \cdot (0.18 + 3.3 \cdot 3000 \cdot (22-4,8) / 3750^2)}{H} = 1,04 \cdot 10^7$$

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_{II}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{II}}{[Q]_{IE}} \right)^2}} = 6,768 \cdot 10^6 / (1 + (6,768 \cdot 10^6 / 1,04 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 5,673 \cdot 10^6 \text{ H}$$

$$5,673 \cdot 10^6 \text{ H} \geq 9,651 \cdot 10^5 \text{ H}$$

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0,21 / 0,3125 + 0 / 0 + 1,862 \cdot 10^6 / 1,862 \cdot 10^7 + (9,651 \cdot 10^5 / 5,673 \cdot 10^6)^2 = 0,801 \leq 1$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны растяжения:

$$[M]_{\text{mp}} = \frac{D}{4} \cdot [F] = 3000 / 4 * 2,723 \cdot 10^7 = 2,042 \cdot 10^7 \text{ H M}$$

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

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

$$\frac{F+p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{no}}} = (3100 + 0 \cdot 3,142 \cdot 3000^2 / 4) / 2,723 \cdot 10^7 + 1,862 \cdot 10^6 / 2,042 \cdot 10^7 = 0,09128 \leq 1$$

Заключение: Условие прочности выполнено

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p>По момента и поперечного усилия:</p> $\text{Проверка условия устойчивости: } \left(\frac{P}{[P]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 \leq 1 \right)$ $\frac{P}{[P]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0,21 / 0,3125 + 0 / 0 + 1,862 \cdot 10^6 / 1,862 \cdot 10^7 + (9,651 \cdot 10^5 / 5,673 \cdot 10^6)^2 = 0,801 \leq 1$ <p>Заключение: Условие устойчивости выполнено</p> <p>Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны растяжения:</p> $[M]_{\text{пр}} = \frac{D}{4} \cdot [F] = 3000 / 4 \cdot 2,723 \cdot 10^7 = 2,042 \cdot 10^7 \text{ Н м}$ <p>Обечайка, работающая под совместным действием внутреннего давления, осевого растягивающего усилия и изгибающего момента.</p> $\text{Проверка условия прочности: } \frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{пр}}} \leq 1,0$ $\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{пр}}} = (3100 + 0 \cdot 3,142 \cdot 3000^2 / 4) / 2,723 \cdot 10^7 + 1,862 \cdot 10^6 / 2,042 \cdot 10^7 = 0,09128 \leq 1$ <p>Заключение: Условие прочности выполнено</p>
					<p>Инв. № подл. 19746.4</p>

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP	Лист
						25

Для расчёта обечайки от действия седловых опор:

$$B_1 = \min \left\{ 1.0; 9.45 \cdot \frac{D}{1} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (s-c)}} \right\} = \min \{ 1.0, 9.45 \cdot 3000 / 3750 \cdot (3000 / (100 \cdot (22 - 4.8)))^{1/2} \} = 1$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости:

$$[p]_u = \frac{2.08 \cdot 10^{-5} E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D}{1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s-c)}{D} \right]^{2.5} = 20.8 \cdot 10^{-6} \cdot 1.83 \cdot 10^5 \cdot 3000 / (2.4 \cdot 1 \cdot 3750) \cdot (100 \cdot (22 - 4.8) / 3000)^{2.5} = 0.3158 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$[p]_n = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s-c)}{D + (s-c)} = 2 \cdot 167 \cdot (22 - 4.8) / (3000 + 22 - 4.8) = 1.904 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_n}{[p]_u} \right)^2}} = 1.904 / (1 + (1.904 / 0.3158)^2)^{1/2} = 0.3115 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление: $[p] = 0.3115 \text{ МПа}$

Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием (п. 2.3.4)

Допускаемое осевое сжимающее усилие:

$$[F] = \frac{[F]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_n}{[F]_{E1}} \right)^2}} = 2.723 \cdot 10^7 / (1 + (2.723 \cdot 10^7 / 5.295 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 2.421 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости:

$$[M]_{уст} = \frac{[M]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_n}{[M]_{E1}} \right)^2}} = 2.042 \cdot 10^7 / (1 + (2.042 \cdot 10^7 / 4.539 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 1.862 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \min \{ M_{кр}, M_{уст} \} = \min \{ 2.042 \cdot 10^7, 1.862 \cdot 10^7 \} = 1.862 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

Расчётная длина для расчёта седловых опор:

$l_s = 4600 \text{ мм}$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

$$[Q]_E = \frac{2.4 \cdot E \cdot (s-c)^2}{n_y} \cdot \left[0.18 + 3.3 \frac{D(s-c)}{l_s^2} \right] = \frac{2.4 \cdot 1.83 \cdot 10^5 \cdot (22 - 4.8)^2}{4600^2} \cdot \left[0.18 + 3.3 \cdot 3000 \cdot (22 - 4.8) / 4600^2 \right] = 1.018 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_n}{[Q]_E} \right)^2}} = 6.768 \cdot 10^6 / (1 + (6.768 \cdot 10^6 / 1.018 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 5.636 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, Т:	20 °С
Расчётное внутреннее избыточное давление (с учётом гидростатического), р:	0,558 МПа
Расчётный изгибающий момент, М:	$1,396 \cdot 10^5 \text{ Н м}$
Расчётное поперечное усилие, Q:	$2,468 \cdot 10^5 \text{ Н}$
Расчётное осевое растягивающее усилие, F:	0 Н

Изн. № подл.	19746.4
Взам. инв. №	
Изн. № дубл.	
Подпись и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP	Лист
						26

$$[M] = \frac{[M]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\Pi}}{[M]_{\Sigma}}\right)^2}} = 3,335 \cdot 10^7 / (1 + (3,335 \cdot 10^7 / 6,58 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 2,975 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

$$2,975 \cdot 10^7 \text{ Н м} \geq 1,396 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Обечайка, нагруженная поперечным усилием (п. 5.3.6)

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности:

$$[Q]_{\Pi} = 0,25 \cdot \pi \cdot D \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 0,25 \cdot 3,142 \cdot 3000 \cdot (22 - 4,8) \cdot 272,7 = 1,105 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$$l_p = 3750 \text{ мм}$$

Расчётная длина для расчёта от действия поперечной силы:

$$l_Q = 3750 \text{ мм}$$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

$$[Q]_{\Sigma} = \frac{2,4 \cdot E \cdot (s - c)^2}{n_y} \cdot \left[0,18 + 3,3 \cdot \frac{D(s - c)}{l^2} \right] = \frac{2,4 \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot (22 - 4,8)^2}{1,8 \cdot (0,18 + 3,3 \cdot 3000 \cdot (22 - 4,8) / 3750^2)} = 1,508 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\Pi}}{[Q]_{\Sigma}}\right)^2}} = 1,105 \cdot 10^7 / (1 + (1,105 \cdot 10^7 / 1,508 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 8,915 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$8,915 \cdot 10^6 \text{ Н} \geq 2,468 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

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

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

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0/0 + 0/0 + 1,396 \cdot 10^5 / 2,975 \cdot 10^7 + (2,468 \cdot 10^5 / 8,915 \cdot 10^6)^2 = 0,005458 \leq 1$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием (п. 5.3.3)

Допускаемое осевое растягивающее усилие:

$$[F] = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = 3,142 \cdot (3000 + 22 - 4,8) \cdot (22 - 4,8) \cdot 272,7 \cdot 1 = 4,446 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны растяжения:

$$[M]_{\Sigma p} = \frac{D}{4} \cdot [F] = 3000 / 4 \cdot 4,446 \cdot 10^7 = 3,335 \cdot 10^7 \text{ Н м}$$

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

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

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Обечайка, работающая под совместным действием наружного давления, осевого сжимающего усилия, изгибающе-го момента и поперечного усилия.
					Проверка условия устойчивости: $\left(\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 \leq 1\right)$
					$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 = 0/0 + 0/0 + 1,396 \cdot 10^5 / 2,975 \cdot 10^7 + (2,468 \cdot 10^5 / 8,915 \cdot 10^6)^2 = 0,005458 \leq 1$
					Заключение: Условие устойчивости выполнено
					Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием (п. 5.3.3)
					Допускаемое осевое растягивающее усилие:
					$[F] = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = 3,142 \cdot (3000 + 22 - 4,8) \cdot (22 - 4,8) \cdot 272,7 \cdot 1 = 4,446 \cdot 10^7 \text{ Н}$
					Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны растяжения:
					$[M]_{\text{пр}} = \frac{D}{4} \cdot [F] = 3000 / 4 \cdot 4,446 \cdot 10^7 = 3,335 \cdot 10^7 \text{ Н м}$
					Обечайка, работающая под совместным действием внутреннего давления, осевого растягивающего усилия и изги-бающего момента.
					Проверка условия прочности: $\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{пр}}} \leq 1,0$

$$\frac{F+p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{lim}}} = (0 + 0,558 \cdot 3,142 \cdot 3000^2 / 4) / 4,446 \cdot 10^7 + 1,396 \cdot 10^5 / 3,335 \cdot 10^7 = 0,09290 \leq 1$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Для расчёта обечайки от действия седловых опор:

$$B_1 = \min \left\{ 1.0; 9.45 \cdot \frac{D}{1} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (s - c)}} \right\} = \min \{ 1.0, 9.45 \cdot 3000 / 3750 \cdot (3000 / (100 \cdot (22 - 4.8)))^{1/2} \} = 1$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости:

$$[p]_e = \frac{2.08 \cdot 10^{-5} E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D}{1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2.5} = 20.8 \cdot 10^{-6} * 1,99 \cdot 10^5 * 3000 / (1,8 * 1 * 3750) * (100 * (22 - 4,8) / 3000)^{2.5} = 0,4579 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$[p]_{\text{н}} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s - e)}{D + (s - e)} = 2 \cdot 272,7 \cdot (22 - 4,8) / (3000 + 22 - 4,8) = 3,109 \text{ МПа}$$

$$[\sigma] = \frac{[\sigma]_{\text{II}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[\sigma]_{\text{II}}}{[\sigma]_{\text{E}}}\right)^2}} = 3,109 / (1 + (3,109 / 0,4579)^2)^{1/2} = 0,453 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление: $[p] = 0,453 \text{ МПа}$

Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием (п. 2.3.4)

Допускаемое осевое сжимающее усилие:

$$\frac{[F]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\pi}}{[F]_{E1}}\right)^2}} = 4,446 \cdot 10^7 / (1 + (4,446 \cdot 10^7 / 7,677 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 3,848 \cdot 10^7 \text{ H}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости:

$$[M]_{\text{ver}} = \frac{[M]_{\text{II}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\text{II}}}{[M]_{\text{I}}}\right)^2}} = 3,335 \cdot 10^7 / (1 + (3,335 \cdot 10^7 / 6,58 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 2,975 \cdot 10^7 \text{ H M}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \min \{M_{\text{imp}}, M_{\text{ygr}}\} = \min \{3,335 \cdot 10^7, 2,975 \cdot 10^7\} = 2,975 \cdot 10^7 \text{ H}_M$$

Расчётная длина для расчёта седловых опор:

 $l_s = 4600 \text{ mm}$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

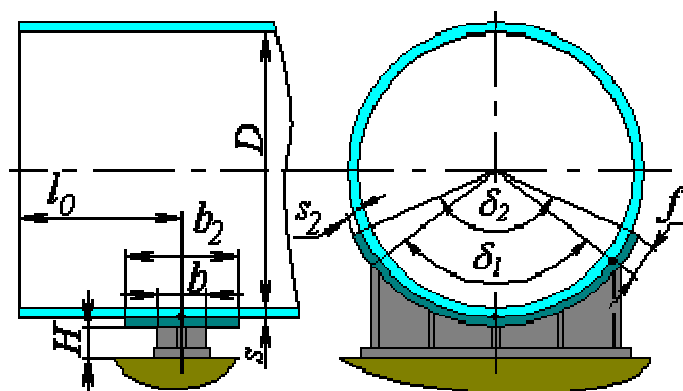
$$[Q]_E = \frac{2.4 \cdot E \cdot (s-c)^2}{n_y} \cdot \left[0.18 + 3.3 \frac{D(s-c)}{1_c^2} \right] = \frac{2.4 \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot (22-4,8)^2 / 1,8 \cdot (0.18 + 3.3 \cdot 3000 \cdot (22-4,8) / 4600^2)}{H} = 1,476 \cdot 10^7$$

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_n}{[Q]_E}\right)^2}} = 1,105 \cdot 10^7 / (1 + (1,105 \cdot 10^7 / 1,476 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 8,847 \cdot 10^6 \text{ H}$$

Инв. № подл.	19746.4	Подпись и дата		Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$[F] = \frac{[F]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\Pi}}{[F]_{\text{Е}}}\right)^2}} = 4,446 \cdot 10^7 / (1 + (4,446 \cdot 10^7 / 7,677 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 3,848 \cdot 10^7 \text{ Н}$ <p>Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости:</p> $[M]_{\text{уст}} = \frac{[M]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\Pi}}{[M]_{\text{Е}}}\right)^2}} = 3,335 \cdot 10^7 / (1 + (3,335 \cdot 10^7 / 6,58 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 2,975 \cdot 10^7 \text{ Н м}$ <p>Допускаемый изгибающий момент:</p> $[M] = \min \{M_{\text{кр}}, M_{\text{уст}}\} = \min \{3,335 \cdot 10^7, 2,975 \cdot 10^7\} = 2,975 \cdot 10^7 \text{ Н м}$ <p>Расчётная длина для расчёта седловых опор: $l_s = 4600 \text{ мм}$</p> <p>Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:</p> $[Q]_{\text{Е}} = \frac{2,4 \cdot E \cdot (s - c)^2}{n_y} \cdot \left[0,18 + 3,3 \frac{D(s - c)}{l_s^2} \right] = \frac{2,4 \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot (22 - 4,8)^2}{1,8} \cdot (0,18 + 3,3 \cdot 3000 \cdot (22 - 4,8) / 4600^2) = 1,476 \cdot 10^7 \text{ Н}$ <p>Допускаемое поперечное усилие:</p> $[Q] = \frac{[Q]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\Pi}}{[Q]_{\text{Е}}}\right)^2}} = 1,105 \cdot 10^7 / (1 + (1,105 \cdot 10^7 / 1,476 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 8,847 \cdot 10^6 \text{ Н}$
							<div> <div> <div>Изм.</div> <div>Лист</div> <div>№ докум.</div> <div>Подп.</div> <div>Дата</div> </div> <div> <div>E-10K.00.00.000 PP</div> <div>Лист</div> <div>29</div> </div> </div>

Опора седловая (подвижная)



Исходные данные

Элемент, связанный с опорой:	Обечайка цилиндрическая
Внутренний диаметр обечайки, D:	3000 мм
Толщина стенки обечайки, s:	22 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c ₁ :	4 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, c ₂ :	0,8 мм
Прибавка технологическая, c ₃ :	0 мм
Сумма прибавок к стенке обечайки, c:	4,8 мм
Ширина опоры, b:	300 мм
Угол охвата опоры, δ_1 :	120 °
Расстояние от края элемента, l ₀ :	1120 мм
Расстояние до днища, a:	$1,2 \cdot 10^3$ мм
Высота опоры, H:	205 мм
Толщина листа, s ₂ :	22 мм
Ширина листа, b ₂ :	450 мм
Угол охвата листа, δ_2 :	140 °
Длина выступающей части листа, f:	269,5 мм

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения (см. Эпюры сил и моментов):

Расчётная температура, T:	120 °C
Коэффициент заполнения жидкостью, ξ :	1
Плотность жидкости, $\rho_{ж}$:	750 кг/м ³
Расчётное внутреннее избыточное давление, действующее в элементе над опорой, p:	0,401 МПа
Изгибающий момент в сечении оболочки над опорой, M: $3,038 \cdot 10^5$ Н м	

Изн. № подл.	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19746.4			

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

E-10K.00.00.000 PP

Опорное усилие, F: 1,23·10⁶ Н
 Поперечное усилие в сечении оболочки над опорой, Q: 1,105·10⁶ Н

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

Допускаемое наружное давление, [p]: 0,3219 МПа
 Допускаемый изгибающий момент, [M]_{уст}: 1,942·10⁷ Н м
 Допускаемая осевое сжимающее усилие, [F]: 2,524·10⁷ Н
 Допускаемая поперечное усилие, [Q]: 5,868·10⁶ Н

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

Опора с подкладным листом

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

$$K_{19} = \frac{5}{6 \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{s-c}} \cdot \delta_1} = 5 / [6 \cdot (3000 / (22 - 4,8))^{1/3} \cdot 2,094] = 0,07121$$

$$K_{19} \cdot D + 1.5 \cdot b = 0,07121 \cdot 3000 + 1.5 \cdot 300 = 663,6 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, проводятся два расчёта

Расчёт №1:

Подкладной лист рассматривают как седловую опору шириной b_2 с углом охвата δ_2 . Во всех формулах принимают $b = b_2 = 450$ 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:

$$\gamma = 2.83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s-c}{D}} = 2.83 \cdot 1,2 \cdot 10^3 / 3000 \cdot ((22 - 4,8) / 3000)^{1/2} = 0,08571$$

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

$$K_{15} = \min \left\{ 1.0; \frac{0.8 \cdot \sqrt{\gamma + 6 \cdot \gamma}}{\delta_1} \right\} = \min \{ 1.0; (0.8 \cdot 0,08571^{1/2} + 6 \cdot 0,08571) / 2,443 \} = 0,3063$$

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

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

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta_1 = 0.91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s-c)}} = 0.91 \cdot 450 / (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 1,803$$

Изн. № подл.	Изн. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата					
19746.4								
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				
					E-10K.00.00.000 PP			
					Лист 31			

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

$$K_{10} = \max \left\{ \frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0,25 \right\} = \max \{ e^{-1,803} \cdot \sin(1,803) / 1,803; 0,25 \} = 0,25$$

$$\Phi_1 = - \frac{0,23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0,23 \cdot 0,07095 \cdot 0,3063 / (0,8514 \cdot 0,25) = (-0,02348)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{\text{мк}} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = 4 \cdot 3,038 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot 3000^2 \cdot (22 - 4,8)) = 2,499 \text{ МПа}$$

$$\Phi_{21} = - \frac{\bar{\sigma}_{\text{мк}}}{K_2 \cdot [\sigma]} = -2,499 / (1,25 \cdot 174,5) = (-0,01146)$$

$$\Phi_{22} = \left(\frac{p \cdot D}{4 \cdot (s - c)} - \frac{\bar{\sigma}_{\text{мк}}}{K_2 \cdot [\sigma]} \right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = [0,401 \cdot 3000 / (4 \cdot (22 - 4,8)) - 2,499] / (1,2 \cdot 174,5) = 0,07158$$

Примечание: при $\Phi_{21} < 0$ в расчёте K_1 знаки Φ_1 и Φ_2 меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \Phi_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \Phi_1 \cdot \Phi_2 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \Phi_1 \cdot \Phi_2 \right)^2 + (1 - \Phi_2^2) \cdot \Phi_1}} = 1,497 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \Phi_2 = \Phi_{21} \\ \text{при } \Phi_2 = \Phi_{2,2} \end{array} \right|$$

$$= 1,498$$

$$K_1 = \min \{ 1,497, 1,498 \} = 1,497$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1,497 \cdot 1,25 \cdot 174,5 = 326,5 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0,7 \cdot [\sigma]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c) \cdot (s - c)}}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0,7 \cdot 326,5 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} \cdot (22 - 4,8) / (0,25 \cdot 0,8514) = 4,195 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-1,803} \cdot \cos(1,803)) / 1,803 = 0,5757$$

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

$$K_{16} = 1 - \frac{0,65}{1 + (\delta \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0,65 / (1 + (6 \cdot 0,08571)^2) \cdot [3,142 / (3 \cdot 2,443)]^{1/2} = 0,6635$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0,6 \cdot 3 \cdot \sqrt{\frac{D}{s - c}} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1} = 1 / [1 + 0,6 \cdot (3000 / (22 - 4,8))^{1/3} \cdot 450 / 3000 \cdot 2,443] = 0,4487$$

$$\Phi_1 = - \frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 \cdot 0,5757 / [0,4249 \cdot 0,6635 \cdot 0,4487 \cdot \sin(0,5 \cdot 2,443)] = (-2,567)$$

$$\Phi_{21} = 0$$

$$\Phi_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s - c)} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = 0,401 \cdot 3000 / (2 \cdot (22 - 4,8)) \cdot 1 / (1,25 \cdot 174,5) = 0,1603$$

Примечание: при $\Phi_{21} < 0$ в расчёте K_1 знаки Φ_1 и Φ_2 меняют на противоположные

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:
					$[F]_2 = \frac{0.7 \cdot [\sigma_1]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c) \cdot (s - c)}}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0.7 \cdot 326,5 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} \cdot (22 - 4,8) / (0,25 \cdot 0,8514) = 4,195 \cdot 10^6 \text{ Н}$
					$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-1,803 \cdot \cos(1,803)}) / 1,803 = 0,5757$
					$K_{14} = \frac{1,45 - 0,43 \cdot \delta_1}{\sin(0,5 \cdot \delta_1)} = (1,45 - 0,43 \cdot 2,443) / \sin(0,5 \cdot 2,443) = 0,4249$
					$K_{16} = 1 - \frac{0,65}{1 + (6 \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0,65 / (1 + (6 \cdot 0,08571)^2) \cdot [3,142 / (3 \cdot 2,443)]^{1/2} = 0,6635$
					$K_{17} = \frac{1}{1 + 0,6 \cdot 3 \cdot \sqrt{\frac{D}{s - c}} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1} = 1 / [1 + 0,6 \cdot (3000 / (22 - 4,8))^{1/3} \cdot 450 / 3000 \cdot 2,443] = 0,4487$
					$\vartheta_1 = - \frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 \cdot 0,5757 / [0,4249 \cdot 0,6635 \cdot 0,4487 \cdot \sin(0,5 \cdot 2,443)] = (-2,567)$
					$\vartheta_{21} = 0$
					$\vartheta_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s - c)} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = 0,401 \cdot 3000 / (2 \cdot (22 - 4,8)) \cdot 1 / (1,25 \cdot 174,5) = 0,1603$
					Примечание: при $\vartheta_{21} < 0$ в расчёте K_1 знаки ϑ_1 и ϑ_2 меняют на противоположные
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-10К.00.00.000 РР
					Лист
					32

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 0,3423 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{2,2} \end{array} \right|$$

$$= 0,3966$$

$$K_1 = \min\{0,3423, 0,3966\} = 0,3423$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_3 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,3423 \cdot 1,25 \cdot 174,5 = 74,65 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0,9 \cdot [\sigma]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} \cdot (s - c)}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0,9 \cdot 74,65 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} \cdot (22 - 4,8) / (0,4249 \cdot 0,6635 \cdot 0,4487) = 2,075 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$s_{ef} = (s - c) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{s_2}{s - c}\right)^2} = (22 - 4,8) \cdot (1 + (22 / (22 - 4,8))^2)^{1/2} = 27,93 \text{ мм}$$

Расчёт №2:

Подкладной лист рассматривают как усиление стенки сосуда. Во всех формулах принимают $b = 300 \text{ мм}$, $\delta_1 = 120^\circ$ (2,094 рад), $s = s_{ef} + c = 27,93 + 4,8 = 32,73 \text{ мм}$.

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

Параметр, определяемый расстоянием до днища:

$$\gamma = 2,83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s - c}{D}} = 2,83 \cdot 1,2 \cdot 10^3 / 3000 \cdot ((32,73 - 4,8) / 3000)^{1/2} = 0,1092$$

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

$$K_{15} = \min\left\{1,0; \frac{0,8 \cdot \sqrt{\gamma} + 6 \cdot \gamma}{\delta_1}\right\} = \min\{1,0; (0,8 \cdot 0,1092^{1/2} + 6 \cdot 0,1092) / 2,094\} = 0,4391$$

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

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

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta_1 = 0,91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s - c)}} = 0,91 \cdot 300 / (3000 \cdot (32,73 - 4,8))^{1/2} = 0,9432$$

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

$$K_{10} = \max\left\{\frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0,25\right\} = \max\{e^{-0,9432} \cdot \sin(0,9432) / 0,9432; 0,25\} = 0,3342$$

$$\vartheta_1 = -\frac{0,23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0,23 \cdot 0,3464 \cdot 0,4391 / (0,9816 \cdot 0,3342) = (-0,1067)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\sigma_{mx} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = 4 \cdot 3,038 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot 3000^2 \cdot (32,73 - 4,8)) = 1,539 \text{ МПа}$$

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP	Лист
						33

$$\vartheta_{21} = -\frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = -1,539 / (1,25 \cdot 174,5) = (-0,007055)$$

$$\vartheta_{22} = \left(\frac{p \cdot D}{4 \cdot (s - c)} - \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} \right) = [0,401 \cdot 3000 / (4 \cdot (32,73 - 4,8)) - 1,539] / (1,2 \cdot 174,5) = 0,04409$$

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

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 1,46 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{2,2} \end{array} \right.$$

$$= 1,481$$

$$K_1 = \min\{1,46, 1,481\} = 1,46$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1,46 \cdot 1,25 \cdot 174,5 = 318,5 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0,7 \cdot [\sigma]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c) \cdot (s - c)}}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0,7 \cdot 318,5 \cdot (3000 \cdot (32,73 - 4,8))^{1/2} \cdot (32,73 - 4,8) / (0,3342 \cdot 0,9816) = 5,494 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-0,9432} \cdot \cos(0,9432)) / 0,9432 = 0,8178$$

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

$$K_{16} = 1 - \frac{0,65}{1 + (\delta \cdot \gamma)^2} \cdot \frac{\pi}{\sqrt{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0,65 / (1 + (6 \cdot 0,1092)^2) \cdot [3,142 / (3 \cdot 2,094)]^{1/2} = 0,6785$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0,6 \cdot \sqrt{\frac{D}{s - c} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1}} = 1 / [1 + 0,6 \cdot (3000 / (32,73 - 4,8))^{1/3} \cdot 300 / 3000 \cdot 2,094] = 0,626$$

$$\vartheta_1 = -\frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 \cdot 0,8178 / [0,6344 \cdot 0,6785 \cdot 0,626 \cdot \sin(0,5 \cdot 2,094)] = (-1,857)$$

$$\vartheta_{21} = 0$$

$$\vartheta_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s - c) \cdot K_2 \cdot [\sigma]} = 0,401 \cdot 3000 / (2 \cdot (32,73 - 4,8)) \cdot 1 / (1,25 \cdot 174,5) = 0,09876$$

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

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 0,4504 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{2,2} \end{array} \right.$$

$$= 0,4941$$

$$K_1 = \min\{0,4504, 0,4941\} = 0,4504$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_3 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,4504 \cdot 1,25 \cdot 174,5 = 98,23 \text{ МПа}$$

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата				
	Инов. № дубл.				
	Взам. инв. №				
	Подпись и дата				
	Изм. Лист № докум. Подп. Дата				
E-10K.00.00.000 PP					Лист 34

$$\vartheta_{22} = \left(\frac{p \cdot D}{4 \cdot (s - c)} - \frac{\sigma_{\text{max}}}{K_2 \cdot [\sigma]} \right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = [(-0,21) \cdot 3000 / (4 \cdot (22 - 4,8)) - 2,073] / (1,2 \cdot 167) = (-0,05604)$$

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

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 1,497 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{22} \end{array} \right|$$

$$= 1,488$$

$$K_1 = \min\{1,497, 1,488\} = 1,488$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1,488 \cdot 1,25 \cdot 167 = 310,5 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0,7 \cdot [\sigma]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c) \cdot (s - c)}}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0,7 \cdot 310,5 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} \cdot (22 - 4,8) / (0,25 \cdot 0,8514) = 3,99 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-1,803} \cdot \cos(1,803)) / 1,803 = 0,5757$$

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

$$K_{16} = 1 - \frac{0,65}{1 + (\delta \cdot \gamma)^2} \cdot \frac{\pi}{\sqrt{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0,65 / (1 + (6 \cdot 0,08571)^2) \cdot [3,142 / (3 \cdot 2,443)]^{1/2} = 0,6635$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0,6 \cdot \sqrt{\frac{D}{s - c} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1}} = 1 / [1 + 0,6 \cdot (3000 / (22 - 4,8))^{1/3} \cdot 450 / 3000 \cdot 2,443] = 0,4487$$

$$\vartheta_1 = - \frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 \cdot 0,5757 / [0,4249 \cdot 0,6635 \cdot 0,4487 \cdot \sin(0,5 \cdot 2,443)] = (-2,567)$$

$$\vartheta_{21} = 0$$

$$\vartheta_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s - c)} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = (-0,21) \cdot 3000 / (2 \cdot (22 - 4,8)) \cdot 1 / (1,25 \cdot 167) = (-0,08773)$$

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

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 0,3423 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{22} \end{array} \right|$$

$$= 0,3125$$

$$K_1 = \min\{0,3423, 0,3125\} = 0,3125$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_3 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,3125 \cdot 1,25 \cdot 167 = 65,22 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата					Лист 37	
	Инов. № дубл.						
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Взам. инв. №		Подпись и дата
					Инов. № дубл.		
<div>$K_{16} = \frac{1}{1 + (6 \cdot \gamma)^2 \sqrt{3 \cdot \delta_1}} = 1 / [1 + 0.6 \cdot (3000 / (22 - 4,8))^{1/3} \cdot 450 / 3000 \cdot 2,443] = 0,6655$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0.6 \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{s-c}} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1} = 1 / [1 + 0.6 \cdot (3000 / (22 - 4,8))^{1/3} \cdot 450 / 3000 \cdot 2,443] = 0,4487$$\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 0,5757 / [0,4249 \cdot 0,6635 \cdot 0,4487 \cdot \sin(0.5 \cdot 2,443)] = (-2,567)$$\vartheta_{21} = 0$$\vartheta_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s-c)} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = (-0,21) \cdot 3000 / (2 \cdot (22 - 4,8)) \cdot 1 / (1,25 \cdot 167) = (-0,08773)$<p>Примечание: при $\vartheta_{2i} < 0$ в расчёте K_1 знаки ϑ_1 и ϑ_2 меняют на противоположные</p>$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}}$<div>$= 0,3423$<div>при $\vartheta_2 = \vartheta_{21}$</div><div>при $\vartheta_2 = \vartheta_{22}$</div></div>$= 0,3125$$K_1 = \min\{ 0,3423, 0,3125 \} = 0,3125$<p>Расчёт в точке 3: Предельное напряжение изгиба: $[\sigma]_B = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,3125 \cdot 1,25 \cdot 167 = 65,22$ МПа Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:</p></div>							

$$[F]_3 = \frac{0.9 \cdot [\sigma_1]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} \cdot (s - c)}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0.9 \cdot 65,22 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} \cdot (22 - 4,8) / (0,4249 \cdot 0,6635 \cdot 0,4487) = 1,813 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$s_{ef} = (s - c) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{s_2}{s - c}\right)^2} = (22 - 4,8) \cdot (1 + (22 / (22 - 4,8))^2)^{1/2} = 27,93 \text{ мм}$$

Расчёт №2:

Подкладной лист рассматривают как усиление стенки сосуда. Во всех формулах принимают $b = 300 \text{ мм}$, $\delta_1 = 120^\circ$ (2,094 рад), $s = s_{ef} + c = 27,93 + 4,8 = 32,73 \text{ мм}$.

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

Параметр, определяемый расстоянием до днища:

$$\gamma = 2.83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s - c}{D}} = 2.83 \cdot 1,2 \cdot 10^3 / 3000 \cdot ((32,73 - 4,8) / 3000)^{1/2} = 0,1092$$

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

$$K_{15} = \min\left\{1.0; \frac{0.8 \cdot \sqrt{\gamma + 6 \cdot \gamma}}{\delta_1}\right\} = \min\{1.0; (0.8 \cdot 0,1092^{1/2} + 6 \cdot 0,1092) / 2,094\} = 0,4391$$

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

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

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta_1 = 0.91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s - c)}} = 0.91 \cdot 300 / (3000 \cdot (32,73 - 4,8))^{1/2} = 0,9432$$

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

$$K_{10} = \max\left\{\frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0.25\right\} = \max\{e^{-0,9432} \cdot \sin(0,9432) / 0,9432; 0.25\} = 0,3342$$

$$\vartheta_1 = -\frac{0.23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0.23 \cdot 0,3464 \cdot 0,4391 / (0,9816 \cdot 0,3342) = (-0,1067)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{mk} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = 4 \cdot 2,52 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot 3000^2 \cdot (32,73 - 4,8)) = 1,277 \text{ МПа}$$

$$\vartheta_{21} = -\frac{\bar{\sigma}_{mk}}{K_2 \cdot [\sigma]} = -1,277 / (1,25 \cdot 167) = (-0,006115)$$

$$\vartheta_{22} = \left(\frac{p \cdot D}{4 \cdot (s - c)} - \bar{\sigma}_{mk}\right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = [(-0,21) \cdot 3000 / (4 \cdot (32,73 - 4,8)) - 1,277] / (1,2 \cdot 167) = (-0,03451)$$

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

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 1,461 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \end{array} \right|$$

Инв. № подл. 19746.4	Подпись и дата				
	Инв. № дубл.				
	Взам. инв. №				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<div>E-10K.00.00.000 PP</div> <div>Лист 38</div>

$$= 1,447$$

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

$$K_1 = \min\{ 1,461, 1,447 \} = 1,447$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1,447 \cdot 1,25 \cdot 167 = 302 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0,7 \cdot [\sigma]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} \cdot (s - c)}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0,7 \cdot 302 \cdot (3000 \cdot (32,73 - 4,8))^{1/2} \cdot (32,73 - 4,8) / (0,3342 \cdot 0,9816) = 5,209 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-0,9432} \cdot \cos(0,9432)) / 0,9432 = 0,8178$$

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

$$K_{16} = 1 - \frac{0,65}{1 + (6 \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0,65 / (1 + (6 \cdot 0,1092)^2) \cdot [3,142 / (3 \cdot 2,094)]^{1/2} = 0,6785$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0,6 \cdot 3 \cdot \sqrt{\frac{D}{s - c}} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1} = 1 / [1 + 0,6 \cdot (3000 / (32,73 - 4,8))^{1/2} \cdot 300 / 3000 \cdot 2,094] = 0,626$$

$$\vartheta_1 = - \frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 \cdot 0,8178 / [0,6344 \cdot 0,6785 \cdot 0,626 \cdot \sin(0,5 \cdot 2,094)] = (-1,857)$$

$$\vartheta_{21} = 0$$

$$\vartheta_{2,2} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s - c)} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = (-0,21) \cdot 3000 / (2 \cdot (32,73 - 4,8)) \cdot 1 / (1,25 \cdot 167) = (-0,05404)$$

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

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 0,4504 \quad \left| \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \right|$$

$$= 0,4264$$

$$K_1 = \min\{ 0,4504, 0,4264 \} = 0,4264$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_3 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,4264 \cdot 1,25 \cdot 167 = 89,01 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0,9 \cdot [\sigma]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} \cdot (s - c)}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0,9 \cdot 89,01 \cdot (3000 \cdot (32,73 - 4,8))^{1/2} \cdot (32,73 - 4,8) / (0,6344 \cdot 0,6785 \cdot 0,626) = 2,403 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Условие прочности:

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

$$[F] = 1,813 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$1,003 \cdot 10^6 \text{ Н} \leq 1,813 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Проверка условия устойчивости

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP	Лист
						39

Эффективное осевое усилие от местных мембранных напряжений:

$$F_e = F \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{D}{(s-c)}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} = 1,003 \cdot 10^6 \cdot 3,142 / 4 \cdot (3000 / (22 - 4,8))^{1/2} \cdot 0,07095 \cdot 0,3063 = 2,261 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

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

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{F_e}{[F]} + \frac{M}{[M]_{уст}} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0,21 / 0,3115 + 2,261 \cdot 10^5 / 2,421 \cdot 10^7 + 2,52 \cdot 10^5 / 1,862 \cdot 10^7 + (9,657 \cdot 10^5 / 5,636 \cdot 10^6)^2 = 0,7263$$

$$0,7263 \leq 1.0$$

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, ξ : 1
Плотность жидкости, $\rho_{ж}$: $1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$
Расчётное внутреннее избыточное давление, действующее в элементе над опорой, p: 0,558 МПа

Изгибающий момент над опорой, M: $1,123 \cdot 10^5 \text{ Н м}$
Опорное усилие, F: $4,05 \cdot 10^5 \text{ Н}$
Поперечное усилие в сечении оболочки над опорой, Q: $2,498 \cdot 10^5 \text{ Н}$

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

Допускаемое наружное давление, [p]: 0,453 МПа
Допускаемый изгибающий момент, $[M]_{уст}$: $2,975 \cdot 10^7 \text{ Н м}$
Допускаемая осевое сжимающее усилие, [F]: $3,848 \cdot 10^7 \text{ Н}$
Допускаемая поперечное усилие, [Q]: $8,847 \cdot 10^6 \text{ Н}$

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

Опора с подкладным листом

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

$$K_{19} = \frac{5}{6 \cdot 3 \cdot \sqrt{\frac{D}{s-c}} \cdot \delta_1} = 5 / [6 \cdot (3000 / (22 - 4,8))^{1/3} \cdot 2,094] = 0,07121$$

$$K_{19} \cdot D + 1.5 \cdot b = 0,07121 \cdot 3000 + 1.5 \cdot 300 = 663,6 \text{ мм}$$

Подпись и дата		Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP	Лист
Изн. № дубл.								40
Взам. инв. №								
Подпись и дата								
Изн. № подл.	19746.4							

Условие не выполнено, проводятся два расчёта

Расчёт №1:

Подкладной лист рассматривают как седловую опору шириной b_2 с углом охвата δ_2 . Во всех формулах принимают $b = b_2 = 450$ 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:

$$\gamma = 2,83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s-c}{D}} = 2,83 * 1,2 \cdot 10^3 / 3000 * ((22 - 4,8) / 3000)^{1/2} = 0,08571$$

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

$$K_{15} = \min \left\{ 1,0; \frac{0,8 \cdot \sqrt{\gamma + 6 \cdot \gamma}}{\delta_1} \right\} = \min \{ 1,0; (0,8 * 0,08571^{1/2} + 6 * 0,08571) / 2,443 \} = 0,3063$$

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

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

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta_1 = 0,91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s-c)}} = 0,91 * 450 / (3000 * (22 - 4,8))^{1/2} = 1,803$$

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

$$K_{10} = \max \left\{ \frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0,25 \right\} = \max \{ e^{-1,803} * \sin(1,803) / 1,803; 0,25 \} = 0,25$$

$$\Phi_1 = - \frac{0,23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0,23 * 0,07095 * 0,3063 / (0,8514 * 0,25) = (-0,02348)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{\text{мк}} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s-c)} = 4 * 1,123 \cdot 10^5 / (3,142 * 3000^2 * (22 - 4,8)) = 0,9235 \text{ МПа}$$

$$\Phi_{21} = -\bar{\sigma}_{\text{мк}} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = -0,9235 / (1,05 * 272,7) = (-0,003225)$$

$$\Phi_{22} = \left(\frac{p \cdot D}{4 \cdot (s-c)} - \bar{\sigma}_{\text{мк}} \right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = [0,558 * 3000 / (4 * (22 - 4,8)) - 0,9235] / (1 * 272,7) = 0,08584$$

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

$$K_1 = \frac{1 - \Phi_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \Phi_1 \cdot \Phi_2 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \Phi_1 \cdot \Phi_2 \right)^2 + \left(1 - \Phi_2^2 \right) \cdot \Phi_1}} = 1,498 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \Phi_2 = \Phi_{21} \\ \text{при } \Phi_2 = \Phi_{22} \end{array} \right|$$

$$= 1,496$$

$K_1 = \min \{ 1,498, 1,496 \} = 1,496$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

Изн. № подл.	Изн. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата
19746.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
E-10K.00.00.000 PP			
Лист			
41			

$$[\sigma_i]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1,496 * 1,05 * 272,7 = 428,4 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0,7 \cdot [\sigma]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s-c) \cdot (s-c)}}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0,7 \cdot 428,4 \cdot (3000 \cdot (22-4,8))^{1/2} / (0,25 \cdot 0,8514) = 5,505 \cdot 10^6 \text{ H}$$

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-1,803} \cdot \cos(1,803)) / 1,803 = 0,5757$$

$$K_{14} = \frac{1.45 - 0.43 \cdot \delta_1}{\sin(0.5 \cdot \delta_1)} = (1.45 - 0.43 \cdot 2.443) / \sin(0.5 \cdot 2.443) = 0,4249$$

$$K_{16} = 1 - \frac{0.65}{1 + (6 \cdot \gamma)^2} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{3 \cdot 8_1}} = 1 - 0.65 / (1 + (6 \cdot 0,08571)^2) \cdot [3,142 / (3 \cdot 2,443)]^{1/2} = 0,6635$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0.6 \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{s - c} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1}} = 1 / [1 + 0.6 \cdot (3000 / (22 - 4.8))^{1/3} \cdot 450 / 3000 \cdot 2.443] = 0.4487$$

$$q_1 = - \frac{0.53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0.5 \cdot \delta_1)} = -0.53 \cdot 0.5757 / [0.4249 \cdot 0.6635 \cdot 0.4487 \cdot \sin(0.5 \cdot 2.443)] = (-2.567)$$

$$g_{21} = 0$$

$$S_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s - c)} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot |\sigma|} = 0,558 \cdot 3000 / (2 \cdot (22 - 4,8)) \cdot 1 / (1,05 \cdot 272,7) = 0,1699$$

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

$$K_1 = \frac{1 - g_2^2}{\left(\frac{1}{3} + g_1 \cdot g_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + g_1 \cdot g_2\right)^2 + (1 - g_2^2) \cdot g_1}} = 0,3423 \quad \text{при } g_2 = g_{2,1}$$

$$= 0,3998 \quad \text{при } g_2 = g_{2,2}$$

$$K_1 = \min\{ 0,3423, 0,3998 \} = 0,3423$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma_i]_k = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,3423 \cdot 1,05 \cdot 272,7 = 98,01 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0,9 \cdot [\sigma_1]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s-c)} \cdot (s-c)}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0,9 \cdot 98,01 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} \cdot (22 - 4,8) / (0,4249 \cdot 0,6635 \cdot 0,4487) = 2,724 \cdot 10^6 \text{ H}$$

$$s_{\text{eff}} = (s - c) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{s_2}{s - c}\right)^2} = (22 - 4,8) \cdot (1 + (22 / (22 - 4,8))^2)^{1/2} = 27,93 \text{ mm}$$

Расчет №2:

Подкладной лист рассматривают как усиление стенки сосуда. Во всех формулах принимают $b = 300$ мм, $\delta_1 = 120^\circ$ (2,094 рад), $s = s_{ef} + c = 27,93 + 4,8 = 32,73$ мм.

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p>Примечание: при $\sigma_{21} < 0$ в расчёте K_1 знаки σ_1 и σ_2 меняют на противоположные</p> $K_1 = \frac{1 - \sigma_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \sigma_1 \cdot \sigma_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \sigma_1 \cdot \sigma_2\right)^2 + (1 - \sigma_2^2) \cdot \sigma_1}}$ <p>$= 0,3998$</p> <p>$K_1 = \min\{ 0,3423, 0,3998 \} = 0,3423$</p> <p>Расчёт в точке 3:</p> <p>Предельное напряжение изгиба:</p> <p>$[\sigma_i]_3 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,3423 \cdot 1,05 \cdot 272,7 = 98,01 \text{ МПа}$</p> <p>Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:</p> $[F]_3 = \frac{0,9 \cdot [\sigma_i]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} \cdot (s - c)}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0,9 \cdot 98,01 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} \cdot (22 - 4,8) / (0,4249 \cdot 0,6635 \cdot 0,4487) = 2,724 \cdot 10^6 \text{ Н}$ $s_{ef} = (s - c) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_2}{s - c}\right)^2} = (22 - 4,8) \cdot (1 + (22 / (22 - 4,8))^2)^{1/2} = 27,93 \text{ мм}$ <p>Расчёт №2:</p> <p>Подкладной лист рассматривают как усиление стенки сосуда. Во всех формулах принимают $b = 300 \text{ мм}$, $\delta_1 = 120^\circ$ (2,094 рад), $s = s_{ef} + c = 27,93 + 4,8 = 32,73 \text{ мм}$.</p>
Инв. № докум.	Лист	E-10K.00.00.000 PP			Лист
19746.4	42				42

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

Параметр, определяемый расстоянием до днища:

$$\gamma = 2.83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s-c}{D}} = 2.83 \cdot 1.2 \cdot 10^3 / 3000 \cdot ((32.73 - 4.8) / 3000)^{1/2} = 0.1092$$

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

$$K_{15} = \min\left\{1.0; \frac{0.8 \cdot \sqrt{\gamma + 6 \cdot \gamma}}{\delta_1}\right\} = \min\{1.0; (0.8 \cdot 0.1092^{1/2} + 6 \cdot 0.1092) / 2.094\} = 0.4391$$

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

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

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta_1 = 0.91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s-c)}} = 0.91 \cdot 300 / (3000 \cdot (32.73 - 4.8))^{1/2} = 0.9432$$

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

$$K_{10} = \max\left\{\frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0.25\right\} = \max\{e^{-0.9432} \cdot \sin(0.9432) / 0.9432; 0.25\} = 0.3342$$

$$\Phi_1 = -\frac{0.23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0.23 \cdot 0.3464 \cdot 0.4391 / (0.9816 \cdot 0.3342) = (-0.1067)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{\text{мк}} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s-c)} = 4 \cdot 1.123 \cdot 10^5 / (3.142 \cdot 3000^2 \cdot (32.73 - 4.8)) = 0.5688 \text{ МПа}$$

$$\Phi_{21} = -\frac{\bar{\sigma}_{\text{мк}}}{K_2 \cdot [\sigma]} = -0.5688 / (1.05 \cdot 272.7) = (-0.001986)$$

$$\Phi_{22} = \left(\frac{p \cdot D}{4 \cdot (s-c)} - \bar{\sigma}_{\text{мк}}\right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = [0.558 \cdot 3000 / (4 \cdot (32.73 - 4.8)) - 0.5688] / (1 \cdot 272.7) = 0.05287$$

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

$$K_1 = \frac{1 - \Phi_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \Phi_1 \cdot \Phi_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \Phi_1 \cdot \Phi_2\right)^2 + (1 - \Phi_2^2) \cdot \Phi_1}} = 1.463 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \Phi_2 = \Phi_{21} \\ \text{при } \Phi_2 = \Phi_{22} \end{array} \right|$$

$$= 1.483$$

$$K_1 = \min\{1.463, 1.483\} = 1.463$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1.463 \cdot 1.05 \cdot 272.7 = 418.8 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0.7 \cdot [\sigma]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s-c) \cdot (s-c)}}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0.7 \cdot 418.8 \cdot (3000 \cdot (32.73 - 4.8))^{1/2} \cdot (32.73 - 4.8) / (0.3342 \cdot 0.9816) = 7.224 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла: $\bar{\sigma}_{\text{мк}} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = 4 \cdot 1,123 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot 3000^2 \cdot (32,73 - 4,8)) = 0,5688 \text{ МПа}$ $\vartheta_{2,1} = -\bar{\sigma}_{\text{мк}} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = -0,5688 / (1,05 \cdot 272,7) = (-0,001986)$ $\vartheta_{2,2} = \left(\frac{p \cdot D}{4 \cdot (s - c)} - \bar{\sigma}_{\text{мк}} \right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = [0,558 \cdot 3000 / (4 \cdot (32,73 - 4,8)) - 0,5688] / (1 \cdot 272,7) = 0,05287$ <p>Примечание: при $\vartheta_{2,i} < 0$ в расчёте K_1 знаки ϑ_1 и ϑ_2 меняют на противоположные</p> $K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 1,463 \quad \left \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{2,1} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{2,2} \end{array} \right.$ <p>$= 1,483$ $K_1 = \min\{ 1,463, 1,483 \} = 1,463$ Расчёт в точке 2: Предельное напряжение изгиба: $[\sigma]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1,463 \cdot 1,05 \cdot 272,7 = 418,8 \text{ МПа}$ Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении: $[F]_2 = \frac{0,7 \cdot [\sigma]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c) \cdot (s - c)}}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0,7 \cdot 418,8 \cdot (3000 \cdot (32,73 - 4,8))^{1/2} \cdot (32,73 - 4,8) / (0,3342 \cdot 0,9816) = 7,224 \cdot 10^6 \text{ Н}$</p>	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-10К.00.00.000 РР	Лист 43

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-0,9432} \cdot \cos(0,9432)) / 0,9432 = 0,8178$$

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

$$K_{16} = 1 - \frac{0.65}{1 + (6 \cdot \gamma)^2} \cdot \frac{\pi}{\sqrt{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0.65 / (1 + (6 * 0,1092)^2) * [3,142 / (3 * 2,094)]^{1/2} = 0,6785$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0.6 \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{s-c} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1}} = 1 / [1 + 0.6 \cdot (3000 / (32,73 - 4,8))^{1/3} \cdot 300 / 3000 \cdot 2,094] = 0,626$$

$$g_1 = -\frac{0.53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0.5 \cdot \delta_1)} = -0.53 \cdot 0.8178 / [0.6344 \cdot 0.6785 \cdot 0.626 \cdot \sin(0.5 \cdot 2.094)] = (-1,857)$$

$$S_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s - c)} \cdot \frac{1}{K_0 \cdot \sigma} = 0,558 \cdot 3000 / (2 \cdot (32,73 - 4,8)) \cdot 1 / (1,05 \cdot 272,7) = 0,1047$$

Примечание: при $s_{21} < 0$ в расчёте K_1 знаки s_1 и s_2 меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - g_2^2}{\left(\frac{1}{3} + g_1 \cdot g_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + g_1 \cdot g_2\right)^2 + (1 - g_2^2) \cdot g_1}} = 0,4504 \quad \text{при } g_2 = g_{2,1}$$

$$= 0,4967 \quad \text{при } g_2 = g_{2,2}$$

$$K_1 = \min\{ 0,4504, 0,4967 \} = 0,4504$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma_i]_3 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,4504 * 1,05 * 272,7 = 129 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[\text{F}]_3 = \frac{0.9 \cdot [\sigma_1]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c) \cdot (s - c)}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0.9 \cdot 129 \cdot (3000 \cdot (32,73 - 4,8))^{1/2} \cdot (32,73 - 4,8) / (0,6344 \cdot 0,6785 \cdot 0,626) = 3,482 \cdot 10^6 \text{ H}$$

Условие прочности:

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

$$[F] = 2,724 \cdot 10^6 \text{ H}$$

$$4.05 \cdot 10^5 \text{ H} \leq 2.724 \cdot 10^6 \text{ H}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Проверка условия устойчивости

Эффективное осевое усилие от местных мембранных напряжений:

$$F_e = F \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{D}{(s-c)}} \cdot K_{13} \cdot K_{13} = 4,05 \cdot 10^5 * 3,142 / 4 * (3000 / (22 - 4,8))^{1/2} * 0,07095 * 0,3063 = 9,131 \cdot 10^4 \text{ H}$$

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

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

Инв. № подл.	19746.4	Подпись и дата		Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$= 0,4967$ $K_1 = \min\{ 0,4504 , 0,4967 \} = 0,4504$ Расчёт в точке 3: Предельное напряжение изгиба: $[\sigma]_3 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,4504 * 1,05 * 272,7 = 129 \text{ МПа}$ Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении: $[F]_3 = \frac{0,9 \cdot [\sigma]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} \cdot (s - c)}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0,9 * 129 * (3000 * (32,73 - 4,8))^{1/2} * (32,73 - 4,8) / (0,6344 * 0,6785 * 0,626) = 3,482 \cdot 10^6 \text{ Н}$ Условие прочности: $F \leq [F] = \min\{ [F]_{2[1]}, [F]_{3[1]}, [F]_{2[2]}, [F]_{3[2]} \}$ $[F] = 2,724 \cdot 10^6 \text{ Н}$ $4,05 \cdot 10^5 \text{ Н} \leq 2,724 \cdot 10^6 \text{ Н}$ Заключение: Условие прочности и устойчивости выполнено
							<p align="center">Проверка условия устойчивости</p> Эффективное осевое усилие от местных мембранных напряжений: $F_e = F \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{D}{(s - c)}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} = 4,05 \cdot 10^5 * 3,142 / 4 * (3000 / (22 - 4,8))^{1/2} * 0,07095 * 0,3063 = 9,131 \cdot 10^4 \text{ Н}$ Сосуд работает под внутренним давлением, при проверке устойчивости принимают $p=0$. Условие устойчивости: $\frac{ p }{[p]} + \frac{F_e}{[F]} + \frac{M}{[M]_{уст}} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 \leq 1$
Инв. № подл.	19746.4	Подпись и дата		Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Е-10K.00.00.000 PP
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			Лист 44

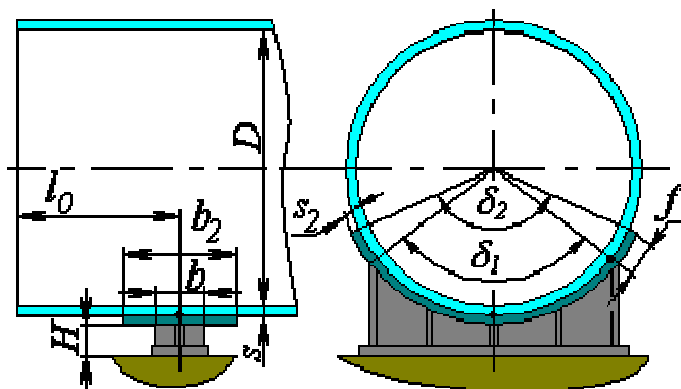
$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{F_e}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{уст}}} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0 / 0,453 + 9,131 \cdot 10^4 / 3,848 \cdot 10^7 + 1,123 \cdot 10^5 / 2,975 \cdot 10^7 + (2,498 \cdot 10^5 / 8,847 \cdot 10^6)^2 = 0,006945$$

$$0,006945 \leq 1.0$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Инв. № подл.	Подпись и дата				Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
19746.4							
					E-10K.00.00.000 PP		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист		
					45		

Опора седловая (неподвижная)



Исходные данные

Элемент, связанный с опорой:	Обечайка цилиндрическая
Внутренний диаметр обечайки, D:	3000 мм
Толщина стенки обечайки, s:	22 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c ₁ :	4 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, c ₂ :	0,8 мм
Прибавка технологическая, c ₃ :	0 мм
Сумма прибавок к стенке обечайки, c:	4,8 мм
Ширина опоры, b:	300 мм
Угол охвата опоры, δ_1 :	120 °
Расстояние от края элемента, l ₀ :	5720 мм
Расстояние до днища, a:	$1,2 \cdot 10^3$ мм
Высота опоры, H:	205 мм
Толщина листа, s ₂ :	22 мм
Ширина листа, b ₂ :	450 мм
Угол охвата листа, δ_2 :	140 °
Длина выступающей части листа, f:	269,5 мм

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения (см. Эпюры сил и моментов):

Расчётная температура, T:	120 °C
Коэффициент заполнения жидкостью, ξ :	1
Плотность жидкости, $\rho_{ж}$:	750 кг/м ³
Расчётное внутреннее избыточное давление, действующее в элементе над опорой, p:	0,401 МПа
Изгибающий момент в сечении оболочки над опорой, M: $3,078 \cdot 10^5$ Н м	

Инов. № подл.	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19746.4			

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

E-10K.00.00.000 PP

Поперечное усилие в сечении оболочки над опорой, Q: $1,066 \cdot 10^6$ Н

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

Допускаемое наружное давление, [p]:	0,3219 МПа
Допускаемый изгибающий момент, [M] _{уст} :	1,942·10 ⁷ Н м
Допускаемая осевое сжимающее усилие, [F]:	2,524·10 ⁷ Н
Допускаемая поперечное усилие, [Q]:	5.868·10 ⁶ Н

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

Опора с подкладным листом

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

$$K_{19} = \frac{5}{6 \cdot 3 \sqrt{\frac{D}{s-c}} \cdot d_1} = 5 / [6 * (3000 / (22 - 4,8))^{1/3} * 2,094] = 0,07121$$

$$K_{18} \cdot D + 1.5 \cdot b = 0,07121 \cdot 3000 + 1.5 \cdot 300 = 663,6 \text{ mm}$$

Условие не выполнено, проводятся два расчёта

Расчет №1:

Подкладной лист рассматривают как седловую опору шириной b_2 с углом охвата δ_2 . Во всех формулах принимают $b = b_2 = 450$ мм, $\delta_1 = \delta_2 = 140^\circ$ (2,443 рад)

$$K_{13} = \frac{\max\left\{1.7 - \frac{2.1 \cdot 5}{\pi}; 0\right\}}{\sin(0.5 \cdot 5)} = \max\{1.7 - 2.1 \cdot 3.142 / 3.142; 0\} / \sin(0.5 \cdot 3.142) = 0.07095$$

Параметр, определяемый расстоянием до дна:

$$\gamma = 2.83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s-c}{D}} = 2.83 \cdot 1,2 \cdot 10^3 / 3000 \cdot ((22-4,8)/3000)^{1/2} = 0,08571$$

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

$$K_{15} = \min \left\{ 1.0; \frac{0.8 \cdot \sqrt{\gamma} + 6 \cdot \gamma}{\delta_1} \right\} = \min \{ 1.0; (0.8 * 0.08571)^{1/2} + 6 * 0.08571 \} / 2.443 = 0.3063$$

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

$$K_{12} = \frac{1.15 - 0.1432 \cdot 8.1}{\sin(0.5 \cdot 8.1)} = (1.15 - 0.1432 \cdot 2.443) / \sin(0.5 \cdot 2.443) = 0.8514$$

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta_1 = 0.91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s - c)}} = 0.91 * 450 / (3000 * (22 - 4,8))^{1/2} = 1,803$$

Инв. № подл.	19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p>Расчёт №1:</p> <p>Подкладной лист рассматривают как седловую опору шириной b_2 с углом охвата δ_2. Во всех формулах принимают $b = b_2 = 450$ мм, $\delta_1 = \delta_2 = 140^\circ$ (2,443 рад)</p> $K_{13} = \frac{\max \left\{ 1.7 - \frac{2.1 \cdot \delta_1}{\pi}; 0 \right\}}{\sin(0.5 \cdot \delta_1)} = \max \{ 1.7 - 2.1 * 2.443 / 3.142; 0 \} / \sin(0.5 * 2.443) = 0,07095$ <p>Параметр, определяемый расстоянием до днища:</p> $\gamma = 2.83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s-c}{D}} = 2.83 * 1.2 \cdot 10^3 / 3000 * ((22 - 4.8) / 3000)^{1/2} = 0,08571$ <p>Коэффициенты, учитывающие влияние расстояния до днища (δ_1 подставляют в радианах):</p> $K_{15} = \min \left\{ 1.0; \frac{0.8 \cdot \sqrt{\gamma + 6 \cdot \gamma}}{\delta_1} \right\} = \min \{ 1.0; (0.8 * 0,08571)^{1/2} + 6 * 0,08571 / 2.443 \} = 0,3063$ <p>Коэффициенты, учитывающие влияние угла охвата опоры (δ_1 подставляют в радианах):</p> $K_{12} = \frac{1.15 - 0.1432 \cdot \delta_1}{\sin(0.5 \cdot \delta_1)} = (1.15 - 0.1432 * 2.443) / \sin(0.5 * 2.443) = 0,8514$ <p>Параметр, определяемый шириной пояса опоры:</p> $\beta_1 = 0.91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s-c)}} = 0.91 * 450 / (3000 * (22 - 4.8))^{1/2} = 1,803$
						<div> <div> <div>Изм.</div> <div>Лист</div> <div>№ докум.</div> <div>Подп.</div> <div>Дата</div> </div> <div> <div>E-10K.00.00.000 PP</div> <div>47</div> </div> </div>

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

$$K_{10} = \max \left\{ \frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0,25 \right\} = \max \{ e^{-1,803} \cdot \sin(1,803) / 1,803; 0,25 \} = 0,25$$

$$\Phi_1 = - \frac{0,23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0,23 \cdot 0,07095 \cdot 0,3063 / (0,8514 \cdot 0,25) = (-0,02348)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{\text{мк}} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = 4 \cdot 3,078 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot 3000^2 \cdot (22 - 4,8)) = 2,532 \text{ МПа}$$

$$\Phi_{21} = - \bar{\sigma}_{\text{мк}} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = -2,532 / (1,25 \cdot 174,5) = (-0,01161)$$

$$\Phi_{22} = \left(\frac{p \cdot D}{4 \cdot (s - c)} - \bar{\sigma}_{\text{мк}} \right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = [0,401 \cdot 3000 / (4 \cdot (22 - 4,8)) - 2,532] / (1,2 \cdot 174,5) = 0,07142$$

Примечание: при $\Phi_{21} < 0$ в расчёте K_1 знаки Φ_1 и Φ_2 меняют на противоположные

$$K_1 = \frac{1 - \Phi_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \Phi_1 \cdot \Phi_2 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \Phi_1 \cdot \Phi_2 \right)^2 + (1 - \Phi_2^2) \cdot \Phi_1}} = 1,497 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \Phi_2 = \Phi_{21} \\ \text{при } \Phi_2 = \Phi_{2,2} \end{array} \right|$$

$= 1,498$

$$K_1 = \min \{ 1,497, 1,498 \} = 1,497$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma_1]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1,497 \cdot 1,25 \cdot 174,5 = 326,5 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0,7 \cdot [\sigma_1]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c) \cdot (s - c)}}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0,7 \cdot 326,5 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} \cdot (22 - 4,8) / (0,25 \cdot 0,8514) = 4,195 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-1,803} \cdot \cos(1,803)) / 1,803 = 0,5757$$

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

$$K_{16} = 1 - \frac{0,65}{1 + (\delta \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0,65 / (1 + (6 \cdot 0,08571)^2) \cdot [3,142 / (3 \cdot 2,443)]^{1/2} = 0,6635$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0,6 \cdot 3 \cdot \sqrt{\frac{D}{s - c}} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1} = 1 / [1 + 0,6 \cdot (3000 / (22 - 4,8))^{1/3} \cdot 450 / 3000 \cdot 2,443] = 0,4487$$

$$\Phi_1 = - \frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 \cdot 0,5757 / [0,4249 \cdot 0,6635 \cdot 0,4487 \cdot \sin(0,5 \cdot 2,443)] = (-2,567)$$

$$\Phi_{21} = 0$$

$$\Phi_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s - c)} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = 0,401 \cdot 3000 / (2 \cdot (22 - 4,8)) \cdot 1 / (1,25 \cdot 174,5) = 0,1603$$

Примечание: при $\Phi_{21} < 0$ в расчёте K_1 знаки Φ_1 и Φ_2 меняют на противоположные

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	E-10K.00.00.000 PP					Лист
										48
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 0,3423 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{2,2} \end{array} \right|$$

$$= 0,3966$$

$$K_1 = \min\{0,3423, 0,3966\} = 0,3423$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_3 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,3423 \cdot 1,25 \cdot 174,5 = 74,65 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0,9 \cdot [\sigma]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} \cdot (s - c)}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0,9 \cdot 74,65 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} \cdot (22 - 4,8) / (0,4249 \cdot 0,6635 \cdot 0,4487) = 2,075 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$s_{ef} = (s - c) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{s_2}{s - c}\right)^2} = (22 - 4,8) \cdot (1 + (22 / (22 - 4,8))^2)^{1/2} = 27,93 \text{ мм}$$

Расчёт №2:

Подкладной лист рассматривают как усиление стенки сосуда. Во всех формулах принимают $b = 300 \text{ мм}$, $\delta_1 = 120^\circ$ (2,094 рад), $s = s_{ef} + c = 27,93 + 4,8 = 32,73 \text{ мм}$.

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

Параметр, определяемый расстоянием до днища:

$$\gamma = 2,83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s - c}{D}} = 2,83 \cdot 1,2 \cdot 10^3 / 3000 \cdot ((32,73 - 4,8) / 3000)^{1/2} = 0,1092$$

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

$$K_{15} = \min\left\{1,0; \frac{0,8 \cdot \sqrt{\gamma} + 6 \cdot \gamma}{\delta_1}\right\} = \min\{1,0; (0,8 \cdot 0,1092^{1/2} + 6 \cdot 0,1092) / 2,094\} = 0,4391$$

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

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

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta_1 = 0,91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s - c)}} = 0,91 \cdot 300 / (3000 \cdot (32,73 - 4,8))^{1/2} = 0,9432$$

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

$$K_{10} = \max\left\{\frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0,25\right\} = \max\{e^{-0,9432} \cdot \sin(0,9432) / 0,9432; 0,25\} = 0,3342$$

$$\vartheta_1 = -\frac{0,23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0,23 \cdot 0,3464 \cdot 0,4391 / (0,9816 \cdot 0,3342) = (-0,1067)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\sigma_{mx} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = 4 \cdot 3,078 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot 3000^2 \cdot (32,73 - 4,8)) = 1,56 \text{ МПа}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
19746.4					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
E-10K.00.00.000 PP					Лист
					49

$$\vartheta_{21} = -\frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = -1,56 / (1,25 * 174,5) = (-0,007150)$$

$$\vartheta_{22} = \left(\frac{p \cdot D}{4 \cdot (s - c)} - \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} \right) = [0,401 * 3000 / (4 * (32,73 - 4,8)) - 1,56] / (1,2 * 174,5) = 0,04399$$

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

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 1,46 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{22} \end{array} \right|$$

$$= 1,481$$

$$K_1 = \min\{ 1,46, 1,481 \} = 1,46$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1,46 * 1,25 * 174,5 = 318,5 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0,7 \cdot [\sigma]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c) \cdot (s - c)}}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0,7 * 318,5 * (3000 * (32,73 - 4,8))^{1/2} * (32,73 - 4,8) / (0,3342 * 0,9816) = 5,494 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-0,9432} * \cos(0,9432)) / 0,9432 = 0,8178$$

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

$$K_{16} = 1 - \frac{0,65}{1 + (\delta \cdot \gamma)^2} \cdot \frac{\pi}{\sqrt{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0,65 / (1 + (6 * 0,1092)^2) * [3,142 / (3 * 2,094)]^{1/2} = 0,6785$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0,6 \cdot \sqrt{\frac{D}{s - c} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1}} = 1 / [1 + 0,6 * (3000 / (32,73 - 4,8))^{1/3} * 300 / 3000 * 2,094] = 0,626$$

$$\vartheta_1 = -\frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 * 0,8178 / [0,6344 * 0,6785 * 0,626 * \sin(0,5 * 2,094)] = (-1,857)$$

$$\vartheta_{21} = 0$$

$$\vartheta_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s - c) \cdot K_2 \cdot [\sigma]} = 0,401 * 3000 / (2 * (32,73 - 4,8)) * 1 / (1,25 * 174,5) = 0,09876$$

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

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 0,4504 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{22} \end{array} \right|$$

$$= 0,4941$$

$$K_1 = \min\{ 0,4504, 0,4941 \} = 0,4504$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_3 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,4504 * 1,25 * 174,5 = 98,23 \text{ МПа}$$

Инв. № подл.	19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
E-10K.00.00.000 PP					Лист 50

$$K_{16} = 1 - \frac{0.65}{1 + (6 \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0.65 / (1 + (6 \cdot 0.1092)^2) \cdot [3.142 / (3 \cdot 2.094)]^{1/2} = 0.6785$$
$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0.6 \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{s - c} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1}} = 1 / [1 + 0.6 \cdot (3000 / (32.73 - 4.8))^{1/3} \cdot 300 / 3000 \cdot 2.094] = 0.626$$
$$\vartheta_1 = - \frac{0.53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0.5 \cdot \delta_1)} = -0.53 \cdot 0.8178 / [0.6344 \cdot 0.6785 \cdot 0.626 \cdot \sin(0.5 \cdot 2.094)] = (-1.857)$$
$$\vartheta_{21} = 0$$
$$\vartheta_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s - c)} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = 0.401 \cdot 3000 / (2 \cdot (32.73 - 4.8)) \cdot 1 / (1.25 \cdot 174.5) = 0.09876$$

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

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 0.4504 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{22} \end{array} \right|$$

$= 0.4941$

$K_1 = \min\{ 0.4504, 0.4941 \} = 0.4504$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma_i]_B = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0.4504 \cdot 1.25 \cdot 174.5 = 98.23 \text{ МПа}$$

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

Опора с подкладным листом

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

$$K_{19} = \frac{5}{6 \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{s-c}} \cdot \delta_1} = 5 / [6 \cdot (3000 / (22 - 4,8))^{1/3} \cdot 2,094] = 0,07121$$

$$K_{19} \cdot D + 1.5 \cdot b = 0,07121 \cdot 3000 + 1.5 \cdot 300 = 663,6 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, проводятся два расчёта

Расчёт №1:

Подкладной лист рассматривают как седловую опору шириной b_2 с углом охвата δ_2 . Во всех формулах принимают $b = b_2 = 450 \text{ мм}$, $\delta_1 = \delta_2 = 140^\circ (2,443 \text{ рад})$

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

Параметр, определяемый расстоянием до днища:

$$\gamma = 2.83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s-c}{D}} = 2.83 \cdot 1,2 \cdot 10^3 / 3000 \cdot ((22 - 4,8) / 3000)^{1/2} = 0,08571$$

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

$$K_{15} = \min \left\{ 1.0; \frac{0.8 \cdot \sqrt{\gamma + 6 \cdot \gamma}}{\delta_1} \right\} = \min \{ 1.0; (0.8 \cdot 0,08571^{1/2} + 6 \cdot 0,08571) / 2,443 \} = 0,3063$$

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

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

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta_1 = 0.91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s-c)}} = 0.91 \cdot 450 / (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 1,803$$

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

$$K_{10} = \max \left\{ \frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0.25 \right\} = \max \{ e^{-1,803} \cdot \sin(1,803) / 1,803; 0.25 \} = 0,25$$

$$\Phi_1 = - \frac{0.23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0.23 \cdot 0,07095 \cdot 0,3063 / (0,8514 \cdot 0,25) = (-0,02348)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\sigma_{\text{мк}} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s-c)} = 4 \cdot 2,556 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot 3000^2 \cdot (22 - 4,8)) = 2,102 \text{ МПа}$$

$$\Phi_{21} = - \sigma_{\text{мк}} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = -2,102 / (1,25 \cdot 167) = (-0,01007)$$

Изн. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	$\gamma = 1,032$ $\delta \sqrt{D}$
					Коэффициенты, учитывающие влияние расстояния до днища (δ_1 подставляют в радианах):
					$K_{15} = \min \left\{ 1,0; \frac{0,8 \cdot \sqrt{\gamma + 6 \cdot \gamma}}{\delta_1} \right\} = \min \{ 1,0; (0,8 * 0,08571^{1/2} + 6 * 0,08571) / 2,443 \} = 0,3063$
					Коэффициенты, учитывающие влияние угла охвата опоры (δ_1 подставляют в радианах):
					$K_{12} = \frac{1,15 - 0,1432 \cdot \delta_1}{\sin(0,5 \cdot \delta_1)} = (1,15 - 0,1432 * 2,443) / \sin(0,5 * 2,443) = 0,8514$
					Параметр, определяемый шириной пояса опоры:
					$\beta_1 = 0,91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s - c)}} = 0,91 * 450 / (3000 * (22 - 4,8))^{1/2} = 1,803$
					Коэффициенты, учитывающие влияние ширины пояса опоры (δ_1 подставляют в радианах):
					$K_{10} = \max \left\{ \frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0,25 \right\} = \max \{ e^{-1,803} * \sin(1,803) / 1,803; 0,25 \} = 0,25$
					$\Phi_1 = - \frac{0,23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0,23 * 0,07095 * 0,3063 / (0,8514 * 0,25) = (-0,02348)$
					Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:
					$\sigma_{\text{изг}} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = 4 * 2,556 \cdot 10^5 / (3,142 * 3000^2 * (22 - 4,8)) = 2,102 \text{ МПа}$
					$\Phi_{21} = - \sigma_{\text{изг}} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = -2,102 / (1,25 * 167) = (-0,01007)$
Изн. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	Изн. № подл. 19746.4
E-10K.00.00.000 PP					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист 52

$$[F]_3 = \frac{0.9 \cdot [\sigma_1]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} \cdot (s - c)}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0.9 \cdot 65,22 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} \cdot (22 - 4,8) / (0,4249 \cdot 0,6635 \cdot 0,4487) = 1,813 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$s_{\text{эф}} = (s - c) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{s_2}{s - c}\right)^2} = (22 - 4,8) \cdot (1 + (22 / (22 - 4,8))^2)^{1/2} = 27,93 \text{ мм}$$

Расчёт №2:

Подкладной лист рассматривают как усиление стенки сосуда. Во всех формулах принимают $b = 300 \text{ мм}$, $\delta_1 = 120^\circ$ (2,094 рад), $s = s_{\text{эф}} + c = 27,93 + 4,8 = 32,73 \text{ мм}$.

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

Параметр, определяемый расстоянием до днища:

$$\gamma = 2.83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s - c}{D}} = 2.83 \cdot 1,2 \cdot 10^3 / 3000 \cdot ((32,73 - 4,8) / 3000)^{1/2} = 0,1092$$

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

$$K_{15} = \min\left\{1.0; \frac{0.8 \cdot \sqrt{\gamma + 6 \cdot \gamma}}{\delta_1}\right\} = \min\{1.0; (0.8 \cdot 0,1092^{1/2} + 6 \cdot 0,1092) / 2,094\} = 0,4391$$

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

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

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta_1 = 0.91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s - c)}} = 0.91 \cdot 300 / (3000 \cdot (32,73 - 4,8))^{1/2} = 0,9432$$

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

$$K_{10} = \max\left\{\frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0.25\right\} = \max\{e^{-0,9432} \cdot \sin(0,9432) / 0,9432; 0.25\} = 0,3342$$

$$\vartheta_1 = -\frac{0.23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0.23 \cdot 0,3464 \cdot 0,4391 / (0,9816 \cdot 0,3342) = (-0,1067)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{\text{мк}} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = 4 \cdot 2,556 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot 3000^2 \cdot (32,73 - 4,8)) = 1,295 \text{ МПа}$$

$$\vartheta_{21} = -\frac{\bar{\sigma}_{\text{мк}}}{K_2 \cdot [\sigma]} = -1,295 / (1,25 \cdot 167) = (-0,006203)$$

$$\vartheta_{22} = \left(\frac{p \cdot D}{4 \cdot (s - c)} - \bar{\sigma}_{\text{мк}}\right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = [(-0,21) \cdot 3000 / (4 \cdot (32,73 - 4,8)) - 1,295] / (1,2 \cdot 167) = (-0,03461)$$

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

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 1,461 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \end{array} \right|$$

Инв. № подл. 19746.4	Подпись и дата				
	Инв. № дубл.				
	Взам. инв. №				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<div>E-10K.00.00.000 PP</div> <div>Лист 54</div>

$$= 1,446$$

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

$$K_1 = \min\{ 1,461, 1,446 \} = 1,446$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1,446 \cdot 1,25 \cdot 167 = 302 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0,7 \cdot [\sigma]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c) \cdot (s - c)}}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0,7 \cdot 302 \cdot (3000 \cdot (32,73 - 4,8))^{1/2} \cdot (32,73 - 4,8) / (0,3342 \cdot 0,9816) = 5,209 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-0,9432} \cdot \cos(0,9432)) / 0,9432 = 0,8178$$

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

$$K_{16} = 1 - \frac{0,65}{1 + (6 \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0,65 / (1 + (6 \cdot 0,1092)^2) \cdot [3,142 / (3 \cdot 2,094)]^{1/2} = 0,6785$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0,6 \cdot 3 \cdot \sqrt{\frac{D}{s - c}} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1} = 1 / [1 + 0,6 \cdot (3000 / (32,73 - 4,8))^{1/2} \cdot 300 / 3000 \cdot 2,094] = 0,626$$

$$\vartheta_1 = - \frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 \cdot 0,8178 / [0,6344 \cdot 0,6785 \cdot 0,626 \cdot \sin(0,5 \cdot 2,094)] = (-1,857)$$

$$\vartheta_{21} = 0$$

$$\vartheta_{2,2} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s - c)} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = (-0,21) \cdot 3000 / (2 \cdot (32,73 - 4,8)) \cdot 1 / (1,25 \cdot 167) = (-0,05404)$$

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

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2 \right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 0,4504 \quad \left| \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \right|$$

$$= 0,4264$$

$$K_1 = \min\{ 0,4504, 0,4264 \} = 0,4264$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_3 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,4264 \cdot 1,25 \cdot 167 = 89,01 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0,9 \cdot [\sigma]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c) \cdot (s - c)}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0,9 \cdot 89,01 \cdot (3000 \cdot (32,73 - 4,8))^{1/2} \cdot (32,73 - 4,8) / (0,6344 \cdot 0,6785 \cdot 0,626) = 2,403 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Условие прочности:

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

$$[F] = 1,813 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$9,819 \cdot 10^5 \text{ Н} \leq 1,813 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Проверка условия устойчивости

Изн.	№ подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
19746.4					

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP	Лист
						55

Эффективное осевое усилие от местных мембранных напряжений:

$$F_e = F \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{D}{(s-c)}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} = 9,819 \cdot 10^5 * 3,142 / 4 * (3000 / (22 - 4,8))^{1/2} * 0,07095 * 0,3063 = 2,213 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

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

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{F_e}{[F]} + \frac{M}{[M]_{уст}} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0,21 / 0,3115 + 2,213 \cdot 10^5 / 2,421 \cdot 10^7 + 2,556 \cdot 10^5 / 1,862 \cdot 10^7 + (9,426 \cdot 10^5 / 5,636 \cdot 10^6)^2 = 0,7249$$

$$0,7249 \leq 1,0$$

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, ξ : 1
Плотность жидкости, $\rho_{ж}$: $1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$
Расчётное внутреннее избыточное давление, действующее в элементе над опорой, p: 0,558 МПа

Изгибающий момент над опорой, M: $1,139 \cdot 10^5 \text{ Н м}$
Опорное усилие, F: $3,642 \cdot 10^5 \text{ Н}$
Поперечное усилие в сечении оболочки над опорой, Q: $2,085 \cdot 10^5 \text{ Н}$

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

Допускаемое наружное давление, [p]: 0,453 МПа
Допускаемый изгибающий момент, $[M]_{уст}$: $2,975 \cdot 10^7 \text{ Н м}$
Допускаемая осевое сжимающее усилие, [F]: $3,848 \cdot 10^7 \text{ Н}$
Допускаемая поперечное усилие, [Q]: $8,847 \cdot 10^6 \text{ Н}$

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

Опора с подкладным листом

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

$$K_{19} = \frac{5}{6 \cdot 3 \cdot \sqrt{\frac{D}{s-c}} \cdot \delta_1} = 5 / [6 * (3000 / (22 - 4,8))^{1/3} * 2,094] = 0,07121$$

$$K_{19} \cdot D + 1,5 \cdot b = 0,07121 * 3000 + 1,5 * 300 = 663,6 \text{ мм}$$

Подпись и дата		Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP	Лист
Изн. № дубл.		Изн. № подл.	19746.4					56

Условие не выполнено, проводятся два расчёта

Расчёт №1:

Подкладной лист рассматривают как седловую опору шириной b_2 с углом охвата δ_2 . Во всех формулах принимают $b = b_2 = 450$ 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:

$$\gamma = 2,83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s-c}{D}} = 2,83 * 1,2 \cdot 10^3 / 3000 * ((22 - 4,8) / 3000)^{1/2} = 0,08571$$

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

$$K_{15} = \min \left\{ 1,0; \frac{0,8 \cdot \sqrt{\gamma + 6 \cdot \gamma}}{\delta_1} \right\} = \min \{ 1,0; (0,8 * 0,08571^{1/2} + 6 * 0,08571) / 2,443 \} = 0,3063$$

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

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

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta_1 = 0,91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s-c)}} = 0,91 * 450 / (3000 * (22 - 4,8))^{1/2} = 1,803$$

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

$$K_{10} = \max \left\{ \frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0,25 \right\} = \max \{ e^{-1,803} * \sin(1,803) / 1,803; 0,25 \} = 0,25$$

$$\Phi_1 = - \frac{0,23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0,23 * 0,07095 * 0,3063 / (0,8514 * 0,25) = (-0,02348)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{\text{мк}} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s-c)} = 4 * 1,139 \cdot 10^5 / (3,142 * 3000^2 * (22 - 4,8)) = 0,9368 \text{ МПа}$$

$$\Phi_{21} = -\bar{\sigma}_{\text{мк}} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = -0,9368 / (1,05 * 272,7) = (-0,003271)$$

$$\Phi_{22} = \left(\frac{p \cdot D}{4 \cdot (s-c)} - \bar{\sigma}_{\text{мк}} \right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = [0,558 * 3000 / (4 * (22 - 4,8)) - 0,9368] / (1 * 272,7) = 0,08579$$

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

$$K_1 = \frac{1 - \Phi_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \Phi_1 \cdot \Phi_2 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \Phi_1 \cdot \Phi_2 \right)^2 + \left(1 - \Phi_2^2 \right) \cdot \Phi_1}} = 1,498 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \Phi_2 = \Phi_{21} \\ \text{при } \Phi_2 = \Phi_{22} \end{array} \right|$$

$$= 1,496$$

$K_1 = \min \{ 1,498, 1,496 \} = 1,496$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

Изн. № подл.	Изн. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата
19746.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
E-10K.00.00.000 PP			
Лист 57			

$$[\sigma]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1,496 \cdot 1,05 \cdot 272,7 = 428,4 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0,7 \cdot [\sigma]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c) \cdot (s - c)}}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0,7 \cdot 428,4 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} \cdot (22 - 4,8) / (0,25 \cdot 0,8514) = 5,505 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-1,803} \cdot \cos(1,803)) / 1,803 = 0,5757$$

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

$$K_{16} = 1 - \frac{0,65}{1 + (\delta \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0,65 / (1 + (6 \cdot 0,08571)^2) \cdot [3,142 / (3 \cdot 2,443)]^{1/2} = 0,6635$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0,6 \cdot \sqrt{\frac{D}{s - c} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1}} = 1 / [1 + 0,6 \cdot (3000 / (22 - 4,8))^{1/3} \cdot 450 / 3000 \cdot 2,443] = 0,4487$$

$$\vartheta_1 = - \frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 \cdot 0,5757 / [0,4249 \cdot 0,6635 \cdot 0,4487 \cdot \sin(0,5 \cdot 2,443)] = (-2,567)$$

$$\vartheta_{21} = 0$$

$$\vartheta_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s - c)} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = 0,558 \cdot 3000 / (2 \cdot (22 - 4,8)) \cdot 1 / (1,05 \cdot 272,7) = 0,1699$$

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

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 0,3423 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{22} \end{array} \right|$$

$$= 0,3998$$

$$K_1 = \min\{0,3423, 0,3998\} = 0,3423$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_3 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,3423 \cdot 1,05 \cdot 272,7 = 98,01 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0,9 \cdot [\sigma]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c) \cdot (s - c)}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0,9 \cdot 98,01 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} \cdot (22 - 4,8) / (0,4249 \cdot 0,6635 \cdot 0,4487) = 2,724 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$s_{\text{эф}} = (s - c) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{s_2}{s - c}\right)^2} = (22 - 4,8) \cdot (1 + (22 / (22 - 4,8))^2)^{1/2} = 27,93 \text{ мм}$$

Расчёт №2:

Подкладной лист рассматривают как усиление стенки сосуда. Во всех формулах принимают $b = 300 \text{ мм}$, $\delta_1 = 120^\circ$ (2,094 рад), $s = s_{\text{эф}} + c = 27,93 + 4,8 = 32,73 \text{ мм}$.

Изн. № подл.	19746.4	Подпись и дата		Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP	
						Лист
						58

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

Параметр, определяемый расстоянием до днища:

$$\gamma = 2.83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s-c}{D}} = 2.83 \cdot 1.2 \cdot 10^3 / 3000 \cdot ((32.73 - 4.8) / 3000)^{1/2} = 0.1092$$

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

$$K_{15} = \min\left\{1.0; \frac{0.8 \cdot \sqrt{\gamma + 6 \cdot \gamma}}{\delta_1}\right\} = \min\{1.0; (0.8 \cdot 0.1092^{1/2} + 6 \cdot 0.1092) / 2.094\} = 0.4391$$

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

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

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta_1 = 0.91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s-c)}} = 0.91 \cdot 300 / (3000 \cdot (32.73 - 4.8))^{1/2} = 0.9432$$

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

$$K_{10} = \max\left\{\frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin \beta_1}{\beta_1}; 0.25\right\} = \max\{e^{-0.9432} \cdot \sin(0.9432) / 0.9432; 0.25\} = 0.3342$$

$$\Phi_1 = -\frac{0.23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0.23 \cdot 0.3464 \cdot 0.4391 / (0.9816 \cdot 0.3342) = (-0.1067)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{\text{мк}} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s-c)} = 4 \cdot 1.139 \cdot 10^5 / (3.142 \cdot 3000^2 \cdot (32.73 - 4.8)) = 0.577 \text{ МПа}$$

$$\Phi_{21} = -\bar{\sigma}_{\text{мк}} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = -0.577 / (1.05 \cdot 272.7) = (-0.002015)$$

$$\Phi_{22} = \left(\frac{p \cdot D}{4 \cdot (s-c)} - \bar{\sigma}_{\text{мк}}\right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = [0.558 \cdot 3000 / (4 \cdot (32.73 - 4.8)) - 0.577] / (1 \cdot 272.7) = 0.05284$$

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

$$K_1 = \frac{1 - \Phi_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \Phi_1 \cdot \Phi_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \Phi_1 \cdot \Phi_2\right)^2 + (1 - \Phi_2^2) \cdot \Phi_1}} = 1.463 \quad \left| \begin{array}{l} \text{при } \Phi_2 = \Phi_{21} \\ \text{при } \Phi_2 = \Phi_{22} \end{array} \right|$$

$$= 1.483$$

$$K_1 = \min\{1.463, 1.483\} = 1.463$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1.463 \cdot 1.05 \cdot 272.7 = 418.8 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0.7 \cdot [\sigma]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s-c) \cdot (s-c)}}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0.7 \cdot 418.8 \cdot (3000 \cdot (32.73 - 4.8))^{1/2} \cdot (32.73 - 4.8) / (0.3342 \cdot 0.9816) = 7.224 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Инв. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Е-10К.00.00.000 РР					Лист
										59
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos \beta_1}{\beta_1} = (1 - e^{-0,9432} \cdot \cos(0,9432)) / 0,9432 = 0,8178$$

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

$$K_{16} = 1 - \frac{0,65}{1 + (\delta \cdot \gamma)^2} \cdot \frac{\pi}{\sqrt{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0,65 / (1 + (6 \cdot 0,1092)^2) \cdot [3,142 / (3 \cdot 2,094)]^{1/2} = 0,6785$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0,6 \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{s-c} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1}} = 1 / [1 + 0,6 \cdot (3000 / (32,73 - 4,8))^{1/3} \cdot 300 / 3000 \cdot 2,094] = 0,626$$

$$\vartheta_1 = - \frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 \cdot 0,8178 / [0,6344 \cdot 0,6785 \cdot 0,626 \cdot \sin(0,5 \cdot 2,094)] = (-1,857)$$

$$\vartheta_{21} = 0$$

$$\vartheta_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s-c)} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot [\sigma]} = 0,558 \cdot 3000 / (2 \cdot (32,73 - 4,8)) \cdot 1 / (1,05 \cdot 272,7) = 0,1047$$

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

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1}} = 0,4504 \quad \left. \begin{array}{l} \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{22} \end{array} \right\}$$

$$= 0,4967$$

$$K_1 = \min\{0,4504, 0,4967\} = 0,4504$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_3 = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,4504 \cdot 1,05 \cdot 272,7 = 129 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0,9 \cdot [\sigma]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s-c)} \cdot (s-c)}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0,9 \cdot 129 \cdot (3000 \cdot (32,73 - 4,8))^{1/2} \cdot (32,73 - 4,8) / (0,6344 \cdot 0,6785 \cdot 0,626) = 3,482 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Условие прочности:

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

$$[F] = 2,724 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$3,642 \cdot 10^5 \text{ Н} \leq 2,724 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Проверка условия устойчивости

Эффективное осевое усилие от местных мембранных напряжений:

$$F_e = F \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{D}{(s-c)}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} = 3,642 \cdot 10^5 \cdot 3,142 / 4 \cdot (3000 / (22 - 4,8))^{1/2} \cdot 0,07095 \cdot 0,3063 = 8,211 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

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

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

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-10K.00.00.000 PP				Лист
				60

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{F_e}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{уст}}} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0 / 0,453 + 8,211 \cdot 10^4 / 3,848 \cdot 10^7 + 1,139 \cdot 10^5 / 2,975 \cdot 10^7 + (2,085 \cdot 10^5 / 8,847 \cdot 10^6)^2 = 0,006518$$

$$0,006518 \leq 1.0$$

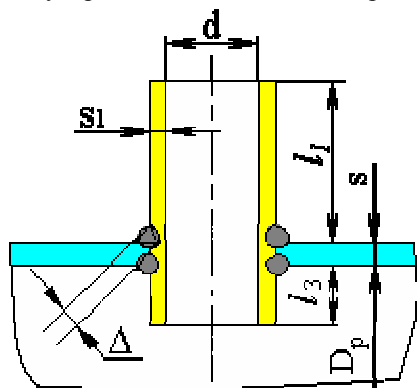
Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Инв. № подл.	Подпись и дата				Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
19746.4							
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP		
					Лист		
					61		

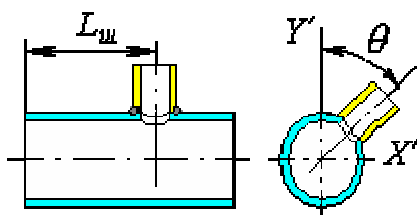
Штуцер МН DN800

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



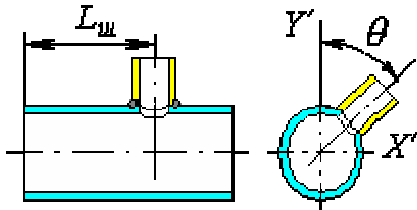
Материал несущего элемента: 09Г2С
Толщина стенки несущего элемента, s: 22 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, с: 4,8 мм
Материал штуцера: 09Г2С
Внутренний диаметр штуцера, d: 800 мм
Толщина стенки штуцера, s₁: 22 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), с_s: 4,8 мм
Длина штуцера, l₁: 3500 мм



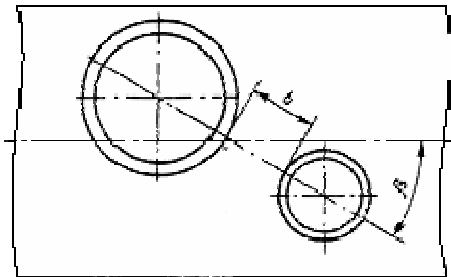
Смещение штуцера, L_ш: 1190 мм
Угол поворота штуцера, θ: 0 °
Длина внутр. части штуцера, l₃: 0 мм
Прибавка на коррозию, с_{s1}: 0 мм
Минимальный размер сварного шва, Δ: 1 мм
Расчётные параметры размещения штуцера:
Ближайший штуцер

Изн. № подл.	Изн. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата	
19746.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-10K.00.00.000 PP				Лист
				62

Материал штуцера:	09Г2С
Внутренний диаметр штуцера, d:	800 мм
Толщина стенки штуцера, s ₁ :	22 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c _s :	4,8 мм
Длина штуцера, l ₁ :	3500 мм



Смещение штуцера, L _ш :	1190 мм
Угол поворота штуцера, ϑ:	0 °
Длина внутр. части штуцера, l ₃ :	0 мм
Прибавка на коррозию, c _{s1} :	0 мм
Минимальный размер сварного шва, Δ:	1 мм
Расчётные параметры размещения штуцера:	
Ближайший штуцер	



Название штуцера: Штуцер LT2 DN100

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 491 мм

Угол β : 180 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$\varphi_1 = 1$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$\varphi = 1$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 3000$ мм

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 120 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,3788 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 120 °C (расчётные условия):

$[\sigma] = 174,5$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 120 °C:

$E = 1,89 \cdot 10^5$ МПа

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 120 °C (расчётные условия):

$[\sigma]_1 = 174,5$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 120 °C:

$E_1 = 1,89 \cdot 10^5$ МПа

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,3788 \cdot (800 + 2 \cdot 4,8) / (2 \cdot 174,5 \cdot 1 - 0,3788) = 0,8797 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 174,5 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) / (800 + 22 + 4,8) = 7,26 \text{ МПа}$$

7,26 МПа \geq 0,3788 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

Изн.	№ подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
	19746.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
E-10K.00.00.000 PP					Лист
					63

$$D_p = D = 3000 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 3,26 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 800 + 2 \cdot 4,8 = 809,6 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((22 - 4,8) / 3,26 - 0,8) \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 2034 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 3500; 1,25 \cdot ((800 + 2 \cdot 4,8) \cdot (22 - 4,8))^{1/2} \} = 147,5 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]}{\sigma} \right\} = \min \{ 1,0, 174,5 / 174,5 \} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((800 + 2 \cdot 4,8) \cdot (22 - 4,8 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 227,2 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 848 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 227,2 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 90,86 \text{ мм}$$

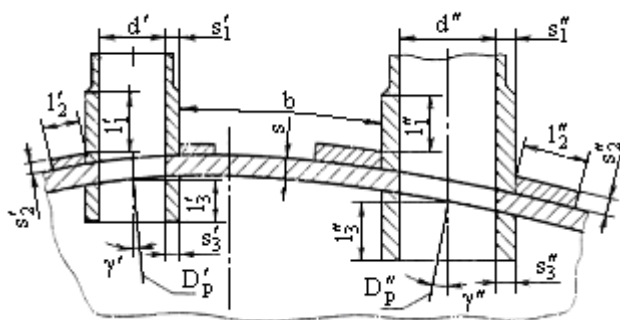
$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0,5 \cdot \frac{d_p - d_{0p}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}}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

$$= \min \{ 1; [1 + (147,5 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (22 - 4,8 - 0) \cdot 1) / (227,2 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0,5 \cdot (809,6 - 90,86) / 227,2 + 1 \cdot (800 + 2 \cdot 4,8) / 3000 \cdot 1 / 1 \cdot 147,5 / 227,2] \} = 0,5982$$

$$= 0,5982$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 \cdot 174,5 \cdot 0,5982 / [3000 + (22 - 4,8) \cdot 0,5982] = 1,193 \text{ МПа}$$

Изн. № подл.	Изн. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата
19746.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
E-10K.00.00.000 PP			
Лист			
64			



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

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} + (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 454,3 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 1,193 \text{ МПа}$

$1,193 \text{ МПа} \geq 0,3788 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (809,6 - 90,86) \cdot 3,26 = 0,001171 \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

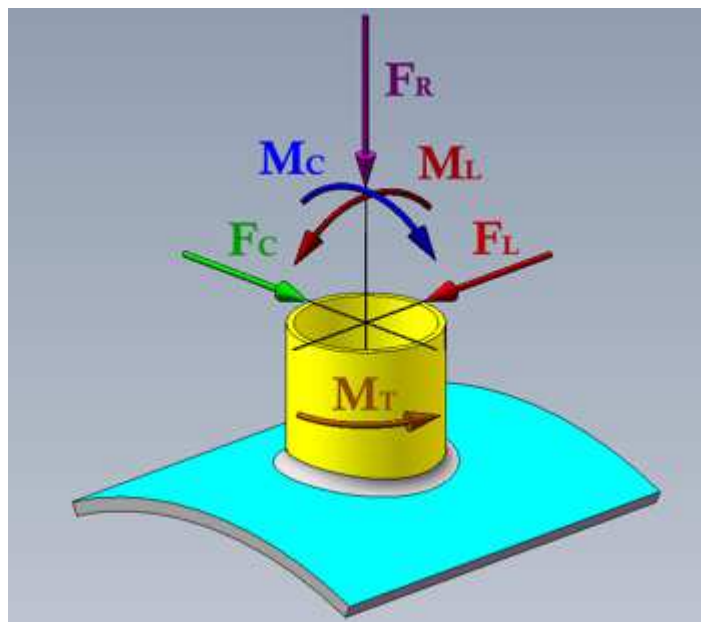
$$= 147,5 \cdot (22 - 0,8797 - 4,8) \cdot 1 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (22 - 4,8 - 0) \cdot 1 + 227,2 \cdot (22 - 3,26 - 4,8)$$

$$= 0,005574 \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,001171 \text{ м}^2 \leq 0,005574 \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

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



Радиальная нагрузка, F_R : $3,096 \cdot 10^4 \text{ Н}$

Окружной момент, M_C : 0 Н м

Продольный момент, M_L : 0 Н м

Крутящий момент, M_T : 0 Н м

Инов. № подл.	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19746.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
			Дата
E-10K.00.00.000 PP			
Лист 65			

$$[F_z] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1.81\} = 174,5 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot \max\{4,052; 1.81\} = 2,092 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \frac{|F_z|}{[F_z]} = |(-3,096 \cdot 10^4) / 2,092 \cdot 10^5| = 0,148$$

Условие прочности: $\Phi_z \leq 1$

0,148 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_x = M_c + F_c \cdot l_1 = 0 + 0 \cdot 3500 = 0 \text{ Н м}$$

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_y = M_L + F_L \cdot l_1 = 0 + 0 \cdot 3500 = 0 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 3,624 + 0,1589 \cdot 3,624^2 + (-0,02142) \cdot 3,624^3 + 0,001035 \cdot 3,624^4 = 6,004$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 3,624$):

$$[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 174,5 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot 826,8 / 4 \cdot \max\{6,004; 4.9\} = 6,406 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 21,53$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 3,624$):

$$[M_y] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 174,5 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot 826,8 / 4 \cdot \max\{21,53; 4.9\} = 2,298 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((0 / 6,406 \cdot 10^4)^2 + (0 / 2,298 \cdot 10^5)^2)^{1/2} = 0$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

0 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right|; \left|\Phi_z\right|; \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} = (\max(|0,3176 / 1 + (-0,148)|; |(-0,148)|; |0,3176 / 1 - 0.2 \cdot (-0,148)|))^2 + 0^2)^{1/2} = 0,3472$$

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

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

0,3472 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = 0,3788 \cdot (800 + 22) / (4 \cdot (22 - 4,8)) + 4 \cdot (0^2 + 0^2)^{1/2} / (3,142 \cdot (800 + 22)^2 \cdot (22 - 4,8)) + 0 / (3,142 \cdot (800 + 22) \cdot (22 - 4,8)) = 4,526 \text{ МПа}$$

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

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

4,526 МПа ≤ 174,5 МПа. **Условие прочности выполнено**

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0 / 7,26 + (0^2 + 0^2)^{1/2} / 1,538 \cdot 10^6 + |(-3,096 \cdot 10^4)| / 5,883 \cdot 10^6 = 0,005262$$

Изн. № подл. 19746.4	Подпись и дата				
	Взам. инв. №				
	Изн. № дубл.				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<div>E-10K.00.00.000 PP</div> <div>Лист 67</div>

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

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

0,005262 ≤ 1.0. **Условие устойчивости выполнено**

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения:

Расчётная температура, Т: 180 °С
Расчётное наружное избыточное давление, р: 0,21 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)):

$[\sigma] = 167$ МПа
Модуль продольной упругости при температуре 180 °С:
 $E = 1,83 \cdot 10^5$ МПа

Свойства материала штуцера

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

$[\sigma]_1 = 167$ МПа
Модуль продольной упругости при температуре 180 °С:
 $E_1 = 1,83 \cdot 10^5$ МПа
Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 - p} = 0,21 \cdot (800 + 2 \cdot 4,8) / (2 \cdot 167 - 0,21) = 0,5094 \text{ мм}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$B_1 = \min \left\{ 1.0, 9.45 \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \sqrt{\frac{d}{100 \cdot (s_1 - c_s)}} \right\} = \min \{ 1.0, 9.45 \cdot 800 / 3500 \cdot (800 / (100 \cdot (22 - 4,8)))^{1/2} \} = 1$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия устойчивости:

$$[p]_e = \frac{20.8 \cdot 10^{-6} E_1}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_1 - c_s)}{d} \right]^{2.5} = 20.8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 800 / (2,4 \cdot 1 \cdot 3500) \cdot (100 \cdot (22 - 4,8) / 800)^{2.5} = 2,457 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия прочности:

$$[p]_n = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + (s_1 - c_s)} = 2 \cdot 167 \cdot (22 - 4,8) / (800 + 22 - 4,8) = 7,03 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_n}{[p]_e} \right)^2}} = 7,03 / (1 + (7,03 / 2,457)^2)^{1/2} = 2,319 \text{ МПа}$$

2,319 МПа ≥ 0,21 МПа
Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**
Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 3000$ мм
Расчётный диаметр отверстия (ось штуцера совпадает с нормалью к поверхности в центре отверстия):

Изн. № подл.	Изн. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата
19746.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
E-10K.00.00.000 PP			Лист 68

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 800 + 2 \cdot 4,8 = 809,6 \text{ мм}$$

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 3500; 1,25 \cdot ((800 + 2 \cdot 4,8) \cdot (22 - 4,8))^{1/2} \} = 147,5 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

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

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{2p} = \min \left\{ l_2; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((800 + 2 \cdot 4,8) \cdot (22 - 4,8 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 227,2 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 848 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 227,2 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{op} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 90,86 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (147,5 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (0 - 2 \cdot 4,8) \cdot 1) / (227,2 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0,5 \cdot (809,6 - 90,86) / 227,2 + 1 \cdot (800 + 2 \cdot 4,8) / 3000 \cdot 147,5 / 227,2] \} = 0,5982$$

$$= 0,5982$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 167 \cdot 0,5982 / [3000 + (22 - 4,8) \cdot 0,5982] = 1,142 \text{ МПа}$$

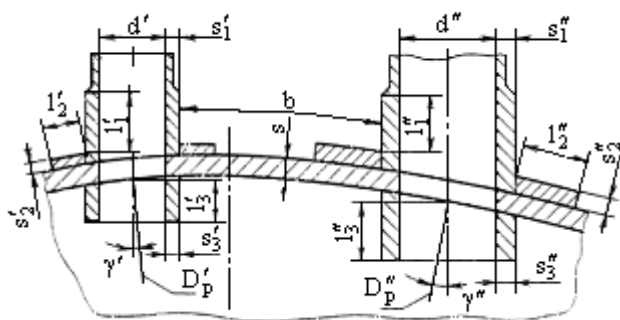
Допускаемое наружное давление:

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_p}{[p]_E} \right)^2}} = 1,142 / (1 + (1,142 / 0,3167)^2)^{1/2} = 0,3052 \text{ МПа}$$

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

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	$\bar{V} = \min \left\{ 1; \frac{l_p \cdot (s - c)}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{l_p}{l_p}} \right\}$ $= \min \{ 1; [1 + (147,5 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (0 - 2 \cdot 4,8) \cdot 1) / (227,2 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0.5 \cdot (809,6 - 90,86) / 227,2 + 1 \cdot (800 + 2 \cdot 4,8) / 3000 \cdot 147,5 / 227,2] = 0,5982 \}$ $= 0,5982$ $[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot \bar{V}} \cdot \bar{V} = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 167 \cdot 0,5982 / [3000 + (22 - 4,8) \cdot 0,5982] = 1,142 \text{ МПа}$ <p>Допускаемое наружное давление:</p> $[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_p}{[p]_E} \right)^2}} = 1,142 / (1 + (1,142 / 0,3167)^2)^{1/2} = 0,3052 \text{ МПа}$ <p>где [P]_Е – допускаемое наружное давление в пределах упругости для элемента, несущего штуцер (см. расчёт элемента “Обечайка цилиндрическая”)</p>

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-10К.00.00.000 РР	Лист
						69



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

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} + (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 454,3 \text{ мм}$$

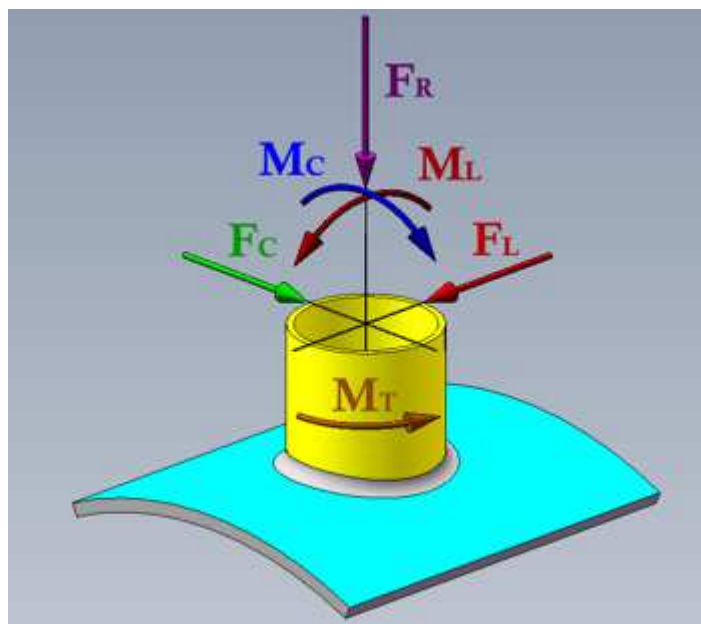
Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 0,3052 \text{ МПа}$

$0,3052 \text{ МПа} \geq 0,21 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

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



Радиальная нагрузка, F_R : $1,775 \cdot 10^4 \text{ Н}$

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:

$$s_s = s - c = 22 - 4,8 = 17,2 \text{ мм}$$

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c = 3000 + 22 + 4,8 = 3027 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_s = 800 + 22 + 4,8 = 826,8 \text{ мм}$$

Подпись и дата

Инов. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инов. № подл.
19746.4

E-10K.00.00.000 PP

Лист

70

Изм. Лист № докум. Подп. Дата

$$M_y = M_L + F_L \cdot l_1 = 0 + 0 \cdot 3500 = 0 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 3,624 + 0,1589 \cdot 3,624^2 + (-0,02142) \cdot 3,624^3 + 0,001035 \cdot 3,624^4 = 6,004$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 3,624$):

$$[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4,9\} = 167 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot 826,8 / 4 \cdot \max\{6,004; 4,9\} = 6,131 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 21,53$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 3,624$):

$$[M_y] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4,9\} = 167 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot 826,8 / 4 \cdot \max\{21,53; 4,9\} = 2,199 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((0 / 6,131 \cdot 10^4)^2 + (0 / 2,199 \cdot 10^5)^2)^{1/2} = 0$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

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

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_x\right|; \left|\Phi_x\right|; \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0,2 \cdot \Phi_x\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} = \left(\left[\max\left(\left|0,6881 / 1 + (-0,08865)\right|; \left|(-0,08865)\right|; \left|0,6881 / 1 - 0,2 \cdot (-0,08865)\right|\right)\right]^2 + 0^2\right)^{1/2} = 0,7058$$

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

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

$0,7058 \leq 1,0$. **Условие прочности выполнено**

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = \frac{(-0,21) \cdot (800 + 22)}{4 \cdot (22 - 4,8)} + \frac{4 \cdot (0^2 + 0^2)^{1/2}}{(3,142 \cdot (800 + 22)^2 \cdot (22 - 4,8))} + \frac{0}{(3,142 \cdot (800 + 22) \cdot (22 - 4,8))} = (-2,509) \text{ МПа}$$

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

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

$(-2,509) \text{ МПа} \leq 167 \text{ МПа}$. **Условие прочности выполнено**

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0,21 / 2,319 + (0^2 + 0^2)^{1/2} / 1,472 \cdot 10^6 + |(-1,775 \cdot 10^4)| / 5,658 \cdot 10^6 = 0,09367$$

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

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

$0,09367 \leq 1,0$. **Условие устойчивости выполнено**

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, Т: 20 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,5284 МПа

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	E-10K.00.00.000 PP					Лист
										72
					Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

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

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

Модуль продольной упругости при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

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

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

Модуль продольной упругости при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,5284 \cdot (800 + 2 \cdot 4,8) / (2 \cdot 272,7 \cdot 1 - 0,5284) = 0,7851 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 272,7 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) / (800 + 22 + 4,8) = 11,35 \text{ МПа}$$

$$11,35 \text{ МПа} \geq 0,5284 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 3000 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 2,909 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 800 + 2 \cdot 4,8 = 809,6 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((22 - 4,8) / 2,909 - 0,8) \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 2323 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 3500; 1,25 \cdot ((800 + 2 \cdot 4,8) \cdot (22 - 4,8))^{1/2} \} = 147,5 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

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

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{2p} = \min \{ l_2; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_2 - c_s - c_{s1})} \} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((800 + 2 \cdot 4,8) \cdot (22 - 4,8 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 227,2 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 848 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	E-10K.00.00.000 PP					Лист
										73
19746.4					Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

$$l_p = L_0 = 227,2 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

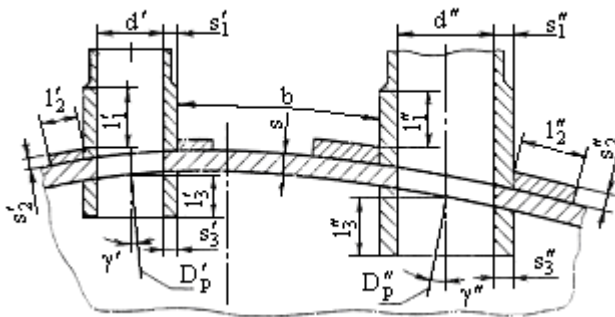
$$d_{op} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 90,86 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (147,5 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (22 - 4,8 - 0) \cdot 1) / (227,2 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0,5 \cdot (809,6 - 90,86) / 227,2 + 1 \cdot (800 + 2 \cdot 4,8) / 3000 \cdot 1 / 1 \cdot 147,5 / 227,2] \} = 0,5982$$

$$= 0,5982$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 \cdot 272,7 \cdot 0,5982 / [3000 + (22 - 4,8) \cdot 0,5982] = 1,864 \text{ МПа}$$



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

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} + (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 454,3 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 1,864 \text{ МПа}$

$$1,864 \text{ МПа} \geq 0,5284 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5(d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (809,6 - 90,86) \cdot 2,909 = 0,001045 \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

$$= 147,5 \cdot (22 - 0,7851 - 4,8) \cdot 1 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (22 - 4,8 - 0) \cdot 1 + 227,2 \cdot (22 - 2,909 - 4,8)$$

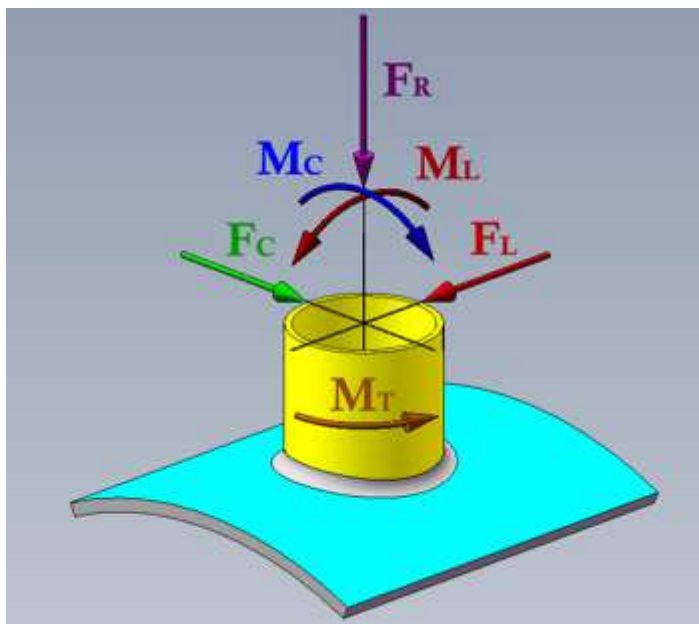
$$= 0,005668 \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,001045 \text{ м}^2 \leq 0,005668 \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	19746.4	Подпись и дата	
Взам. инв. №		Подпись и дата	
Инов. № дубл.		Подпись и дата	
Инов. № подл.	19746.4	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
		Дата	
E-10K.00.00.000 PP			
Лист			
74			

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



Радиальная нагрузка, F_R : $3,546 \cdot 10^4$ 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:

$$s_s = s - c = 22 - 4,8 = 17,2 \text{ мм}$$

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c = 3000 + 22 + 4,8 = 3027 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_s = 800 + 22 + 4,8 = 826,8 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_s}} = 826,8 / (3027 \cdot 17,2)^{1/2} = 3,624$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 491 \text{ мм}$$

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D_c}{2} = 3027 / 2 = 1513 \text{ мм}$$

Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |0,5284 / 1,864| = 0,2834$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

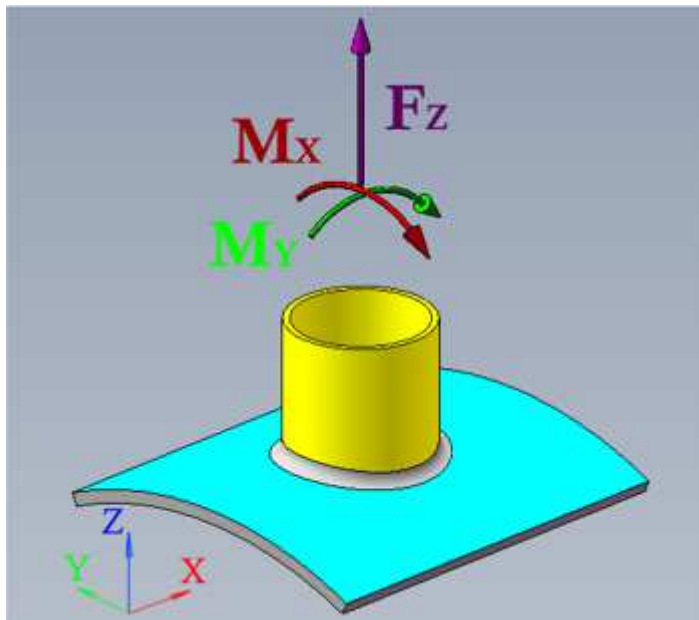
$0,2834 \leq 1,0$. Условие прочности выполнено

Расчетная схема по ГОСТ Р 52857.3-2007

Инов. № подл.	Подпись и дата
19746.4	
Инов. № дубл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Подпись и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

E-10K.00.00.000 PP



Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_z = -F_R = -3,546 \cdot 10^4 \text{ Н} = (-3,546 \cdot 10^4) \text{ Н}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s-c)}} = 826,8 / (3027 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 3,624$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 3,624 + 0,005196 \cdot 3,624^2 + (-0,001406) \cdot 3,624^3 + 0 \cdot 3,624^4 = 4,052$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 3,624$):

$$[F_z] = [\sigma] \cdot (s-c)^2 \cdot \max\{C_1; 1,81\} = 272,7 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot \max\{4,052; 1,81\} = 3,269 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{[F_z]} \right| = |(-3,546 \cdot 10^4) / 3,269 \cdot 10^5| = 0,1085$$

Условие прочности: $\Phi_z \leq 1$

0,1085 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_x = M_c + F_c \cdot l_1 = 0 + 0 \cdot 3500 = 0 \text{ Н м}$$

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_y = M_L + F_L \cdot l_1 = 0 + 0 \cdot 3500 = 0 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 3,624 + 0,1589 \cdot 3,624^2 + (-0,02142) \cdot 3,624^3 + 0,001035 \cdot 3,624^4 = 6,004$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 3,624$):

$$[M_x] = [\sigma] \cdot (s-c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4,9\} = 272,7 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot 826,8 / 4 \cdot \max\{6,004; 4,9\} = 1,001 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 21,53$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 3,624$):

$$[M_y] = [\sigma] \cdot (s-c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4,9\} = 272,7 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot 826,8 / 4 \cdot \max\{21,53; 4,9\} = 3,591 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-10K.00.00.000 PP				Лист
				76

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((0 / 1,001 \cdot 10^5)^2 + (0 / 3,591 \cdot 10^5)^2)^{1/2} = 0$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

$0 \leq 1.0$. Условие прочности выполнено

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right|; \left|\Phi_z\right|; \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} = (\max(|0,2834 / 1 + (-0,1085)|; |(-0,1085)|; |0,2834 / 1 - 0.2 \cdot (-0,1085)|))^2 + 0^2)^{1/2} = 0,3051$$

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

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

$0,3051 \leq 1.0$. Условие прочности выполнено

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = 0,5284 \cdot (800 + 22) / (4 \cdot (22 - 4,8)) + 4 \cdot (0^2 + 0^2)^{1/2} / (3,142 \cdot (800 + 22)^2 \cdot (22 - 4,8)) + 0 / (3,142 \cdot (800 + 22) \cdot (22 - 4,8)) = 6,313 \text{ МПа}$$

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

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

$6,313 \text{ МПа} \leq 272,7 \text{ МПа}$. Условие прочности выполнено

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0 / 11,35 + (0^2 + 0^2)^{1/2} / 2,403 \cdot 10^6 + |(-3,546 \cdot 10^4)| / 8,768 \cdot 10^6 = 0,004044$$

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

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

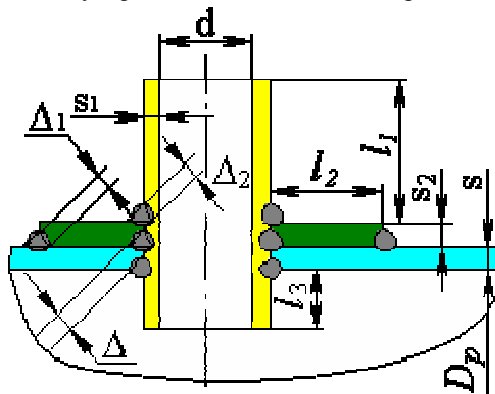
$0,004044 \leq 1.0$. Условие устойчивости выполнено

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-10K.00.00.000 PP				Лист
				77

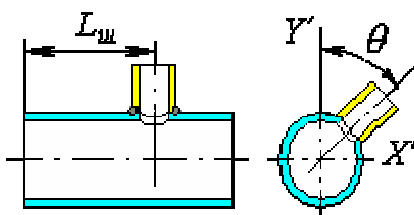
Штуцер А1 DN700

Исходные данные

Элемент:	Штуцер А1 DN700
Условное обозначение (метка)	Штуцер А1
Элемент, несущий штуцер:	Обечайка цилиндрическая
Тип элемента, несущего штуцер:	Обечайка цилиндрическая
Тип штуцера:	Проходящий с накладным кольцом



Материал несущего элемента:	09Г2С
Толщина стенки несущего элемента, s:	22 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, с:	4,8 мм
Материал штуцера:	09Г2С
Внутренний диаметр штуцера, d:	700 мм
Толщина стенки штуцера, s ₁ :	22 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), с _s :	4,8 мм
Длина штуцера, l ₁ :	3510 мм



Смещение штуцера, $L_{шт}$:	2740 мм
Угол поворота штуцера, ϑ :	0 °
Длина внутр. части штуцера, l_3 :	0 мм
Прибавка на коррозию, c_{s1} :	0 мм
Материал кольца:	09Г2С
Ширина кольца, l_2 :	100 мм

Толщина кольца, s_2 : 22 мм

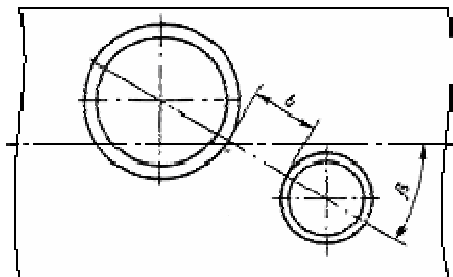
Минимальный размер сварного шва, Δ : 1 мм

Минимальный размер сварного шва, Δ_1 : 1 мм

Минимальный размер сварного шва, Δ_2 : 1 мм

Расчётные параметры размещения штуцера:

Ближайший штуцер



Название штуцера: Штуцер МН DN800

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b : 756 мм

Угол β : 180 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$\phi_1 = 1$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$\phi = 1$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 3000$ мм

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T : 120 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, p : 0,3788 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 120$ °С (расчётные условия):

$[\sigma] = 174,5$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 120 °С:

$E = 1,89 \cdot 10^5$ МПа

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 120$ °С (расчётные условия):

$[\sigma]_1 = 174,5$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 120 °С:

$E_1 = 1,89 \cdot 10^5$ МПа

Свойства материала кольца

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 120$ °С (расчётные условия):

Подпись и дата		Инов. № дубл.		Взам. инв. №		Подпись и дата		Инов. № подл.	19746.4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP				Лист
					79				

$$[\sigma]_2 = 174,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 120 °С:

$$E_2 = 1,89 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \phi_1 - p} = 0,3788 \cdot (700 + 2 \cdot 4,8) / (2 \cdot 174,5 \cdot 1 - 0,3788) = 0,771 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \phi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 174,5 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) / (700 + 22 + 4,8) = 8,259 \text{ МПа}$$

$$8,259 \text{ МПа} \geq 0,3788 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 3000 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 3,26 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 700 + 2 \cdot 4,8 = 709,6 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((22 - 4,8) / 3,26 - 0,8) \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 2034 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 3510; 1,25 \cdot ((700 + 2 \cdot 4,8) \cdot (22 - 4,8))^{1/2} \} = 138,1 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 174,5 / 174,5 \} = 1$$

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

$$L_k = 2448 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 227,2 \text{ мм}$$

Расчётная ширина кольца:

$$l_{2p} = \min \left\{ l_2; \sqrt{D_p \cdot (s_2 + s - c)} \right\} = \min \{ 100; (3000 \cdot (22 + 22 - 4,8))^{1/2} \} = 100 \text{ мм}$$

Для накладного кольца:

$$\chi_2 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 174,5 / 174,5 \} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((700 + 2 \cdot 4,8) \cdot (22 - 4,8 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 227,2 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 90,86 \text{ мм}$$

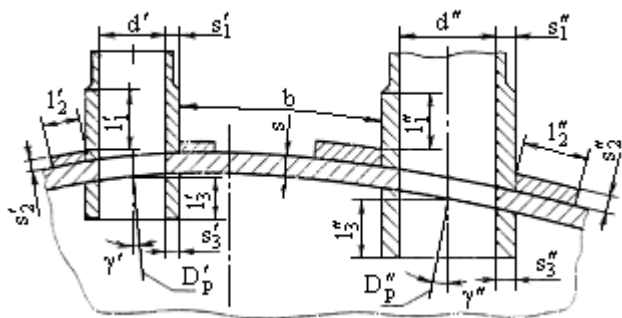
Изн. № подл.	Изн. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата					
19746.4								
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				
					E-10K.00.00.000 PP			
					Лист			
					80			

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

$$= \min \{ 1; [1 + (138,1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 + 100 \cdot 22 \cdot 1 + 0 \cdot (22 - 4,8 - 0) \cdot 1) / (227,2 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0.5 \cdot (709,6 - 90,86) / 227,2 + 1 \cdot (700 + 2 \cdot 4,8) / 3000 \cdot 1 / 1 \cdot 138,1 / 227,2] = 0,8664 \}$$

$$= 0,8664$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 \cdot 174,5 \cdot 0,8664 / [3000 + (22 - 4,8) \cdot 0,8664] = 1,725 \text{ МПа}$$



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер МН DN800 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} + (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 454,3 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 1,725 \text{ МПа}$

$$1,725 \text{ МПа} \geq 0,3788 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0.5(d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0.5 \cdot (709,6 - 90,86) \cdot 3,26 = 0,001008 \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

$$= 138,1 \cdot (22 - 0,771 - 4,8) \cdot 1 + 100 \cdot 22 \cdot 1 + 0 \cdot (22 - 4,8 - 0) \cdot 1 + 227,2 \cdot (22 - 3,26 - 4,8)$$

$$= 0,007635 \text{ м}^2$$

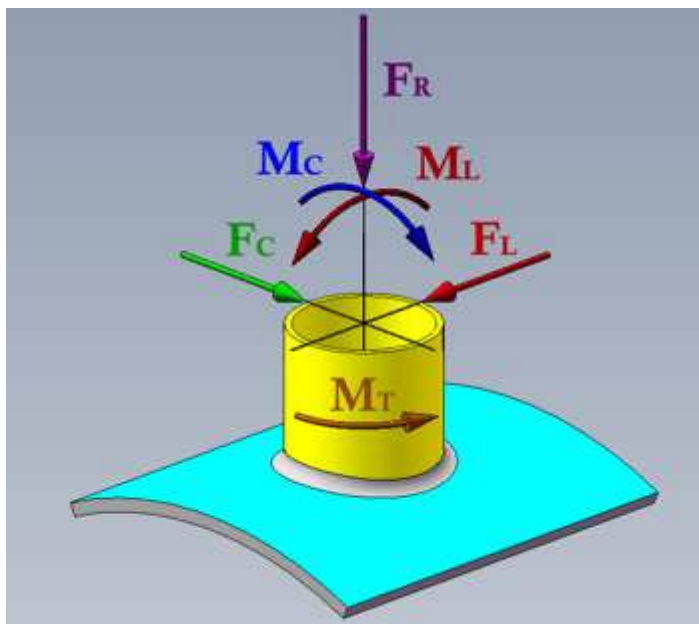
$$A_r = 0,001008 \text{ м}^2 \leq 0,007635 \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	Подпись и дата
19746.4	
Изм.	Лист
№ докум.	Подп.
Дата	

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

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



Радиальная нагрузка, F_R : $2,212 \cdot 10^4$ Н

Окружной момент, M_C : $(-1,287 \cdot 10^4)$ Н м

Продольный момент, M_L : $(-1,302 \cdot 10^4)$ Н м

Крутящий момент, M_T : 0 Н м

Сдвиговая нагрузка, F_C : (-3500) Н

Сдвиговая нагрузка, F_L : (-3100) Н

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c + s_2 = 3000 + 22 + 4,8 + 22 = 3049 \text{ мм}$$

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D_c}{2} = 3049 / 2 = 1524 \text{ мм}$$

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

$$s_3 = s + \min \left\{ s_2 \cdot \frac{l_2}{\sqrt{D_c \cdot (s + s_2)}}; s_2 \right\} \cdot \chi_2 - c = 22 + \min \{ 22 \cdot 100 / (3049 \cdot (22 + 22))^{1/2}; 22 \} \cdot 1 - 4,8 = 23,21 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_s = 700 + 22 + 4,8 = 726,8 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} = 726,8 / (3049 \cdot 23,21)^{1/2} = 2,732$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 656 \text{ мм}$$

Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |0,3788 / 1,725| = 0,2196$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

$0,2196 \leq 1,0$. Условие прочности выполнено

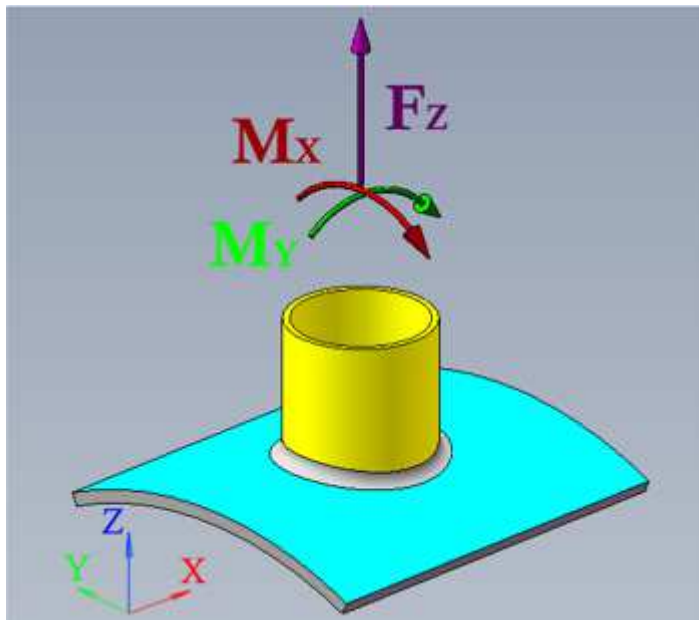
Расчетная схема по ГОСТ Р 52857.3-2007

Инов. № подл.	Подпись и дата
19746.4	
Изм.	Лист
№ докум.	Подп.
Дата	

E-10K.00.00.000 PP

Лист

82



Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_z = -F_R = -2,212 \cdot 10^4 \text{ Н} = (-2,212 \cdot 10^4) \text{ Н}$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 2,732 + 0,005196 \cdot 2,732^2 + (-0,001406) \cdot 2,732^3 + 0 \cdot 2,732^4 = 3,212$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ($\lambda_c = 2,732$):

$$[F_{z1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1,81\} = 174,5 \cdot (22 + 1 \cdot 22 - 4,8)^2 \cdot \max\{3,212; 1,81\} = 8,613 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Наружный диаметр накладного кольца:

$$D_2 = d + 2 \cdot s_1 + 2 \cdot l_2 = 700 + 2 \cdot 22 + 2 \cdot 100 = 944 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{D_2}{\sqrt{D_c \cdot (s - c)}} = 944 / (3049 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 4,122$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 4,122 + 0,005196 \cdot 4,122^2 + (-0,001406) \cdot 4,122^3 + 0 \cdot 4,122^4 = 4,515$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_c = 4,122$):

$$[F_{z2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1,81\} = 174,5 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot \max\{4,515; 1,81\} = 2,331 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при наличии накладного кольца:

$$[F_z] = \min\{[F_{z1}]; [F_{z2}]\} = \min\{8,613 \cdot 10^5; 2,331 \cdot 10^5\} = 2,331 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{[F_z]} \right| = |(-2,212 \cdot 10^4) / 2,331 \cdot 10^5| = 0,09491$$

Условие прочности: $\Phi_z \leq 1$

0,09491 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_x = M_c + F_c \cdot l_1 = (-1,287 \cdot 10^4) + (-3500) \cdot 3510 = (-2,516 \cdot 10^4) \text{ Н м}$$

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_y = M_L + F_L \cdot l_1 = (-1,302 \cdot 10^4) + (-3100) \cdot 3510 = (-2,39 \cdot 10^4) \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 2,732 + 0,1589 \cdot 2,732^2 + (-0,02142) \cdot 2,732^3 + 0,001035 \cdot 2,732^4 = 5,508$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ($\lambda_c = 2,732$):

Подпись и дата		Изн. № дубл.		Взам. инв. №		Подпись и дата		Изн. № подл.	19746.4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP				Лист
									83

$$[M_{x1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 174,5 \cdot (22 + 1 \cdot 22 - 4,8)^2 \cdot 726,8 / 4 \cdot \max\{5,508; 4,9\} = 2,684 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 4,122 + 0,1589 \cdot 4,122^2 + (-0,02142) \cdot 4,122^3 + 0,001035 \cdot 4,122^4 = 6,289$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_c = 4,122$):

$$[M_{x2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{D_2}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 174,5 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot 944 / 4 \cdot \max\{6,289; 4,9\} = 7,661 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

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

$$[M_x] = \min\{[M_{x1}; M_{x2}]\} = \min\{2,684 \cdot 10^5; 7,661 \cdot 10^4\} = 7,661 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)}} = 726,8 / (3049 \cdot (22 + 1 \cdot 22 - 4,8))^{1/2} = 2,102$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 11,84$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ($\lambda_c = 2,102$):

$$[M_{y1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 174,5 \cdot (22 + 1 \cdot 22 - 4,8)^2 \cdot 726,8 / 4 \cdot \max\{11,84; 4,9\} = 5,77 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 24,37$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_c = 4,122$):

$$[M_{y2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{D_2}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 174,5 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot 944 / 4 \cdot \max\{24,37; 4,9\} = 2,969 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

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

$$[M_y] = \min\{[M_{y1}; M_{y2}]\} = \min\{5,77 \cdot 10^5; 2,969 \cdot 10^5\} = 2,969 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = (((-2,516 \cdot 10^4) / 7,661 \cdot 10^4)^2 + ((-2,39 \cdot 10^4) / 2,969 \cdot 10^5)^2)^{1/2} = 0,3381$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

0,3381 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right|; \left|\Phi_z\right|; \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0,2 \cdot \Phi_z\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} = (\left[\max\left(\left|0,2196 / 1 + (-0,09491)\right|; \left|(-0,09491)\right|; \left|0,2196 / 1 - 0,2 \cdot (-0,09491)\right|\right)\right]^2 + 0,3381^2)^{1/2} = 0,4138$$

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

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

0,4138 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = 0,3788 \cdot (700 + 22) / (4 \cdot (22 - 4,8)) + 4 \cdot ((-2,516 \cdot 10^4)^2 + (-2,39 \cdot 10^4)^2)^{1/2} / (3,142 \cdot (700 + 22)^2 \cdot (22 - 4,8)) + 0 / (3,142 \cdot (700 + 22) \cdot (22 - 4,8)) = 8,903 \text{ МПа}$$

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

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

8,903 МПа ≤ 174,5 МПа. **Условие прочности выполнено**

Изн. № подл. 19746.4	Подпись и дата				
	Изн. № дубл.				
	Взам. изн. №				
	Подпись и дата				
	Изн. № подл.				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP
					Лист
					84

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0,259 + ((-2,516 \cdot 10^4)^2 + (-2,39 \cdot 10^4)^2)^{1/2} / 1,182 \cdot 10^6 + |(-2,212 \cdot 10^4)| / 4,561 \cdot 10^6 = 0,03421$$

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

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

0,03421 ≤ 1,0. Условие устойчивости выполнено

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения:

Расчётная температура, Т: 180 °С

Расчётное наружное избыточное давление, р: 0,21 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)):

$[\sigma] = 167$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 180 °С:

$E = 1,83 \cdot 10^5$ МПа

Свойства материала штуцера

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

$[\sigma]_1 = 167$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 180 °С:

$E_1 = 1,83 \cdot 10^5$ МПа

Свойства материала кольца

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

$[\sigma]_2 = 167$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 180 °С:

$E_2 = 1,83 \cdot 10^5$ МПа

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_{\text{ш}} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 - p} = 0,21 \cdot (700 + 2 \cdot 4,8) / (2 \cdot 167 - 0,21) = 0,4464 \text{ мм}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$B_1 = \min \left\{ 1,0, 9,45 \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \sqrt{\frac{d}{100 \cdot (s_1 - c_s)}} \right\} = \min \{ 1,0, 9,45 \cdot 700 / 3510 \cdot (700 / (100 \cdot (22 - 4,8)))^{1/2} \} = 1$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия устойчивости:

$$[p]_u = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E_1}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_1 - c_s)}{d} \right]^{2,5} = 20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 700 / (2,4 \cdot 1 \cdot 3510) \cdot (100 \cdot (22 - 4,8) / 700)^{2,5} = 2,993 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия прочности:

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	ние)): [σ] ₁ = 167 МПа Модуль продольной упругости при температуре 180 °С: E ₁ = 1,83·10 ⁵ МПа		
					Свойства материала кольца		
					Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре Т = 180 °С (расчётные условия (наружное давление)): [σ] ₂ = 167 МПа Модуль продольной упругости при температуре 180 °С: E ₂ = 1,83·10 ⁵ МПа Расчётная толщина стенки штуцера:		
					$s_{\text{ш}} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 - p} = 0,21 \cdot (700 + 2 \cdot 4,8) / (2 \cdot 167 - 0,21) = 0,4464 \text{ мм}$ Допускаемое наружное давление из условия прочности:		
Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	$B_1 = \min \left\{ 1,0, 9,45 \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \sqrt{\frac{d}{100 \cdot (s_1 - c_s)}} \right\} = \min \{ 1,0, 9,45 \cdot 700 / 3510 \cdot (700 / (100 \cdot (22 - 4,8)))^{1/2} \} = 1$ Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия устойчивости:		
					$[p]_e = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E_1}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_1 - c_s)}{d} \right]^{2,5} = 20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 700 / (2,4 \cdot 1 \cdot 3510) \cdot (100 \cdot (22 - 4,8) / 700)^{2,5} = 2,993 \text{ МПа}$ Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия прочности:		
					E-10K.00.00.000 PP		Лист
							85
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			

$$[p]_{\pi} = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + (s_1 - c_s)} = 2 \cdot 167 \cdot (22 - 4,8) / (700 + 22 - 4,8) = 8,01 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\pi}}{[p]_E}\right)^2}} = 8,01 / (1 + (8,01 / 2,993)^2)^{1/2} = 2,804 \text{ МПа}$$

2,804 МПа ≥ 0,21 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 3000 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 700 + 2 \cdot 4,8 = 709,6 \text{ мм}$$

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 3510; 1,25 \cdot ((700 + 2 \cdot 4,8) \cdot (22 - 4,8))^{1/2} \} = 138,1 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

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

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

$$L_k = 2448 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 227,2 \text{ мм}$$

Расчётная ширина кольца:

$$l_{2p} = \min \left\{ l_2; \sqrt{D_p \cdot (s_2 + s - c)} \right\} = \min \{ 100; (3000 \cdot (22 + 22 - 4,8))^{1/2} \} = 100 \text{ мм}$$

Для накладного кольца:

$$\chi_2 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 167 / 167 \} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((700 + 2 \cdot 4,8) \cdot (22 - 4,8 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 227,2 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{op} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 90,86 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (138,1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 + 100 \cdot 22 \cdot 1 + 0 \cdot (0 - 2 \cdot 4,8) \cdot 1) / (227,2 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0,5 \cdot (709,6 - 90,86) / 227,2 + 1 \cdot (700 + 2 \cdot 4,8) / 3000 \cdot 138,1 / 227,2] \} = 0,8664$$

$$= 0,8664$$

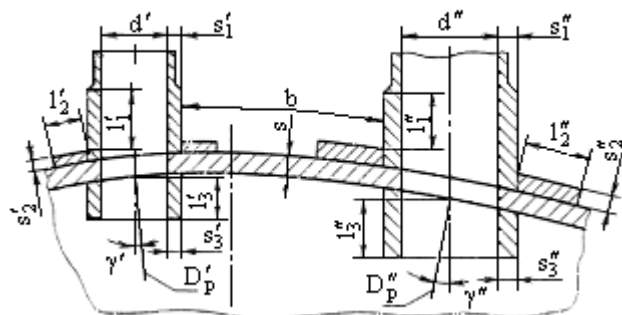
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата					
19746.4									
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата					
					E-10K.00.00.000 PP				
					Лист				
					86				

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 * 1 * (22 - 4,8) * 167 * 0,8664 / [3000 + (22 - 4,8) * 0,8664] = 1,651 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление:

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_p}{[p]_E} \right)^2}} = 1,651 / (1 + (1,651 / 0,3167)^2)^{1/2} = 0,3111 \text{ МПа}$$

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



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер МН DN800 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (3000 * (22 - 4,8))^{1/2} + (3000 * (22 - 4,8))^{1/2} = 454,3 \text{ мм}$$

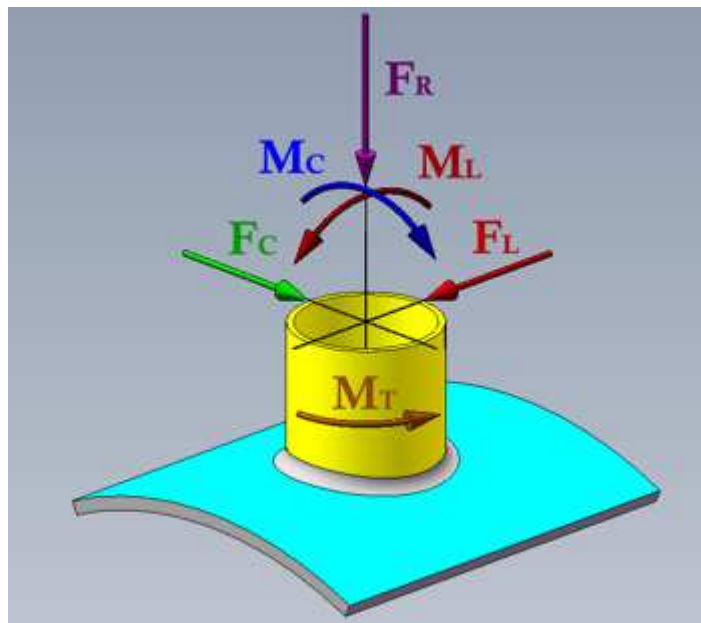
Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 0,3111 \text{ МПа}$

$0,3111 \text{ МПа} \geq 0,21 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

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



Радиальная нагрузка, F_R : $1,194 \cdot 10^4 \text{ Н}$

Окружной момент, M_C : $(-1,287 \cdot 10^4) \text{ Н м}$

Продольный момент, M_L : $(-1,302 \cdot 10^4) \text{ Н м}$

Крутящий момент, M_T : 0 Н м

Инов. № подл.	Подпись и дата
19746.4	
Взам. инв. №	Инов. № дубл.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

E-10K.00.00.000 PP

Лист

87

Сдвиговая нагрузка, F_C : (-3500) Н

Сдвиговая нагрузка, F_L : (-3100) Н

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c + s_2 = 3000 + 22 + 4,8 + 22 = 3049 \text{ мм}$$

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D_c}{2} = 3049 / 2 = 1524 \text{ мм}$$

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

$$s_3 = s + \min \left\{ s_2 \cdot \frac{l_2}{\sqrt{D_c \cdot (s + s_2)}}; s_2 \right\} \cdot \chi_2 - c = 22 + \min \{ 22 \cdot 100 / (3049 \cdot (22 + 22))^{1/2}; 22 \} \cdot 1 - 4,8 = 23,21 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_s = 700 + 22 + 4,8 = 726,8 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} = 726,8 / (3049 \cdot 23,21)^{1/2} = 2,732$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 656 \text{ мм}$$

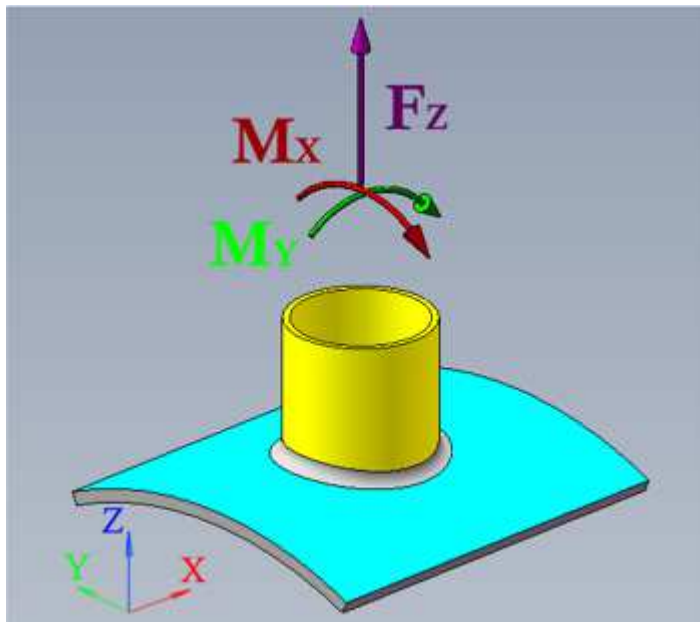
Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |(-0,21) / 0,3111| = 0,6751$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

$0,6751 \leq 1,0$. Условие прочности выполнено

Расчетная схема по ГОСТ Р 52857.3-2007



Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_z = -F_R = -1,194 \cdot 10^4 \text{ Н} = (-1,194 \cdot 10^4) \text{ Н}$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 2,732 + 0,005196 \cdot 2,732^2 + (-0,001406) \cdot 2,732^3 + 0 \cdot 2,732^4 = 3,212$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ($\lambda_c = 2,732$):

$$[F_{z1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \max \{ C_1; 1,81 \} = 167 \cdot (22 + 1 \cdot 22 - 4,8)^2 \cdot \max \{ 3,212; 1,81 \} = 8,243 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Инов. № подл.	19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
E-10K.00.00.000 PP					Лист
					88

Наружный диаметр накладного кольца:

$$D_2 = d + 2 \cdot s_1 + 2 \cdot l_2 = 700 + 2 \cdot 22 + 2 \cdot 100 = 944 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{D_2}{\sqrt{D_c \cdot (s - c)}} = 944 / (3049 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 4,122$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 4,122 + 0,005196 \cdot 4,122^2 + (-0,001406) \cdot 4,122^3 + 0 \cdot 4,122^4 = 4,515$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_c = 4,122$):

$$[F_{x2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1,81\} = 167 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot \max\{4,515; 1,81\} = 2,231 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при наличии накладного кольца:

$$[F_x] = \min\{[F_{x1}]; [F_{x2}]\} = \min\{8,243 \cdot 10^5; 2,231 \cdot 10^5\} = 2,231 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_x = \left| \frac{F_x}{[F_x]} \right| = |(-1,194 \cdot 10^4) / 2,231 \cdot 10^5| = 0,05352$$

Условие прочности: $\Phi_x \leq 1$

0,05352 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_x = M_c + F_c \cdot l_1 = (-1,287 \cdot 10^4) + (-3500) \cdot 3510 = (-2,515 \cdot 10^4) \text{ Н м}$$

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_y = M_L + F_L \cdot l_1 = (-1,302 \cdot 10^4) + (-3100) \cdot 3510 = (-2,39 \cdot 10^4) \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 2,732 + 0,1589 \cdot 2,732^2 + (-0,02142) \cdot 2,732^3 + 0,001035 \cdot 2,732^4 = 5,508$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ($\lambda_c = 2,732$):

$$[M_{x1}] = [\sigma] \cdot (s + \lambda_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4,9\} = 167 \cdot (22 + 1 \cdot 22 - 4,8)^2 \cdot 726,8 / 4 \cdot \max\{5,508; 4,9\} = 2,568 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 4,122 + 0,1589 \cdot 4,122^2 + (-0,02142) \cdot 4,122^3 + 0,001035 \cdot 4,122^4 = 6,289$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_c = 4,122$):

$$[M_{x2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{D_2}{4} \cdot \max\{C_2; 4,9\} = 167 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot 944 / 4 \cdot \max\{6,289; 4,9\} = 7,332 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

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

$$[M_x] = \min\{[M_{x1}]; [M_{x2}]\} = \min\{2,568 \cdot 10^5; 7,332 \cdot 10^4\} = 7,332 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s + \lambda_2 \cdot s_2 - c)}} = 726,8 / (3049 \cdot (22 + 1 \cdot 22 - 4,8))^{1/2} = 2,102$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 11,84$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ($\lambda_c = 2,102$):

$$[M_{y1}] = [\sigma] \cdot (s + \lambda_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4,9\} = 167 \cdot (22 + 1 \cdot 22 - 4,8)^2 \cdot 726,8 / 4 \cdot \max\{11,84; 4,9\} = 5,522 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 24,37$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_c = 4,122$):

$$[M_{y2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{D_2}{4} \cdot \max\{C_3; 4,9\} = 167 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot 944 / 4 \cdot \max\{24,37; 4,9\} = 2,842 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

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

Изн. № подл.	Подпись и дата
19746.4	
Взам. инв. №	Изн. № дубл.
Подпись и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP	Лист
						89

$$[M_y] = \min\{[M_{y1}; M_{y2}\} = \min\{5,522 \cdot 10^5; 2,842 \cdot 10^5\} = 2,842 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = (((-2,515 \cdot 10^4) / 7,332 \cdot 10^4)^2 + ((-2,39 \cdot 10^4) / 2,842 \cdot 10^5)^2)^{1/2} = 0,3532$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

0,3532 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right|; \left|\Phi_z\right|; \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0,2 \cdot \Phi_z\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} = ([\max(|0,6751 / 1 + (-0,05352)|; |(-0,05352)|; |0,6751 / 1 - 0,2 \cdot (-0,05352)|)]^2 + 0,3532^2)^{1/2} = 0,7714$$

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

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

0,7714 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = (-0,21) \cdot (700 + 22) / (4 \cdot (22 - 4,8)) + 4 \cdot ((-2,515 \cdot 10^4)^2 + (-2,39 \cdot 10^4)^2)^{1/2} / (3,142 \cdot (700 + 22)^2 \cdot (22 - 4,8)) + 0 / (3,142 \cdot (700 + 22) \cdot (22 - 4,8)) = 2,724 \text{ МПа}$$

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

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

2,724 МПа ≤ 167 МПа. **Условие прочности выполнено**

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0,21 / 2,804 + ((-2,515 \cdot 10^4)^2 + (-2,39 \cdot 10^4)^2)^{1/2} / 1,131 \cdot 10^6 + |(-1,194 \cdot 10^4)| / 4,393 \cdot 10^6 = 0,1083$$

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

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

0,1083 ≤ 1.0. **Условие устойчивости выполнено**

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, Т: 20 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,5284 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

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

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

Модуль продольной упругости при температуре 20 °С:

$$E = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

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

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

Изн. № подл. 19746.4	Подпись и дата				
	Взам. инв. №				
	Изн. № дубл.				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
E-10K.00.00.000 PP					Лист
					90

Модуль продольной упругости при температуре 20 °С:

$E_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала кольца

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

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

Модуль продольной упругости при температуре 20 °С:

$E_2 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,5284 \cdot (700 + 2 \cdot 4,8) / (2 \cdot 272,7 \cdot 1 - 0,5284) = 0,6881 \text{ мм}$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 272,7 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) / (700 + 22 + 4,8) = 12,91 \text{ МПа}$

$12,91 \text{ МПа} \geq 0,5284 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 3000 \text{ мм}$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$s_p = 2,909 \text{ мм}$

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

$d_p = d + 2 \cdot c_s = 700 + 2 \cdot 4,8 = 709,6 \text{ мм}$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((22 - 4,8) / 2,909 - 0,8) \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 2323 \text{ мм}$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$l_{1p} = \min \{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 3510; 1,25 \cdot ((700 + 2 \cdot 4,8) \cdot (22 - 4,8))^{1/2} \} = 138,1 \text{ мм}$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

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

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

$L_k = 2448 \text{ мм}$

Ширина зоны укрепления:

$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 227,2 \text{ мм}$

Расчётная ширина кольца:

$l_{2p} = \min \{ l_2; \sqrt{D_p \cdot (s_2 + s - c)} \} = \min \{ 100; (3000 \cdot (22 + 22 - 4,8))^{1/2} \} = 100 \text{ мм}$

Для накладного кольца:

$\chi_2 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 272,7 / 272,7 \} = 1$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$l_{3p} = \min \{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((700 + 2 \cdot 4,8) \cdot (22 - 4,8 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$

Расчётная ширина зоны укрепления:

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	E-10K.00.00.000 PP					Лист
										91
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

$$l_p = L_0 = 227,2 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

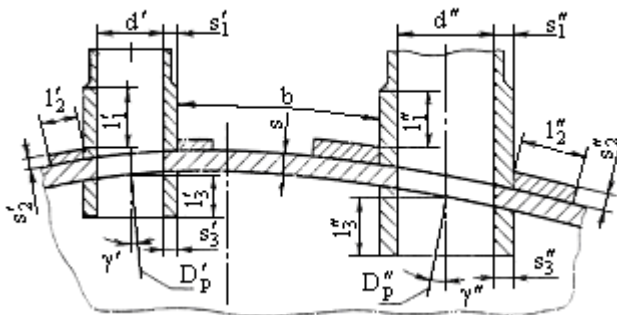
$$d_{op} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 90,86 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (138,1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 + 100 \cdot 22 \cdot 1 + 0 \cdot (22 - 4,8 - 0) \cdot 1) / (227,2 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0,5 \cdot (709,6 - 90,86) / 227,2 + 1 \cdot (700 + 2 \cdot 4,8) / 3000 \cdot 1 / 1 \cdot 138,1 / 227,2] = 0,8664 \}$$

$$= 0,8664$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 \cdot 272,7 \cdot 0,8664 / [3000 + (22 - 4,8) \cdot 0,8664] = 2,696 \text{ МПа}$$



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер МН DN800 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} + (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 454,3 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 2,696 \text{ МПа}$

$$2,696 \text{ МПа} \geq 0,5284 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5(d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (709,6 - 90,86) \cdot 2,909 = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

$$= 138,1 \cdot (22 - 0,6881 - 4,8) \cdot 1 + 100 \cdot 22 \cdot 1 + 0 \cdot (22 - 4,8 - 0) \cdot 1 + 227,2 \cdot (22 - 2,909 - 4,8)$$

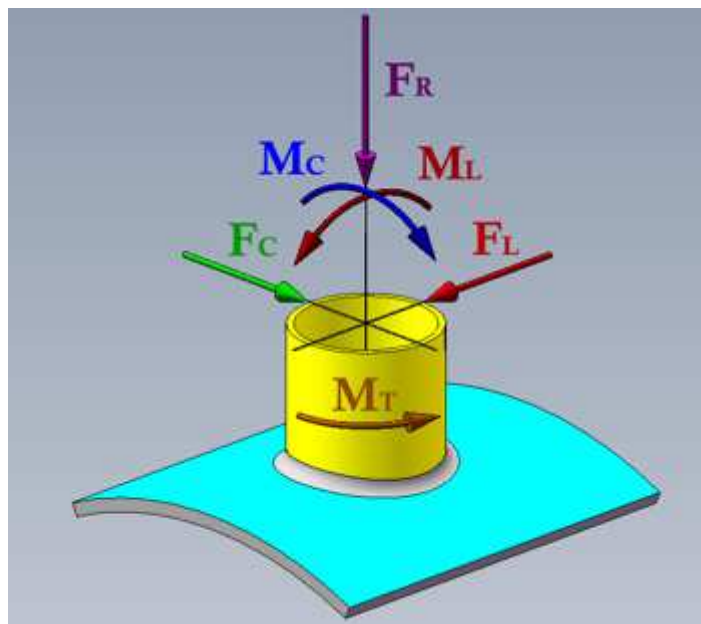
$$= 0,007727 \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \leq 0,007727 \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19746.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
E-10K.00.00.000 PP			
Лист			
92			

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



Радиальная нагрузка, F_R : $2,952 \cdot 10^4$ 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

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c + s_2 = 3000 + 22 + 4,8 + 22 = 3049 \text{ мм}$$

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D_c}{2} = 3049 / 2 = 1524 \text{ мм}$$

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

$$s_3 = s + \min \left\{ s_2 \cdot \frac{l_2}{\sqrt{D_c \cdot (s + s_2)}}; s_2 \right\} \cdot \chi_2 - c = 22 + \min \{ 22 * 100 / (3049 * (22 + 22))^{1/2}; 22 \} * 1 - 4,8 = 23,21 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_s = 700 + 22 + 4,8 = 726,8 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} = 726,8 / (3049 * 23,21)^{1/2} = 2,732$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 656 \text{ мм}$$

Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |0,5284 / 2,696| = 0,196$$

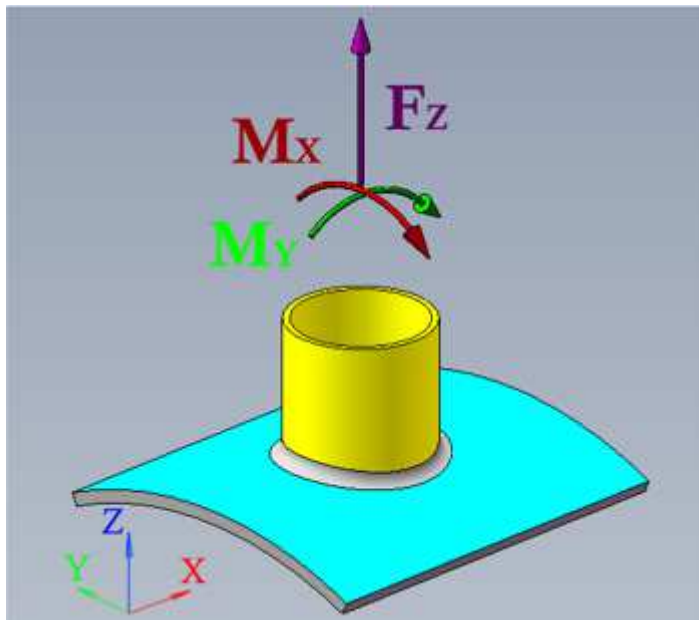
Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

0,196 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Расчетная схема по ГОСТ Р 52857.3-2007

Инов. № подл.	Подпись и дата
19746.4	
Изм.	Лист
№ докум.	Подп.
Дата	

E-10K.00.00.000 PP



Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_z = -F_R = -2,952 \cdot 10^4 \quad = (-2,952 \cdot 10^4) \text{ Н}$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 2,732 + 0,005196 \cdot 2,732^2 + (-0,001406) \cdot 2,732^3 + 0 \cdot 2,732^4 = 3,212$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ($\lambda_c = 2,732$):

$$[F_{z1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1,81\} = 272,7 \cdot (22 + 1 \cdot 22 - 4,8)^2 \cdot \max\{3,212; 1,81\} = 1,346 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Наружный диаметр накладного кольца:

$$D_2 = d + 2 \cdot s_1 + 2 \cdot l_2 = 700 + 2 \cdot 22 + 2 \cdot 100 = 944 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{D_2}{\sqrt{D_c \cdot (s - c)}} = 944 / (3049 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 4,122$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 4,122 + 0,005196 \cdot 4,122^2 + (-0,001406) \cdot 4,122^3 + 0 \cdot 4,122^4 = 4,515$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_c = 4,122$):

$$[F_{z2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1,81\} = 272,7 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot \max\{4,515; 1,81\} = 3,643 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при наличии накладного кольца:

$$[F_z] = \min\{[F_{z1}; F_{z2}]\} = \min\{1,346 \cdot 10^6; 3,643 \cdot 10^5\} = 3,643 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{[F_z]} \right| = |(-2,952 \cdot 10^4) / 3,643 \cdot 10^5| = 0,08104$$

Условие прочности: $\Phi_z \leq 1$

0,08104 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_x = M_c + F_c \cdot l_1 = 0 + 0 \cdot 3510 = 0 \text{ Н м}$$

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_y = M_L + F_L \cdot l_1 = 0 + 0 \cdot 3510 = 0 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 2,732 + 0,1589 \cdot 2,732^2 + (-0,02142) \cdot 2,732^3 + 0,001035 \cdot 2,732^4 = 5,508$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ($\lambda_c = 2,732$):

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-10K.00.00.000 PP				Лист
				94

$$[M_{x1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 272,7 * (22 + 1 * 22 - 4,8)^2 * 726,8 / 4 * \max\{5,508; 4,9\} = 4,194 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 * 4,122 + 0,1589 * 4,122^2 + (-0,02142) * 4,122^3 + 0,001035 * 4,122^4 = 6,289$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_c = 4,122$):

$$[M_{x2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{D_2}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 272,7 * (22 - 4,8)^2 * 944 / 4 * \max\{6,289; 4,9\} = 1,197 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

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

$$[M_x] = \min\{[M_{x1}; M_{x2}]\} = \min\{4,194 \cdot 10^5; 1,197 \cdot 10^5\} = 1,197 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)}} = 726,8 / (3049 * (22 + 1 * 22 - 4,8))^{1/2} = 2,102$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 11,84$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ($\lambda_c = 2,102$):

$$[M_{y1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 272,7 * (22 + 1 * 22 - 4,8)^2 * 726,8 / 4 * \max\{11,84; 4,9\} = 9,018 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 24,37$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ($\lambda_c = 4,122$):

$$[M_{y2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{D_2}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 272,7 * (22 - 4,8)^2 * 944 / 4 * \max\{24,37; 4,9\} = 4,641 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

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

$$[M_y] = \min\{[M_{y1}; M_{y2}]\} = \min\{9,018 \cdot 10^5; 4,641 \cdot 10^5\} = 4,641 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((0 / 1,197 \cdot 10^5)^2 + (0 / 4,641 \cdot 10^5)^2)^{1/2} = 0$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

0 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right|; \left|\Phi_z\right|; \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} = (\left[\max\left(\left|0,196 / 1 + (-0,08104)\right|; \left|(-0,08104)\right|; \left|0,196 / 1 - 0.2 * (-0,08104)\right|\right)\right]^2 + 0^2)^{1/2} = 0,2122$$

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

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

0,2122 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = 0,5284 * (700 + 22) / (4 * (22 - 4,8)) + 4 * (0^2 + 0^2)^{1/2} / (3,142 * (700 + 22)^2 * (22 - 4,8)) + 0 / (3,142 * (700 + 22) * (22 - 4,8)) = 5,545 \text{ МПа}$$

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

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

5,545 МПа ≤ 272,7 МПа. **Условие прочности выполнено**

Изн. № подл. 19746.4	Подпись и дата				
	Изн. № дубл.				
	Взам. изн. №				
	Подпись и дата				
	Изн. № подл.				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<div>E-10K.00.00.000 PP</div> <div>Лист 95</div>

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0 / 12,91 + (0^2 + 0^2)^{1/2} / 1,847 \cdot 10^6 + |(-2,952 \cdot 10^4)| / 6,705 \cdot 10^6 = 0,004403$$

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

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

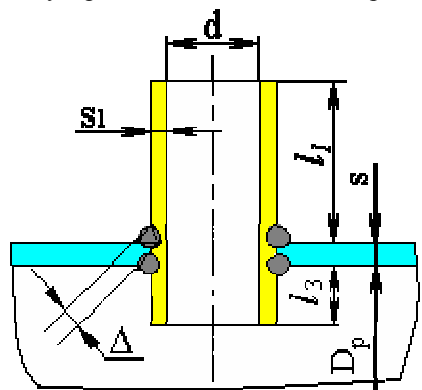
$0,004403 \leq 1.0$. Условие устойчивости выполнено

Инв. № подл. 19746.4	Подпись и дата		Взам. инв. №		Инв. № дубл.		Подпись и дата		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP				Лист
									96

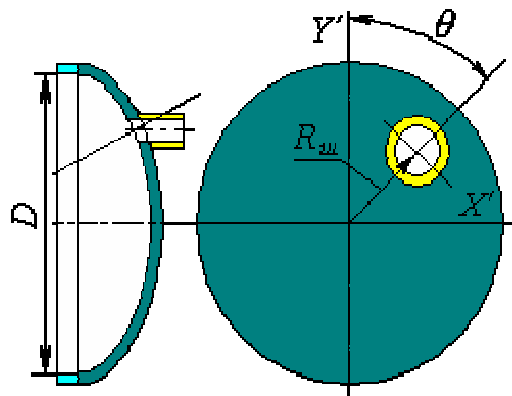
Штуцер I1 DN150

Исходные данные

Элемент: Штуцер I1 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: 22 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, с: 8,1 мм
Материал штуцера: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281
Внутренний диаметр штуцера, d: 144 мм
Толщина стенки штуцера, s₁: 12 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), с_s: 5,8 мм
Длина штуцера, l₁: 140 мм



Смещение штуцера, R_ш: 1100 мм
Угол поворота штуцера, ϑ : 0 °
Полученный угол наклона штуцера, γ : (-27,94) °
Длина внутр. части штуцера, l₃: 0 мм
Прибавка на коррозию, с_{s1}: 0 мм
Минимальный размер сварного шва, Δ : 1 мм

Исх. № подл.	Исх. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата
19746.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
E-10K.00.00.000 PP			Лист 97

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s-c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = 2 \cdot ((22-8,1)/2,541 - 0,8) \cdot (4635 \cdot (22-8,1))^{1/2} = 2371 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d+2 \cdot c_s) \cdot (s_1-c_s)} \right\} = \min \{ 140; 1,25 \cdot ((144+2 \cdot 5,8) \cdot (12-5,8))^{1/2} \} = 38,82 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma_1]}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 157,5 / 174,5 \} = 0,9026$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

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

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = (4635 \cdot (22-8,1))^{1/2} = 253,8 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 253,8 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{op} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = 0,4 \cdot (4635 \cdot (22-8,1))^{1/2} = 101,5 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (38,82 \cdot (12-5,8) \cdot 0,9026 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (12-5,8-0) \cdot 0,9026) / (253,8 \cdot (22-8,1))] / [1 + 0,5 \cdot (176,8-101,5) / 253,8 + 2 \cdot (144 + 2 \cdot 5,8) / 4635 \cdot 1 / 1 \cdot 38,82 / 253,8] \} = 0,9163$$

$$= 0,9163$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s-c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s-c) \cdot V} = 2 \cdot 2 \cdot (22-8,1) \cdot 1 \cdot 174,5 \cdot 0,9163 / [4635 + (22-8,1) \cdot 0,9163] = 1,913 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление $[p] = 1,913 \text{ МПа}$

$$1,913 \text{ МПа} \geq 0,3824 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_T = 0,5(d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (176,8 - 101,5) \cdot 2,541 = 0,9561 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

$$= 38,82 \cdot (12 - 0,1891 - 5,8) \cdot 0,9026 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (12 - 5,8 - 0) \cdot 0,9026 + 253,8 \cdot (22 - 2,541 - 8,1)$$

$$= 0,003094 \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,9561 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \leq 0,003094 \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Расчет на прочность по МКЭ

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP

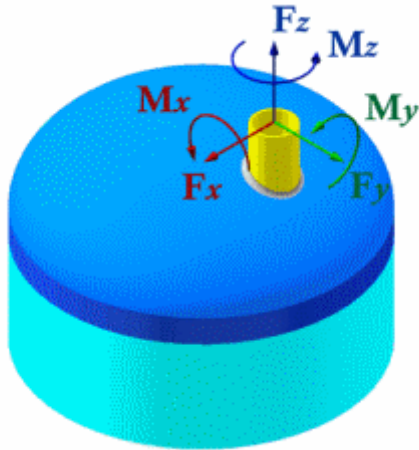
Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, Т: 120 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,35 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
4000	4000	5700	2900	2900	4100

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 120 °С:

$$[s] = \frac{[\sigma]_s}{K_m} = 174,5 / 1,3 = 134,2 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 120 °С:

$$E = 1,89 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Номинальные допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре 120 °С:

$$[s]_1 = \frac{[\sigma]_s}{K_m} = 157,5 / 1,3 = 121,2 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 120 °С:

$$E_1 = 1,89 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Подпись и дата

Инов. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инов. № подл.
19746.4

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

E-10K.00.00.000 PP

Лист

100

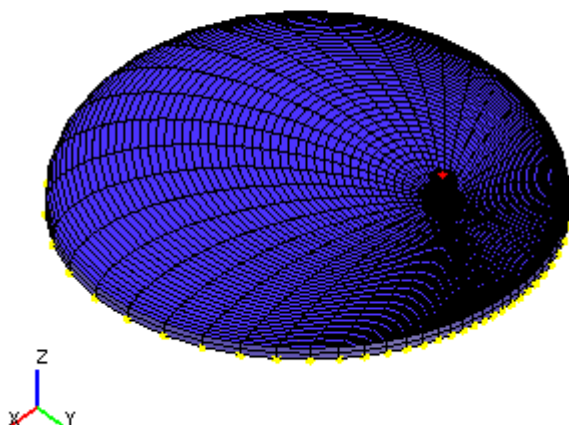


Рис. 1. Конечно-элементная модель узла врезки

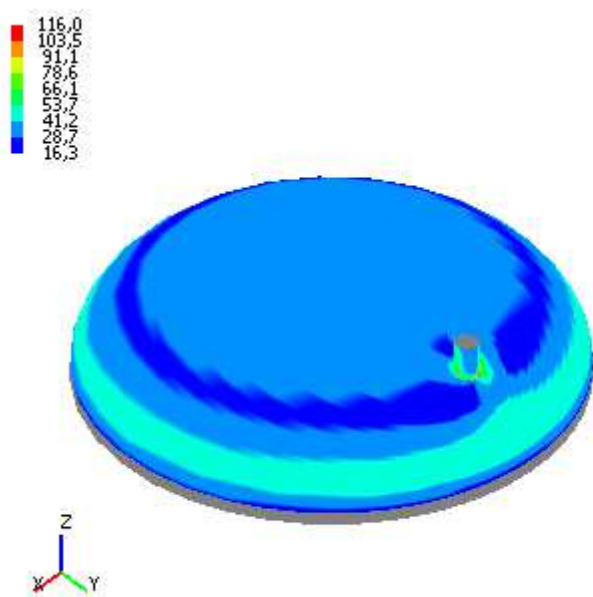


Рис. 2. Эквивалентные мембранные напряжения от совместного действия сил и давления, МПа.
Заключение:

Для несущего элемента $\sigma_{\text{max}} = 82,41 \text{ МПа} \leq 1.5[s] = 201,5 \text{ МПа}$.
Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Для штуцера $\sigma_{\text{max}} = 116 \text{ МПа} \leq 1.5[s]_1 = 181,8 \text{ МПа}$.
Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	E-10K.00.00.000 PP					Лист
										101
19746.4					Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

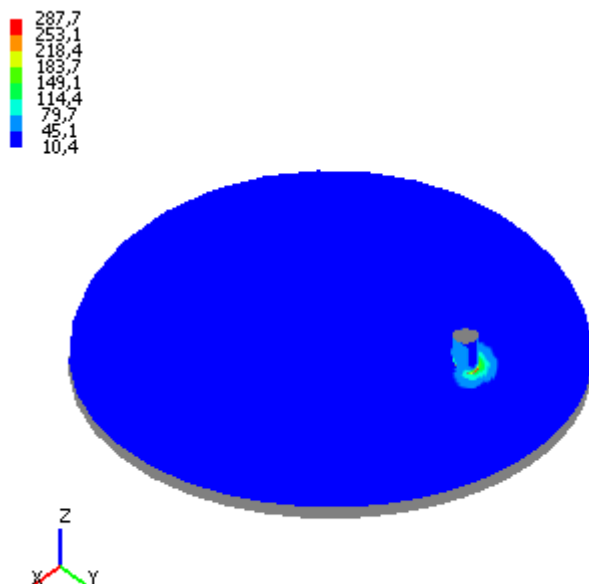


Рис. 3. Общие (мембранные и изгибные) напряжения на внешней поверхности, МПа.

Заключение:

Для несущего элемента $\sigma_{mb\ max} = 159,4\ \text{МПа} \leq 3[s] = 402,9\ \text{МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Для штуцера $\sigma_{mb\ max} = 287,7\ \text{МПа} \leq 3[s]_1 = 363,7\ \text{МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

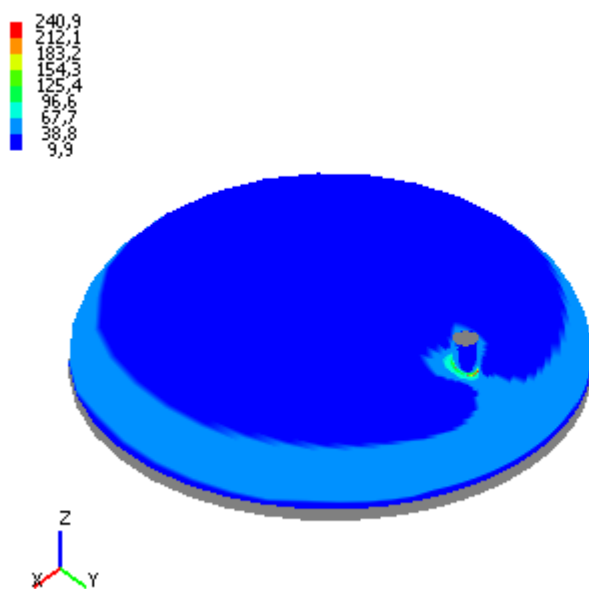


Рис. 4. Общие (мембранные и изгибные) напряжения на внутренней поверхности, МПа.

Заключение:

Для несущего элемента $\sigma_{mb\ max} = 115,1\ \text{МПа} \leq 3[s] = 402,9\ \text{МПа}$.

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата					Лист 102
	Взам. инв. №					
	Инов. № дубл.					
	Подпись и дата					
	Изм.					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP	

<

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Для штуцера $\sigma_{\text{max}} = 240,9 \text{ МПа} \leq 3[\sigma]_1 = 363,7 \text{ МПа}$.

Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Общее заключение: **Условия прочности выполнены.**

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

$F_x, \text{ Н}$	$F_y, \text{ Н}$	$F_z, \text{ Н}$	$M_x, \text{ Н м}$	$M_y, \text{ Н м}$	$M_z, \text{ Н м}$	$p, \text{ МПа}$
$1,322 \cdot 10^5$	$2,303 \cdot 10^4$	$2,782 \cdot 10^4$	1342	6059	6072	1,035

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

Допускаемые нагрузки на штуцер при расчетном давлении**

$F_x, \text{ Н}$	$F_y, \text{ Н}$	$F_z, \text{ Н}$	$M_x, \text{ Н м}$	$M_y, \text{ Н м}$	$M_z, \text{ Н м}$	$p, \text{ МПа}$
$2,187 \cdot 10^4$	3810	4602	222	1002	1005	0,35

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

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения:

Расчётная температура, Т: 180 °С

Расчётное наружное избыточное давление, р: 0,21 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

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре Т = 180 °С (расчётные условия (наружное давление)):

$[\sigma]_1 = 150 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °С:

$E_1 = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 - p} = 0,21 \cdot (144 + 2 \cdot 5,8) / (2 \cdot 150 - 0,21) = 0,109 \text{ мм}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$B_1 = \min \left\{ 1,0, 9,45 \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \sqrt{\frac{d}{100 \cdot (s_1 - c_s)}} \right\} = \min \{ 1,0, 9,45 \cdot 144 / 140 \cdot (144 / (100 \cdot (12 - 5,8)))^{1/2} \} = 1$$

Подпись и дата

Изнв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Изнв. № подл.

19746.4

Лист

E-10K.00.00.000 PP

103

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

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия устойчивости:

$$[p]_e = \frac{20.8 \cdot 10^{-6} E_1}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_1 - c_s)}{d} \right]^{2.5} = 20.8 \cdot 10^{-6} \cdot 1.83 \cdot 10^5 \cdot 144 / (2.4 \cdot 1 \cdot 140) \cdot (100 \cdot (12 - 5.8) / 144)^{2.5} = 62.75 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия прочности:

$$[p]_n = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + (s_1 - c_s)} = 2 \cdot 150 \cdot (12 - 5.8) / (144 + 12 - 5.8) = 12.38 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_n}{[p]_e} \right)^2}} = 12.38 / (1 + (12.38 / 62.75)^2)^{1/2} = 12.15 \text{ МПа}$$

12,15 МПа ≥ 0,21 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища:

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{\text{м}}^2} = 3000^2 / (2 \cdot 750) \cdot (1 - 4 \cdot (3000^2 - 4 \cdot 750^2) \cdot 1100^2 / 3000^4)^{1/2} = 4635 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия (смещённый штуцер на эллиптическом днище):

$$d_p = \frac{d + 2 \cdot c_s}{\sqrt{1 - \left(\frac{2 \cdot R_{\text{м}}}{D_p} \right)^2}} = (144 + 2 \cdot 5.8) / [1 - (2 \cdot 1100 / 4635)^2]^{1/2} = 176.8 \text{ мм}$$

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1.25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 140; 1.25 \cdot ((144 + 2 \cdot 5.8) \cdot (12 - 5.8))^{1/2} \} = 38.82 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1.0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1.0, 150 / 167 \} = 0.8982$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \{ l_3; 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \} = \min \{ 0; 0.5 \cdot ((144 + 2 \cdot 5.8) \cdot (12 - 5.8 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (4635 \cdot (22 - 8.1))^{1/2} = 253.8 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 253.8 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (4635 \cdot (22 - 8.1))^{1/2} = 101.5 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (38.82 \cdot (12 - 5.8) \cdot 0.8982 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (0 - 2 \cdot 5.8) \cdot 0.8982) / (253.8 \cdot (22 - 8.1))] / [1 + 0.5 \cdot (176.8 - 101.5) / 253.8 + 2 \cdot (144 + 2 \cdot 5.8) / 4635 \cdot 38.82 / 253.8] \} = 0.9161$$

$$= 0.9161$$

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Оптимизация допускаемых напряжений				
					Для внешней части штуцера:				
					$\chi_1 = \min\left\{1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]}\right\} = \min\{1,0, 150 / 167\} = 0,8982$				
					Расчётная длина внутренней части штуцера:				
					$l_{3p} = \min\left\{l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})}\right\} = \min\{0; 0,5 \cdot ((144 + 2 \cdot 5,8) \cdot (12 - 5,8 - 0))^{1/2}\} = 0 \text{ мм}$				
					Ширина зоны укрепления:				
					$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (4635 \cdot (22 - 8,1))^{1/2} = 253,8 \text{ мм}$				
					Расчётная ширина зоны укрепления:				
					$l_p = L_0 = 253,8 \text{ мм}$				
					Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:				
					$d_{оп} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (4635 \cdot (22 - 8,1))^{1/2} = 101,5 \text{ мм}$				
					$V = \min\left\{1; \frac{1 + \frac{l_p \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0,5 \cdot \frac{d_p - d_{оп}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{l_p}{l_p}}\right\}$				
					$= \min\{1; [1 + (38,82 \cdot (12 - 5,8) \cdot 0,8982 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (0 - 2 \cdot 5,8) \cdot 0,8982) / (253,8 \cdot (22 - 8,1))] / [1 + 0,5 \cdot (176,8 - 101,5) / 253,8 + 2 \cdot (144 + 2 \cdot 5,8) / 4635 \cdot 38,82 / 253,8]\} = 0,9161\}$				
					$= 0,9161$				
Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	E-10K.00.00.000 PP				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист 104				

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 2 \cdot (22 - 8,1) \cdot 167 \cdot 0,9161 / [4635 + (22 - 8,1) \cdot 0,9161] = 1,83 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление:

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_p}{[p]_E} \right)^2}} = 1,83 / (1 + (1,83 / 0,4626)^2)^{1/2} = 0,4485 \text{ МПа}$$

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

Допускаемое давление $[p] = 0,4485 \text{ МПа}$

$0,4485 \text{ МПа} \geq 0,21 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчет на прочность по МКЭ

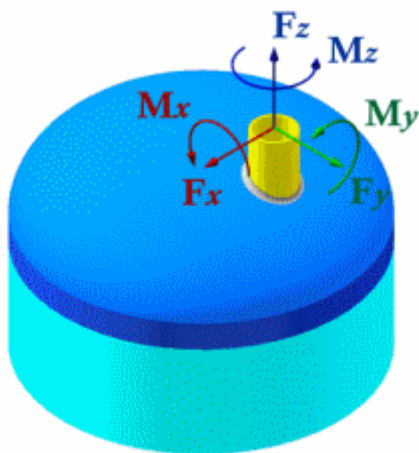
Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения:

Расчётная температура, Т: 180 °С

Расчётное наружное избыточное давление, р: 0,21 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
4000	4000	5700	2900	2900	4100

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 180 °С:

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-10K.00.00.000 PP				
Лист				
105				

$$[s] = \frac{[\sigma]_s}{K_m} = 167 / 1,3 = 128,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °С:

$$E = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала итуцера

Номинальные допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре 180 °С:

$$[s]_1 = \frac{[\sigma]_s}{K_m} = 150 / 1,3 = 115,4 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °С:

$$E_1 = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

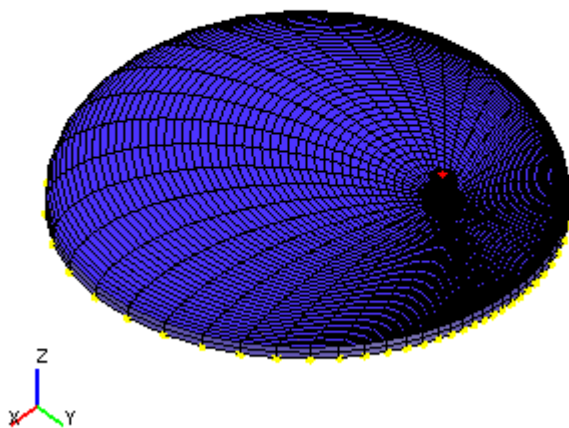


Рис. 1. Конечно-элементная модель узла врезки

Инов. № подл.	19746.4	Подпись и дата				Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP				Лист
									106

Рис. 1. Конечно-элементная модель узла врезки

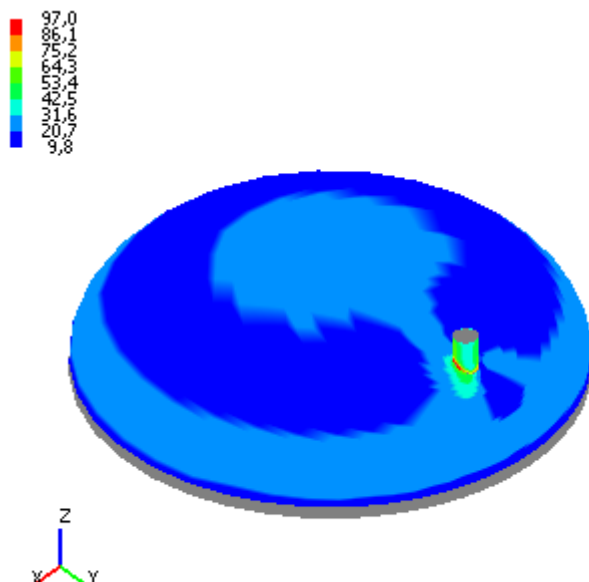


Рис. 2. Эквивалентные мембранные напряжения от совместного действия сил и давления, МПа.
Заключение:

Для несущего элемента $\sigma_{m \max} = 62,77 \text{ МПа} \leq 1,5[s] = 193,2 \text{ МПа}$.
Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

Для штуцера $\sigma_{m \max} = 97,03 \text{ МПа} \leq 1,5[s]_1 = 173,5 \text{ МПа}$.
Условие прочности **ВЫПОЛНЕНО**.

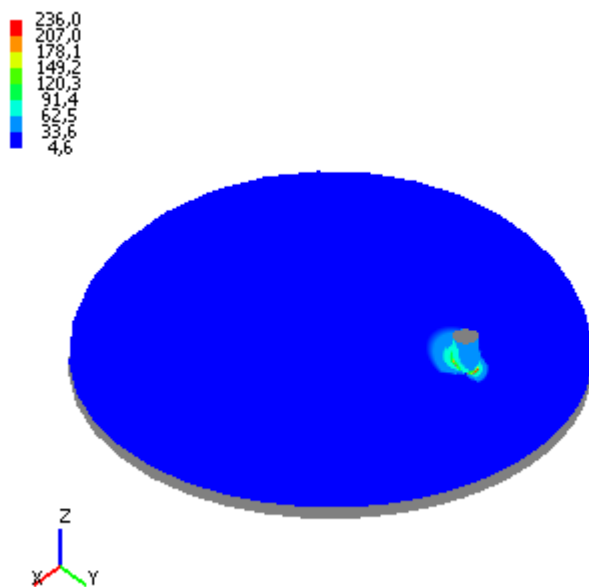


Рис. 3. Общие (мембранные и изгибные) напряжения на внешней поверхности, МПа.
Заключение:

Для несущего элемента $\sigma_{mb \max} = 104,4 \text{ МПа} \leq 3[s] = 386,3 \text{ МПа}$.

Инв. № подл. 19746.4	Подпись и дата				Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<div><div><div><div><div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></</div></div></div></div></div></div>		

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, Т: 20 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,5333 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

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

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

Модуль продольной упругости при температуре 20 °С:

$$E = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре Т = 20 °С (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]^{20}_1 = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 280 / 1,1 = 254,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °С:

$$E_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,5333 \cdot (144 + 2 \cdot 5,8) / (2 \cdot 254,5 \cdot 1 - 0,5333) = 0,1632 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 254,5 \cdot 1 \cdot (12 - 5,8) / (144 + 12 + 5,8) = 19,51 \text{ МПа}$$

$$19,51 \text{ МПа} \geq 0,5333 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища:

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{\text{вр}}^2} = 3000^2 / (2 \cdot 750) \cdot (1 - 4 \cdot (3000^2 - 4 \cdot 750^2) \cdot 1100^2 / 3000^4)^{1/2} = 4635 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 2,267 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия (смещённый штуцер на эллиптическом днище):

$$d_p = \frac{d + 2 \cdot c_s}{\sqrt{1 - \left(\frac{2 \cdot R_{\text{вр}}}{D_p} \right)^2}} = (144 + 2 \cdot 5,8) / [1 - (2 \cdot 1100 / 4635)^2]^{1/2} = 176,8 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((22 - 8,1) / 2,267 - 0,8) \cdot (4635 \cdot (22 - 8,1))^{1/2} = 2707 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 140; 1,25 \cdot ((144 + 2 \cdot 5,8) \cdot (12 - 5,8))^{1/2} \} = 38,82 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

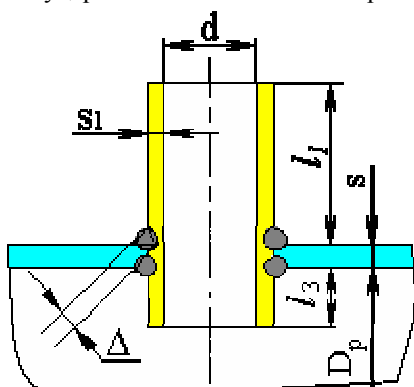
$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0; 254,5 / 272,7 \} = 0,9333$$

Подпись и дата		Инва. № дубл.		Взам. инв. №		Подпись и дата		Инва. № подл.	19746.4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP				Лист
									109

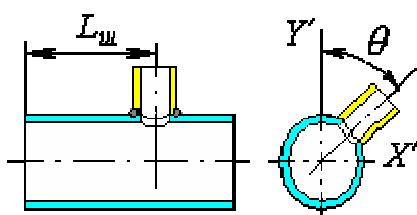
Штуцер LT1 DN100

Исходные данные

Элемент: Штуцер LT1 DN100
 Условное обозначение (метка) Штуцер LT1
 Элемент, несущий штуцер: Обечайка цилиндрическая
 Тип элемента, несущего штуцер: Обечайка цилиндрическая
 Тип штуцера: Проходящий без укрепления

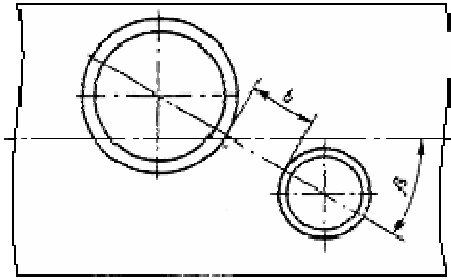


Материал несущего элемента: 09Г2С
 Толщина стенки несущего элемента, s : 22 мм
 Сумма прибавок к стенке несущего элемента, c : 4,8 мм
 Материал штуцера: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281
 Внутренний диаметр штуцера, d : 94 мм
 Толщина стенки штуцера, s_1 : 10 мм
 Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c_s : 5,35 мм
 Длина штуцера, l_1 : 3500 мм



Смещение штуцера, $L_{ш}$: 6000 мм
 Угол поворота штуцера, ϑ : 0 °
 Длина внутр. части штуцера, l_3 : 0 мм
 Прибавка на коррозию, c_{s1} : 0 мм
 Минимальный размер сварного шва, Δ : 1 мм
 Расчётные параметры размещения штуцера:
 Ближайший штуцер

Изн. № подл.	Изн. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата
19746.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
			Дата
E-10K.00.00.000 PP			
Лист			
111			



Название штуцера: Штуцер UC DN50

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 521 мм

Угол β : 0 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$\varphi_1 = 1$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$\varphi = 1$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 3000$ мм

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 120 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,3788 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 120 °C (расчётные условия):

$[\sigma] = 174,5$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 120 °C:

$E = 1,89 \cdot 10^5$ МПа

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 120 °C (расчётные условия):

$[\sigma]_1 = 157,5$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 120 °C:

$E_1 = 1,89 \cdot 10^5$ МПа

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,3788 \cdot (94 + 2 \cdot 5,35) / (2 \cdot 157,5 \cdot 1 - 0,3788) = 0,1261 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 157,5 \cdot 1 \cdot (10 - 5,35) / (94 + 10 + 5,35) = 13,4 \text{ МПа}$$

13,4 МПа \geq 0,3788 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

Изн.	№ подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
	19746.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
E-10K.00.00.000 PP					Лист
					112

$$D_p = D = 3000 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 3,26 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 94 + 2 \cdot 5,35 = 104,7 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((22 - 4,8) / 3,26 - 0,8) \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 2034 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 3500; 1,25 \cdot ((94 + 2 \cdot 5,35) \cdot (10 - 5,35))^{1/2} \} = 27,58 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0; 157,5 / 174,5 \} = 0,9026$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((94 + 2 \cdot 5,35) \cdot (10 - 5,35 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 227,2 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 863 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 227,2 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 90,86 \text{ мм}$$

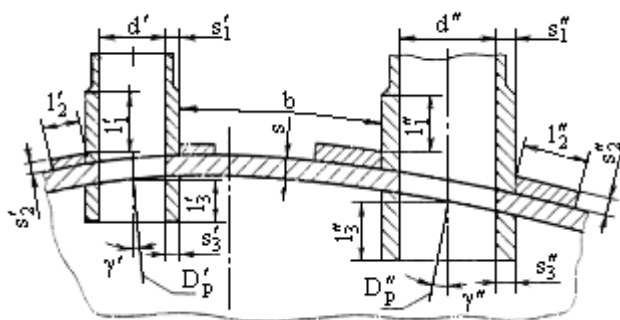
$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0,5 \cdot \frac{d_p - d_{0p}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}}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

$$= \min \{ 1; [1 + (27,58 \cdot (10 - 5,35) \cdot 0,9026 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 5,35 - 0) \cdot 0,9026) / (227,2 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0,5 \cdot (104,7 - 90,86) / 227,2 + 1 \cdot (94 + 2 \cdot 5,35) / 3000 \cdot 1 / 1 \cdot 27,58 / 227,2] \} = 0,9951$$

$$= 0,9951$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 \cdot 174,5 \cdot 0,9951 / [3000 + (22 - 4,8) \cdot 0,9951] = 1,98 \text{ МПа}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	L _k = 863 мм				
					Расчётная ширина зоны укрепления:				
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	l _p = L ₀ = 227,2 мм				
					Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:				
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	d _{0p} = 0.4 · √(D _p · (s - c)) = 0.4 · (3000 · (22 - 4,8)) ^{1/2} = 90,86 мм				
					$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{0p}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}} \right\}$				
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	= min{1; [1 + (27,58 · (10 - 5,35) · 0,9026 + 0 · 0 · 0 + 0 · (10 - 5,35 - 0) · 0,9026) / (227,2 · (22 - 4,8))] / [1 + 0.5 · (104,7 - 90,86) / 227,2 + 1 · (94 + 2 · 5,35) / 3000 · 1 / 1 · 27,58 / 227,2] = 0,9951}				
					= 0,9951				
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 \cdot 174,5 \cdot 0,9951 / [3000 + (22 - 4,8) \cdot 0,9951] = 1,98 \text{ МПа}$				
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.						



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

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} + (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 454,3 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 1,98 \text{ МПа}$

$1,98 \text{ МПа} \geq 0,3788 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (104,7 - 90,86) \cdot 3,26 = 0,2255 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

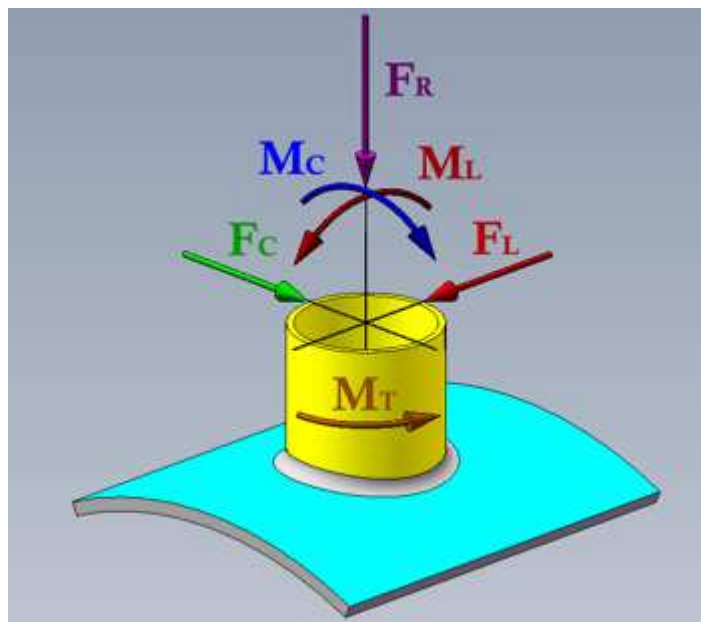
$$= 27,58 \cdot (10 - 0,1261 - 5,35) \cdot 0,9026 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 5,35 - 0) \cdot 0,9026 + 227,2 \cdot (22 - 3,26 - 4,8)$$

$$= 0,003279 \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,2255 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \leq 0,003279 \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

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



Радиальная нагрузка, F_R : 1201 Н

Окружной момент, M_C : 0 Н м

Продольный момент, M_L : 0 Н м

Крутящий момент, M_T : 0 Н м

Инов. № подл.	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19746.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
			Дата
E-10K.00.00.000 PP			
Лист 114			

Сдвиговая нагрузка, F_C : 0 Н

Сдвиговая нагрузка, F_L : 0 Н

Эквивалентная толщина обечайки около штуцера:

$$s_3 = s - c = 22 - 4,8 = 17,2 \text{ мм}$$

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c = 3000 + 22 + 4,8 = 3027 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_s = 94 + 10 + 5,35 = 109,3 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} = 109,3 / (3027 \cdot 17,2)^{1/2} = 0,4793$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 521 \text{ мм}$$

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D_c}{2} = 3027 / 2 = 1513 \text{ мм}$$

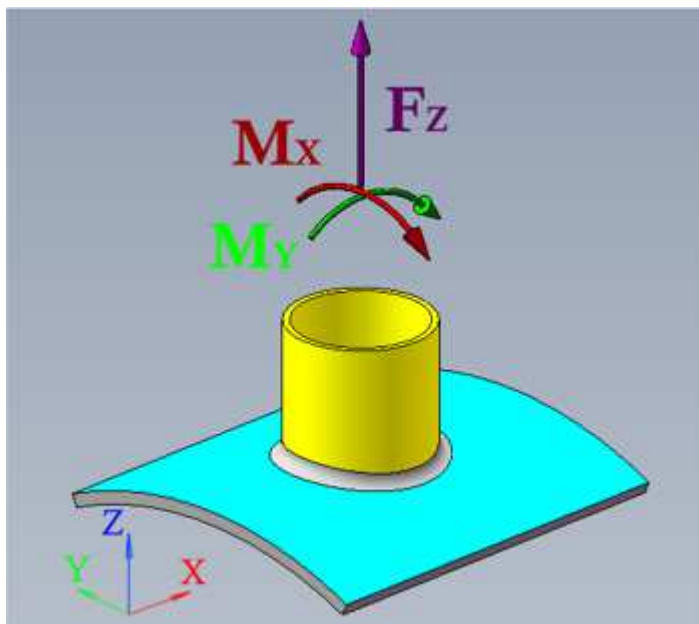
Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |0,3788 / 1,98| = 0,1913$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

0,1913 ≤ 1.0. Условие прочности выполнено

Расчетная схема по ГОСТ Р 52857.3-2007



Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_z = -F_R = -1201 \quad = (-1201) \text{ Н}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s - c)}} = 109,3 / (3027 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 0,4793$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 0,4793 + 0,005196 \cdot 0,4793^2 + (-0,001406) \cdot 0,4793^3 + 0 \cdot 0,4793^4 = 1,058$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4793$):

Инов. № подл.	19746.4	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
E-10K.00.00.000 PP					Лист
					115

$$[F_z] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1.81\} = 174,5 * (22 - 4,8)^2 * \max\{1,058; 1.81\} = 9,344 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{[F_z]} \right| = |(-1201) / 9,344 \cdot 10^4| = 0,01285$$

Условие прочности: $\Phi_z \leq 1$

0,01285 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_x = M_c + F_c \cdot l_1 = 0 + 0 \cdot 3500 = 0 \text{ Н м}$$

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_y = M_L + F_L \cdot l_1 = 0 + 0 \cdot 3500 = 0 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 0,4793 + 0,1589 \cdot 0,4793^2 + (-0,02142) \cdot 0,4793^3 + 0,001035 \cdot 0,4793^4 = 4,591$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4793$):

$$[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4,9\} = 174,5 * (22 - 4,8)^2 * 109,3 / 4 * \max\{4,591; 4,9\} = 6915 \text{ Н м}$$

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

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4793$):

$$[M_y] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4,9\} = 174,5 * (22 - 4,8)^2 * 109,3 / 4 * \max\{5,511; 4,9\} = 7778 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]} \right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]} \right)^2} = ((0 / 6915)^2 + (0 / 7778)^2)^{1/2} = 0$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

0 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max \left(\left| \frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z \right|; \left| \Phi_z \right|; \left| \frac{\Phi_p}{C_4} - 0,2 \cdot \Phi_z \right| \right) \right]^2 + \Phi_b^2} = ([\max(|0,1913 / 1 + (-0,01285)|; |(-0,01285)|; |0,1913 / 1 - 0,2 * (-0,01285)|)]^2 + 0^2)^{1/2} = 0,1939$$

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

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

0,1939 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = 0,3788 * (94 + 10) / (4 * (10 - 5,35)) + 4 * (0^2 + 0^2)^{1/2} / (3,142 * (94 + 10)^2 * (10 - 5,35)) + 0 / (3,142 * (94 + 10) * (10 - 5,35)) = 2,118 \text{ МПа}$$

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

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

2,118 МПа ≤ 157,5 МПа. **Условие прочности выполнено**

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0 / 13,4 + (0^2 + 0^2)^{1/2} / 5333 + |(-1201)| / 5199 = 0,231$$

Инв. № подл. 19746.4	Подпись и дата				
	Взам. инв. №				
	Инв. № дубл.				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<div>E-10K.00.00.000 PP</div> <div>Лист 116</div>

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

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

0,231 ≤ 1.0. **Условие устойчивости выполнено**

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения:

Расчётная температура, Т: 180 °С
Расчётное наружное избыточное давление, р: 0,21 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)):

$[\sigma] = 167$ МПа
Модуль продольной упругости при температуре 180 °С:
 $E = 1,83 \cdot 10^5$ МПа

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре Т = 180 °С (расчётные условия (наружное давление)):

$[\sigma]_1 = 150$ МПа
Модуль продольной упругости при температуре 180 °С:
 $E_1 = 1,83 \cdot 10^5$ МПа
Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 - p} = 0,21 \cdot (94 + 2 \cdot 5,35) / (2 \cdot 150 - 0,21) = 0,07334 \text{ мм}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$B_1 = \min \left\{ 1.0, 9.45 \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \sqrt{\frac{d}{100 \cdot (s_1 - c_s)}} \right\} = \min \{ 1.0, 9.45 \cdot 94 / 3500 \cdot (94 / (100 \cdot (10 - 5,35)))^{1/2} \} = 0,1141$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия устойчивости:

$$[p]_e = \frac{20.8 \cdot 10^{-6} E_1}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_1 - c_s)}{d} \right]^{2.5} = \frac{20.8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 94}{(2,4 \cdot 0,1141 \cdot 3500) \cdot (100 \cdot (10 - 5,35) / 94)^{2.5}} = 20,32 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия прочности:

$$[p]_n = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + (s_1 - c_s)} = 2 \cdot 150 \cdot (10 - 5,35) / (94 + 10 - 5,35) = 14,14 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_n}{[p]_e} \right)^2}} = 14,14 / (1 + (14,14 / 20,32)^2)^{1/2} = 11,61 \text{ МПа}$$

11,61 МПа ≥ 0,21 МПа
Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**
Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 3000$ мм
Расчётный диаметр отверстия (ось штуцера совпадает с нормалью к поверхности в центре отверстия):

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	E-10K.00.00.000 PP					Лист
										117
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 94 + 2 \cdot 5,35 = 104,7 \text{ мм}$$

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 3500; 1,25 \cdot ((94 + 2 \cdot 5,35) \cdot (10 - 5,35))^{1/2} \} = 27,58 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 150 / 167 \} = 0,8982$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{2p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((94 + 2 \cdot 5,35) \cdot (10 - 5,35 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 227,2 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 863 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 227,2 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{op} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 90,86 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (27,58 \cdot (10 - 5,35) \cdot 0,8982 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (0 - 2 \cdot 5,35) \cdot 0,8982) / (227,2 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0,5 \cdot (104,7 - 90,86) / 227,2 + 1 \cdot (94 + 2 \cdot 5,35) / 3000 \cdot 27,58 / 227,2] \} = 0,995$$

$$= 0,995$$

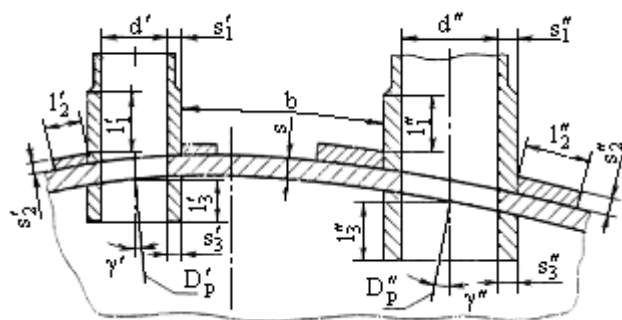
$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 167 \cdot 0,995 / [3000 + (22 - 4,8) \cdot 0,995] = 1,894 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление:

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_p}{[p]_E} \right)^2}} = 1,894 / (1 + (1,894 / 0,3167)^2)^{1/2} = 0,3124 \text{ МПа}$$

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

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата	E-10K.00.00.000 PP					Лист
										118
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						



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

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s-c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s-c)} = (3000 * (22-4,8))^{1/2} + (3000 * (22-4,8))^{1/2} = 454,3 \text{ mm}$$

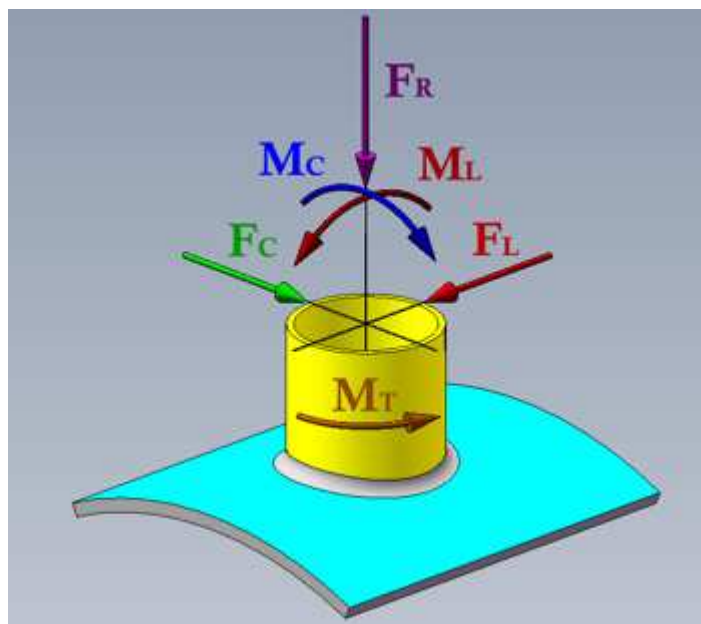
Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 0,3124 \text{ МПа}$

$$0,3124 \text{ МПа} \geq 0,21 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

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



Радиальная нагрузка, F_R : 1016 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:

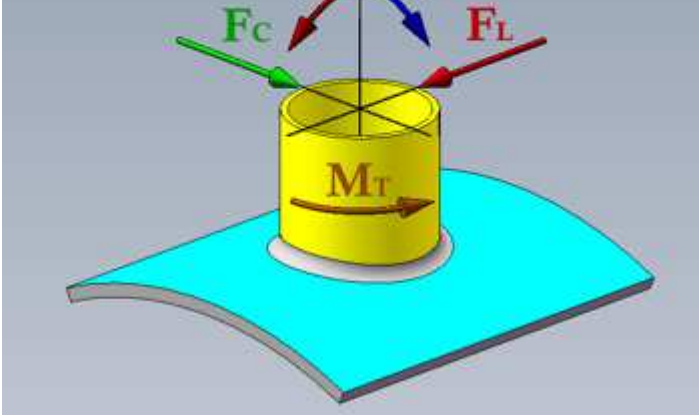
$$e_2 = e - c = 22 - 4,8 = 17,2 \text{ mm}$$

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c = 3000 + 22 + 4,8 = 3027 \text{ mm}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_r = d + s_1 + c_k = 94 + 10 + 5,35 = 109,3 \text{ mm}$$

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	
19746.4					<p>Радиальная нагрузка, F_R: 1016 Н</p> <p>Окружной момент, M_C: 0 Н м</p> <p>Продольный момент, M_L: 0 Н м</p> <p>Крутящий момент, M_T: 0 Н м</p> <p>Сдвиговая нагрузка, F_C: 0 Н</p> <p>Сдвиговая нагрузка, F_L: 0 Н</p> <p>Эквивалентная толщина обечайки около штуцера:</p> $s_s = s - c = 22 - 4,8 = 17,2 \text{ мм}$ <p>Средний диаметр обечайки у отверстия:</p> $D_c = D_p + s + c = 3000 + 22 + 4,8 = 3027 \text{ мм}$ <p>Средний диаметр штуцера:</p> $d_c = d + s_1 + c_s = 94 + 10 + 5,35 = 109,3 \text{ мм}$
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<div>E-10K.00.00.000 PP</div> <div>119</div>

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} = 109,3 / (3027 \cdot 17,2)^{1/2} = 0,4793$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 521 \text{ мм}$$

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D_c}{2} = 3027 / 2 = 1513 \text{ мм}$$

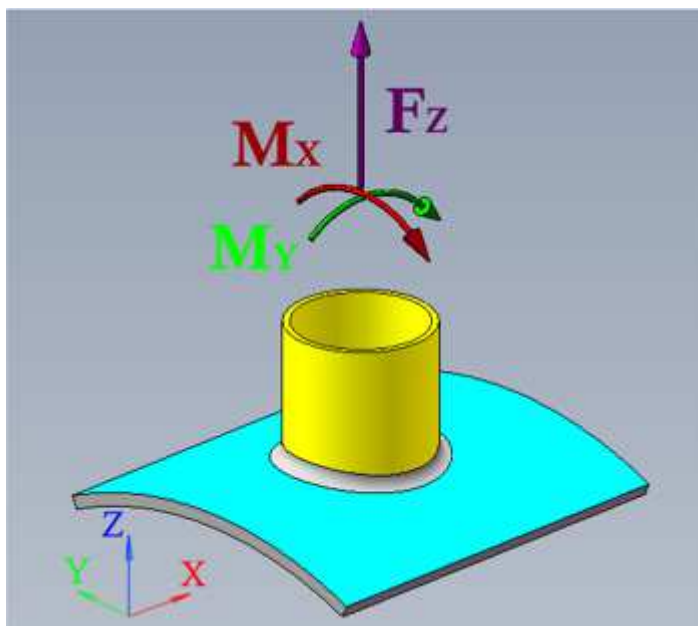
Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |(-0,21) / 0,3124| = 0,6722$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

$0,6722 \leq 1,0$. Условие прочности выполнено

Расчетная схема по ГОСТ Р 52857.3-2007



Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_z = -F_R = -1016 \quad = (-1016) \text{ Н}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s-c)}} = 109,3 / (3027 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 0,4793$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 0,4793 + 0,005196 \cdot 0,4793^2 + (-0,001406) \cdot 0,4793^3 + 0 \cdot 0,4793^4 = 1,058$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4793$):

$$[F_z] = [\sigma] \cdot (s-c)^2 \cdot \max\{C_1; 1,81\} = 167 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot \max\{1,058; 1,81\} = 8,942 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{[F_z]} \right| = |(-1016) / 8,942 \cdot 10^4| = 0,01136$$

Условие прочности: $\Phi_z \leq 1$

$0,01136 \leq 1,0$. Условие прочности выполнено

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_x = M_c + F_c \cdot l_1 = 0 + 0 \cdot 3500 = 0 \text{ Н м}$$

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:

Изн. № подл.	Изн. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата	Изн. № подл.
19746.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-10K.00.00.000 PP				Лист
				120

$$M_y = M_L + F_L \cdot l_1 = 0 + 0 \cdot 3500 = 0 \text{ Hm}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 0,4793 + 0,1589 \cdot 0,4793^2 + (-0,02142) \cdot 0,4793^3 + 0,001035 \cdot 0,4793^4 = 4,591$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4793$):

$$[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 167 \cdot (22 - 4.8)^2 \cdot 109.3 / 4 \cdot \max\{4.591; 4.9\} = 6618 \text{ Н м}$$

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

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4793$):

$$[M_y] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 167 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot 109,3 / 4 \cdot \max\{5,511; 4.9\} = 7443 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{M_x}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{M_y}\right)^2} = ((0/6618)^2 + (0/7443)^2)^{1/2} = 0$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

$0 \leq 1.0$. Условие прочности выполнено

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max \left(\left| \frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_x \right|, \left| \Phi_x \right|, \left| \frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_x \right| \right) \right]^2 + \Phi_b^2} = (\max(|0,6722/1 + (-0,01136)|; |(-0,01136)|; |0,6722/1 - 0.2 * (-0,01136)|))^2 + 0^2)^{1/2} = 0,6745$$

Если $F_7 < 0$, то знак Φ_7 меняется на противоположный.

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

$0,6745 \leq 1,0$. Условие прочности выполнено

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{P \cdot (d+s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d+s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_x}{\pi \cdot (d+s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = (-0,21) * (94 + 10) / (4 * (10 - 5,35)) + 4 * (0^2 + 0^2)^{1/2} / (3,142 * (94 + 10)^2 * (10 - 5,35)) + 0 / (3,142 * (94 + 10) * (10 - 5,35)) = (-1,174) \text{ МПа}$$

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

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

$(-1,174) \text{ МПа} \leq 150 \text{ МПа}$. **Условие прочности выполнено**

$$\frac{|p|}{|p|} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{|M|} + \frac{|F_z|}{|F|} = 0,21 / 11,61 + (0^2 + 0^2)^{1/2} / 5079 + |(-1016)| / 5034 = 0,2199$$

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

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

$0,2199 \leq 1.0$. Условие устойчивости выполнено

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, Т: 20 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,5284 МПа

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p>Условие прочности: $\sqrt{\left[\max\left(\left \frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right ; \left \Phi_z\right ; \left \frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z\right \right)\right]^2 + \Phi_0^2} \leq 1$</p> <p>0,6745 ≤ 1.0. Условие прочности выполнено</p> <p>Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:</p> $\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = \frac{(-0,21) \cdot (94 + 10)}{4 \cdot (10 - 5,35)} + \frac{4 \cdot (0^2 + 0^{2/2})}{(3,142 \cdot (94 + 10)^2 \cdot (10 - 5,35))} + \frac{0}{(3,142 \cdot (94 + 10) \cdot (10 - 5,35))} = (-1,174) \text{ МПа}$ <p>Если F_z создает сжимающее напряжение, ее следует принять равной нулю.</p> <p>Условие прочности: $\sigma_1 \leq [\sigma]_1$</p> <p>(-1,174) МПа ≤ 150 МПа. Условие прочности выполнено</p> $\frac{ p }{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{ F_z }{[F]} = 0,21 / 11,61 + (0^2 + 0^2)^{1/2} / 5079 + (-1016) / 5034 = 0,2199$ <p>Если F_z растягивающая продольная сила, а p – внутреннее избыточное давление, то F_z и p следует принять равными нулю.</p> <p>Условие устойчивости штуцера: $\frac{ p }{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{ F_z }{[F]} \leq 1.0$</p> <p>0,2199 ≤ 1.0. Условие устойчивости выполнено</p> <p>Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)</p> <p>Условия нагружения при испытаниях:</p> <p>Расчётная температура, T: 20 °C</p> <p>Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,5284 МПа</p>					
					<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						

19746.4

E-10K.00.00.000 PP

Лист	121
------	-----

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

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

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

Модуль продольной упругости при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]^{20}_1 = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 280 / 1,1 = 254,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,5284 \cdot (94 + 2 \cdot 5,35) / (2 \cdot 254,5 \cdot 1 - 0,5284) = 0,1088 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 254,5 \cdot 1 \cdot (10 - 5,35) / (94 + 10 + 5,35) = 21,65 \text{ МПа}$$

$$21,65 \text{ МПа} \geq 0,5284 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 3000 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 2,909 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 94 + 2 \cdot 5,35 = 104,7 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((22 - 4,8) / 2,909 - 0,8) \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 2323 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 3500; 1,25 \cdot ((94 + 2 \cdot 5,35) \cdot (10 - 5,35))^{1/2} \} = 27,58 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 254,5 / 272,7 \} = 0,9333$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{2p} = \min \left\{ l_2; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_2 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((94 + 2 \cdot 5,35) \cdot (10 - 5,35 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 227,2 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 863 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

Подпись и дата		Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP	Лист
Изнв. № дубл.		Изнв. № инв.	Изнв. № подл.	19746.4				122

$$l_p = L_0 = 227,2 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

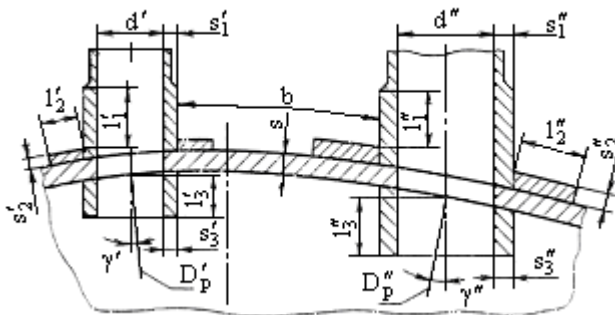
$$d_{op} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 90,86 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (27,58 \cdot (10 - 5,35) \cdot 0,9333 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 5,35 - 0) \cdot 0,9333) / (227,2 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0,5 \cdot (104,7 - 90,86) / 227,2 + 1 \cdot (94 + 2 \cdot 5,35) / 3000 \cdot 1 / 1 \cdot 27,58 / 227,2] = 0,9961 \}$$

$$= 0,9961$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 \cdot 272,7 \cdot 0,9961 / [3000 + (22 - 4,8) \cdot 0,9961] = 3,097 \text{ МПа}$$



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

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} + (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 454,3 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 3,097 \text{ МПа}$

$$3,097 \text{ МПа} \geq 0,5284 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5(d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (104,7 - 90,86) \cdot 2,909 = 0,2013 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

$$= 27,58 \cdot (10 - 0,1088 - 5,35) \cdot 0,9333 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 5,35 - 0) \cdot 0,9333 + 227,2 \cdot (22 - 2,909 - 4,8)$$

$$= 0,003363 \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,2013 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \leq 0,003363 \text{ м}^2$$

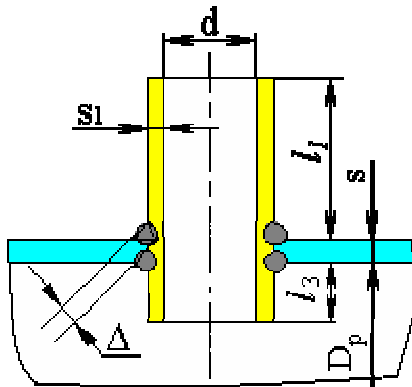
Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19746.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
E-10K.00.00.000 PP			
Лист			
123			

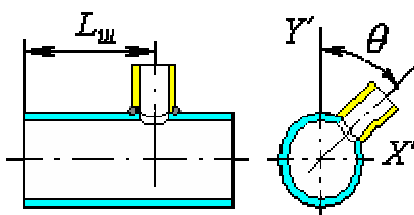
Штуцер LT2 DN100

Исходные данные

Элемент: Штуцер LT2 DN100
 Условное обозначение (метка) Штуцер LT2
 Элемент, несущий штуцер: Обечайка цилиндрическая
 Тип элемента, несущего штуцер: Обечайка цилиндрическая
 Тип штуцера: Проходящий без укрепления

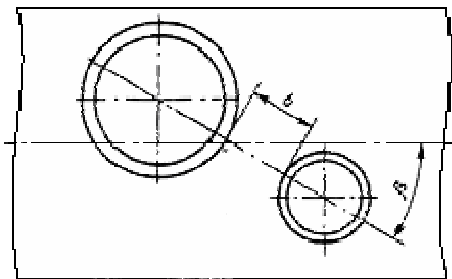


Материал несущего элемента: 09Г2С
 Толщина стенки несущего элемента, s : 22 мм
 Сумма прибавок к стенке несущего элемента, c : 4,8 мм
 Материал штуцера: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281
 Внутренний диаметр штуцера, d : 94 мм
 Толщина стенки штуцера, s_1 : 10 мм
 Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c_s : 5,35 мм
 Длина штуцера, l_1 : 3500 мм



Смещение штуцера, $L_{ш}$: 220 мм
 Угол поворота штуцера, ϑ : 0 °
 Длина внутр. части штуцера, l_3 : 0 мм
 Прибавка на коррозию, c_{s1} : 0 мм
 Минимальный размер сварного шва, Δ : 1 мм
 Расчётные параметры размещения штуцера:
 Ближайший штуцер

Изн. № подл.	Изн. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата
19746.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
			Дата
E-10K.00.00.000 PP			
Лист			
124			



Название штуцера: Штуцер МН DN800

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 491 мм

Угол β : 0°

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$$\phi_1 = 1$$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$$\emptyset = 1$$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 3000 \text{ mm}$$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, Т: 120 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,3788 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$[\sigma] = 174,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 120 °С:

$$E = 1,89 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$[\sigma]_1 = 157,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 120 °С:

$$E_1 = 1,89 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma_1 \cdot \varphi_1 - p]} = 0,3788 \cdot (94 + 2 \cdot 5,35) / (2 \cdot 157,5 \cdot 1 - 0,3788) = 0,1261 \text{ mm}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 * 157,5 * 1 * (10 - 5,35) / (94 + 10 + 5,35) = 13,4 \text{ МПа}$$

$$13,4 \text{ МПа} \geq 0,3788 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

19746.4

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 120 °С (расчётные условия):

[σ]= 174,5 МПа

Модуль продольной упругости при температуре 120 °С:

E= 1,89·10⁵ МПа

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 120 °С (расчётные условия):

[σ]₁= 157,5 МПа

Модуль продольной упругости при температуре 120 °С:

E₁= 1,89·10⁵ МПа

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_{ш} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,3788 \cdot (94 + 2 \cdot 5,35) / (2 \cdot 157,5 \cdot 1 - 0,3788) = 0,1261 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубков штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 157,5 \cdot 1 \cdot (10 - 5,35) / (94 + 10 + 5,35) = 13,4 \text{ МПа}$$

13,4 МПа ≥ 0,3788 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

Изм.

Лист

№ докум.

Подп.

Дата

E-10K.00.00.000 PP

Лист

125

$$D_p = D = 3000 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 3,26 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 94 + 2 \cdot 5,35 = 104,7 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((22 - 4,8) / 3,26 - 0,8) \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 2034 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 3500; 1,25 \cdot ((94 + 2 \cdot 5,35) \cdot (10 - 5,35))^{1/2} \} = 27,58 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0; 157,5 / 174,5 \} = 0,9026$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{2p} = \min \left\{ l_2; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((94 + 2 \cdot 5,35) \cdot (10 - 5,35 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 227,2 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 243 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 227,2 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 90,86 \text{ мм}$$

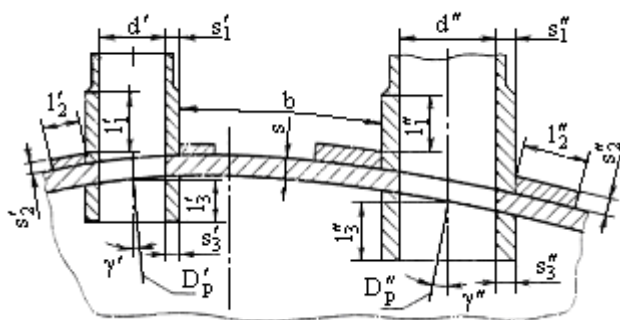
$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0,5 \cdot \frac{d_p - d_{0p}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}}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

$$= \min \{ 1; [1 + (27,58 \cdot (10 - 5,35) \cdot 0,9026 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 5,35 - 0) \cdot 0,9026) / (227,2 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0,5 \cdot (104,7 - 90,86) / 227,2 + 1 \cdot (94 + 2 \cdot 5,35) / 3000 \cdot 1 / 1 \cdot 1 \cdot 27,58 / 227,2] \} = 0,9951$$

$$= 0,9951$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 \cdot 174,5 \cdot 0,9951 / [3000 + (22 - 4,8) \cdot 0,9951] = 1,98 \text{ МПа}$$

Изн. № подл.	19746.4	Подпись и дата	
Взам. инв. №		Изн. № дубл.	
Подпись и дата		Подпись и дата	
Изн. № подл.	19746.4	Изн. № дубл.	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
		Дата	
E-10K.00.00.000 PP			
Лист			
126			



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер МН DN800 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} + (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 454,3 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 1,98 \text{ МПа}$

$1,98 \text{ МПа} \geq 0,3788 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (104,7 - 90,86) \cdot 3,26 = 0,2255 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

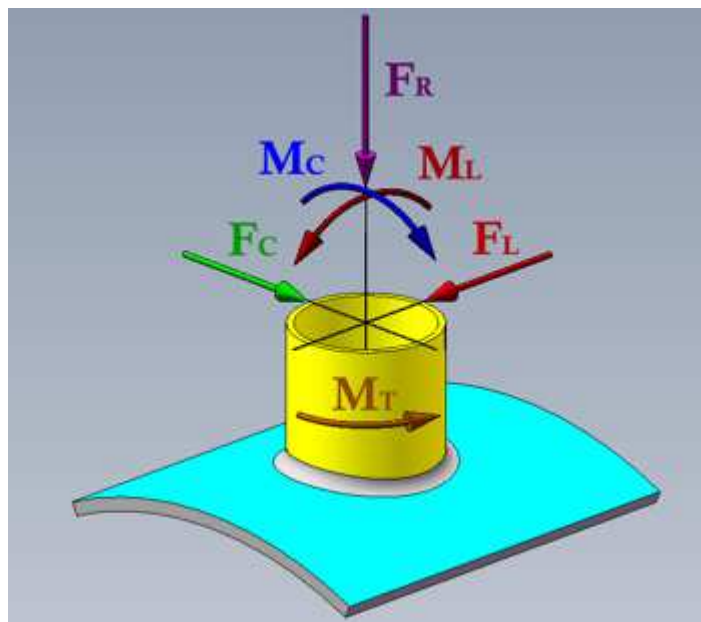
$$= 27,58 \cdot (10 - 0,1261 - 5,35) \cdot 0,9026 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 5,35 - 0) \cdot 0,9026 + 227,2 \cdot (22 - 3,26 - 4,8)$$

$$= 0,003279 \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,2255 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \leq 0,003279 \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

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



Радиальная нагрузка, F_R : 1195 Н

Окружной момент, M_C : 0 Н м

Продольный момент, M_L : 0 Н м

Крутящий момент, M_T : 0 Н м

Инов. № подл.	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19746.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
E-10K.00.00.000 PP			
Лист 127			

$$[F_z] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1.81\} = 174,5 * (22 - 4,8)^2 * \max\{1,058; 1.81\} = 9,344 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{[F_z]} \right| = |(-1195) / 9,344 \cdot 10^4| = 0,01279$$

Условие прочности: $\Phi_z \leq 1$

0,01279 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_x = M_c + F_c \cdot l_1 = 0 + 0 \cdot 3500 = 0 \text{ Н м}$$

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_y = M_L + F_L \cdot l_1 = 0 + 0 \cdot 3500 = 0 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 0,4793 + 0,1589 \cdot 0,4793^2 + (-0,02142) \cdot 0,4793^3 + 0,001035 \cdot 0,4793^4 = 4,591$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4793$):

$$[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4,9\} = 174,5 * (22 - 4,8)^2 * 109,3 / 4 * \max\{4,591; 4,9\} = 6915 \text{ Н м}$$

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

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4793$):

$$[M_y] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4,9\} = 174,5 * (22 - 4,8)^2 * 109,3 / 4 * \max\{5,511; 4,9\} = 7778 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]} \right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]} \right)^2} = ((0 / 6915)^2 + (0 / 7778)^2)^{1/2} = 0$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

0 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max \left(\left| \frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z \right|; \left| \Phi_z \right|; \left| \frac{\Phi_p}{C_4} - 0,2 \cdot \Phi_z \right| \right) \right]^2 + \Phi_b^2} = ([\max(|0,1913 / 1 + (-0,01279)|; |(-0,01279)|; |0,1913 / 1 - 0,2 * (-0,01279)|)]^2 + 0^2)^{1/2} = 0,1939$$

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

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

0,1939 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = 0,3788 * (94 + 10) / (4 * (10 - 5,35)) + 4 * (0^2 + 0^2)^{1/2} / (3,142 * (94 + 10)^2 * (10 - 5,35)) + 0 / (3,142 * (94 + 10) * (10 - 5,35)) = 2,118 \text{ МПа}$$

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

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

2,118 МПа ≤ 157,5 МПа. **Условие прочности выполнено**

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0 / 13,4 + (0^2 + 0^2)^{1/2} / 5333 + |(-1195)| / 5199 = 0,2298$$

Изн. № подл. 19746.4	Подпись и дата				
	Взам. инв. №				
	Изн. № дубл.				
	Подпись и дата				
E-10K.00.00.000 PP					Лист
					129
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

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

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

0,2298 ≤ 1.0. **Условие устойчивости выполнено**

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения:

Расчётная температура, Т: 180 °С
Расчётное наружное избыточное давление, р: 0,21 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)):

$[\sigma] = 167$ МПа
Модуль продольной упругости при температуре 180 °С:
 $E = 1,83 \cdot 10^5$ МПа

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре Т = 180 °С (расчётные условия (наружное давление)):

$[\sigma]_1 = 150$ МПа
Модуль продольной упругости при температуре 180 °С:
 $E_1 = 1,83 \cdot 10^5$ МПа
Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 - p} = 0,21 \cdot (94 + 2 \cdot 5,35) / (2 \cdot 150 - 0,21) = 0,07334 \text{ мм}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$B_1 = \min \left\{ 1.0, 9.45 \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \sqrt{\frac{d}{100 \cdot (s_1 - c_s)}} \right\} = \min \{ 1.0, 9.45 \cdot 94 / 3500 \cdot (94 / (100 \cdot (10 - 5,35)))^{1/2} \} = 0,1141$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия устойчивости:

$$[p]_e = \frac{20.8 \cdot 10^{-6} E_1}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_1 - c_s)}{d} \right]^{2.5} = \frac{20.8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 94}{(2,4 \cdot 0,1141 \cdot 3500) \cdot (100 \cdot (10 - 5,35) / 94)^{2.5}} = 20,32 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия прочности:

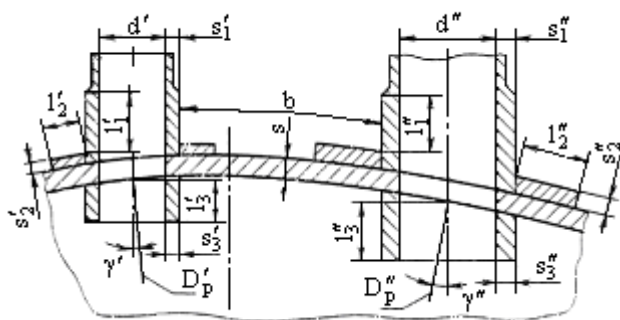
$$[p]_n = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + (s_1 - c_s)} = 2 \cdot 150 \cdot (10 - 5,35) / (94 + 10 - 5,35) = 14,14 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_n}{[p]_e} \right)^2}} = 14,14 / (1 + (14,14 / 20,32)^2)^{1/2} = 11,61 \text{ МПа}$$

11,61 МПа ≥ 0,21 МПа
Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**
Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 3000$ мм
Расчётный диаметр отверстия (ось штуцера совпадает с нормалью к поверхности в центре отверстия):

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	E-10K.00.00.000 PP					Лист
										130
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер МН DN800 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} + (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 454,3 \text{ мм}$$

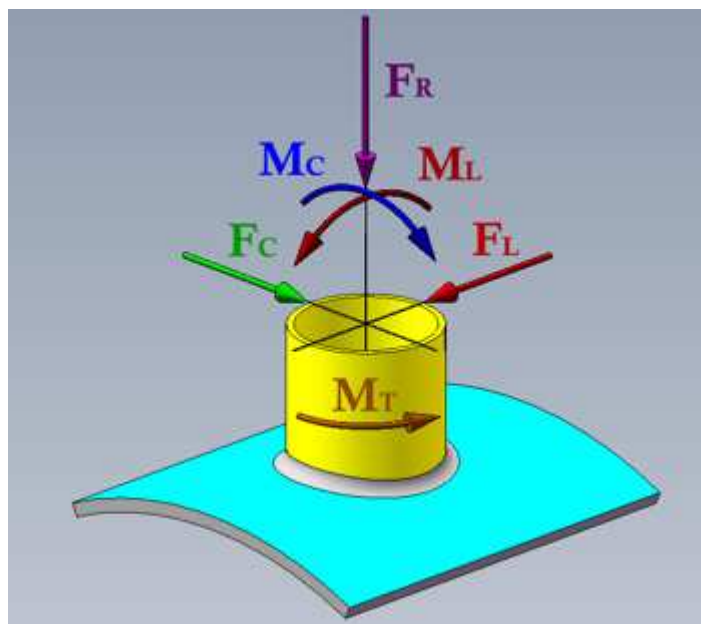
Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 0,3124 \text{ МПа}$

$0,3124 \text{ МПа} \geq 0,21 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

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



Радиальная нагрузка, F_R : 1014 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:

$$s_s = s - c = 22 - 4,8 = 17,2 \text{ мм}$$

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c = 3000 + 22 + 4,8 = 3027 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_s = 94 + 10 + 5,35 = 109,3 \text{ мм}$$

Изм. Лист № докум. Подп. Дата

Подпись и дата

Инд. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инд. № подл. 19746.4

E-10K.00.00.000 PP

Лист

132

$$M_y = M_L + F_L \cdot l_1 = 0 + 0 \cdot 3500 = 0 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 0,4793 + 0,1589 \cdot 0,4793^2 + (-0,02142) \cdot 0,4793^3 + 0,001035 \cdot 0,4793^4 = 4,591$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4793$):

$$[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 167 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot 109,3 / 4 \cdot \max\{4,591; 4.9\} = 6618 \text{ Н м}$$

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

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4793$):

$$[M_y] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 167 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot 109,3 / 4 \cdot \max\{5,511; 4.9\} = 7443 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((0 / 6618)^2 + (0 / 7443)^2)^{1/2} = 0$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

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

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right|; \left|\Phi_z\right|; \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} = ([\max(|0,6722 / 1 + (-0,01134)|; |(-0,01134)|; |0,6722 / 1 - 0.2 \cdot (-0,01134)|)]^2 + 0^2)^{1/2} = 0,6745$$

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

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

$0,6745 \leq 1.0$. **Условие прочности выполнено**

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = (-0,21) \cdot (94 + 10) / (4 \cdot (10 - 5,35)) + 4 \cdot (0^2 + 0^2)^{1/2} / (3,142 \cdot (94 + 10)^2 \cdot (10 - 5,35)) + 0 / (3,142 \cdot (94 + 10) \cdot (10 - 5,35)) = (-1,174) \text{ МПа}$$

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

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

$(-1,174) \text{ МПа} \leq 150 \text{ МПа}$. **Условие прочности выполнено**

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0,21 / 11,61 + (0^2 + 0^2)^{1/2} / 5079 + |(-1014)| / 5034 = 0,2195$$

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

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

$0,2195 \leq 1.0$. **Условие устойчивости выполнено**

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, T: 20 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,5284 МПа

Изн.	Изн. № подл.	Изн. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата
19746.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-10K.00.00.000 PP				Лист
				134

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

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

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

Модуль продольной упругости при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]^{20}_1 = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 280 / 1,1 = 254,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,5284 \cdot (94 + 2 \cdot 5,35) / (2 \cdot 254,5 \cdot 1 - 0,5284) = 0,1088 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 254,5 \cdot 1 \cdot (10 - 5,35) / (94 + 10 + 5,35) = 21,65 \text{ МПа}$$

$$21,65 \text{ МПа} \geq 0,5284 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 3000 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 2,909 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 94 + 2 \cdot 5,35 = 104,7 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((22 - 4,8) / 2,909 - 0,8) \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 2323 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 3500; 1,25 \cdot ((94 + 2 \cdot 5,35) \cdot (10 - 5,35))^{1/2} \} = 27,58 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 254,5 / 272,7 \} = 0,9333$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{2p} = \min \left\{ l_2; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_2 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((94 + 2 \cdot 5,35) \cdot (10 - 5,35 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 227,2 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 243 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

Подпись и дата		Изнв. № дубл.		Взам. инв. №		Подпись и дата		Изнв. № подл.	19746.4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP				Лист
									135

$$l_p = L_0 = 227,2 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

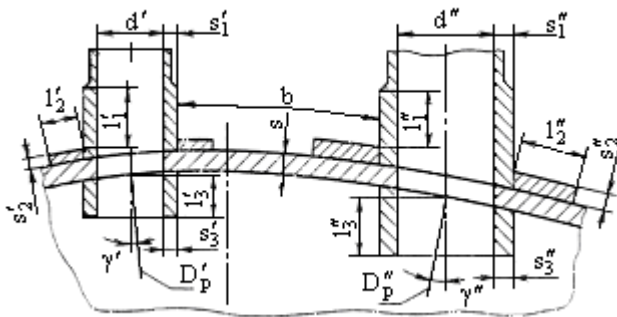
$$d_{op} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 90,86 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (27,58 \cdot (10 - 5,35) \cdot 0,9333 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 5,35 - 0) \cdot 0,9333) / (227,2 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0,5 \cdot (104,7 - 90,86) / 227,2 + 1 \cdot (94 + 2 \cdot 5,35) / 3000 \cdot 1 / 1 \cdot 27,58 / 227,2] = 0,9961 \}$$

$$= 0,9961$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 \cdot 272,7 \cdot 0,9961 / [3000 + (22 - 4,8) \cdot 0,9961] = 3,097 \text{ МПа}$$



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер МН DN800 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} + (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 454,3 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 3,097 \text{ МПа}$

$$3,097 \text{ МПа} \geq 0,5284 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5(d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (104,7 - 90,86) \cdot 2,909 = 0,2013 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

$$= 27,58 \cdot (10 - 0,1088 - 5,35) \cdot 0,9333 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 5,35 - 0) \cdot 0,9333 + 227,2 \cdot (22 - 2,909 - 4,8)$$

$$= 0,003363 \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,2013 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \leq 0,003363 \text{ м}^2$$

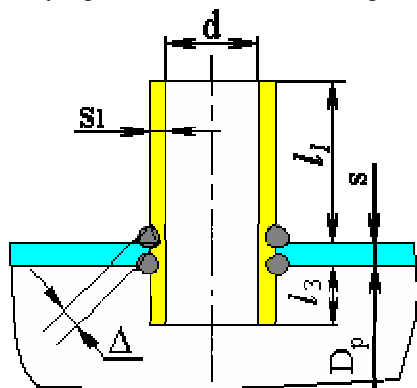
Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19746.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
E-10K.00.00.000 PP			
Лист			
136			

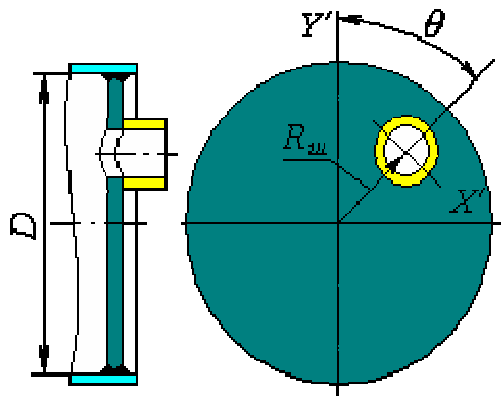
Штуцер O1 DN80

Исходные данные

Элемент: Штуцер O1 DN80
Условное обозначение (метка) Штуцер O1
Элемент, несущий штуцер: Фланец DN700 с крышкой
Тип элемента, несущего штуцер: Крышка плоская
Тип штуцера: Проходящий без укрепления

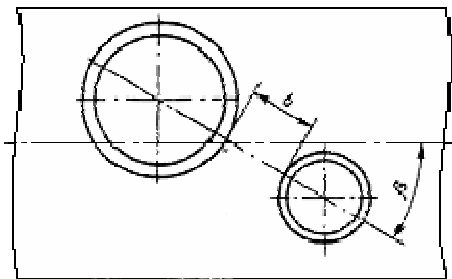


Материал несущего элемента: 09Г2С
Толщина стенки несущего элемента, s: 32 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, c: 5 мм
Материал штуцера: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281
Внутренний диаметр штуцера, d: 78 мм
Толщина стенки штуцера, s₁: 12 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c_s: 5,8 мм
Длина штуцера, l₁: 180 мм



Смещение штуцера, R_ш: 210 мм
Угол поворота штуцера, ϑ : 180 °
Длина внутр. части штуцера, l₃: 0 мм
Прибавка на коррозию, c_{s1}: 0 мм
Минимальный размер сварного шва, Δ: 1 мм
Расчётные параметры размещения штуцера:
Ближайший штуцер

Исх. № подл.	Исх. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата
19746.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
E-10K.00.00.000 PP			Лист 137



Название штуцера: Штуцер О1 (2)

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 318 мм

Угол β : 90°

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$$\phi_1 = 1$$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$$\wp = 1$$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, Т: 120 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,3522 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Температура фланца (кольца), t_{ϕ} : 115,2 °C

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 115,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$[\sigma]=175 \text{ МПа}$$

Температура фланца (кольца), $t_{\text{ф}}$: 115,2 °C

Модуль продольной упругости при температуре 115,2 °С:

$$E = 1,895 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$[\sigma]_1 = 157,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 120 °С:

$$E_1 = 1,89 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_{lp} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma_h \cdot \varphi_1 - p]} = 0,3522 \cdot (78 + 2 \cdot 5,8) / (2 \cdot 157,5 \cdot 1 - 0,3522) = 0,1003 \text{ mm}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 157,5 \cdot 1 \cdot (12 - 5,8) / (78 + 12 + 5,8) = 20,39 \text{ МПа}$$

$$20,39 \text{ МПа} \geq 0,3522 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Инв. № подл.	19746.4	Подпись и дата		Взам. инв. №		Инв. № дубл.		Подпись и дата		<div>Свойства материала элемента, несущего штуцер</div> <div>Температура фланца (кольца), $t_{\text{ф}}$: 115,2 °С Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 115,2$ °С (расчётные условия): $[\sigma]=$ 175 МПа Температура фланца (кольца), $t_{\text{ф}}$: 115,2 °С Модуль продольной упругости при температуре 115,2 °С: $E = 1,895 \cdot 10^5$ МПа</div> <div>Свойства материала штуцера</div> <div>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 120$ °С (расчётные условия): $[\sigma]_1=$ 157,5 МПа Модуль продольной упругости при температуре 120 °С: $E_1 = 1,89 \cdot 10^5$ МПа Расчётная толщина стенки штуцера: $s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,3522 * (78 + 2 * 5,8) / (2 * 157,5 * 1 - 0,3522) = 0,1003$ мм Допускаемое давление для патрубка штуцера: $[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 * 157,5 * 1 * (12 - 5,8) / (78 + 12 + 5,8) = 20,39$ МПа 20,39 МПа \geq 0,3522 МПа Заключение: Условие прочности и устойчивости выполнено</div> <div>Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)</div>				
										E-10K.00.00.000 PP				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						Лист				
										138				

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 180 °C

Расчётное наружное избыточное давление, p: 0,21 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Температура фланца (кольца), t_f : 172,8 °C

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 172,8 °C (расчётные условия (наружное давление)):

$[\sigma] = 168$ МПа

Температура фланца (кольца), t_f : 172,8 °C

Модуль продольной упругости при температуре 172,8 °C:

$E = 1,837 \cdot 10^5$ МПа

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 180 °C (расчётные условия (наружное давление)):

$[\sigma]_1 = 150$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 180 °C:

$E_1 = 1,83 \cdot 10^5$ МПа

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 - p} = 0,21 \cdot (78 + 2 \cdot 5,8) / (2 \cdot 150 - 0,21) = 0,06276 \text{ мм}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$B_1 = \min \left\{ 1,0, 9,45 \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \sqrt{\frac{d}{100 \cdot (s_1 - c_s)}} \right\} = \min \{ 1,0, 9,45 \cdot 78 / 180 \cdot (78 / (100 \cdot (12 - 5,8)))^{1/2} \} = 1$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия устойчивости:

$$[p]_u = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E_1}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_1 - c_s)}{d} \right]^{2,5} = 20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 78 / (2,4 \cdot 1 \cdot 180) \cdot (100 \cdot (12 - 5,8) / 78)^{2,5} = 122,4 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия прочности:

$$[p]_n = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + (s_1 - c_s)} = 2 \cdot 150 \cdot (12 - 5,8) / (78 + 12 - 5,8) = 22,09 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_n}{[p]_E} \right)^2}} = 22,09 / (1 + (22,09 / 122,4)^2)^{1/2} = 21,74 \text{ МПа}$$

21,74 МПа \geq 0,21 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: 0,4929 МПа

Подпись и дата		Изнв. № дубл.		Взам. инв. №		Подпись и дата		Изнв. № подл.	19746.4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP				Лист
									139

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Температура фланца (кольца), t_f : 20 °C
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 20$ °C (условия гидроиспытаний):
 $[\sigma]^{20} = \eta * R_{e/20} / n_T = 1 * 300 / 1,1 = 272,7$ МПа
Температура фланца (кольца), t_f : 20 °C
Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:
 $E = 1,99 \cdot 10^5$ МПа

Свойства материала штуцера

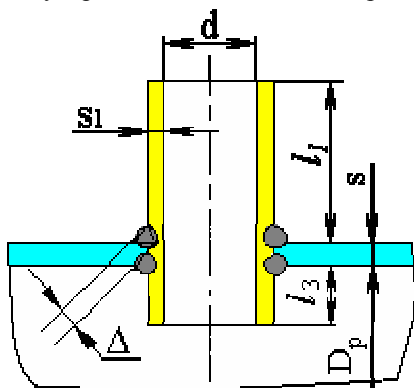
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20$ °C (условия гидроиспытаний):
 $[\sigma]^{20}_1 = \eta * R_{e/20} / n_T = 1 * 280 / 1,1 = 254,5$ МПа
Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:
 $E_1 = 1,99 \cdot 10^5$ МПа
Расчётная толщина стенки штуцера:
 $s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,4929 * (78 + 2 * 5,8) / (2 * 254,5 * 1 - 0,4929) = 0,08683$ мм
Допускаемое давление для патрубка штуцера:
 $[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 * 254,5 * 1 * (12 - 5,8) / (78 + 12 + 5,8) = 32,95$ МПа
 $32,95 \text{ МПа} \geq 0,4929 \text{ МПа}$
Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата		Инов. № дубл.		Взам. инв. №		Подпись и дата		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP				Лист
									140

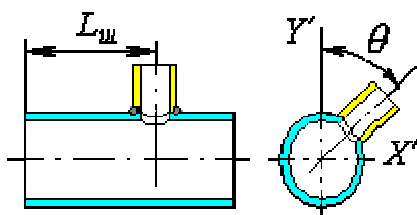
Штуцер O2 DN80

Исходные данные

Элемент: Штуцер O2 DN80
Условное обозначение (метка) Штуцер O2
Элемент, несущий штуцер: Обечайка цилиндрическая
Тип элемента, несущего штуцер: Обечайка цилиндрическая
Тип штуцера: Проходящий без укрепления

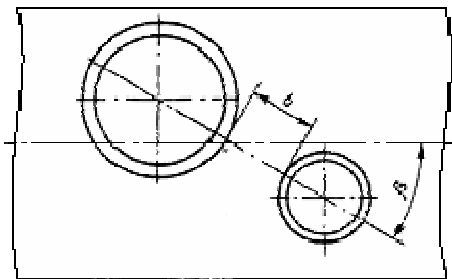


Материал несущего элемента: 09Г2С
Толщина стенки несущего элемента, s: 22 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, с: 4,8 мм
Материал штуцера: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281
Внутренний диаметр штуцера, d: 78 мм
Толщина стенки штуцера, s₁: 12 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), с_s: 5,8 мм
Длина штуцера, l₁: 3700 мм



Смещение штуцера, L_ш: 4450 мм
Угол поворота штуцера, ϑ: 0 °
Длина внутр. части штуцера, l₃: 0 мм
Прибавка на коррозию, с_{s1}: 0 мм
Минимальный размер сварного шва, Δ: 1 мм
Расчётные параметры размещения штуцера:
Ближайший штуцер

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	E-10K.00.00.000 PP	Лист
19746.4						141
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		



Название штуцера: Штуцер TW DN50

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 759 мм

Угол β : 0 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$$\phi_1 = 1$$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$$\emptyset = 1$$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 3000 \text{ mm}$$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, Т: 120 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,3788 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$[\sigma] = 174,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 120 °С:

$$E = 1,89 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$[\sigma]_1 = 157,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 120 °С:

$$E_1 = 1,89 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_{bp} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma_b \cdot \varphi_1 - p]} = 0,3788 \cdot (78 + 2 \cdot 5,8) / (2 \cdot 157,5 \cdot 1 - 0,3788) = 0,1079 \text{ mm}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_\varepsilon)}{d + s_1 + c_\varepsilon} = 2 \cdot 157,5 \cdot 1 \cdot (12 - 5,8) / (78 + 12 + 5,8) = 20,39 \text{ МПа}$$

$$20,39 \text{ МПа} \geq 0,3788 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

Подпись и дата		<p style="text-align: center;">Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007</p> <p style="text-align: center;"><i>Свойства материала элемента, несущего штуцер</i></p> <p>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 120 °С (расчётные условия):</p> <p>[σ] = 174,5 МПа</p> <p>Модуль продольной упругости при температуре 120 °С:</p> <p>E = 1,89·10⁵ МПа</p> <p style="text-align: center;"><i>Свойства материала штуцера</i></p> <p>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 120 °С (расчётные условия):</p> <p>[σ]₁ = 157,5 МПа</p> <p>Модуль продольной упругости при температуре 120 °С:</p> <p>E₁ = 1,89·10⁵ МПа</p> <p>Расчётная толщина стенки штуцера:</p> $s_{ш} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,3788 \cdot (78 + 2 \cdot 5,8) / (2 \cdot 157,5 \cdot 1 - 0,3788) = 0,1079 \text{ мм}$ <p>Допускаемое давление для патрубков штуцера:</p> $[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 157,5 \cdot 1 \cdot (12 - 5,8) / (78 + 12 + 5,8) = 20,39 \text{ МПа}$ <p>20,39 МПа ≥ 0,3788 МПа</p> <p>Заключение: Условие прочности и устойчивости выполнено</p> <p>Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:</p>
Инв. № дубл.		
Взам. инв. №		
Подпись и дата		
Инв. № подл.	19746.4	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP	Лист 142
------	------	----------	-------	------	--------------------	-------------

$$D_p = D = 3000 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 3,26 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 78 + 2 \cdot 5,8 = 89,6 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((22 - 4,8) / 3,26 - 0,8) \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 2034 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 3700; 1,25 \cdot ((78 + 2 \cdot 5,8) \cdot (12 - 5,8))^{1/2} \} = 29,46 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0; 157,5 / 174,5 \} = 0,9026$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((78 + 2 \cdot 5,8) \cdot (12 - 5,8 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 227,2 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 2419 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 227,2 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 90,86 \text{ мм}$$

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

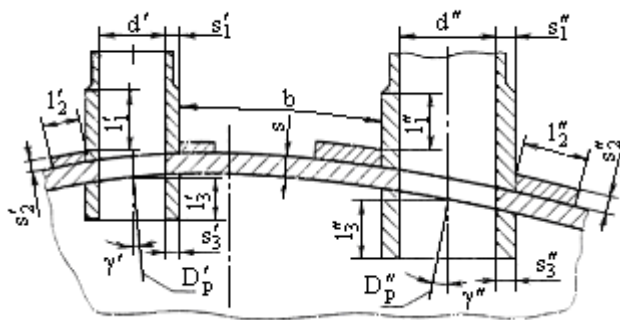
$$= \min \{ 1; [1 + (29,46 \cdot (12 - 5,8) \cdot 0,9026 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (12 - 5,8 - 0) \cdot 0,9026) / (227,2 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0,5 \cdot (89,6 - 90,86) / 227,2 + 1 \cdot (78 + 2 \cdot 5,8) / 3000 \cdot 1 / 1 \cdot 29,46 / 227,2] \} = 1,041$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 \cdot 174,5 \cdot 1 / [3000 + (22 - 4,8) \cdot 1] = 1,99 \text{ МПа}$$

Изн. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	$L_k = 2419 \text{ мм}$ Расчётная ширина зоны укрепления: $l_p = L_0 = 227,2 \text{ мм}$ Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления: $d_{0p} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 90,86 \text{ мм}$ $V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{0p}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}} \right\}$ $= \min \{ 1; [1 + (29,46 \cdot (12 - 5,8) \cdot 0,9026 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (12 - 5,8 - 0) \cdot 0,9026) / (227,2 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0.5 \cdot (89,6 - 90,86) / 227,2 + 1 \cdot (78 + 2 \cdot 5,8) / 3000 \cdot 1 / 1 \cdot 29,46 / 227,2] = 1,041 \}$ $= 1$ $[R]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 \cdot 174,5 \cdot 1 / [3000 + (22 - 4,8) \cdot 1] = 1,99 \text{ МПа}$

Изн. № подл.	19746.4	E-10K.00.00.000 PP					Лист 143
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			



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

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} + (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 454,3 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 1,99 \text{ МПа}$

$1,99 \text{ МПа} \geq 0,3788 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5(d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (89,6 - 90,86) \cdot 3,26 = (-0,2058 \cdot 10^{-5}) \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

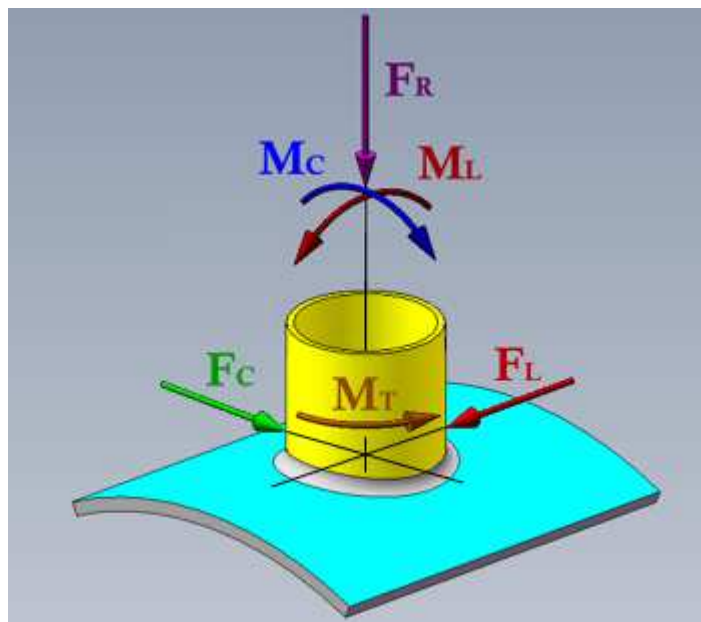
$$= 29,46 \cdot (12 - 0,1079 - 5,8) \cdot 0,9026 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (12 - 5,8 - 0) \cdot 0,9026 + 227,2 \cdot (22 - 3,26 - 4,8)$$

$$= 0,003329 \text{ м}^2$$

$$A_r = (-0,2058 \cdot 10^{-5}) \text{ м}^2 \leq 0,003329 \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

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



Радиальная нагрузка, F_R : 2900 Н

Окружной момент, M_C : 700 Н м

Продольный момент, M_L : 700 Н м

Крутящий момент, M_T : 1000 Н м

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP	Лист
19746.4						144

$$[F_z] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1.81\} = 174,5 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot \max\{1,001; 1.81\} = 9,344 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \frac{|F_z|}{[F_z]} = |(-2900) / 9,344 \cdot 10^4| = 0,03104$$

Условие прочности: $\Phi_z \leq 1$

0,03104 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_x = M_c = 700 \text{ Н м}$$

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_y = M_L = 700 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 0,4199 + 0,1589 \cdot 0,4199^2 + (-0,02142) \cdot 0,4199^3 + 0,001035 \cdot 0,4199^4 = 4,58$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4199$):

$$[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4,9\} = 174,5 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot 95,8 / 4 \cdot \max\{4,58; 4,9\} = 6058 \text{ Н м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 5,516$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4199$):

$$[M_y] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4,9\} = 174,5 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot 95,8 / 4 \cdot \max\{5,516; 4,9\} = 6820 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((700 / 6058)^2 + (700 / 6820)^2)^{1/2} = 0,1545$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

0,1545 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right|, \left|\Phi_z\right|, \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0,2 \cdot \Phi_z\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} = ([\max(|0,1904 / 1 + (-0,03104)|; |(-0,03104)|; |0,1904 / 1 - 0,2 \cdot (-0,03104)|)]^2 + 0,1545^2)^{1/2} = 0,2501$$

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

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

0,2501 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = 0,3788 \cdot (78 + 12) / (4 \cdot (12 - 5,8)) + 4 \cdot (700^2 + 700^2)^{1/2} / (3,142 \cdot (78 + 12)^2 \cdot (12 - 5,8)) + 0 / (3,142 \cdot (78 + 12) \cdot (12 - 5,8)) = 26,47 \text{ МПа}$$

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

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

26,47 МПа ≤ 157,5 МПа. **Условие прочности выполнено**

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0 / 20,39 + (700^2 + 700^2)^{1/2} / 5037 + |(-2900)| / 4542 = 0,835$$

Изн. № подл. 19746.4	Подпись и дата				
	Изн. № дубл.				
	Взам. инв. №				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<div>E-10K.00.00.000 PP</div> <div>Лист</div> <div>146</div>

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

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

0,835 ≤ 1.0. **Условие устойчивости выполнено**

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения:

Расчётная температура, Т: 180 °С

Расчётное наружное избыточное давление, р: 0,21 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)):

$[\sigma] = 167$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 180 °С:

$E = 1,83 \cdot 10^5$ МПа

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре Т = 180 °С (расчётные условия (наружное давление)):

$[\sigma]_1 = 150$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 180 °С:

$E_1 = 1,83 \cdot 10^5$ МПа

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 - p} = 0,21 \cdot (78 + 2 \cdot 5,8) / (2 \cdot 150 - 0,21) = 0,06276 \text{ мм}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$B_1 = \min \left\{ 1,0, 9,45 \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \sqrt{\frac{d}{100 \cdot (s_1 - c_s)}} \right\} = \min \{ 1,0, 9,45 \cdot 78 / 3700 \cdot (78 / (100 \cdot (12 - 5,8)))^{1/2} \} = 0,07066$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия устойчивости:

$$[p]_e = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E_1}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_1 - c_s)}{d} \right]^{2,5} = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 78 / (2,4 \cdot 0,07066 \cdot 3700) \cdot (100 \cdot (12 - 5,8) / 78)}{1^{2,5}} = 84,29 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия прочности:

$$[p]_n = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + (s_1 - c_s)} = 2 \cdot 150 \cdot (12 - 5,8) / (78 + 12 - 5,8) = 22,09 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_n}{[p]_e} \right)^2}} = 22,09 / (1 + (22,09 / 84,29)^2)^{1/2} = 21,37 \text{ МПа}$$

21,37 МПа ≥ 0,21 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 3000$ мм

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата						Лист 147				
					Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата					
					E-10K.00.00.000 PP									

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 78 + 2 \cdot 5,8 = 89,6 \text{ мм}$$

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 3700; 1,25 \cdot ((78 + 2 \cdot 5,8) \cdot (12 - 5,8))^{1/2} \} = 29,46 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 150 / 167 \} = 0,8982$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{2p} = \min \left\{ l_2; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_2 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((78 + 2 \cdot 5,8) \cdot (12 - 5,8 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 227,2 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 2419 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 227,2 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{op} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 90,86 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (29,46 \cdot (12 - 5,8) \cdot 0,8982 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (0 - 2 \cdot 5,8) \cdot 0,8982) / (227,2 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0,5 \cdot (89,6 - 90,86) / 227,2 + 1 \cdot (78 + 2 \cdot 5,8) / 3000 \cdot 29,46 / 227,2] \} = 1,041$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 167 \cdot 1 / [3000 + (22 - 4,8) \cdot 1] = 1,904 \text{ МПа}$$

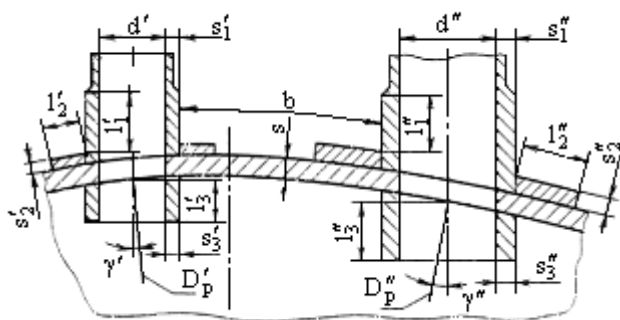
Допускаемое наружное давление:

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_p}{[p]_E} \right)^2}} = 1,904 / (1 + (1,904 / 0,3167)^2)^{1/2} = 0,3124 \text{ МПа}$$

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

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	$\bar{V} = \min \left\{ 1; \frac{1_p \cdot (s - c)}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{оп}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{1_p}{l_p}} \right\}$ $= \min \{ 1; [1 + (29,46 \cdot (12 - 5,8) \cdot 0,8982 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (0 - 2 \cdot 5,8) \cdot 0,8982) / (227,2 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0.5 \cdot (89,6 - 90,86) / 227,2 + 1 \cdot (78 + 2 \cdot 5,8) / 3000 \cdot 29,46 / 227,2] = 1,041 \}$ $= 1$ $[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot \bar{V}} \cdot \bar{V} = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 167 \cdot 1 / [3000 + (22 - 4,8) \cdot 1] = 1,904 \text{ МПа}$ <p>Допускаемое наружное давление:</p> $[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_p}{[p]_E} \right)^2}} = 1,904 / (1 + (1,904 / 0,3167)^2)^{1/2} = 0,3124 \text{ МПа}$ <p>где [P]_Е – допускаемое наружное давление в пределах упругости для элемента, несущего штуцер (см. расчёт элемента “Обечайка цилиндрическая”)</p>

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Е-10К.00.00.000 РР	Лист
						148



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

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} + (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 454,3 \text{ мм}$$

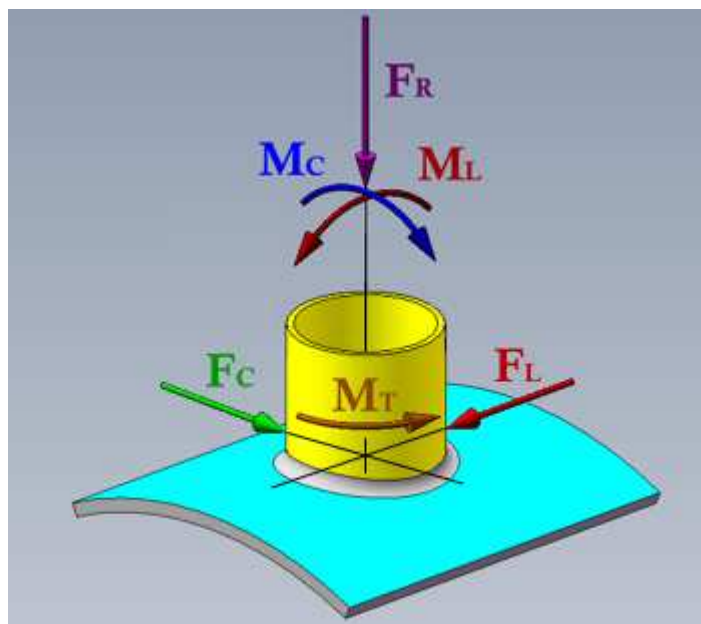
Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 0,3124 \text{ МПа}$

$0,3124 \text{ МПа} \geq 0,21 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

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



Радиальная нагрузка, F_R : 2900 Н

Окружной момент, M_C : 700 Н м

Продольный момент, M_L : 700 Н м

Крутящий момент, M_T : 1000 Н м

Сдвиговая нагрузка, F_C : 2000 Н

Сдвиговая нагрузка, F_L : 2000 Н

Эквивалентная толщина обечайки около штуцера:

$$s_s = s - c = 22 - 4,8 = 17,2 \text{ мм}$$

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c = 3000 + 22 + 4,8 = 3027 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_s = 78 + 12 + 5,8 = 95,8 \text{ мм}$$

Подпись и дата

Инов. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инов. № подл.

19746.4

E-10K.00.00.000 PP

Лист

149

Изм. Лист № докум. Подп. Дата

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} = 95,8 / (3027 \cdot 17,2)^{1/2} = 0,4199$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 759 \text{ мм}$$

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D_c}{2} = 3027 / 2 = 1513 \text{ мм}$$

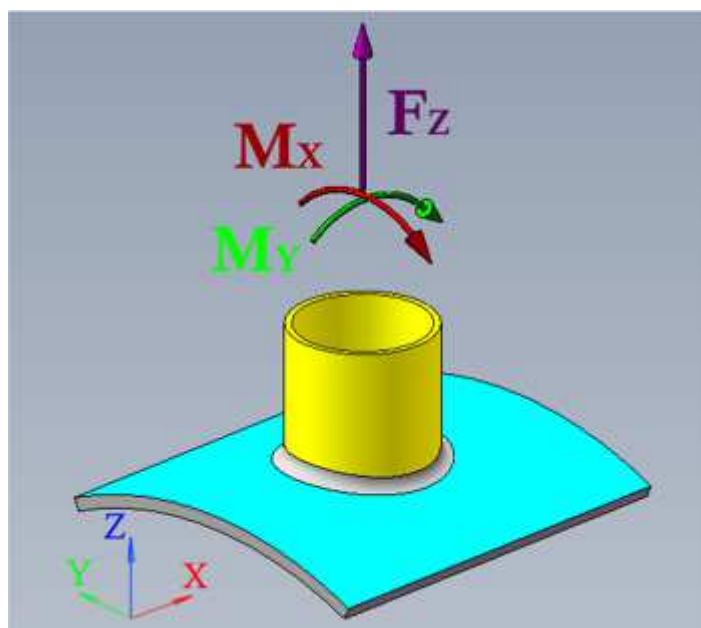
Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |(-0,21) / 0,3124| = 0,6721$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

$0,6721 \leq 1,0$. Условие прочности выполнено

Расчетная схема по ГОСТ Р 52857.3-2007



Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

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

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s-c)}} = 95,8 / (3027 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 0,4199$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 0,4199 + 0,005196 \cdot 0,4199^2 + (-0,001406) \cdot 0,4199^3 + 0 \cdot 0,4199^4 = 1,001$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4199$):

$$[F_z] = [\sigma] \cdot (s-c)^2 \cdot \max\{C_1; 1,81\} = 167 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot \max\{1,001; 1,81\} = 8,942 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{[F_z]} \right| = |(-2900) / 8,942 \cdot 10^4| = 0,03243$$

Условие прочности: $\Phi_z \leq 1$

$0,03243 \leq 1,0$. Условие прочности выполнено

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_x = M_c = 700 \text{ Н м}$$

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:

Изн. № подл.	Изн. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата
19746.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
E-10K.00.00.000 PP			Лист
			150

$$M_y = M_L = 700 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 0,4199 + 0,1589 \cdot 0,4199^2 + (-0,02142) \cdot 0,4199^3 + 0,001035 \cdot 0,4199^4 = 4,58$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4199$):

$$[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 167 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot 95,8 / 4 \cdot \max\{4,58; 4.9\} = 5798 \text{ Н м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 5,516$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,4199$):

$$[M_y] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 167 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot 95,8 / 4 \cdot \max\{5,516; 4.9\} = 6527 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((700 / 5798)^2 + (700 / 6527)^2)^{1/2} = 0,1615$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

$0,1615 \leq 1.0$. **Условие прочности выполнено**

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right|; \left|\Phi_z\right|; \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} = (\max(|0,6721 / 1 + (-0,03243)|; |(-0,03243)|; |0,6721 / 1 - 0.2 \cdot (-0,03243)|))^2 + 0,1615^2)^{1/2} = 0,6976$$

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

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

$0,6976 \leq 1.0$. **Условие прочности выполнено**

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = (-0,21) \cdot (78 + 12) / (4 \cdot (12 - 5,8)) + 4 \cdot (700^2 + 700^2)^{1/2} / (3,142 \cdot (78 + 12)^2 \cdot (12 - 5,8)) + 0 / (3,142 \cdot (78 + 12) \cdot (12 - 5,8)) = 24,34 \text{ МПа}$$

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

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

$24,34 \text{ МПа} \leq 150 \text{ МПа}$. **Условие прочности выполнено**

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0,21 / 21,37 + (700^2 + 700^2)^{1/2} / 4797 + |(-2900)| / 4398 = 0,8756$$

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

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

$0,8756 \leq 1.0$. **Условие устойчивости выполнено**

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, Т: 20 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,5284 МПа

Изн.	№ подл.	19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP	
						Лист
						151

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

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

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

Модуль продольной упругости при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]^{20}_1 = \eta * R_{e/20} / n_T = 1 * 280 / 1,1 = 254,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,5284 * (78 + 2 * 5,8) / (2 * 254,5 * 1 - 0,5284) = 0,09310 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 * 254,5 * 1 * (12 - 5,8) / (78 + 12 + 5,8) = 32,95 \text{ МПа}$$

$$32,95 \text{ МПа} \geq 0,5284 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 3000 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 2,909 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 78 + 2 * 5,8 = 89,6 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 * ((22 - 4,8) / 2,909 - 0,8) * (3000 * (22 - 4,8))^{1/2} = 2323 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 3700; 1,25 * ((78 + 2 * 5,8) * (12 - 5,8))^{1/2} \} = 29,46 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 254,5 / 272,7 \} = 0,9333$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{2p} = \min \left\{ l_2; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_2 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 * ((78 + 2 * 5,8) * (12 - 5,8 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3000 * (22 - 4,8))^{1/2} = 227,2 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 2419 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-10K.00.00.000 PP				Лист
				152

$$l_p = L_0 = 227,2 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

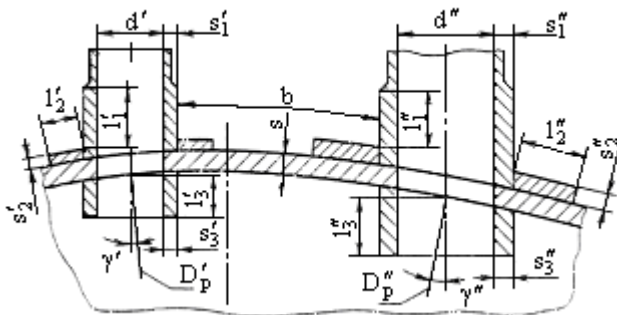
$$d_{op} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 90,86 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (29,46 \cdot (12 - 5,8) \cdot 0,9333 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (12 - 5,8 - 0) \cdot 0,9333) / (227,2 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0,5 \cdot (89,6 - 90,86) / 227,2 + 1 \cdot (78 + 2 \cdot 5,8) / 3000 \cdot 1 / 1 \cdot 29,46 / 227,2] = 1,042 \}$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 \cdot 272,7 \cdot 1 / [3000 + (22 - 4,8) \cdot 1] = 3,109 \text{ МПа}$$



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

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} + (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 454,3 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 3,109 \text{ МПа}$

$$3,109 \text{ МПа} \geq 0,5284 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5(d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (89,6 - 90,86) \cdot 2,909 = (-0,1836 \cdot 10^{-5}) \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

$$= 29,46 \cdot (12 - 0,09310 - 5,8) \cdot 0,9333 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (12 - 5,8 - 0) \cdot 0,9333 + 227,2 \cdot (22 - 2,909 - 4,8)$$

$$= 0,003414 \text{ м}^2$$

$$A_r = (-0,1836 \cdot 10^{-5}) \text{ м}^2 \leq 0,003414 \text{ м}^2$$

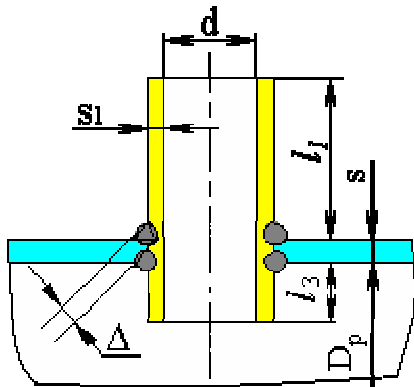
Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19746.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
E-10K.00.00.000 PP			
Лист			
153			

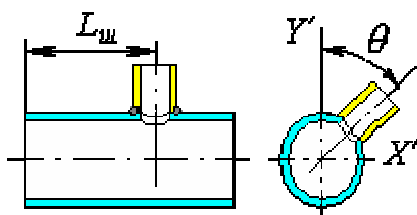
Штуцер P1 DN50

Исходные данные

Элемент: Штуцер P1 DN50
 Условное обозначение (метка) Штуцер P1
 Элемент, несущий штуцер: Штуцер A1 DN700
 Тип элемента, несущего штуцер: Штуцер
 Тип штуцера: Проходящий без укрепления



Материал несущего элемента: 09Г2С
 Толщина стенки несущего элемента, s: 22 мм
 Сумма прибавок к стенке несущего элемента, с: 4,8 мм
 Материал штуцера: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281
 Внутренний диаметр штуцера, d: 48 мм
 Толщина стенки штуцера, s₁: 10 мм
 Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), с_s: 5,5 мм
 Длина штуцера, l₁: 150 мм

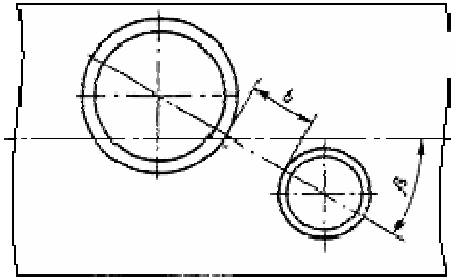


Смещение штуцера, L_ш: 3378 мм
 Угол поворота штуцера, θ: 90 °
 Длина внутр. части штуцера, l₃: 0 мм
 Прибавка на коррозию, с_{s1}: 0 мм
 Минимальный размер сварного шва, Δ: 1 мм
 Расчётные параметры размещения штуцера:
 Ближайший штуцер

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

E-10K.00.00.000 PP



Название штуцера: Штуцер V DN50

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 1101 мм

Угол β : 90 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$\varphi_1 = 1$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$\varphi = 1$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 700 \text{ мм}$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 120 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,3541 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 120 °C (расчётные условия):

$[\sigma] = 174,5 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 120 °C:

$E = 1,89 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 120 °C (расчётные условия):

$[\sigma]_1 = 157,5 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 120 °C:

$E_1 = 1,89 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,3541 \cdot (48 + 2 \cdot 5,5) / (2 \cdot 157,5 \cdot 1 - 0,3541) = 0,06640 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 157,5 \cdot 1 \cdot (10 - 5,5) / (48 + 10 + 5,5) = 22,32 \text{ МПа}$$

22,32 МПа \geq 0,3541 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-10K.00.00.000 PP				Лист
				155

$$D_p = D = 700 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 0,7208 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 48 + 2 \cdot 5,5 = 59 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((22 - 4,8) / 0,7208 - 0,8) \cdot (700 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 5061 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 150; 1,25 \cdot ((48 + 2 \cdot 5,5) \cdot (10 - 5,5))^{1/2} \} = 20,37 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0; 157,5 / 174,5 \} = 0,9026$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

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

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (700 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 109,7 \text{ мм}$$

Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (Фланец DN700 с крышкой):

$$L_k = 133 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 109,7 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (700 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 43,89 \text{ мм}$$

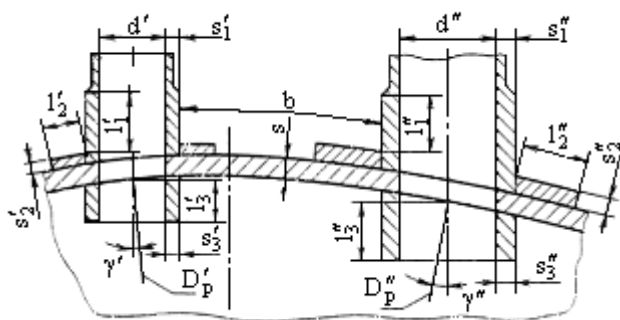
$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0,5 \cdot \frac{d_p - d_{0p}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}}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

$$= \min \{ 1; [1 + (20,37 \cdot (10 - 5,5) \cdot 0,9026 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 5,5 - 0) \cdot 0,9026) / (109,7 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0,5 \cdot (59 - 43,89) / 109,7 + 1 \cdot (48 + 2 \cdot 5,5) / 700 \cdot 1 / 1 \cdot 20,37 / 109,7] \} = 0,9625$$

$$= 0,9625$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 \cdot 174,5 \cdot 0,9625 / [700 + (22 - 4,8) \cdot 0,9625] = 8,063 \text{ МПа}$$

Изн. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP				
					Лист				156



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

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (700 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} + (700 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 219,5 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 8,063 \text{ МПа}$

$8,063 \text{ МПа} \geq 0,3541 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (59 - 43,89) \cdot 0,7208 = 0,5445 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

$$A_a = l_p \cdot (s_1 - s_p - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_{s1}) \cdot \chi_3 + l_p \cdot (s - s_p - c) \\ = 20,37 \cdot (10 - 0,06640 - 5,5) \cdot 0,9026 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 5,5 - 0) \cdot 0,9026 + 109,7 \cdot (22 - 0,7208 - 4,8) \\ = 0,001890 \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,5445 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \leq 0,001890 \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 180 °C

Расчётное наружное избыточное давление, p: 0,21 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

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

$[\sigma] = 167 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °C:

$E = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 180 °C (расчётные условия (наружное давление)):

$[\sigma]_1 = 150 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 180 °C:

$E_1 = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 - p} = 0,21 \cdot (48 + 2 \cdot 5,5) / (2 \cdot 150 - 0,21) = 0,04133 \text{ мм}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19746.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
E-10K.00.00.000 PP			
Лист			
157			

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$E_1 = \min \left\{ 1.0, 9.45 \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \sqrt{\frac{d}{100 \cdot (s_1 - c_s)}} \right\} = \min \{ 1.0, 9.45 \cdot 48 / 150 \cdot (48 / (100 \cdot (10 - 5.5)))^{1/2} \} = 0.9876$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия устойчивости:

$$[p]_e = \frac{20.8 \cdot 10^{-6} E_1}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_1 - c_s)}{d} \right]^{2.5} = \frac{20.8 \cdot 10^{-6} \cdot 1.83 \cdot 10^5 \cdot 48 / (2.4 \cdot 0.9876 \cdot 150) \cdot (100 \cdot (10 - 5.5) / 48)}{2.5} = 138.3 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия прочности:

$$[p]_n = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + (s_1 - c_s)} = 2 \cdot 150 \cdot (10 - 5.5) / (48 + 10 - 5.5) = 25.71 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_n}{[p]_e} \right)^2}} = 25.71 / (1 + (25.71 / 138.3)^2)^{1/2} = 25.28 \text{ МПа}$$

25,28 МПа ≥ 0,21 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 700 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 48 + 2 \cdot 5.5 = 59 \text{ мм}$$

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1.25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 150; 1.25 \cdot ((48 + 2 \cdot 5.5) \cdot (10 - 5.5))^{1/2} \} = 20.37 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1.0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1.0, 150 / 167 \} = 0.8982$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0.5 \cdot ((48 + 2 \cdot 5.5) \cdot (10 - 5.5 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (700 \cdot (22 - 4.8))^{1/2} = 109.7 \text{ мм}$$

Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (Фланец DN700 с крышкой):

$$L_k = 133 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 109.7 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{op} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (700 \cdot (22 - 4.8))^{1/2} = 43.89 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (20.37 \cdot (10 - 5.5) \cdot 0.8982 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (2 - 5.5) \cdot 0.8982) / (109.7 \cdot (22 - 4.8))] / [1 + 0.5 \cdot (59 - 43.89) / 109.7 + 1 \cdot (48 + 2 \cdot 5.5) / 700 \cdot 20.37 / 109.7] \} = 0.9623$$

Изн. № подл. 19746.4	Подпись и дата				
	Изн. № дубл.				
	Взам. инв. №				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP
					Лист
					158

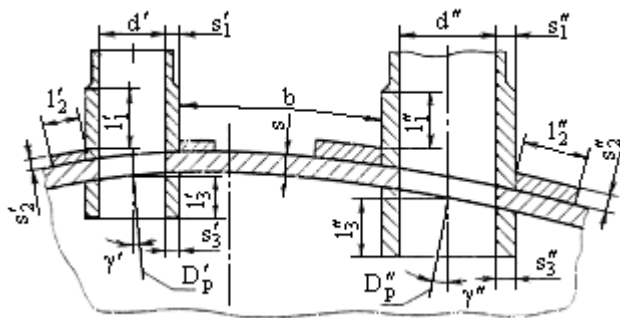
$$= 0,9623$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 167 \cdot 0,9623 / [700 + (22 - 4,8) \cdot 0,9623] = 7,715 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление:

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_p}{[p]_E} \right)^2}} = 7,715 / (1 + (7,715 / 2,993)^2)^{1/2} = 2,791 \text{ МПа}$$

где $[P]_E$ – допускаемое наружное давление в пределах упругости для элемента, несущего штуцер (см. расчёт элемента “Штуцер А1 DN700”)



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

$$b > \sqrt{D_p \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (700 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} + (700 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 219,5 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 2,791 \text{ МПа}$

$2,791 \text{ МПа} \geq 0,21 \text{ МПа}$

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: 0,4955 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

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

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

Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:

$$E = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 20 °C (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]^{20}_1 = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 280 / 1,1 = 254,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:

$$E_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

Изн. № подл.	Подпись и дата
19746.4	
Изн. № дубл.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Подпись и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP	Лист
						159

$$s_{tp} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma_1 \cdot \phi_1 - p]} = 0,4955 \cdot (48 + 2 \cdot 5,5) / (2 \cdot 254,5 \cdot 1 - 0,4955) = 0,05748 \text{ mm}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 * 254,5 * 1 * (10 - 5,5) / (48 + 10 + 5,5) = 36,08 \text{ МПа}$$

$$36,08 \text{ МПа} \geq 0,4955 \text{ МПа}$$

Заключение: Условие прочности и устойчивости выполнено

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 700 \text{ mm}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 0,6452 \text{ MM}$$

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

$$d_n = d + 2 \cdot c_s = 48 + 2 \cdot 5,5 = 59 \text{ mm}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s-c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = 2 \cdot ((22-4,8)/0,6452 - 0,8) \cdot (700 \cdot (22-4,8))^{1/2} = 5675 \text{ mm}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{10} = \min[l_1; 1.25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_c) \cdot (s_1 - c_c)}] = \min[150; 1.25 \cdot ((48 + 2 \cdot 5,5) \cdot (10 - 5,5))^{1/2}] = 20,37 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1, 0; \frac{\begin{bmatrix} \sigma \\ 1 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} \sigma \end{bmatrix}} \right\} = \min \{ 1.0, 254,5 / 272,7 \} = 0,9333$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{30} = \min \{ l_3; 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_f) \cdot (s_3 - c_f - c_{f1})} \} = \min \{ 0; 0.5 \cdot ((48 + 2 \cdot 5,5) \cdot (10 - 5,5 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (700 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 109,7 \text{ mm}$$

Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (Фланец DN700 с крышкой):

$$L_k = 133 \text{ mm}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_0 = L_0 = 109,7 \text{ mm}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{op} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (700 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 43,89 \text{ mm}$$

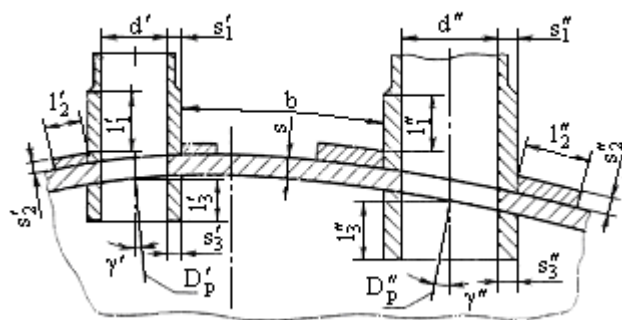
$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{1_{lp} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + 1_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + 1_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{1_p \cdot (s - c)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{op}}{1_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{1_{lp}}{1_p}}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

$$= \min\{1; [1 + (20,37 * (10 - 5,5) * 0,9333 + 0 * 0 * 0 + 0 * (10 - 5,5 - 0) * 0,9333) / (109,7 * (22 - 4,8))] / [1 + 0,5 * (59 - 43,89) / 109,7 + 1 * (48 + 2 * 5,5) / 700 * 1 / 1 * 20,37 / 109,7]\} = \mathbf{0,9639}$$

$$= 0,9639$$

Подпись и дата		Инв. № дубл.		Взам. инв. №		Подпись и дата		Инв. № подл.	19746.4
<p>Расчётная длина внутренней части штуцера:</p> $l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0.5 \cdot ((48 + 2 \cdot 5.5) \cdot (10 - 5.5 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$ <p>Ширина зоны укрепления:</p> $L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (700 \cdot (22 - 4.8))^{1/2} = 109,7 \text{ мм}$ <p>Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (Фланец DN700 с крышкой):</p> $L_k = 133 \text{ мм}$ <p>Расчётная ширина зоны укрепления:</p> $l_p = L_0 = 109,7 \text{ мм}$ <p>Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:</p> $d_{op} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (700 \cdot (22 - 4.8))^{1/2} = 43,89 \text{ мм}$ $V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}} \right\}$ $= \min \{ 1; [1 + (20,37 \cdot (10 - 5,5) \cdot 0,9333 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 5,5 - 0) \cdot 0,9333) / (109,7 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0.5 \cdot (59 - 43,89) / 109,7 + 1 \cdot (48 + 2 \cdot 5,5) / 700 \cdot 1 / 1 \cdot 20,37 / 109,7] = 0,9639 \}$ <p>= 0,9639</p>									
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP				
					160				

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot \gamma} \cdot \gamma = 2 * 1 * (22 - 4,8) * 1 * 272,7 * 0,9639 / [700 + (22 - 4,8) * 0,9639] = 12,62 \text{ МПа}$$



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

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (700 * (22 - 4,8))^{1/2} + (700 * (22 - 4,8))^{1/2} = 219,5 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 12,62 \text{ МПа}$

$12,62 \text{ МПа} \geq 0,4955 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5(d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0,5 * (59 - 43,89) * 0,6452 = 0,4874 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

$$= 20,37 * (10 - 0,05748 - 5,5) * 0,9333 + 0 * 0 * 0 + 0 * (10 - 5,5 - 0) * 0,9333 + 109,7 * (22 - 0,6452 - 4,8)$$

$$= 0,001901 \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,4874 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \leq 0,001901 \text{ м}^2$$

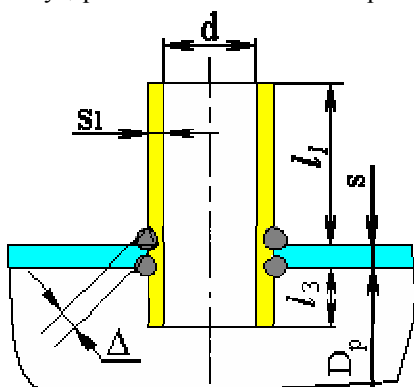
Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19746.4						
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP	
					Лист	161

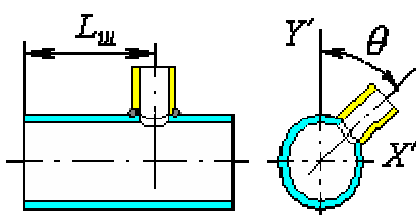
Штуцер TW DN50

Исходные данные

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

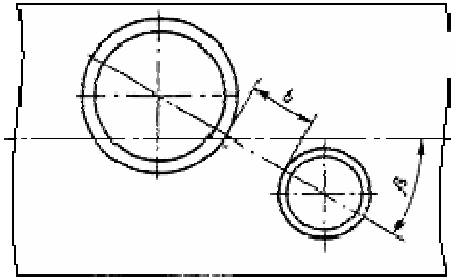


Материал несущего элемента: 09Г2С
 Толщина стенки несущего элемента, s : 22 мм
 Сумма прибавок к стенке несущего элемента, c : 4,8 мм
 Материал штуцера: 09Г2С(КП265) Gr.
 Внутренний диаметр штуцера, d : 48 мм
 Толщина стенки штуцера, s_1 : 16 мм
 Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c_s : 4 мм
 Длина штуцера, l_1 : 100 мм



Смещение штуцера, $L_{ш}$: 5300 мм
 Угол поворота штуцера, ϑ : 0 °
 Длина внутр. части штуцера, l_3 : 0 мм
 Прибавка на коррозию, c_{s1} : 0 мм
 Минимальный размер сварного шва, Δ : 1 мм
 Расчётные параметры размещения штуцера:
 Ближайший штуцер

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	<div style="text-align: center;">E-10K.00.00.000 PP</div>	Лист
19746.4						162
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		



Название штуцера: Штуцер LT1 DN100

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 603 мм

Угол β : 0 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$\varphi_1 = 1$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$\varphi = 1$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 3000 \text{ мм}$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 120 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,3788 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 120 °C (расчётные условия):

$[\sigma] = 174,5 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 120 °C:

$E = 1,89 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 120 °C (расчётные условия):

$[\sigma]_1 = \eta \cdot \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B; R_{m/10n/t} / n_D; R_{p1,0/10n/t} / n_P) = 1 \cdot \min\{206,8 / 1,5; 403 / 2,4; - / -; - / -\} = 137,9 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 120 °C:

$E_1 = 1,89 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,3788 \cdot (48 + 2 \cdot 4) / (2 \cdot 137,9 \cdot 1 - 0,3788) = 0,07702 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 137,9 \cdot 1 \cdot (16 - 4) / (48 + 16 + 4) = 48,67 \text{ МПа}$$

48,67 МПа \geq 0,3788 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-10K.00.00.000 PP				Лист
				163

$$D_p = D = 3000 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 3,26 \text{ мм}$$

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

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

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((22 - 4,8) / 3,26 - 0,8) \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 2034 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 100; 1,25 \cdot ((48 + 2 \cdot 4) \cdot (16 - 4))^{1/2} \} = 32,4 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0; 137,9 / 174,5 \} = 0,7902$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((48 + 2 \cdot 4) \cdot (16 - 4 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 227,2 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 1580 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 227,2 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 90,86 \text{ мм}$$

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

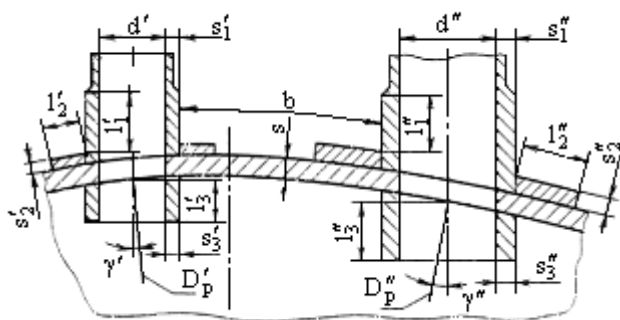
$$= \min \{ 1; [1 + (32,4 \cdot (16 - 4) \cdot 0,7902 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (16 - 4 - 0) \cdot 0,7902) / (227,2 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0,5 \cdot (56 - 90,86) / 227,2 + 1 \cdot (48 + 2 \cdot 4) / 3000 \cdot 1 / 1 \cdot 32,4 / 227,2] \} = 1,165$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 \cdot 174,5 \cdot 1 / [3000 + (22 - 4,8) \cdot 1] = 1,99 \text{ МПа}$$

Изн. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	$L_k = 1580 \text{ мм}$ Расчётная ширина зоны укрепления: $l_p = L_0 = 227,2 \text{ мм}$ Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления: $d_{op} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 90,86 \text{ мм}$ $V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_p \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_p}{l_p}} \right\}$ $= \min \{ 1; [1 + (32,4 \cdot (16 - 4) \cdot 0,7902 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (16 - 4 - 0) \cdot 0,7902) / (227,2 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0.5 \cdot (56 - 90,86) / 227,2 + 1 \cdot (48 + 2 \cdot 4) / 3000 \cdot 1 / 1 \cdot 32,4 / 227,2] = 1,165 \}$ $= 1$ $[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 \cdot 174,5 \cdot 1 / [3000 + (22 - 4,8) \cdot 1] = 1,99 \text{ МПа}$

Изн. № подл.	19746.4	E-10K.00.00.000 PP					Лист 164
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			



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

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} + (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 454,3 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 1,99 \text{ МПа}$

$1,99 \text{ МПа} \geq 0,3788 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5 \{d_p - d_{op}\} \cdot s_p = 0,5 \cdot (56 - 90,86) \cdot 3,26 = (-0,5682 \cdot 10^{-4}) \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

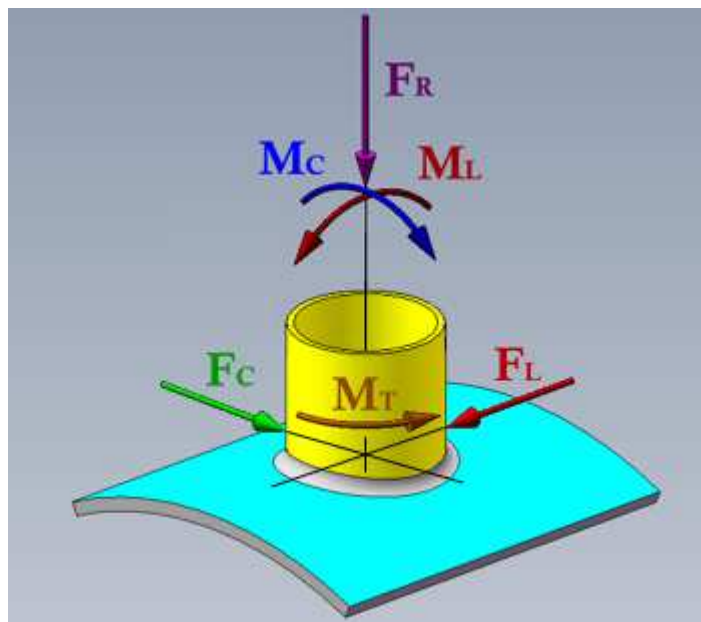
$$= 32,4 \cdot (16 - 0,07702 - 4) \cdot 0,7902 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (16 - 4 - 0) \cdot 0,7902 + 227,2 \cdot (22 - 3,26 - 4,8)$$

$$= 0,003472 \text{ м}^2$$

$$A_r = (-0,5682 \cdot 10^{-4}) \text{ м}^2 \leq 0,003472 \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

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



Радиальная нагрузка, F_R : 599,3 Н

Окружной момент, M_C : 0 Н м

Продольный момент, M_L : 0 Н м

Крутящий момент, M_T : 0 Н м

Изн. № подл. 19746.4	Подпись и дата				Изн. № дубл.	Подпись и дата			
	Взам. инв. №								
Изн. № подл. 19746.4					Лист				
E-10K.00.00.000 PP					165				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата					

$$[F_z] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1.81\} = 174,5 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot \max\{0,8849; 1.81\} = 9,344 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \frac{|F_z|}{[F_z]} = |(-599,3) / 9,344 \cdot 10^4| = 0,006413$$

Условие прочности: $\Phi_z \leq 1$

0,006413 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_x = M_c + F_c \cdot l_1 = 0 + 0 \cdot 100 = 0 \text{ Н м}$$

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_y = M_L + F_L \cdot l_1 = 0 + 0 \cdot 100 = 0 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 0,298 + 0,1589 \cdot 0,298^2 + (-0,02142) \cdot 0,298^3 + 0,001035 \cdot 0,298^4 = 4,559$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,298$):

$$[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 174,5 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot 68 / 4 \cdot \max\{4,559; 4.9\} = 4300 \text{ Н м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 5,606$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,298$):

$$[M_y] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 174,5 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot 68 / 4 \cdot \max\{5,606; 4.9\} = 4920 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((0 / 4300)^2 + (0 / 4920)^2)^{1/2} = 0$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

0 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right|; \left|\Phi_z\right|; \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} = [(\max(|0,1904 / 1 + (-0,006413)|; |(-0,006413)|; |0,1904 / 1 - 0.2 \cdot (-0,006413)|)^2 + 0^2)^{1/2}] = 0,1917$$

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

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

0,1917 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = 0,3788 \cdot (48 + 16) / (4 \cdot (16 - 4)) + 4 \cdot (0^2 + 0^2)^{1/2} / (3,142 \cdot (48 + 16)^2 \cdot (16 - 4)) + 0 / (3,142 \cdot (48 + 16) \cdot (16 - 4)) = 0,5051 \text{ МПа}$$

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

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

0,5051 МПа ≤ 137,9 МПа. **Условие прочности выполнено**

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0 / 48,67 + (0^2 + 0^2)^{1/2} / 3743 + |(-599,3)| / 3156 = 0,1899$$

Изн. № подл. 19746.4	Подпись и дата				Изн. № дубл.	Подпись и дата					
	Взам. инв. №					Изн. № дубл.					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP						Лист 167

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{M_x}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{M_y}\right)^2} = ((0 / 4300)^2 + (0 / 4920)^2)^{1/2} = 0$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$
 $0 \leq 1.0$. **Условие прочности выполнено**
Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right|, \left|\Phi_z\right|, \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} = (\left[\max(|0,1904 / 1 + (-0,006413)|; |(-0,006413)|; |0,1904 / 1 - 0.2 \cdot (-0,006413)|)\right]^2 + 0^2)^{1/2} = 0,1917$$

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

Условие прочности: $\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right|, \left|\Phi_z\right|, \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} \leq 1$
 $0,1917 \leq 1.0$. **Условие прочности выполнено**
Максимальные продольные растягивающие напряжения в ступице:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = 0,3788 \cdot (48 + 16) / (4 \cdot (16 - 4)) + 4 \cdot (0^2 + 0^2)^{1/2} / (3,142 \cdot (48 + 16)^2 \cdot (16 - 4)) + 0 / (3,142 \cdot (48 + 16) \cdot (16 - 4)) = 0,5051 \text{ МПа}$$

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

Условие прочности: $\sigma_1 \leq [\sigma]_1$
 $0,5051 \text{ МПа} \leq 137,9 \text{ МПа}$. **Условие прочности выполнено**

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0 / 48,67 + (0^2 + 0^2)^{1/2} / 3743 + |(-599,3)| / 3156 = 0,1899$$

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

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

0,1899 ≤ 1.0. **Условие устойчивости выполнено**

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения:

Расчётная температура, T : 180 °C
Расчётное наружное избыточное давление, p : 0,21 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

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

$[\sigma] = 167$ МПа
Модуль продольной упругости при температуре 180 °C:
 $E = 1,83 \cdot 10^5$ МПа

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре $T = 180$ °C (расчётные условия (наружное давление)):

$[\sigma]_1 = \eta \cdot \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B; R_{m/10n/t} / n_D; R_{p1,0/10n/t} / n_P) = 1 \cdot \min\{197,2 / 1,5; 435,4 / 2,4; - / -; - / -\} = 131,5$ МПа
Модуль продольной упругости при температуре 180 °C:

$E_1 = 1,83 \cdot 10^5$ МПа
Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 - p} = 0,21 \cdot (48 + 2 \cdot 4) / (2 \cdot 131,5 - 0,21) = 0,04475 \text{ мм}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$B_1 = \min \left\{ 1,0, 9,45 \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \sqrt{\frac{d}{100 \cdot (s_1 - c_s)}} \right\} = \min\{1,0, 9,45 \cdot 48 / 100 \cdot (48 / (100 \cdot (16 - 4)))^{1/2}\} = 0,9072$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия устойчивости:

$$[p]_e = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E_1}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_1 - c_s)}{d} \right]^{2,5} = 20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 48 / (2,4 \cdot 0,9072 \cdot 100) \cdot (100 \cdot (16 - 4) / 48)^{2,5} = 2622 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия прочности:

$$[p]_n = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + (s_1 - c_s)} = 2 \cdot 131,5 \cdot (16 - 4) / (48 + 16 - 4) = 52,6 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_n}{[p]_e} \right)^2}} = 52,6 / (1 + (52,6 / 2622)^2)^{1/2} = 52,59 \text{ МПа}$$

52,59 МПа ≥ 0,21 МПа
Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**
Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 3000 \text{ мм}$$

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

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-10K.00.00.000 PP				Лист
				168

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1.25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 100; 1.25 \cdot ((48 + 2 \cdot 4) \cdot (16 - 4))^{1/2} \} = 32,4 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 131,5 / 167 \} = 0,7874$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{2p} = \min \left\{ l_2; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((48 + 2 \cdot 4) \cdot (16 - 4 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 227,2 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 1580 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 227,2 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{op} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 90,86 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (32,4 \cdot (16 - 4) \cdot 0,7874 + 0 \cdot 18 \cdot 0 + 0 \cdot (0 - 2 \cdot 4) \cdot 0,7874) / (227,2 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0,5 \cdot (56 - 90,86) / 227,2 + 1 \cdot (48 + 2 \cdot 4) / 3000 \cdot 32,4 / 227,2] = 1,165 \}$$

$$= 1$$

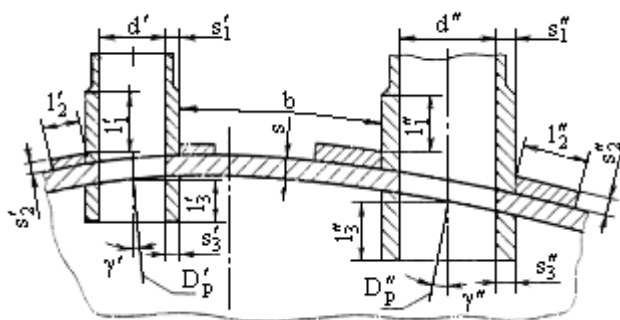
$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 167 \cdot 1 / [3000 + (22 - 4,8) \cdot 1] = 1,904 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление:

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_p}{[p]_E} \right)^2}} = 1,904 / (1 + (1,904 / 0,3167)^2)^{1/2} = 0,3124 \text{ МПа}$$

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

Изн. № подл. 19746.4	Подпись и дата				
	Изн. № дубл.				
	Взам. инв. №				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP
					Лист
					169



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

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} + (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 454,3 \text{ мм}$$

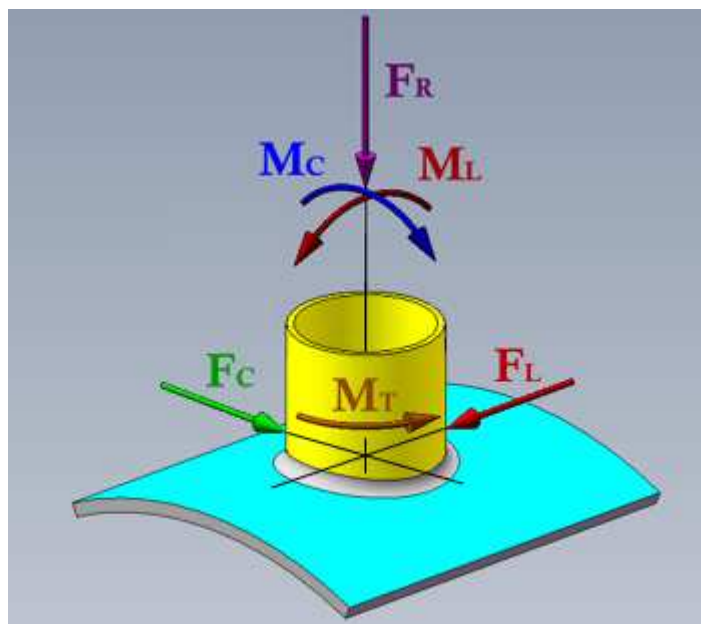
Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 0,3124 \text{ МПа}$

$0,3124 \text{ МПа} \geq 0,21 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

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



Радиальная нагрузка, F_R : 552,1 Н

Окружной момент, M_C : 0 Н м

Продольный момент, M_L : 0 Н м

Крутящий момент, M_T : 0 Н м

Сдвиговая нагрузка, F_C : 0 Н

Сдвиговая нагрузка, F_L : 0 Н

Эквивалентная толщина обечайки около штуцера:

$$s_3 = s - c = 22 - 4,8 = 17,2 \text{ мм}$$

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c = 3000 + 22 + 4,8 = 3027 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_s = 48 + 16 + 4 = 68 \text{ мм}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19746.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
E-10K.00.00.000 PP			
Лист			
170			

$$M_y = M_L + F_L \cdot l_1 = 0 + 0 \cdot 100 = 0 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 0,298 + 0,1589 \cdot 0,298^2 + (-0,02142) \cdot 0,298^3 + 0,001035 \cdot 0,298^4 = 4,559$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,298$):

$$[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4,9\} = 167 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot 68 / 4 \cdot \max\{4,559; 4,9\} = 4115 \text{ Н м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 5,606$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,298$):

$$[M_y] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4,9\} = 167 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot 68 / 4 \cdot \max\{5,606; 4,9\} = 4708 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((0 / 4115)^2 + (0 / 4708)^2)^{1/2} = 0$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

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

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_x\right|; \left|\Phi_x\right|; \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0,2 \cdot \Phi_x\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} = \left(\left[\max\left(\left|0,6721 / 1 + (-0,006174)\right|; \left|(-0,006174)\right|; \left|0,6721 / 1 - 0,2 \cdot (-0,006174)\right|\right)\right]^2 + 0^2\right)^{1/2} = 0,6734$$

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

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

$0,6734 \leq 1,0$. **Условие прочности выполнено**

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = (-0,21) \cdot (48 + 16) / (4 \cdot (16 - 4)) + 4 \cdot (0^2 + 0^2)^{1/2} / (3,142 \cdot (48 + 16)^2 \cdot (16 - 4)) + 0 / (3,142 \cdot (48 + 16) \cdot (16 - 4)) = (-0,28) \text{ МПа}$$

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

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

$(-0,28) \text{ МПа} \leq 131,5 \text{ МПа}$. **Условие прочности выполнено**

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0,21 / 52,59 + (0^2 + 0^2)^{1/2} / 3569 + |(-552,1)| / 3056 = 0,1846$$

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

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

$0,1846 \leq 1,0$. **Условие устойчивости выполнено**

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, Т: 20 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,5284 МПа

Инов. № подл.	19746.4	Подпись и дата	
Взам. инв. №		Инов. № дубл.	
Подпись и дата		Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
Дата			
E-10K.00.00.000 PP			
Лист			
172			

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

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

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

Модуль продольной упругости при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (условия гидротестирования):

$$[\sigma]^{20}_1 = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 245 / 1,1 = 222,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,5284 \cdot (48 + 2 \cdot 4) / (2 \cdot 222,7 \cdot 1 - 0,5284) = 0,06651 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 222,7 \cdot 1 \cdot (16 - 4) / (48 + 16 + 4) = 78,61 \text{ МПа}$$

$$78,61 \text{ МПа} \geq 0,5284 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 3000 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 2,909 \text{ мм}$$

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

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

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((22 - 4,8) / 2,909 - 0,8) \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 2323 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 100; 1,25 \cdot ((48 + 2 \cdot 4) \cdot (16 - 4))^{1/2} \} = 32,4 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 222,7 / 272,7 \} = 0,8167$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{2p} = \min \{ l_2; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_2 - c_s - c_{s1})} \} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((48 + 2 \cdot 4) \cdot (16 - 4 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 227,2 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 1580 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

Изн. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	E-10K.00.00.000 PP					Лист
										173
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

$$l_p = L_0 = 227,2 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

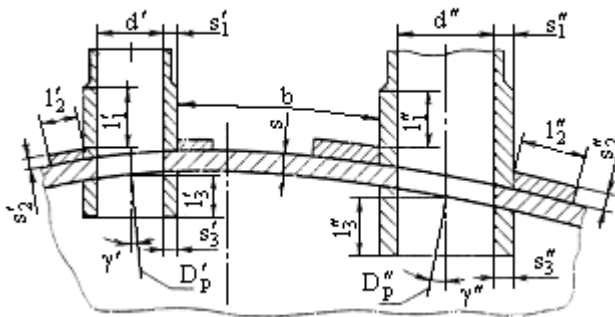
$$d_{op} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 90,86 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (32,4 \cdot (16 - 4) \cdot 0,8167 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (16 - 4 - 0) \cdot 0,8167) / (227,2 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0,5 \cdot (56 - 90,86) / 227,2 + 1 \cdot (48 + 2 \cdot 4) / 3000 \cdot 1 / 1 \cdot 32,4 / 227,2] \} = 1,168$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 \cdot 272,7 \cdot 1 / [3000 + (22 - 4,8) \cdot 1] = 3,109 \text{ МПа}$$



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

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} + (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 454,3 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 3,109 \text{ МПа}$

$$3,109 \text{ МПа} \geq 0,5284 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5(d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (56 - 90,86) \cdot 2,909 = (-0,5071 \cdot 10^{-4}) \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

$$= 32,4 \cdot (16 - 0,06651 - 4) \cdot 0,8167 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (16 - 4 - 0) \cdot 0,8167 + 227,2 \cdot (22 - 2,909 - 4,8)$$

$$= 0,003562 \text{ м}^2$$

$$A_r = (-0,5071 \cdot 10^{-4}) \text{ м}^2 \leq 0,003562 \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.
19746.4

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

E-10K.00.00.000 PP

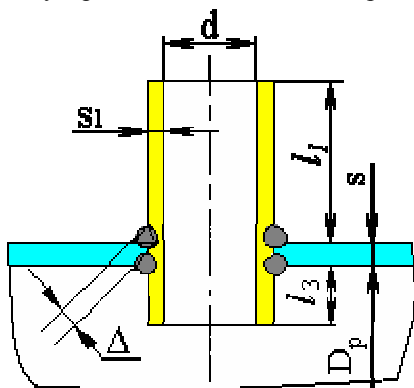
Лист

174

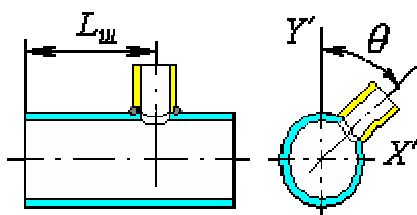
Штуцер UC DN50

Исходные данные

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



Материал несущего элемента: 09Г2С
Толщина стенки несущего элемента, s: 22 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, с: 4,8 мм
Материал штуцера: 09Г2С(КП265) Gr.
Внутренний диаметр штуцера, d: 48 мм
Толщина стенки штуцера, s₁: 18 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), с_s: 4 мм
Длина штуцера, l₁: 100 мм



Смещение штуцера, L_ш: 6620 мм
Угол поворота штуцера, θ: 0 °
Длина внутр. части штуцера, l₃: 0 мм
Прибавка на коррозию, с_{s1}: 0 мм
Минимальный размер сварного шва, Δ: 1 мм
Расчётные параметры размещения штуцера:
Ближайший штуцер

Подпись и дата

Инов. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

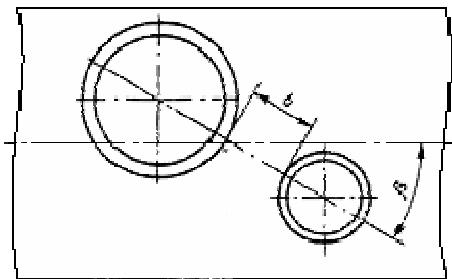
Инов. № подл.
19746.4

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

E-10K.00.00.000 PP

Лист

175



Название штуцера: Штуцер LT1 DN100

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 521 мм

$$U_{\text{ГОЛ } \beta}: \quad 180^\circ$$

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$$\phi_1 = 1$$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$$\wp = 1$$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 3000 \text{ mm}$$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, Т: 120 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,3788 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штицер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$[\sigma] = 174,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 120 °С:

$$E = 1,89 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре $T = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$[\sigma]_1 = \eta^* \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B; R_{m/10n/t} / n_J; R_{n1.0/10n/t} / n_{\Pi}) = 1^* \min\{206,8 / 1,5; 403 / 2,4; - / -; - / -\} = 137,9 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 120 °С:

$$E_1 = 1,89 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_{bp} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma_h \cdot \varphi_1 - p]} = 0,3788 \cdot (48 + 2 \cdot 4) / (2 \cdot 137,9 \cdot 1 - 0,3788) = 0,07702 \text{ mm}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_\varepsilon)}{d + s_1 + c_\varepsilon} = 2 \cdot 137,9 \cdot 1 \cdot (18 - 4) / (48 + 18 + 4) = 55,16 \text{ МПа}$$

$$55,16 \text{ МПа} \geq 0,3788 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

19746.4

Расчёт внутреннего избыточного давления, р: 0,3788 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре Т = 120 °С (расчётные условия):
 $[\sigma] = 174,5 \text{ МПа}$
Модуль продольной упругости при температуре 120 °С:
 $E = 1,89 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре Т = 120 °С (расчётные условия):
 $[\sigma]_1 = \eta \cdot \min(R_{eT} / n_T; R_{mT} / n_B; R_{m/10n_T} / n_D; R_{p1,0/10n_T} / n_n) = 1 \cdot \min(206,8 / 1,5; 403 / 2,4; - / -; - / -) = 137,9 \text{ МПа}$
Модуль продольной упругости при температуре 120 °С:
 $E_1 = 1,89 \cdot 10^5 \text{ МПа}$
Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_{ш} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,3788 \cdot (48 + 2 \cdot 4) / (2 \cdot 137,9 \cdot 1 - 0,3788) = 0,07702 \text{ мм}$$
Допускаемое давление для патрубков штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 137,9 \cdot 1 \cdot (18 - 4) / (48 + 18 + 4) = 55,16 \text{ МПа}$$
 $55,16 \text{ МПа} \geq 0,3788 \text{ МПа}$
Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**
Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

Изм.

Лист

№ докум.

Подп.

Дата

E-10K.00.00.000 PP

Лист

176

$$D_p = D = 3000 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 3,26 \text{ мм}$$

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

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

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((22 - 4,8) / 3,26 - 0,8) \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 2034 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 100; 1,25 \cdot ((48 + 2 \cdot 4) \cdot (18 - 4))^{1/2} \} = 35 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0; 137,9 / 174,5 \} = 0,7902$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((48 + 2 \cdot 4) \cdot (18 - 4 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 227,2 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 258 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 227,2 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 90,86 \text{ мм}$$

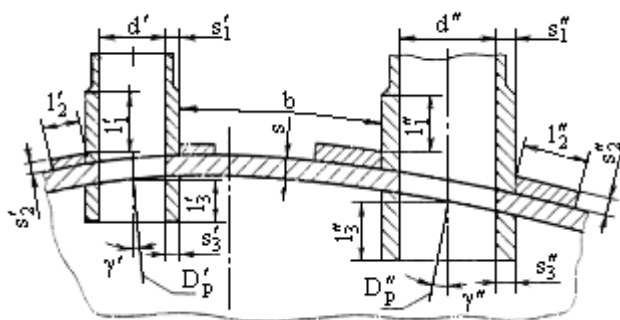
$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0,5 \cdot \frac{d_p - d_{0p}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}}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

$$= \min \{ 1; [1 + (35 \cdot (18 - 4) \cdot 0,7902 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (18 - 4 - 0) \cdot 0,7902) / (227,2 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0,5 \cdot (56 - 90,86) / 227,2 + 1 \cdot (48 + 2 \cdot 4) / 3000 \cdot 1 / 1 \cdot 35 / 227,2] = 1,187 \}$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 \cdot 174,5 \cdot 1 / [3000 + (22 - 4,8) \cdot 1] = 1,99 \text{ МПа}$$

Изн. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP				
					Лист				177



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

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} + (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 454,3 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 1,99 \text{ МПа}$

$1,99 \text{ МПа} \geq 0,3788 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5 \{ d_p - d_{op} \} \cdot s_p = 0,5 \cdot (56 - 90,86) \cdot 3,26 = (-0,5682 \cdot 10^{-4}) \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

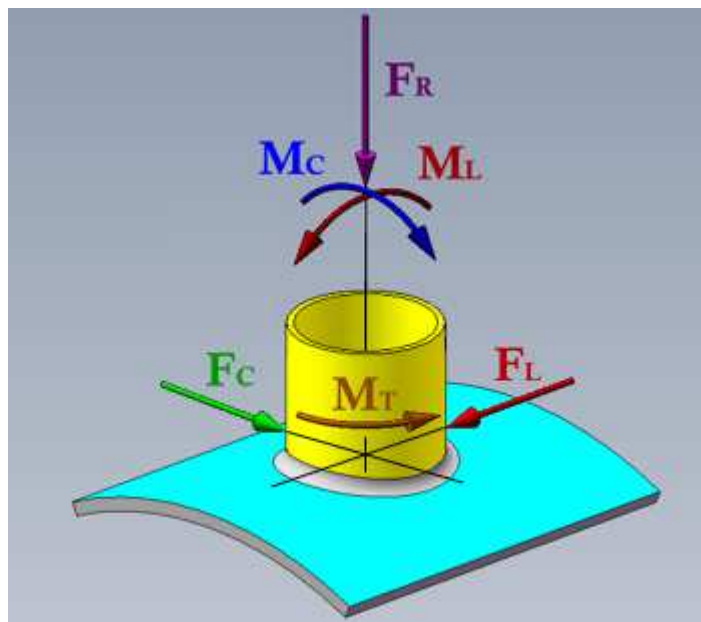
$$= 35 \cdot (18 - 0,07702 - 4) \cdot 0,7902 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (18 - 4 - 0) \cdot 0,7902 + 227,2 \cdot (22 - 3,26 - 4,8)$$

$$= 0,003552 \text{ м}^2$$

$$A_r = (-0,5682 \cdot 10^{-4}) \text{ м}^2 \leq 0,003552 \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

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



Радиальная нагрузка, F_R : 1500 Н

Окружной момент, M_C : 200 Н м

Продольный момент, M_L : 200 Н м

Крутящий момент, M_T : 300 Н м

Инов. № подл.	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19746.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
E-10K.00.00.000 PP			
Лист 178			

Сдвиговая нагрузка, F_C : 1100 Н

Сдвиговая нагрузка, F_L : 1100 Н

Эквивалентная толщина обечайки около штуцера:

$$s_3 = s - c = 22 - 4,8 = 17,2 \text{ мм}$$

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c = 3000 + 22 + 4,8 = 3027 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_s = 48 + 18 + 4 = 70 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} = 70 / (3027 \cdot 17,2)^{1/2} = 0,3068$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 178 \text{ мм}$$

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D_c}{2} = 3027 / 2 = 1513 \text{ мм}$$

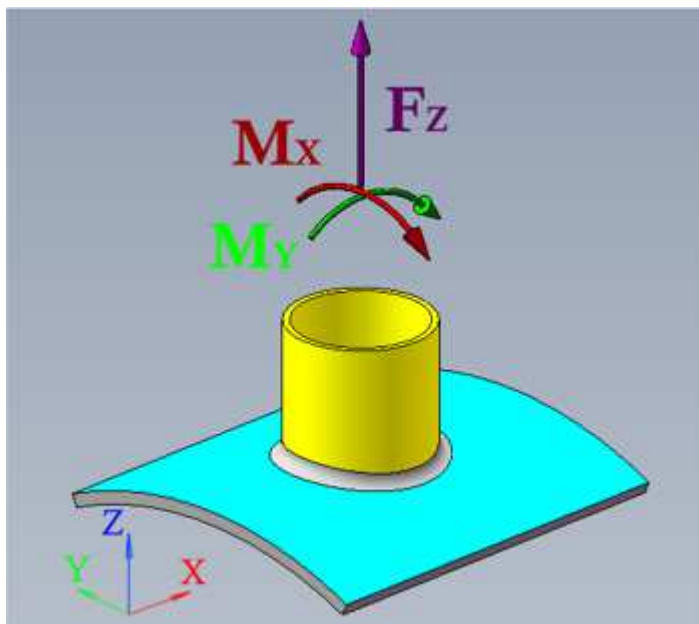
Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |0,3788 / 1,99| = 0,1904$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

$0,1904 \leq 1,0$. Условие прочности выполнено

Расчетная схема по ГОСТ Р 52857.3-2007



Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_z = -F_R = -1500 \quad = (-1500) \text{ Н}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s - c)}} = 70 / (3027 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 0,3068$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 0,3068 + 0,005196 \cdot 0,3068^2 + (-0,001406) \cdot 0,3068^3 + 0 \cdot 0,3068^4 = 0,8932$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,3068$):

Подпись и дата	Инов. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата	Инов. № подл.	19746.4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP
					Лист 179

$$[F_z] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1.81\} = 174,5 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot \max\{0,8932; 1.81\} = 9,344 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \frac{|F_z|}{[F_z]} = |(-1500) / 9,344 \cdot 10^4| = 0,01605$$

Условие прочности: $\Phi_z \leq 1$

0,01605 ≤ 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:

$$M_y = M_L = 200 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 0,3068 + 0,1589 \cdot 0,3068^2 + (-0,02142) \cdot 0,3068^3 + 0,001035 \cdot 0,3068^4 = 4,56$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,3068$):

$$[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4,9\} = 174,5 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot 70 / 4 \cdot \max\{4,56; 4,9\} = 4427 \text{ Н м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 5,596$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,3068$):

$$[M_y] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4,9\} = 174,5 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot 70 / 4 \cdot \max\{5,596; 4,9\} = 5055 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((200 / 4427)^2 + (200 / 5055)^2)^{1/2} = 0,06005$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

0,06005 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right|, \left|\Phi_z\right|, \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0,2 \cdot \Phi_z\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} = (\max(|0,1904 / 1 + (-0,01605)|; |(-0,01605)|; |0,1904 / 1 - 0,2 \cdot (-0,01605)|)^2 + 0,06005^2)^{1/2} = 0,2027$$

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

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

0,2027 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = 0,3788 \cdot (48 + 18) / (4 \cdot (18 - 4)) + 4 \cdot (200^2 + 200^2)^{1/2} / (3,142 \cdot (48 + 18)^2 \cdot (18 - 4)) + 0 / (3,142 \cdot (48 + 18) \cdot (18 - 4)) = 6,352 \text{ МПа}$$

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

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

6,352 МПа ≤ 137,9 МПа. **Условие прочности выполнено**

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0 / 55,16 + (200^2 + 200^2)^{1/2} / 4512 + |(-1500)| / 4032 = 0,4347$$

Изн. № подл. 19746.4	Подпись и дата				
	Изн. № дубл.				
	Взам. инв. №				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<div>E-10K.00.00.000 PP</div> <div>Лист</div> <div>180</div>

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

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

0,4347 ≤ 1.0. **Условие устойчивости выполнено**

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения:

Расчётная температура, Т: 180 °С
Расчётное наружное избыточное давление, р: 0,21 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)):

[σ] = 167 МПа
Модуль продольной упругости при температуре 180 °С:
Е = 1,83·10⁵ МПа

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре Т = 180 °С (расчётные условия (наружное давление)):

[σ]₁ = η·min(R_{е/т} / n_Т; R_{м/т} / n_В; R_{м/10^н/т} / n_Д; R_{р1,0/10^н/т} / n_П) = 1·min{197,2 / 1,5; 435,4 / 2,4; - / -; - / -} = 131,5 МПа
Модуль продольной упругости при температуре 180 °С:

Е₁ = 1,83·10⁵ МПа
Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 - p} = 0,21 \cdot (48 + 2 \cdot 4) / (2 \cdot 131,5 - 0,21) = 0,04475 \text{ мм}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$B_1 = \min \left\{ 1.0, 9.45 \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \sqrt{\frac{d}{100 \cdot (s_1 - c_s)}} \right\} = \min \{ 1.0, 9.45 \cdot 48 / 100 \cdot (48 / (100 \cdot (18 - 4)))^{1/2} \} = 0,8399$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия устойчивости:

$$[p]_e = \frac{20.8 \cdot 10^{-6} E_1}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_1 - c_s)}{d} \right]^{2.5} = 20.8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 48 / (2,4 \cdot 0,8399 \cdot 100) \cdot (100 \cdot (18 - 4) / 48)^{2.5} = 4164 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия прочности:

$$[p]_n = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + (s_1 - c_s)} = 2 \cdot 131,5 \cdot (18 - 4) / (48 + 18 - 4) = 59,38 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_n}{[p]_e} \right)^2}} = 59,38 / (1 + (59,38 / 4164)^2)^{1/2} = 59,38 \text{ МПа}$$

59,38 МПа ≥ 0,21 МПа
Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**
Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

D_р = D = 3000 мм
Расчётный диаметр отверстия (ось штуцера совпадает с нормалью к поверхности в центре отверстия):

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	E-10K.00.00.000 PP					Лист 181
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1.25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 100; 1.25 \cdot ((48 + 2 \cdot 4) \cdot (18 - 4))^{1/2} \} = 35 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1.0; \left[\frac{\sigma}{\sigma_s} \right] \right\} = \min \{ 1.0, 131.5 / 167 \} = 0.7874$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{2p} = \min \left\{ l_2; 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0.5 \cdot ((48 + 2 \cdot 4) \cdot (18 - 4 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4.8))^{1/2} = 227.2 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 258 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 227.2 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{op} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (3000 \cdot (22 - 4.8))^{1/2} = 90.86 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (35 \cdot (18 - 4) \cdot 0.7874 + 0 \cdot 18 \cdot 0 + 0 \cdot (0 - 2 \cdot 4) \cdot 0.7874) / (227.2 \cdot (22 - 4.8))] / [1 + 0.5 \cdot (56 - 90.86) / 227.2 + 1 \cdot (48 + 2 \cdot 4) / 3000 \cdot 35 / 227.2] \} = 1.186$$

$$= 1$$

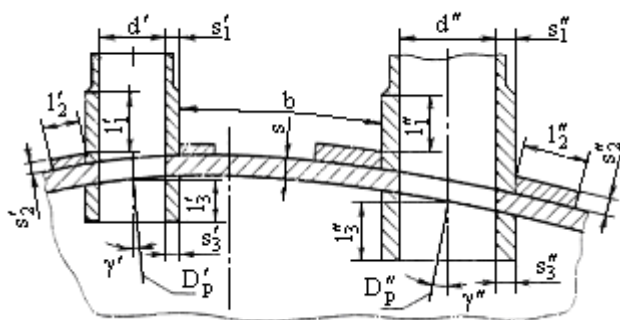
$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4.8) \cdot 167 \cdot 1 / [3000 + (22 - 4.8) \cdot 1] = 1.904 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление:

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_p}{[p]_E} \right)^2}} = 1.904 / (1 + (1.904 / 0.3167)^2)^{1/2} = 0.3124 \text{ МПа}$$

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

Изн. № подл. 19746.4	Подпись и дата				
	Изн. № дубл.				
	Взам. инв. №				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP
					Лист
					182



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

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} + (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 454,3 \text{ мм}$$

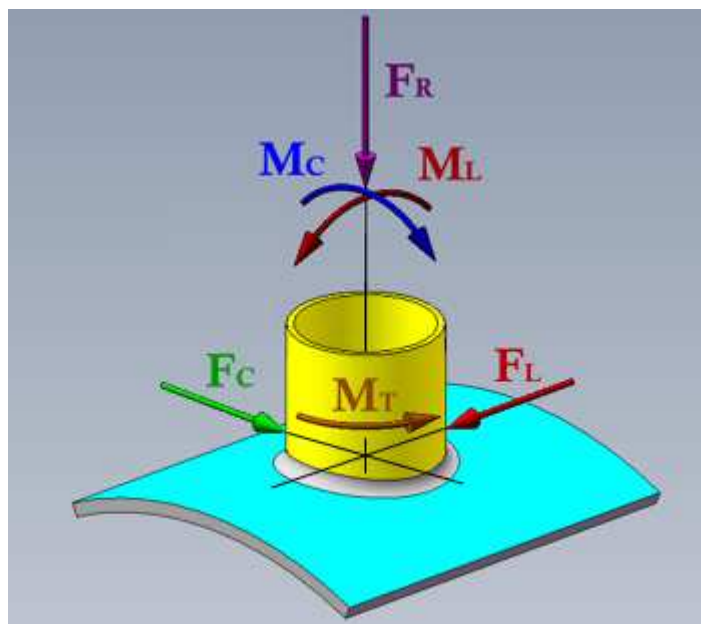
Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 0,3124 \text{ МПа}$

$0,3124 \text{ МПа} \geq 0,21 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

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



Радиальная нагрузка, F_R : 1500 Н

Окружной момент, M_C : 200 Н м

Продольный момент, M_L : 200 Н м

Крутящий момент, M_T : 300 Н м

Сдвиговая нагрузка, F_C : 1100 Н

Сдвиговая нагрузка, F_L : 1100 Н

Эквивалентная толщина обечайки около штуцера:

$$s_s = s - c = 22 - 4,8 = 17,2 \text{ мм}$$

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c = 3000 + 22 + 4,8 = 3027 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_s = 48 + 18 + 4 = 70 \text{ мм}$$

Изм. Лист № докум. Подп. Дата

Подпись и дата

Инд. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инд. № подл.

19746.4

E-10K.00.00.000 PP

Лист

183

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} = 70 / (3027 \cdot 17,2)^{1/2} = 0,3068$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 178 \text{ мм}$$

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D_c}{2} = 3027 / 2 = 1513 \text{ мм}$$

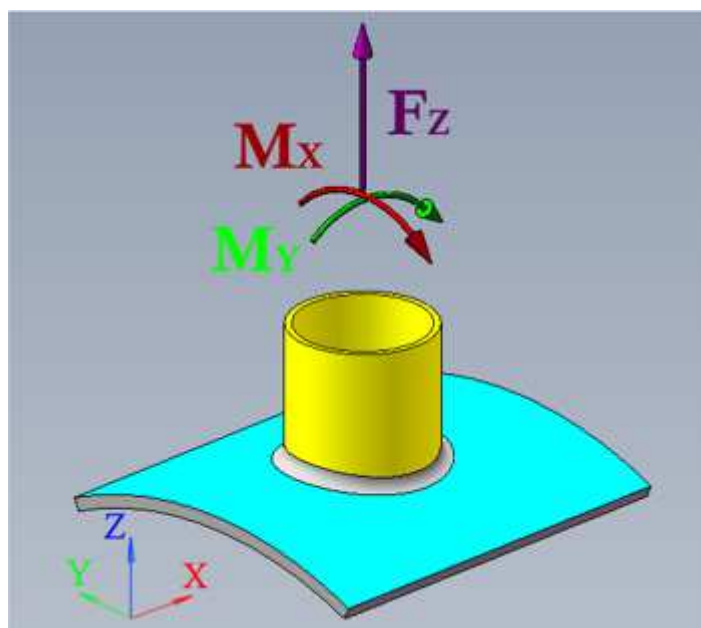
Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |(-0,21) / 0,3124| = 0,6721$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

$0,6721 \leq 1,0$. Условие прочности выполнено

Расчетная схема по ГОСТ Р 52857.3-2007



Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_z = -F_R = -1500 \quad = (-1500) \text{ Н}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s-c)}} = 70 / (3027 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 0,3068$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 0,3068 + 0,005196 \cdot 0,3068^2 + (-0,001406) \cdot 0,3068^3 + 0 \cdot 0,3068^4 = 0,8932$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,3068$):

$$[F_z] = [\sigma] \cdot (s-c)^2 \cdot \max\{C_1; 1,81\} = 167 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot \max\{0,8932; 1,81\} = 8,942 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{[F_z]} \right| = |(-1500) / 8,942 \cdot 10^4| = 0,01677$$

Условие прочности: $\Phi_z \leq 1$

$0,01677 \leq 1,0$. Условие прочности выполнено

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_x = M_c = 200 \text{ Н м}$$

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:

Изн. № подл.	Изн. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата
19746.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
E-10K.00.00.000 PP			
Лист 184			

$$M_y = M_L = 200 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 0,3068 + 0,1589 \cdot 0,3068^2 + (-0,02142) \cdot 0,3068^3 + 0,001035 \cdot 0,3068^4 = 4,56$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,3068$):

$$[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 167 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot 70 / 4 \cdot \max\{4,56; 4.9\} = 4237 \text{ Н м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 5,596$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,3068$):

$$[M_y] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 167 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot 70 / 4 \cdot \max\{5,596; 4.9\} = 4838 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((200 / 4237)^2 + (200 / 4838)^2)^{1/2} = 0,06275$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

0,06275 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right|; \left|\Phi_z\right|; \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} = (\max(|0,6721 / 1 + (-0,01677)|; |(-0,01677)|; |0,6721 / 1 - 0.2 \cdot (-0,01677)|))^2 + 0,06275^2)^{1/2} = 0,6784$$

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

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

0,6784 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = (-0,21) \cdot (48 + 18) / (4 \cdot (18 - 4)) + 4 \cdot (200^2 + 200^2)^{1/2} / (3,142 \cdot (48 + 18)^2 \cdot (18 - 4)) + 0 / (3,142 \cdot (48 + 18) \cdot (18 - 4)) = 5,658 \text{ МПа}$$

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

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

5,658 МПа ≤ 131,5 МПа. **Условие прочности выполнено**

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0,21 / 59,38 + (200^2 + 200^2)^{1/2} / 4303 + |(-1500)| / 3904 = 0,4535$$

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

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

0,4535 ≤ 1.0. **Условие устойчивости выполнено**

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, Т: 20 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,5284 МПа

Изн. № подл.	19746.4	Подпись и дата	
Взам. инв. №		Изн. № дубл.	
Подпись и дата		Подпись и дата	
Изн. № подл.	19746.4	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
		Дата	
E-10K.00.00.000 PP			Лист
			185

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

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

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

Модуль продольной упругости при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (условия гидротестирования):

$$[\sigma]^{20}_1 = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 245 / 1,1 = 222,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,5284 \cdot (48 + 2 \cdot 4) / (2 \cdot 222,7 \cdot 1 - 0,5284) = 0,06651 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 222,7 \cdot 1 \cdot (18 - 4) / (48 + 18 + 4) = 89,09 \text{ МПа}$$

$$89,09 \text{ МПа} \geq 0,5284 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 3000 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 2,909 \text{ мм}$$

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

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

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((22 - 4,8) / 2,909 - 0,8) \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 2323 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 100; 1,25 \cdot ((48 + 2 \cdot 4) \cdot (18 - 4))^{1/2} \} = 35 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 222,7 / 272,7 \} = 0,8167$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{2p} = \min \{ l_2; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_2 - c_s - c_{s1})} \} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((48 + 2 \cdot 4) \cdot (18 - 4 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 227,2 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 258 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата						Лист
					E-10K.00.00.000 PP					
19746.4					Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	186

$s_p = 2,909 \text{ мм}$

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

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

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((22 - 4,8) / 2,909 - 0,8) \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 2323 \text{ мм}$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$l_{1p} = \min \{ l_1; 1.25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 100; 1.25 \cdot ((48 + 2 \cdot 4) \cdot (18 - 4))^{1/2} \} = 35 \text{ мм}$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 222,7 / 272,7 \} = 0,8167$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$l_{3p} = \min \{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((48 + 2 \cdot 4) \cdot (18 - 4 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$

Ширина зоны укрепления:

$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 227,2 \text{ мм}$

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

$L_k = 258 \text{ мм}$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 227,2 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

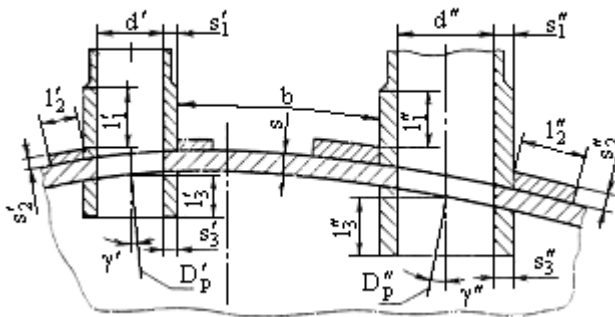
$$d_{op} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 90,86 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (35 \cdot (18 - 4) \cdot 0,8167 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (18 - 4 - 0) \cdot 0,8167) / (227,2 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0,5 \cdot (56 - 90,86) / 227,2 + 1 \cdot (48 + 2 \cdot 4) / 3000 \cdot 1 / 1 \cdot 35 / 227,2] = 1,19 \}$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 \cdot 272,7 \cdot 1 / [3000 + (22 - 4,8) \cdot 1] = 3,109 \text{ МПа}$$



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

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} + (3000 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 454,3 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 3,109 \text{ МПа}$

$$3,109 \text{ МПа} \geq 0,5284 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5(d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (56 - 90,86) \cdot 2,909 = (-0,5071 \cdot 10^{-4}) \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

$$= 35 \cdot (18 - 0,06651 - 4) \cdot 0,8167 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (18 - 4 - 0) \cdot 0,8167 + 227,2 \cdot (22 - 2,909 - 4,8)$$

$$= 0,003645 \text{ м}^2$$

$$A_r = (-0,5071 \cdot 10^{-4}) \text{ м}^2 \leq 0,003645 \text{ м}^2$$

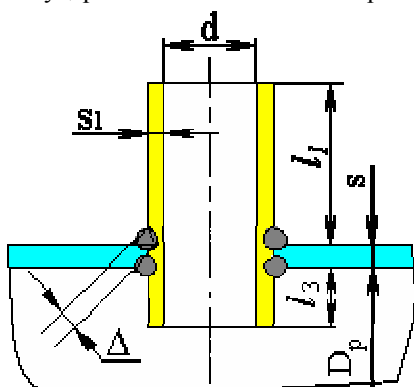
Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19746.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
E-10K.00.00.000 PP			
Лист			
187			

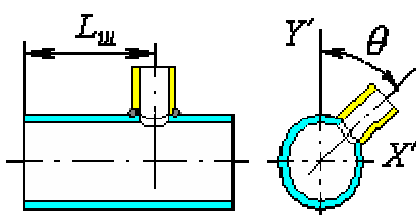
Штуцер V DN50

Исходные данные

Элемент: Штуцер V DN50
 Условное обозначение (метка) Штуцер V
 Элемент, несущий штуцер: Штуцер A1 DN700
 Тип элемента, несущего штуцер: Штуцер
 Тип штуцера: Проходящий без укрепления

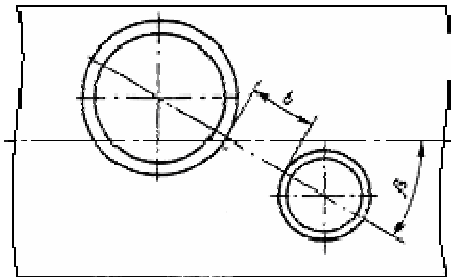


Материал несущего элемента: 09Г2С
 Толщина стенки несущего элемента, s : 22 мм
 Сумма прибавок к стенке несущего элемента, c : 4,8 мм
 Материал штуцера: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281
 Внутренний диаметр штуцера, d : 48 мм
 Толщина стенки штуцера, s_1 : 10 мм
 Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c_s : 5,5 мм
 Длина штуцера, l_1 : 150 мм



Смещение штуцера, $L_{ш}$: 3378 мм
 Угол поворота штуцера, ϑ : 270 °
 Длина внутр. части штуцера, l_3 : 0 мм
 Прибавка на коррозию, c_{s1} : 0 мм
 Минимальный размер сварного шва, Δ : 1 мм
 Расчётные параметры размещения штуцера:
 Ближайший штуцер

Инов. № подл.	19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
E-10K.00.00.000 PP					Лист
					188



Название штуцера: Штуцер P1 DN50

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 1101 мм

Угол β : 90 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$\varphi_1 = 1$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$\varphi = 1$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 700$ мм

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 120 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,3541 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 120 °C (расчётные условия):

$[\sigma] = 174,5$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 120 °C:

$E = 1,89 \cdot 10^5$ МПа

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 120 °C (расчётные условия):

$[\sigma]_1 = 157,5$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 120 °C:

$E_1 = 1,89 \cdot 10^5$ МПа

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,3541 \cdot (48 + 2 \cdot 5,5) / (2 \cdot 157,5 \cdot 1 - 0,3541) = 0,06640 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 157,5 \cdot 1 \cdot (10 - 5,5) / (48 + 10 + 5,5) = 22,32 \text{ МПа}$$

22,32 МПа \geq 0,3541 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

Изн.	№ подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
	19746.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
E-10K.00.00.000 PP					Лист
					189

$$D_p = D = 700 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 0,7208 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 48 + 2 \cdot 5,5 = 59 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((22 - 4,8) / 0,7208 - 0,8) \cdot (700 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 5061 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 150; 1,25 \cdot ((48 + 2 \cdot 5,5) \cdot (10 - 5,5))^{1/2} \} = 20,37 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0; 157,5 / 174,5 \} = 0,9026$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

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

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (700 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 109,7 \text{ мм}$$

Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (Фланец DN700 с крышкой):

$$L_k = 133 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 109,7 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (700 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 43,89 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (20,37 \cdot (10 - 5,5) \cdot 0,9026 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 5,5 - 0) \cdot 0,9026) / (109,7 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0,5 \cdot (59 - 43,89) / 109,7 + 1 \cdot (48 + 2 \cdot 5,5) / 700 \cdot 1 / 1 \cdot 20,37 / 109,7] \} = 0,9625$$

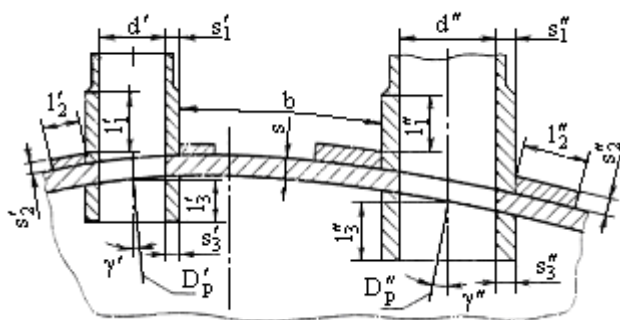
$$= 0,9625$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 \cdot 174,5 \cdot 0,9625 / [700 + (22 - 4,8) \cdot 0,9625] = 8,063 \text{ МПа}$$

Изн. № подл. 19746.4	Подпись и дата				
	Изн. № дубл.				
	Взам. инв. №				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP

Лист

190



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер P1 DN50 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (700 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} + (700 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 219,5 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 8,063 \text{ МПа}$

$8,063 \text{ МПа} \geq 0,3541 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5(d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (59 - 43,89) \cdot 0,7208 = 0,5445 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

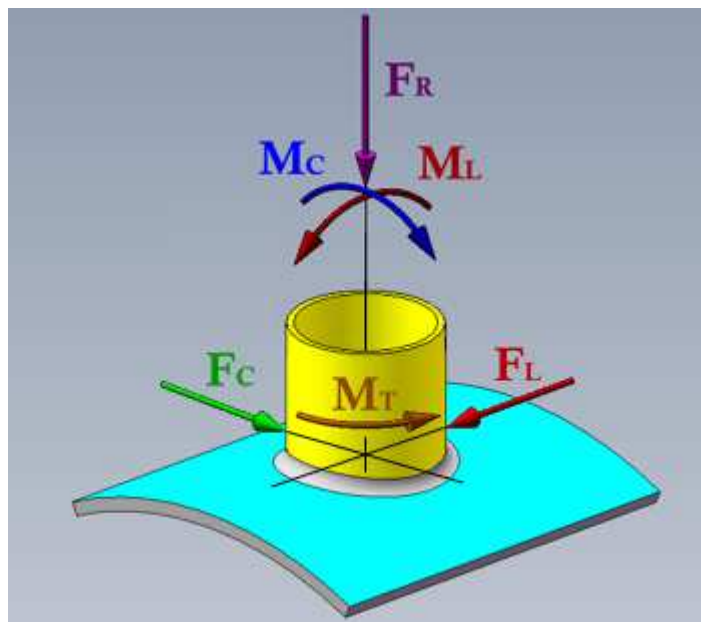
$$= 20,37 \cdot (10 - 0,06640 - 5,5) \cdot 0,9026 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 5,5 - 0) \cdot 0,9026 + 109,7 \cdot (22 - 0,7208 - 4,8)$$

$$= 0,001890 \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,5445 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \leq 0,001890 \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

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



Радиальная нагрузка, F_R : (-1500) Н

Окружной момент, M_C : 200 Н м

Продольный момент, M_L : 200 Н м

Крутящий момент, M_T : 300 Н м

Инов. № подл.	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19746.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
			Дата
E-10K.00.00.000 PP			
Лист 191			

Сдвиговая нагрузка, F_C : 1100 Н

Сдвиговая нагрузка, F_L : 1100 Н

Эквивалентная толщина обечайки около штуцера:

$$s_3 = s - c = 22 - 4,8 = 17,2 \text{ мм}$$

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c = 700 + 22 + 4,8 = 726,8 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_s = 48 + 10 + 5,5 = 63,5 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} = 63,5 / (726,8 \cdot 17,2)^{1/2} = 0,5679$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 98 \text{ мм}$$

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D_c}{2} = 726,8 / 2 = 363,4 \text{ мм}$$

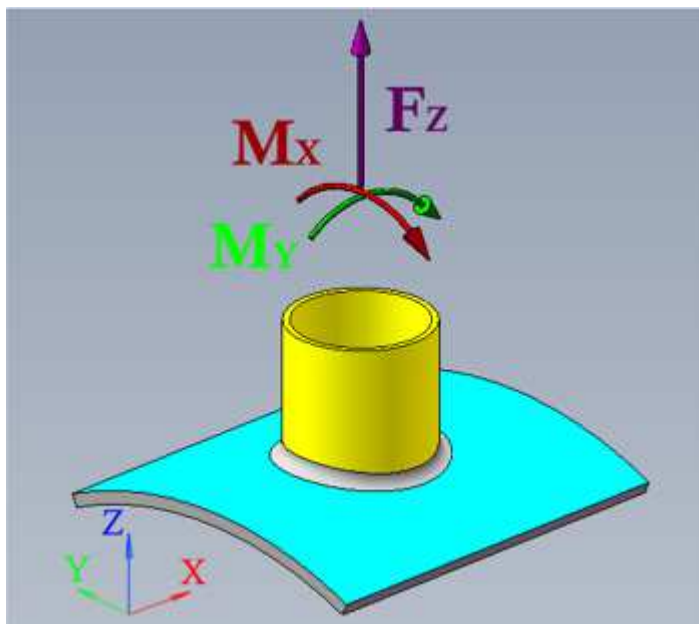
Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |0,3541 / 8,063| = 0,04392$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

$0,04392 \leq 1,0$. Условие прочности выполнено

Расчетная схема по ГОСТ Р 52857.3-2007



Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_x = -F_R = -(-1500) = 1500 \text{ Н}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s - c)}} = 63,5 / (726,8 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 0,5679$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 0,5679 + 0,005196 \cdot 0,5679^2 + (-0,001406) \cdot 0,5679^3 + 0 \cdot 0,5679^4 = 1,143$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,5679$):

Подпись и дата	Инов. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата	Инов. № подл.	19746.4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

E-10K.00.00.000 PP

Лист
192

$$[F_z] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1.81\} = 174,5 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot \max\{1,143; 1.81\} = 9,344 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \frac{|F_z|}{[F_z]} = |1500 / 9,344 \cdot 10^4| = 0,01605$$

Условие прочности: $\Phi_z \leq 1$

0,01605 ≤ 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:

$$M_y = M_L = 200 \text{ Н м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4,526 + 0,06402 \cdot 0,5679 + 0,1589 \cdot 0,5679^2 + (-0,02142) \cdot 0,5679^3 + 0,001035 \cdot 0,5679^4 = 4,61$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,5679$):

$$[M_x] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4,9\} = 174,5 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot 63,5 / 4 \cdot \max\{4,61; 4,9\} = 4016 \text{ Н м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 5,547$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, перпендикулярной к оси сосуда, при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,5679$):

$$[M_y] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4,9\} = 174,5 \cdot (22 - 4,8)^2 \cdot 63,5 / 4 \cdot \max\{5,547; 4,9\} = 4546 \text{ Н м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов:

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((200 / 4016)^2 + (200 / 4546)^2)^{1/2} = 0,06645$$

Условие прочности: $\Phi_b \leq 1$

0,06645 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Прочность от совместного действия нагрузок:

$$\sqrt{\left[\max\left(\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right|, \left|\Phi_z\right|, \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0,2 \cdot \Phi_z\right|\right)\right]^2 + \Phi_b^2} = (\max(|0,04392 / 1 + 0,01605|; |0,01605|; |0,04392 / 1 - 0,2 \cdot 0,01605|)^2 + 0,06645^2)^{1/2} = 0,08951$$

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

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

0,08951 ≤ 1.0. **Условие прочности выполнено**

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = 0,3541 \cdot (48 + 10) / (4 \cdot (10 - 5,5)) + 4 \cdot (200^2 + 200^2)^{1/2} / (3,142 \cdot (48 + 10)^2 \cdot (10 - 5,5)) + 1500 / (3,142 \cdot (48 + 10) \cdot (10 - 5,5)) = 26,76 \text{ МПа}$$

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

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

26,76 МПа ≤ 157,5 МПа. **Условие прочности выполнено**

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = 0 / 22,32 + (200^2 + 200^2)^{1/2} / 1403 + |0| / 1,169 \cdot 10^5 = 0,2016$$

Изн. № подл. 19746.4	Подпись и дата				
	Изн. № дубл.				
	Взам. инв. №				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<div>E-10K.00.00.000 PP</div> <div>Лист</div> <div>193</div>

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

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

0,2016 ≤ 1.0. **Условие устойчивости выполнено**

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения:

Расчётная температура, Т: 180 °С

Расчётное наружное избыточное давление, р: 0,21 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)):

$[\sigma] = 167$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 180 °С:

$E = 1,83 \cdot 10^5$ МПа

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре Т = 180 °С (расчётные условия (наружное давление)):

$[\sigma]_1 = 150$ МПа

Модуль продольной упругости при температуре 180 °С:

$E_1 = 1,83 \cdot 10^5$ МПа

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 - p} = 0,21 \cdot (48 + 2 \cdot 5,5) / (2 \cdot 150 - 0,21) = 0,04133 \text{ мм}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$B_1 = \min \left\{ 1.0, 9.45 \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \sqrt{\frac{d}{100 \cdot (s_1 - c_s)}} \right\} = \min \{ 1.0, 9.45 \cdot 48 / 150 \cdot (48 / (100 \cdot (10 - 5,5)))^{1/2} \} = 0,9876$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия устойчивости:

$$[p]_e = \frac{20.8 \cdot 10^{-6} E_1}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_1 - c_s)}{d} \right]^{2.5} = \frac{20.8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 48 / (2,4 \cdot 0,9876 \cdot 150) \cdot (100 \cdot (10 - 5,5) / 48)}{2.5} = 138,3 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия прочности:

$$[p]_n = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + (s_1 - c_s)} = 2 \cdot 150 \cdot (10 - 5,5) / (48 + 10 - 5,5) = 25,71 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_n}{[p]_e} \right)^2}} = 25,71 / (1 + (25,71 / 138,3)^2)^{1/2} = 25,28 \text{ МПа}$$

25,28 МПа ≥ 0,21 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 700$ мм

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

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	$E_1 = 1,83 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ Расчётная толщина стенки штуцера: $s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 - p} = 0,21 \cdot (48 + 2 \cdot 5,5) / (2 \cdot 150 - 0,21) = 0,04133 \text{ мм}$ Допускаемое наружное давление из условия прочности: $B_1 = \min \left\{ 1,0, 9,45 \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \sqrt{\frac{d}{100 \cdot (s_1 - c_s)}} \right\} = \min \{ 1,0, 9,45 \cdot 48 / 150 \cdot (48 / (100 \cdot (10 - 5,5)))^{1/2} \} = 0,9876$ Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия устойчивости: $[p]_e = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E_1}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_1 - c_s)}{d} \right]^{2,5} = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 48 / (2,4 \cdot 0,9876 \cdot 150) \cdot (100 \cdot (10 - 5,5) / 48)}{j^{2,5}} = 138,3 \text{ МПа}$ Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия прочности: $[p]_{\pi} = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + (s_1 - c_s)} = 2 \cdot 150 \cdot (10 - 5,5) / (48 + 10 - 5,5) = 25,71 \text{ МПа}$ $[p] = \frac{[p]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\pi}}{[p]_e} \right)^2}} = 25,71 / (1 + (25,71 / 138,3)^2)^{1/2} = 25,28 \text{ МПа}$ $25,28 \text{ МПа} \geq 0,21 \text{ МПа}$ Заключение: Условие прочности и устойчивости выполнено Расчётный диаметр цилиндрической обечайки: $D_p = D = 700 \text{ мм}$ Расчётный диаметр отверстия (ось штуцера совпадает с нормалью к поверхности в центре отверстия):	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP	Лист 194

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 48 + 2 \cdot 5,5 = 59 \text{ мм}$$

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 150; 1,25 \cdot ((48 + 2 \cdot 5,5) \cdot (10 - 5,5))^{1/2} \} = 20,37 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]}{\sigma} \right\} = \min \{ 1,0, 150 / 167 \} = 0,8982$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

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

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (700 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 109,7 \text{ мм}$$

Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (Фланец DN700 с крышкой):

$$L_k = 133 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 109,7 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (700 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 43,89 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (20,37 \cdot (10 - 5,5) \cdot 0,8982 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (0 - 2 \cdot 5,5) \cdot 0,8982) / (109,7 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0,5 \cdot (59 - 43,89) / 109,7 + 1 \cdot (48 + 2 \cdot 5,5) / 700 \cdot 20,37 / 109,7] \} = 0,9623$$

$$= 0,9623$$

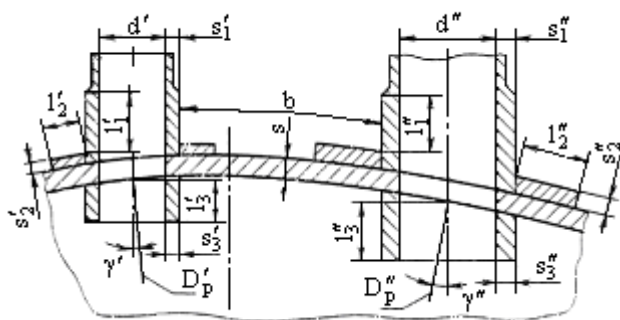
$$[P]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 167 \cdot 0,9623 / [700 + (22 - 4,8) \cdot 0,9623] = 7,715 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление:

$$[P] = \frac{[P]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[P]_p}{[P]_E} \right)^2}} = 7,715 / (1 + (7,715 / 2,993)^2)^{1/2} = 2,791 \text{ МПа}$$

где $[P]_E$ – допускаемое наружное давление в пределах упругости для элемента, несущего штуцер (см. расчёт элемента “Штуцер А1 DN700”)

Изн. № подл. 19746.4	Подпись и дата				
	Изн. № дубл.				
	Взам. изн. №				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP
					Лист
					195



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер P1 DN50 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (700 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} + (700 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 219,5 \text{ мм}$$

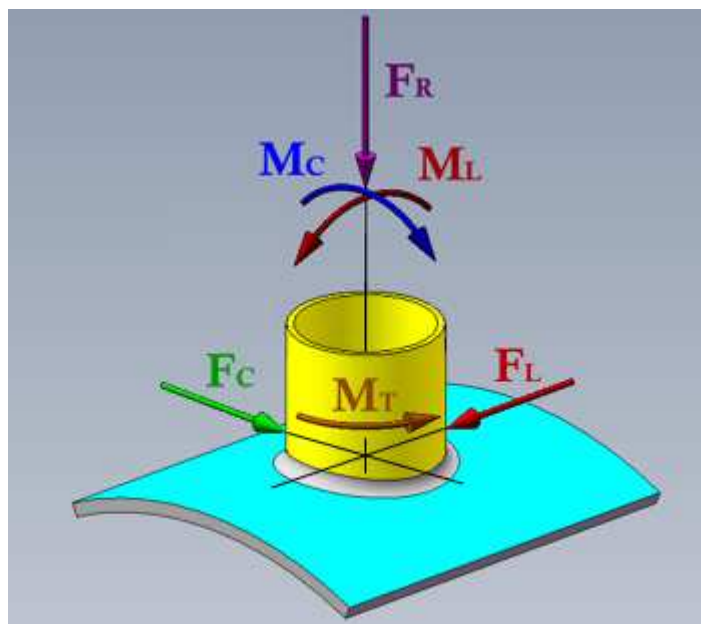
Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 2,791 \text{ МПа}$

$2,791 \text{ МПа} \geq 0,21 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

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



Радиальная нагрузка, F_R : $(-1500) \text{ Н}$

Окружной момент, M_C : 200 Н м

Продольный момент, M_L : 200 Н м

Крутящий момент, M_T : 300 Н м

Сдвиговая нагрузка, F_C : 1100 Н

Сдвиговая нагрузка, F_L : 1100 Н

Эквивалентная толщина обечайки около штуцера:

$$s_s = s - c = 22 - 4,8 = 17,2 \text{ мм}$$

Средний диаметр обечайки у отверстия:

$$D_c = D_p + s + c = 700 + 22 + 4,8 = 726,8 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера:

$$d_c = d + s_1 + c_s = 48 + 10 + 5,5 = 63,5 \text{ мм}$$

Инов. № подл.	19746.4	Подпись и дата		Подпись и дата	
Изм.		Лист		Инов. № дубл.	
№ докум.		Подп.		Взам. инв. №	
Дата				Подпись и дата	
E-10K.00.00.000 PP					Лист
					196

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} = 63,5 / (726,8 \cdot 17,2)^{1/2} = 0,5679$$

Расстояние от края штуцера до возможного концентратора напряжений:

$$b_p = 98 \text{ мм}$$

Средний радиус обечайки у отверстия:

$$R_c = \frac{D_c}{2} = 726,8 / 2 = 363,4 \text{ мм}$$

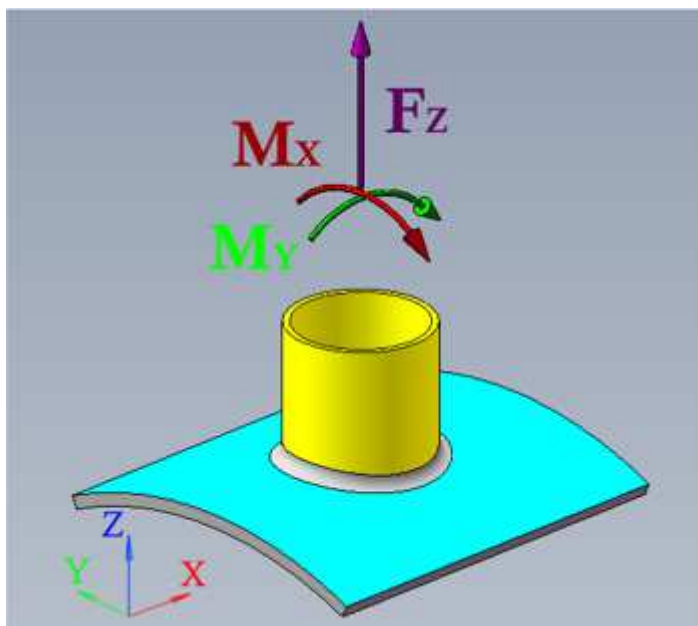
Прочность от действия давления:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |(-0,21) / 2,791| = 0,07525$$

Условие прочности: $\Phi_p \leq 1$

$0,07525 \leq 1,0$. Условие прочности выполнено

Расчетная схема по ГОСТ Р 52857.3-2007



Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер:

$$F_z = -F_R = -(-1500) = 1500 \text{ Н}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s-c)}} = 63,5 / (726,8 \cdot (22-4,8))^{1/2} = 0,5679$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0,6007 + 0,952 \cdot 0,5679 + 0,005196 \cdot 0,5679^2 + (-0,001406) \cdot 0,5679^3 + 0 \cdot 0,5679^4 = 1,143$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при отсутствии накладного кольца ($\lambda_c = 0,5679$):

$$[F_z] = [\sigma] \cdot (s-c)^2 \cdot \max\{C_1; 1,81\} = 167 \cdot (22-4,8)^2 \cdot \max\{1,143; 1,81\} = 8,942 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки:

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{[F_z]} \right| = |1500 / 8,942 \cdot 10^4| = 0,01677$$

Условие прочности: $\Phi_z \leq 1$

$0,01677 \leq 1,0$. Условие прочности выполнено

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер:

$$M_x = M_c = 200 \text{ Н м}$$

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер:

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-10K.00.00.000 PP				Лист
				197

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

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

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

Модуль продольной упругости при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]^{20}_1 = \eta * R_{e/20} / n_T = 1 * 280 / 1,1 = 254,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,4955 * (48 + 2 * 5,5) / (2 * 254,5 * 1 - 0,4955) = 0,05748 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 * 254,5 * 1 * (10 - 5,5) / (48 + 10 + 5,5) = 36,08 \text{ МПа}$$

$$36,08 \text{ МПа} \geq 0,4955 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 700 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 0,6452 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 48 + 2 * 5,5 = 59 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 * ((22 - 4,8) / 0,6452 - 0,8) * (700 * (22 - 4,8))^{1/2} = 5675 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ 150; 1,25 * ((48 + 2 * 5,5) * (10 - 5,5))^{1/2} \} = 20,37 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 254,5 / 272,7 \} = 0,9333$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{2p} = \min \left\{ l_2; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_2 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 * ((48 + 2 * 5,5) * (10 - 5,5 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (700 * (22 - 4,8))^{1/2} = 109,7 \text{ мм}$$

Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (Фланец DN700 с крышкой):

$$L_k = 133 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

Подпись и дата		Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP	Лист
Изнв. № дубл.		Изнв. № инв.	Изнв. № подл.	19746.4				199

$$l_p = L_0 = 109,7 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

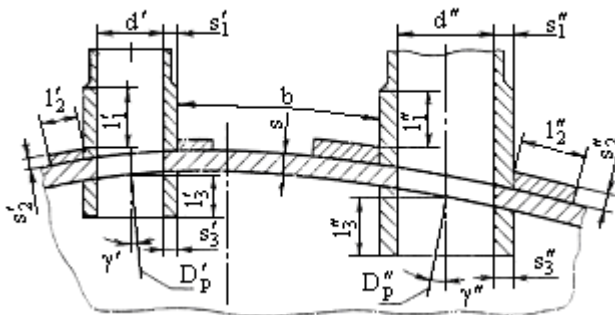
$$d_{op} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (700 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 43,89 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (20,37 \cdot (10 - 5,5) \cdot 0,9333 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 5,5 - 0) \cdot 0,9333) / (109,7 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0.5 \cdot (59 - 43,89) / 109,7 + 1 \cdot (48 + 2 \cdot 5,5) / 700 \cdot 1 / 1 \cdot 20,37 / 109,7] \} = 0,9639$$

$$= 0,9639$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 \cdot 272,7 \cdot 0,9639 / [700 + (22 - 4,8) \cdot 0,9639] = 12,62 \text{ МПа}$$



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер P1 DN50 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (700 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} + (700 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 219,5 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление $[p] = 12,62 \text{ МПа}$

$$12,62 \text{ МПа} \geq 0,4955 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0.5(d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0.5 \cdot (59 - 43,89) \cdot 0,6452 = 0,4874 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

$$= 20,37 \cdot (10 - 0,05748 - 5,5) \cdot 0,9333 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 5,5 - 0) \cdot 0,9333 + 109,7 \cdot (22 - 0,6452 - 4,8)$$

$$= 0,001901 \text{ м}^2$$

$$A_r = 0,4874 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \leq 0,001901 \text{ м}^2$$

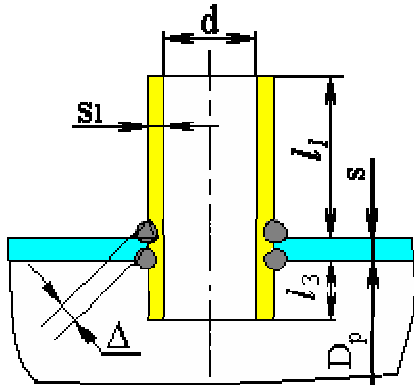
Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	Подпись и дата	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19746.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
E-10K.00.00.000 PP			
Лист			
200			

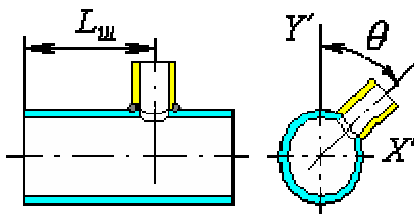
Штуцер HI1 DN25

Исходные данные

Элемент: Штуцер HI1 DN25
Условное обозначение (метка) Штуцер HI1
Элемент, несущий штуцер: Штуцер МН DN800
Тип элемента, несущего штуцер: Штуцер
Тип штуцера: Проходящий без укрепления



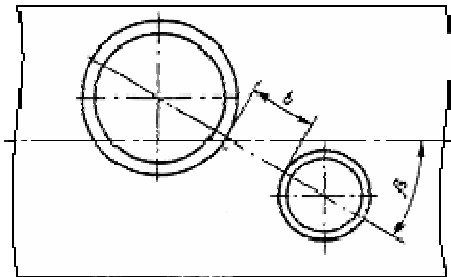
Материал несущего элемента: 09Г2С
Толщина стенки несущего элемента, s: 22 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, c: 4,8 мм
Материал штуцера: 09Г2С(КП265) Gr.
Внутренний диаметр штуцера, d: 25 мм
Толщина стенки штуцера, s₁: 10 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), c_s: 4 мм
Длина штуцера, l₁: 143 мм



Смещение штуцера, L_ш: 3400 мм
Угол поворота штуцера, ϑ : 260 °
Длина внутр. части штуцера, l₃: 0 мм
Прибавка на коррозию, c_{s1}: 0 мм
Минимальный размер сварного шва, Δ : 1 мм
Расчётные параметры размещения штуцера:
Ближайший штуцер

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата



Название штуцера: Штуцер HO1 DN25

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 102,3 мм

Угол β : 90 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$\varphi_1 = 1$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$\varphi = 1$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 800 \text{ мм}$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 120 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,3539 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 120 °C (расчётные условия):

$[\sigma] = 174,5 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 120 °C:

$E = 1,89 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 120 °C (расчётные условия):

$[\sigma]_1 = \eta \cdot \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B; R_{m/10n/t} / n_D; R_{p1,0/10n/t} / n_P) = 1 \cdot \min\{206,8 / 1,5; 403 / 2,4; - / -; - / -\} = 137,9 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 120 °C:

$E_1 = 1,89 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,3539 \cdot (25 + 2 \cdot 4) / (2 \cdot 137,9 \cdot 1 - 0,3539) = 0,04240 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 137,9 \cdot 1 \cdot (10 - 4) / (25 + 10 + 4) = 42,43 \text{ МПа}$$

42,43 МПа \geq 0,3539 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-10K.00.00.000 PP				Лист
				202

$$D_p = D = 800 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 0,8218 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 25 + 2 \cdot 4 = 33 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((22 - 4,8) / 0,8218 - 0,8) \cdot (800 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 4723 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 143; 1,25 \cdot ((25 + 2 \cdot 4) \cdot (10 - 4))^{1/2} \} = 17,59 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{\left[\frac{\sigma}{\sigma_1} \right]}{\left[\frac{\sigma}{\sigma} \right]} \right\} = \min \{ 1,0; 137,9 / 174,5 \} = 0,7902$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{2p} = \min \left\{ l_2; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0,5 \cdot ((25 + 2 \cdot 4) \cdot (10 - 4 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (800 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 117,3 \text{ мм}$$

Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (Фланец DN800 с крышкой):

$$L_k = 119,5 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 117,3 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (800 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 46,92 \text{ мм}$$

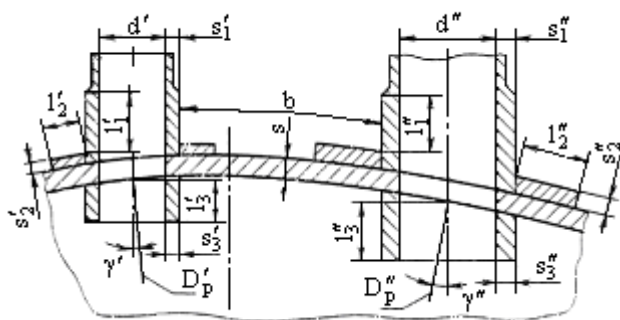
$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0,5 \cdot \frac{d_p - d_{0p}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}}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

$$= \min \{ 1; [1 + (17,59 \cdot (10 - 4) \cdot 0,7902 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 4 - 0) \cdot 0,7902) / (117,3 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0,5 \cdot (33 - 46,92) / 117,3 + 1 \cdot (25 + 2 \cdot 4) / 800 \cdot 1 / 1 \cdot 17,59 / 117,3] \} = 1,1 \}$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 \cdot 174,5 \cdot 1 / [800 + (22 - 4,8) \cdot 1] = 7,346 \text{ МПа}$$

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата					
					E-10K.00.00.000 PP				
					Лист 203				



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер НО1 DN25 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D'_p \cdot (s - c)} + \sqrt{D''_p \cdot (s - c)} = (800 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} + (800 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 234,6 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, требуется дополнительный расчёт укреплений.

$$K_3 = \frac{1 + \cos^2 \beta}{2} = [1 + \cos^2(90)] / 2 = 0,5$$

$$V_1 = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l'_{1p} \cdot (s'_1 - c'_s) \cdot \chi'_1 + l'_{2p} \cdot s'_2 \cdot \chi'_2 + l'_{3p} \cdot (s'_3 - c'_s - c'_{s1}) \cdot \chi'_3 + l''_{1p} \cdot (s''_1 - c_s) \cdot \chi''_1 + l''_{2p} \cdot s''_2 \cdot \chi''_2 + l''_{3p} \cdot (s''_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi''_3}{b \cdot (s - c)}}{K_3 \left(0,8 + \frac{d'_p + d''_p}{2 \cdot b} \right) + K_1 \left(\frac{d' + 2 \cdot c'_s}{D'_p} \cdot \frac{\varphi'_1}{\varphi'_1} \cdot \frac{l'_{1p}}{b} + \frac{d'' + 2 \cdot c_s}{D''_p} \cdot \frac{\varphi''_1}{\varphi''_1} \cdot \frac{l''_{1p}}{b} \right)} \right\}$$

$$= \min \{ 1; (1 + [(17,59 \cdot (10 - 4) \cdot 0,7902 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 4 - 0) \cdot 0,7902 + 17,59 \cdot (10 - 4) \cdot 0,7902 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 4 - 0) \cdot 0,7902) / (102,3 \cdot (22 - 4,8))] / (0,5 \cdot (0,8 + (33 + 33) / (2 \cdot 102,3)) + 1 \cdot [(25 + 2 \cdot 4) / 800 \cdot 1 / 1 \cdot 17,59 / 102,3 + [(25 + 2 \cdot 4) / 800 \cdot 1 / 1 \cdot 17,59 / 102,3]]) = 1,902 \}$$

$$= 1$$

$$[p] = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{0,5 \cdot (D'_p + D''_p) + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 \cdot 174,5 / [0,5 \cdot (800 + 800) + (22 - 4,8) \cdot 1] \cdot 1 = 7,346 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление $[p] = \min \{ 7,346; 7,346 \}$ МПа

7,346 МПа \geq 0,3539 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5(d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (33 - 46,92) \cdot 0,8218 = (-0,572 \cdot 10^{-5}) \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

$$= 17,59 \cdot (10 - 0,04240 - 4) \cdot 0,7902 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 4 - 0) \cdot 0,7902 + 117,3 \cdot (22 - 0,8218 - 4,8)$$

$$= 0,002004 \text{ м}^2$$

$$A_r = (-0,572 \cdot 10^{-5}) \text{ м}^2 \leq 0,002004 \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 180 °С

Расчётное наружное избыточное давление, p: 0,21 МПа

Инов. № подл.	19746.4
Взам. инв. №	
Инов. № дубл.	
Подпись и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

E-10K.00.00.000 PP

Лист
204

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(КП265) Gr. при температуре $T = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия (наружное давление)):

$$[\sigma]_1 = \eta \cdot \min(R_{eT} / n_T; R_{mT} / n_B; R_{m10nT} / n_D; R_{p1,0/10nT} / n_n) = 1 \cdot \min\{197,2 / 1,5; 435,4 / 2,4; - / -; - / -\} = 131,5\text{ МПа}$$

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

$$E_1 = 1,83 \cdot 10^5\text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 - p} = 0,21 \cdot (25 + 2 \cdot 4) / (2 \cdot 131,5 - 0,21) = 0,02637\text{ мм}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$B_1 = \min\left\{1,0; 9,45 \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \sqrt{\frac{d}{100 \cdot (s_1 - c_s)}}\right\} = \min\{1,0; 9,45 \cdot 25 / 143 \cdot (25 / (100 \cdot (10 - 4)))^{1/2}\} = 0,3372$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия устойчивости:

$$[p]_e = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E_1}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_1 - c_s)}{d}\right]^{2,5} = 20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 25 / (2,4 \cdot 0,3372 \cdot 143) \cdot (100 \cdot (10 - 4) / 25)^{2,5} = 2320\text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия прочности:

$$[p]_n = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + (s_1 - c_s)} = 2 \cdot 131,5 \cdot (10 - 4) / (25 + 10 - 4) = 50,9\text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_n}{[p]_e}\right)^2}} = 50,9 / (1 + (50,9 / 2320)^2)^{1/2} = 50,89\text{ МПа}$$

$$50,89\text{ МПа} \geq 0,21\text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p - D = 800\text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 25 + 2 \cdot 4 = 33\text{ мм}$$

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min\left\{l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)}\right\} = \min\{143; 1,25 \cdot ((25 + 2 \cdot 4) \cdot (10 - 4))^{1/2}\} = 17,59\text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min\left\{1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]}\right\} = \min\{1,0; 131,5 / 167\} = 0,7874$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

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

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-10K.00.00.000 PP				Лист
				205

$$V_1 = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l'_{1p} \cdot (s'_1 - c'_s) \cdot \chi'_1 + l'_{2p} \cdot s'_2 \cdot \chi'_2 + l'_{3p} \cdot (s'_3 - c'_s - c'_{s1}) \cdot \chi'_3 + l'_{1p} \cdot (s''_1 - c''_s - c'_{s1}) \cdot \chi''_1 + l'_{2p} \cdot s''_2 \cdot \chi''_2 + l'_{3p} \cdot (s''_3 - c''_s - c'_{s1}) \cdot \chi''_3}{b \cdot (s - c)}}{K_3 \left(0,8 + \frac{d'_p + d'_p}{2 \cdot b} \right) + K_1 \left(\frac{d' + 2 \cdot c'_s}{D'_p} \cdot \frac{l'_{1p}}{b} + \frac{d' + 2 \cdot c'_s}{D'_p} \cdot \frac{l'_{1p}}{b} \right)} \right\}$$

$$= \min \{ 1; (1 + [(17,59 * (10 - 4) * 0,7874 + 0 * 0 * 0 + 0 * (10 - 4 - 0) * 0,7874 + 17,59 * (10 - 4) * 0,7874 + 0 * 0 * 0 + 0 * (10 - 4 - 0) * 0,7874) / (102,3 * (22 - 4,8))] / (0,5 * (0,8 + (33 + 33) / (2 * 102,3) + 1 * [(25 + 2 * 4) / 800 * 17,59 / 102,3 + [(25 + 2 * 4) / 800 * 17,59 / 102,3]])) = 1,902 \}$$

= 1

$$[p]_n = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{0,5 \cdot (D'_p + D''_p) + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2 * 1 * (22 - 4,8) * 167 / [0,5 * (800 + 800) + (22 - 4,8) * 1] * 1 = 7,03 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_n}{[p]_E} \right)^2}} = 7,03 / (1 + (7,03 / 2,457)^2)^{1/2} = 2,319 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление $[p] = \min \{ 2,319; 2,319 \}$ МПа

2,319 МПа \geq 0,21 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, Т: 20 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,4952 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

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

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

Модуль продольной упругости при температуре 20 °С:

$$E = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре Т = 20 °С (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]^{20}_1 = \eta * R_{e/20} / n_T = 1 * 245 / 1,1 = 222,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °С:

$$E_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_{1p} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,4952 * (25 + 2 * 4) / (2 * 222,7 * 1 - 0,4952) = 0,03673 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 * 222,7 * 1 * (10 - 4) / (25 + 10 + 4) = 68,53 \text{ МПа}$$

68,53 МПа \geq 0,4952 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 800 \text{ мм}$$

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-10K.00.00.000 PP				Лист
				207

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 0,7357 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 25 + 2 \cdot 4 = 33 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((22 - 4,8) / 0,7357 - 0,8) \cdot (800 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 5298 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 143; 1,25 \cdot ((25 + 2 \cdot 4) \cdot (10 - 4))^{1/2} \} = 17,59 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 222,7 / 272,7 \} = 0,8167$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

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

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (800 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 117,3 \text{ мм}$$

Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (Фланец DN800 с крышкой):

$$L_k = 119,5 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 117,3 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (800 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 46,92 \text{ мм}$$

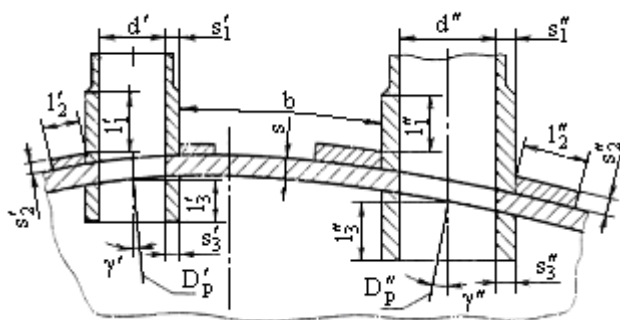
$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0,5 \cdot \frac{d_p - d_{0p}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}}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

$$= \min \{ 1; [1 + (17,59 \cdot (10 - 4) \cdot 0,8167 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 4 - 0) \cdot 0,8167) / (117,3 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0,5 \cdot (33 - 46,92) / 117,3 + 1 \cdot (25 + 2 \cdot 4) / 800 \cdot 1 / 1 \cdot 17,59 / 117,3] \} = 1,101$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 \cdot 272,7 \cdot 1 / [800 + (22 - 4,8) \cdot 1] = 11,48 \text{ МПа}$$

Инов. № подл.	19746.4	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-10K.00.00.000 PP				Лист
				208



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер НО1 DN25 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (800 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} + (800 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 234,6 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, требуется дополнительный расчёт укреплений.

$$K_3 = \frac{1 + \cos^2 \beta}{2} = [1 + \cos^2(90)] / 2 = 0,5$$

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

$$= \min \{ 1; (1 + [(17,59 \cdot (10 - 4) \cdot 0,8167 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 4 - 0) \cdot 0,8167 + 17,59 \cdot (10 - 4) \cdot 0,8167 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 4 - 0) \cdot 0,8167) / (102,3 \cdot (22 - 4,8))] / (0,5 \cdot (0,8 + (33 + 33) / (2 \cdot 102,3)) + 1 \cdot [(25 + 2 \cdot 4) / 800 \cdot 1 / 1 \cdot 17,59 / 102,3 + [(25 + 2 \cdot 4) / 800 \cdot 1 / 1 \cdot 17,59 / 102,3] \cdot 1]) = 1,908 \}$$

$$= 1$$

$$[p] = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{0,5 \cdot (D_p' + D_p'') + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 \cdot 272,7 / [0,5 \cdot (800 + 800) + (22 - 4,8) \cdot 1] \cdot 1 = 11,48 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление $[p] = \min \{ 11,48; 11,48 \}$ МПа

$$11,48 \text{ МПа} \geq 0,4952 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5(d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (33 - 46,92) \cdot 0,7357 = (-0,5121 \cdot 10^{-5}) \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

$$A_a = l_{1p} \cdot (s_1 - s_{p1} - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + l_p \cdot (s - s_p - c)$$

$$= 17,59 \cdot (10 - 0,03673 - 4) \cdot 0,8167 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 4 - 0) \cdot 0,8167 + 117,3 \cdot (22 - 0,7357 - 4,8)$$

$$= 0,002017 \text{ м}^2$$

$$A_r = (-0,5121 \cdot 10^{-5}) \text{ м}^2 \leq 0,002017 \text{ м}^2$$

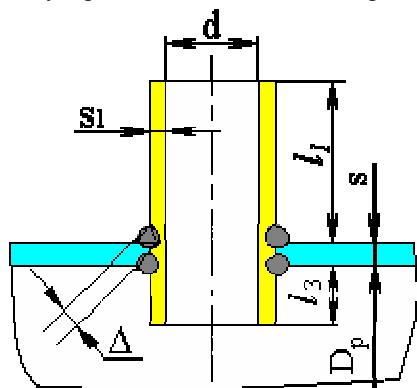
Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19746.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
			Дата
E-10K.00.00.000 PP			
Лист			
209			

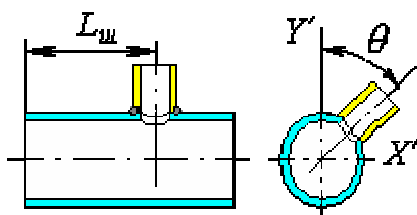
Штуцер HO1 DN25

Исходные данные

Элемент: Штуцер HO1 DN25
Условное обозначение (метка) Штуцер HO1
Элемент, несущий штуцер: Штуцер МН DN800
Тип элемента, несущего штуцер: Штуцер
Тип штуцера: Проходящий без укрепления

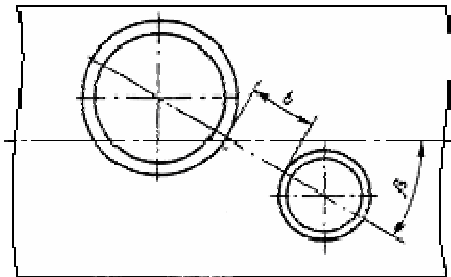


Материал несущего элемента: 09Г2С
Толщина стенки несущего элемента, s: 22 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, с: 4,8 мм
Материал штуцера: 09Г2С(КП265) Gr.
Внутренний диаметр штуцера, d: 25 мм
Толщина стенки штуцера, s₁: 10 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), с_s: 4 мм
Длина штуцера, l₁: 143 мм



Смещение штуцера, L_ш: 3400 мм
Угол поворота штуцера, ϑ: 280 °
Длина внутр. части штуцера, l₃: 0 мм
Прибавка на коррозию, с_{s1}: 0 мм
Минимальный размер сварного шва, Δ: 1 мм
Расчётные параметры размещения штуцера:
Ближайший штуцер

Изнв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изнв. № дубл.	Подпись и дата						Лист	
19746.4										210	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP						



Название штуцера: Штуцер Н11 DN25

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b: 102,3 мм

Угол β : 90 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$\varphi_1 = 1$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$\varphi = 1$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 800 \text{ мм}$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 120 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,3539 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 120 °C (расчётные условия):

$[\sigma] = 174,5 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 120 °C:

$E = 1,89 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 120 °C (расчётные условия):

$[\sigma]_1 = \eta \cdot \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B; R_{m/10n/t} / n_D; R_{p1,0/10n/t} / n_P) = 1 \cdot \min\{206,8 / 1,5; 403 / 2,4; - / -; - / -\} = 137,9 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 120 °C:

$E_1 = 1,89 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,3539 \cdot (25 + 2 \cdot 4) / (2 \cdot 137,9 \cdot 1 - 0,3539) = 0,04240 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 137,9 \cdot 1 \cdot (10 - 4) / (25 + 10 + 4) = 42,43 \text{ МПа}$$

42,43 МПа \geq 0,3539 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата					
19746.4									
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата					
					E-10K.00.00.000 PP				Лист
									211

$$D_p = D = 800 \text{ mm}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 0,8218 \text{ MM}$$

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

$$d_D = d + 2 \cdot c_s = 25 + 2 \cdot 4 = 33 \text{ mm}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s-c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = 2 \cdot ((22-4,8)/0,8218-0,8) \cdot (800 \cdot (22-4,8))^{1/2} = 4723 \text{ mm}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min[l_1; 1.25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)}] = \min[143; 1.25 \cdot ((25 + 2 \cdot 4) \cdot (10 - 4))^{1/2}] = 17,59 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1, 0; \left\lfloor \frac{[\sigma]}{[\sigma]} \right\rfloor \right\} = \min \{ 1, 0, 137,9 / 174,5 \} = 0,7902$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

$$l_{30} = \min \{ l_3; \quad 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{d1})} \} = \min \{ 0; 0.5 \cdot ((25 + 2 \cdot 4) \cdot (10 - 4 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ mm}$$

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (800 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 117,3 \text{ mm}$$

Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (Фланец DN800 с крышкой):

$$L_k = 119,5 \text{ mm}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_0 = L_0 = 117,3 \text{ mm}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{op} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (800 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 46,92 \text{ mm}$$

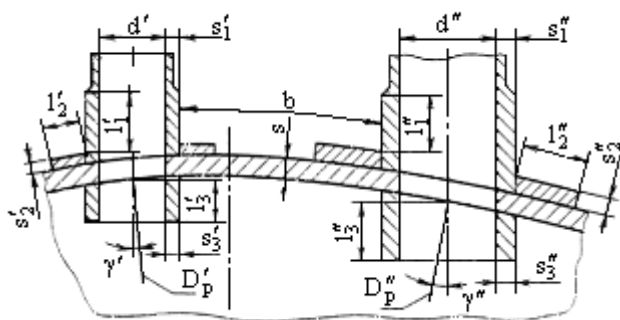
$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{1_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + 1_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + 1_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{1_p \cdot (s - c)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{op}}{1_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{1_{1p}}{1_p}}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

$$= \min\{1; [1 + (17,59 * (10 - 4) * 0,7902 + 0 * 0 * 0 + 0 * (10 - 4 - 0) * 0,7902) / (117,3 * (22 - 4,8))] / [1 + 0,5 * (33 - 46,92) / 117,3 + 1 * (25 + 2 * 4) / 800 * 1 / 1 * 17,59 / 117,3]\} = 1,1\}$$

$$= \mathbf{1}$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_n + (s - c) \cdot \varphi} \cdot \nabla = 2 * 1 * (22 - 4,8) * 1 * 174,5 * 1 / [800 + (22 - 4,8) * 1] = 7,346 \text{ МПа}$$

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$L_k = 119,5 \text{ мм}$ Расчётная ширина зоны укрепления: $l_p = L_0 = 117,3 \text{ мм}$ Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления: $d_{op} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (800 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 46,92 \text{ мм}$ $V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_p \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_p}{l_p}} \right\}$ $= \min \{ 1; [1 + (17,59 \cdot (10 - 4) \cdot 0,7902 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 4 - 0) \cdot 0,7902) / (117,3 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0.5 \cdot (33 - 46,92) / 117,3 + 1 \cdot (25 + 2 \cdot 4) / 800 \cdot 1 / 1 \cdot 17,59 / 117,3] = 1,1 \}$ $= 1$ $[\sigma]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 \cdot 174,5 \cdot 1 / [800 + (22 - 4,8) \cdot 1] = 7,346 \text{ МПа}$
					<div> <div>19746.4</div> <div> <div>Инв. № подл.</div> <div>Подпись и дата</div> <div>Взам. инв. №</div> <div>Инв. № дубл.</div> <div>Подпись и дата</div> </div> </div>
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<div>E-10K.00.00.000 PP</div> <div>Лист 212</div>



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер Н1 DN25 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D'_p \cdot (s - c)} + \sqrt{D''_p \cdot (s - c)} = (800 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} + (800 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 234,6 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, требуется дополнительный расчёт укреплений.

$$K_3 = \frac{1 + \cos^2 \beta}{2} = [1 + \cos^2(90)] / 2 = 0,5$$

$$V_1 = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l'_{1p} \cdot (s'_1 - c'_s) \cdot \chi'_1 + l'_{2p} \cdot s'_2 \cdot \chi'_2 + l'_{3p} \cdot (s'_3 - c'_s - c'_{s1}) \cdot \chi'_3 + l''_{1p} \cdot (s''_1 - c_s) \cdot \chi''_1 + l''_{2p} \cdot s''_2 \cdot \chi''_2 + l''_{3p} \cdot (s''_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi''_3}{b \cdot (s - c)}}{K_3 \left(0,8 + \frac{d'_p + d''_p}{2 \cdot b} \right) + K_1 \left(\frac{d' + 2 \cdot c'_s}{D'_p} \cdot \frac{\varphi'_1}{\varphi'_1} \cdot \frac{l'_{1p}}{b} + \frac{d'' + 2 \cdot c_s}{D''_p} \cdot \frac{\varphi''_1}{\varphi''_1} \cdot \frac{l''_{1p}}{b} \right)} \right\}$$

$$= \min \{ 1; (1 + [(17,59 \cdot (10 - 4) \cdot 0,7902 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 4 - 0) \cdot 0,7902 + 17,59 \cdot (10 - 4) \cdot 0,7902 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 4 - 0) \cdot 0,7902) / (102,3 \cdot (22 - 4,8))] / (0,5 \cdot (0,8 + (33 + 33) / (2 \cdot 102,3)) + 1 \cdot [(25 + 2 \cdot 4) / 800 \cdot 1 / 1 \cdot 17,59 / 102,3 + [(25 + 2 \cdot 4) / 800 \cdot 1 / 1 \cdot 17,59 / 102,3]]) = 1,902 \}$$

$$= 1$$

$$[p]_k = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{0,5 \cdot (D'_p + D''_p) + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 \cdot 174,5 / [0,5 \cdot (800 + 800) + (22 - 4,8) \cdot 1] \cdot 1 = 7,346 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление $[p] = \min \{ 7,346; 7,346 \} \text{ МПа}$

$$7,346 \text{ МПа} \geq 0,3539 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5(d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (33 - 46,92) \cdot 0,8218 = (-0,572 \cdot 10^{-5}) \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

$$= 17,59 \cdot (10 - 0,04240 - 4) \cdot 0,7902 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 4 - 0) \cdot 0,7902 + 117,3 \cdot (22 - 0,8218 - 4,8)$$

$$= 0,002004 \text{ м}^2$$

$$A_r = (-0,572 \cdot 10^{-5}) \text{ м}^2 \leq 0,002004 \text{ м}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 180 °С

Расчётное наружное избыточное давление, p: 0,21 МПа

Инов. № подл.	19746.4
Взам. инв. №	
Инов. № дубл.	
Подпись и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

E-10K.00.00.000 PP

Лист
213

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(КП265) Gr. при температуре $T = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия (наружное давление)):

$$[\sigma]_1 = \eta \cdot \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B; R_{m/10n/t} / n_D; R_{p1,0/10n/t} / n_n) = 1 \cdot \min\{197,2 / 1,5; 435,4 / 2,4; - / -; - / -\} = 131,5\text{ МПа}$$

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

$$E_1 = 1,83 \cdot 10^5\text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_p = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 - p} = 0,21 \cdot (25 + 2 \cdot 4) / (2 \cdot 131,5 - 0,21) = 0,02637\text{ мм}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$B_1 = \min\left\{1,0; 9,45 \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \sqrt{\frac{d}{100 \cdot (s_1 - c_s)}}\right\} = \min\{1,0; 9,45 \cdot 25 / 143 \cdot (25 / (100 \cdot (10 - 4)))^{1/2}\} = 0,3372$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия устойчивости:

$$[p]_e = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E_1}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_1 - c_s)}{d}\right]^{2,5} = 20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 25 / (2,4 \cdot 0,3372 \cdot 143) \cdot (100 \cdot (10 - 4) / 25)^{2,5} = 2320\text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление для патрубка штуцера из условия прочности:

$$[p]_n = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + (s_1 - c_s)} = 2 \cdot 131,5 \cdot (10 - 4) / (25 + 10 - 4) = 50,9\text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_n}{[p]_e}\right)^2}} = 50,9 / (1 + (50,9 / 2320)^2)^{1/2} = 50,89\text{ МПа}$$

$$50,89\text{ МПа} \geq 0,21\text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p - D = 800\text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 25 + 2 \cdot 4 = 33\text{ мм}$$

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min\left\{l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)}\right\} = \min\{143; 1,25 \cdot ((25 + 2 \cdot 4) \cdot (10 - 4))^{1/2}\} = 17,59\text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min\left\{1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]}\right\} = \min\{1,0; 131,5 / 167\} = 0,7874$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

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

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-10K.00.00.000 PP				Лист
				214

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (800 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 117,3 \text{ мм}$$

Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (Фланец DN800 с крышкой):

$$L_k = 119,5 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 117,3 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{op} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (800 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 46,92 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (17,59 \cdot (10 - 4) \cdot 0,7874 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (0 - 2 \cdot 4) \cdot 0,7874) / (117,3 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0,5 \cdot (33 - 46,92) / 117,3 + 1 \cdot (25 + 2 \cdot 4) / 800 \cdot 17,59 / 117,3] = 1,1 \}$$

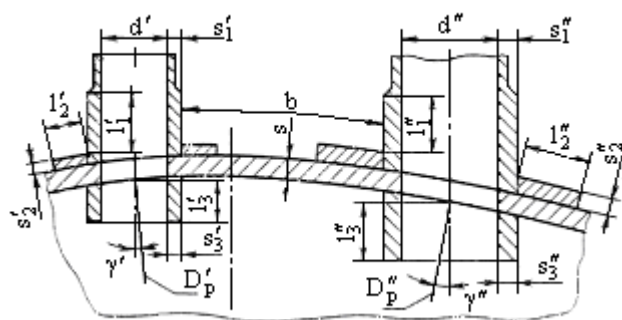
$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 167 \cdot 1 / [800 + (22 - 4,8) \cdot 1] = 7,03 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление:

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_p}{[p]_E} \right)^2}} = 7,03 / (1 + (7,03 / 2,457)^2)^{1/2} = 2,319 \text{ МПа}$$

где $[p]_E$ – допускаемое наружное давление в пределах упругости для элемента, несущего штуцер (см. расчёт элемента “Штуцер МН DN800”)



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер НН1 DN25 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (800 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} + (800 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 234,6 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, требуется дополнительный расчёт укреплений.

$$K_3 = \frac{1 + \cos^2 \beta}{2} = [1 + \cos^2(90)] / 2 = 0,5$$

Изн. № подл.	19746.4
Подпись и дата	
Взам. инв. №	
Изн. № дубл.	
Подпись и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

E-10K.00.00.000 PP

Лист
215

$$V_1 = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l'_{1p} \cdot (s'_1 - c'_s) \cdot \chi'_1 + l'_{2p} \cdot s'_2 \cdot \chi'_2 + l'_{3p} \cdot (s'_3 - c'_s - c'_{s1}) \cdot \chi'_3 + l'_{1p} \cdot (s''_1 - c''_s - c'_{s1}) \cdot \chi''_1 + l'_{2p} \cdot s''_2 \cdot \chi''_2 + l'_{3p} \cdot (s''_3 - c''_s - c'_{s1}) \cdot \chi''_3}{b \cdot (s - c)}}{K_3 \left(0,8 + \frac{d'_p + d'_p}{2 \cdot b} \right) + K_1 \left(\frac{d' + 2 \cdot c'_s}{D'_p} \cdot \frac{l'_{1p}}{b} + \frac{d' + 2 \cdot c'_s}{D'_p} \cdot \frac{l'_{1p}}{b} \right)} \right\}$$

$$= \min \{ 1; (1 + [(17,59 * (10 - 4) * 0,7874 + 0 * 0 * 0 + 0 * (10 - 4 - 0) * 0,7874 + 17,59 * (10 - 4) * 0,7874 + 0 * 0 * 0 + 0 * (10 - 4 - 0) * 0,7874) / (102,3 * (22 - 4,8))] / (0,5 * (0,8 + (33 + 33) / (2 * 102,3) + 1 * [(25 + 2 * 4) / 800 * 17,59 / 102,3 + [(25 + 2 * 4) / 800 * 17,59 / 102,3]])) = 1,902 \}$$

= 1

$$[p]_n = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot [\sigma]}{0,5 \cdot (D'_p + D''_p) + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2 * 1 * (22 - 4,8) * 167 / [0,5 * (800 + 800) + (22 - 4,8) * 1] * 1 = 7,03 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_n}{[p]_E} \right)^2}} = 7,03 / (1 + (7,03 / 2,457)^2)^{1/2} = 2,319 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление $[p] = \min \{ 2,319; 2,319 \}$ МПа

2,319 МПа \geq 0,21 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, Т: 20 °С

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,4952 МПа

Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ Р 52857.3-2007

Свойства материала элемента, несущего штуцер

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

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

Модуль продольной упругости при температуре 20 °С:

$$E = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре Т = 20 °С (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]^{20}_1 = \eta * R_{e/20} / n_T = 1 * 245 / 1,1 = 222,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °С:

$$E_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_{1p} = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 0,4952 * (25 + 2 * 4) / (2 * 222,7 * 1 - 0,4952) = 0,03673 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 * 222,7 * 1 * (10 - 4) / (25 + 10 + 4) = 68,53 \text{ МПа}$$

68,53 МПа \geq 0,4952 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 800 \text{ мм}$$

Инов. № подл.	19746.4	Подпись и дата		Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	E-10K.00.00.000 PP					Лист
												216
							Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера:

$$s_p = 0,7357 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 25 + 2 \cdot 4 = 33 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot ((22 - 4,8) / 0,7357 - 0,8) \cdot (800 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 5298 \text{ мм}$$

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

Расчётная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 143; 1,25 \cdot ((25 + 2 \cdot 4) \cdot (10 - 4))^{1/2} \} = 17,59 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1,0, 222,7 / 272,7 \} = 0,8167$$

Расчётная длина внутренней части штуцера:

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

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (800 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 117,3 \text{ мм}$$

Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (Фланец DN800 с крышкой):

$$L_k = 119,5 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 117,3 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0,4 \cdot (800 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 46,92 \text{ мм}$$

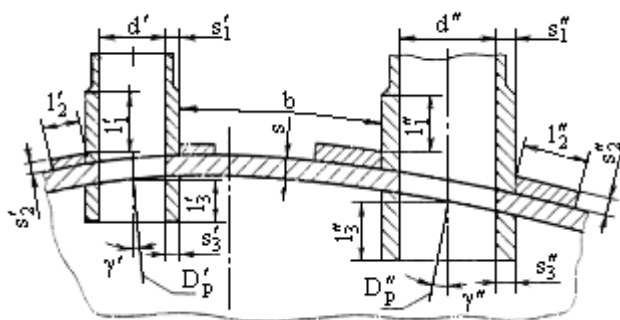
$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0,5 \cdot \frac{d_p - d_{0p}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}}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

$$= \min \{ 1; [1 + (17,59 \cdot (10 - 4) \cdot 0,8167 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 4 - 0) \cdot 0,8167) / (117,3 \cdot (22 - 4,8))] / [1 + 0,5 \cdot (33 - 46,92) / 117,3 + 1 \cdot (25 + 2 \cdot 4) / 800 \cdot 1 / 1 \cdot 17,59 / 117,3] = 1,101 \}$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 \cdot 272,7 \cdot 1 / [800 + (22 - 4,8) \cdot 1] = 11,48 \text{ МПа}$$

Изн.	№ подл.	19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP	
						Лист
						217



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Штуцер Н1 DN25 не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (800 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} + (800 \cdot (22 - 4,8))^{1/2} = 234,6 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, требуется дополнительный расчёт укреплений.

$$K_3 = \frac{1 + \cos^2 \beta}{2} = [1 + \cos^2(90)] / 2 = 0,5$$

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

$$= \min \{ 1; (1 + [(17,59 \cdot (10 - 4) \cdot 0,8167 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 4 - 0) \cdot 0,8167 + 17,59 \cdot (10 - 4) \cdot 0,8167 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 4 - 0) \cdot 0,8167) / (102,3 \cdot (22 - 4,8))] / (0,5 \cdot (0,8 + (33 + 33) / (2 \cdot 102,3)) + 1 \cdot [(25 + 2 \cdot 4) / 800 \cdot 1 / 1 \cdot 17,59 / 102,3 + [(25 + 2 \cdot 4) / 800 \cdot 1 / 1 \cdot 17,59 / 102,3] \cdot 1]) = 1,908 \}$$

$$= 1$$

$$[p] = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{0,5 \cdot (D_p' + D_p'') + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2 \cdot 1 \cdot (22 - 4,8) \cdot 1 \cdot 272,7 / [0,5 \cdot (800 + 800) + (22 - 4,8) \cdot 1] \cdot 1 = 11,48 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление $[p] = \min \{ 11,48; 11,48 \}$ МПа

11,48 МПа \geq 0,4952 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0,5(d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0,5 \cdot (33 - 46,92) \cdot 0,7357 = (-0,5121 \cdot 10^{-5}) \text{ м}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

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

$$= 17,59 \cdot (10 - 0,03673 - 4) \cdot 0,8167 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 4 - 0) \cdot 0,8167 + 117,3 \cdot (22 - 0,7357 - 4,8)$$

$$= 0,002017 \text{ м}^2$$

$$A_r = (-0,5121 \cdot 10^{-5}) \text{ м}^2 \leq 0,002017 \text{ м}^2$$

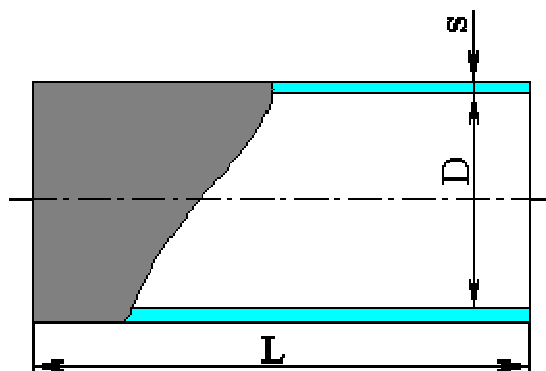
Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	19746.4
Взам. инв. №	
Инов. № дубл.	
Подпись и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

E-10K.00.00.000 PP

Патрубок UC, TW DN50



Исходные данные

Материал: 09Г2С(КП265) Gr.
Внутр. диаметр, D: 48 мм
Толщина стенки, s: 10 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c_1 : 4 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, c_2 : 1,5 мм
Прибавка технологическая, c_3 : 0 мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, c : 5,5 мм
Длина обечайки, L: 3400 мм
Коэффициенты прочности сварных швов:
Продольный шов:

$$\varphi_P = 1$$

Окружной шов:

$$\varphi_T = 1$$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 120 °C
Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,3781 МПа
Расчётный изгибающий момент, M: 0 Н м
Расчётное поперечное усилие, Q: 0 Н
Расчётное осевое сжимающее усилие, F: 511,5 Н

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 120 °C (расчётные условия):

$$[\sigma] = \eta \cdot \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B; R_{m/10n/t} / n_D; R_{p1,0/10n/t} / n_n) = 1 \cdot \min\{206,8 / 1,5; 403 / 2,4; - / -; - / -\} = 137,9 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 120 °C:

$$E = 1,89 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

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

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-10K.00.00.000 PP				Лист
				219

$$s_p + c = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} + c = (0,3781 \cdot 48) / (2 \cdot 137,9 \cdot 1 - 0,3781) + 5,5 = 5,566 \text{ мм}$$

$$5,566 \text{ мм} \leq 10 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие работоспособности выполнено**

Допускаемое давление:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 137,9 \cdot 1 \cdot (10 - 5,5) / (48 + 10 - 5,5) = 23,64 \text{ МПа}$$

$$23,64 \text{ МПа} \geq 0,3781 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Минимальное расстояние между "одиночными" штуцерами:

$$b_0 = 2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} = 2 \cdot \sqrt{48 \cdot (10 - 5,5)} = 29,39 \text{ мм}$$

Расчётная длина для расчёта от действия осевой силы:

$$l_F = 3400 \text{ мм}$$

Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием (п. 5.3.4)

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$[F]_K = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3,142 \cdot (48 + 10 - 5,5) \cdot (10 - 5,5) \cdot 137,9 = 1,023 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:

$$[F]_{E1} = \frac{31,0 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2,5} = 310 \cdot 10^{-6} \cdot 1,89 \cdot 10^5 \cdot 48^2 / (2,4) \cdot (100 \cdot (10 - 5,5) / 48)^{2,5} = 1,514 \cdot 10^7 \text{ Н}$$



Приведённая длина: $l_{np} = 6800 \text{ мм}$

Гибкость:

$$\lambda = \frac{2,83 \cdot l_{np}}{D + s - c} = 2,83 \cdot 6800 / (48 + 10 - 5,5) = 303,1$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия общей устойчивости:

$$[F]_{E2} = \frac{\pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot E}{n_y} \cdot \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2 = 3,142 \cdot (48 + 10 - 5,5) \cdot (10 - 5,5) \cdot 1,89 \cdot 10^5 / (2,4) \cdot (3,142 / 303,1)^2 = 6281 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия устойчивости:

$$[F]_E = \min \{ [F]_{E1}, [F]_{E2} \} = \min \{ 1,514 \cdot 10^7, 6281 \} = 6281 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие:

$$[F] = \frac{[F]_K}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_K}{[F]_E} \right)^2}} = 1,023 \cdot 10^5 / (1 + (1,023 \cdot 10^5 / 6281)^2)^{1/2} = 6269 \text{ Н}$$

$$6269 \text{ Н} \geq 511,5 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

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

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

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

Изн. № подл.	19746.4
Взам. инв. №	
Изн. № дубл.	
Подпись и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

E-10K.00.00.000 PP

Лист

220

$$[Q]_{\Pi} = 0.25 \cdot \pi \cdot D \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 0.25 \cdot 3,142 \cdot 48 \cdot (10 - 5,5) \cdot 137,9 = 2,339 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Расчётная длина для расчёта седловых опор:

$l_s = 4600 \text{ мм}$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

$$[Q]_{\Sigma} = \frac{2,4 \cdot E \cdot (s - c)^2}{n_y} \cdot \left[0,18 + 3,3 \frac{D(s - c)}{l_s^2} \right] = 2,4 \cdot 1,89 \cdot 10^5 \cdot (10 - 5,5)^2 / 2,4 \cdot (0,18 + 3,3 \cdot 48 \cdot (10 - 5,5) / 4600^2) = 6,89 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\Pi}}{[Q]_{\Sigma}} \right)^2}} = 2,339 \cdot 10^4 / (1 + (2,339 \cdot 10^4 / 6,89 \cdot 10^5)^2)^{1/2} = 2,338 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Расчёт в расчётных условиях (наружное давление)

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 180 °C

Расчётное наружное избыточное давление, p: 0,21 МПа

Расчётный изгибающий момент, M: 0 Н м

Расчётное поперечное усилие, Q: 0 Н

Расчётное осевое сжимающее усилие, F: 466,9 Н

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 180 °C (расчётные условия (наружное давление)):

$[\sigma] = \eta \cdot \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B; R_{m/10n/t} / n_D; R_{p1,0/10n/t} / n_n) = 1 \cdot \min\{197,2 / 1,5; 435,4 / 2,4; - / -; - / -\} = 131,5 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С(КП265) Gr. 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:

$l_p = 3400 \text{ мм}$

$$B = \max \left\{ 1; 0,47 \cdot \left(\frac{p}{10^{-5} \cdot E} \right)^{0,067} \cdot \left(\frac{1}{D} \right)^{0,4} \right\} = \max \{ 1; 0,47 \cdot (0,21 / (10^{-5} \cdot 1,83 \cdot 10^5))^{0,067} \cdot (3400 / 48)^{0,4} \} = 2,235$$

Расчётная толщина стенки с учетом прибавок:

$$s_p + c = \max \left\{ 1,06 \cdot \frac{10^{-2} \cdot D}{B} \cdot \left(\frac{p}{10^{-5} \cdot E} \cdot \frac{1}{D} \right)^{0,4}; \frac{1,2 \cdot p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] - p} \right\} = \max \{ 1,06 \cdot 10^{-2} \cdot 48 / 2,235 \cdot (0,21 / (10^{-5} \cdot 1,83 \cdot 10^5)) \cdot 3400 / 48^{0,4}; 1,2 \cdot 0,21 \cdot 48 / (2 \cdot 131,5 - 0,21) \} + 5,5 = 6,026 \text{ мм}$$

6,026 мм ≤ 10 мм

Заключение: **Условие работоспособности выполнено**

$$B_1 = \min \left\{ 1,0; 9,45 \cdot \frac{D}{l} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (s - c)}} \right\} = \min \{ 1,0; 9,45 \cdot 48 / 3400 \cdot (48 / (100 \cdot (10 - 5,5)))^{1/2} \} = 0,04357$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости:

$$[p]_{\Sigma} = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D}{l} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2,5} = 2,08 \cdot 10^{-5} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 48 / (2,4 \cdot 0,04357 \cdot 3400) \cdot (100 \cdot (10 - 5,5) / 48)^{2,5} = 138,3 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$[p]_{\Pi} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 131,5 \cdot (10 - 5,5) / (48 + 10 - 5,5) = 22,54 \text{ МПа}$$

Подпись и дата

Инд. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инд. № подл.

19746.4

E-10K.00.00.000 PP

Лист

222

Изм. Лист № докум. Подп. Дата

$$[p] = \frac{[F]_{\text{н}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\text{н}}}{[F]_{\text{е}}}\right)^2}} = 22,54 / (1 + (22,54 / 138,3)^2)^{1/2} = 22,25 \text{ МПа}$$

22,25 МПа ≥ 0,21 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Минимальное расстояние между “одиночными” штуцерами:

$$b_0 = 2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} = 2 \cdot (48 \cdot (10 - 5,5))^{1/2} = 29,39 \text{ мм}$$

Расчётная длина для расчёта от действия осевой силы:

$l_F = 3400 \text{ мм}$

Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием (п. 5.3.4)

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$[F]_{\text{н}} = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3,142 \cdot (48 + 10 - 5,5) \cdot (10 - 5,5) \cdot 131,5 = 9,759 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:

$$[F]_{\text{е1}} = \frac{31,0 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2,5} = 310 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 48^2 / (2,4) \cdot (100 \cdot (10 - 5,5) / 48)^{2,5} = 1,466 \cdot 10^7 \text{ Н}$$



Приведённая длина: $l_{\text{пр}} = 6800 \text{ мм}$

Гибкость:

$$\lambda = \frac{2,83 \cdot l_{\text{пр}}}{D + s - c} = 2,83 \cdot 6800 / (48 + 10 - 5,5) = 303,1$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия общей устойчивости:

$$[F]_{\text{е2}} = \frac{\pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot E}{n_y} \cdot \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2 = 3,142 \cdot (48 + 10 - 5,5) \cdot (10 - 5,5) \cdot 1,83 \cdot 10^5 / (2,4) \cdot (3,142 / 303,1)^2 = 6082 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия устойчивости:

$$[F]_{\text{е}} = \min \{ [F]_{\text{н}}, [F]_{\text{е2}} \} = \min \{ 1,466 \cdot 10^7, 6082 \} = 6082 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие:

$$[F] = \frac{[F]_{\text{н}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\text{н}}}{[F]_{\text{е}}}\right)^2}} = 9,759 \cdot 10^4 / (1 + (9,759 \cdot 10^4 / 6082)^2)^{1/2} = 6070 \text{ Н}$$

6070 Н ≥ 466,9 Н

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

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

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

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0,21 / 22,25 + 466,9 / 6070 + 0 / 0 + (0 / 0)^2 = 0,08637 \leq 1$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Изн. № подл.	Изн. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата
19746.4			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
E-10K.00.00.000 PP			
Лист 223			

Для расчёта обечайки от действия седловых опор:

$$B_1 = \min \left\{ 1,0; 9,45 \cdot \frac{D}{1} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (s-c)}} \right\} = \min \{ 1,0; 9,45 \cdot 48 / 3400 \cdot (48 / (100 \cdot (10 - 5,5)))^{1/2} \} = 0,04357$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости:

$$[p]_u = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D}{1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s-c)}{D} \right]^{2,5} = 20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot 48 / (2,4 \cdot 0,04357 \cdot 3400) \cdot (100 \cdot (10 - 5,5) / 48)^{2,5} = 138,3 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\pi}}{[p]_E} \right)^2}} = 22,54 / (1 + (22,54 / 138,3)^2)^{1/2} = 22,25 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление: $[p] = 22,25 \text{ МПа}$

Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием (п. 2.3.4)

Допускаемое осевое сжимающее усилие:

$$[F] = \frac{[F]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\pi}}{[F]_{E1}} \right)^2}} = 9,759 \cdot 10^4 / (1 + (9,759 \cdot 10^4 / 1,466 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 9,759 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием (п. 5.3.3)

Допускаемое осевое растягивающее усилие:

$$[F] = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = 3,142 \cdot (48 + 10 - 5,5) \cdot (10 - 5,5) \cdot 131,5 \cdot 1 = 9,759 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны растяжения:

$$[M]_{\pi p} = \frac{D}{4} \cdot [F] = 48 / 4 \cdot 9,759 \cdot 10^4 = 1171 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны сжатия:

$$[M]_{\pi} = \frac{D}{4} \cdot [F]_{\pi} = 48 / 4 \cdot 9,759 \cdot 10^4 = 1171 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_E = \frac{D}{3,5} \cdot [F]_{E1} = 48 / 3,5 \cdot 1,466 \cdot 10^7 = 2,01 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости:

$$[M]_{уст} = \frac{[M]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\pi}}{[M]_E} \right)^2}} = 1171 / (1 + (1171 / 2,01 \cdot 10^5)^2)^{1/2} = 1171 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \min \{ M_{\pi p}, M_{уст} \} = \min \{ 1171, 1171 \} = 1171 \text{ Н м}$$

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности:

$$[Q]_{\pi} = 0,25 \cdot \pi \cdot D \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 0,25 \cdot 3,142 \cdot 48 \cdot (10 - 5,5) \cdot 131,5 = 2,231 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Расчётная длина для расчёта седловых опор:

$l_s = 4600 \text{ мм}$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

$$[Q]_E = \frac{2,4 \cdot E \cdot (s - c)^2}{n_y} \cdot \left[0,18 + 3,3 \frac{D(s - c)}{l_s^2} \right] = \frac{2,4 \cdot 1,83 \cdot 10^5 \cdot (10 - 5,5)^2}{4600^2} \cdot \left[0,18 + 3,3 \cdot 48 \cdot (10 - 5,5) / 4600^2 \right] = 6,672 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие:

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	E-10K.00.00.000 PP					Лист
19746.4					Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	224

$$[Q] = \frac{[Q]_H}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_H}{[Q]_E}\right)^2}} = 2,231 \cdot 10^4 / (1 + (2,231 \cdot 10^4 / 6,672 \cdot 10^5)^2)^{1/2} = 2,229 \cdot 10^4 \text{ H}$$

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, T:	20 °C
Расчётное внутреннее избыточное давление (с учётом гидростатического), p:	0,5274 МПа
Расчётный изгибающий момент, M:	0 Н м
Расчётное поперечное усилие, Q:	0 Н
Расчётное осевое сжимающее усилие, F:	526,4 Н

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]^{20} = \eta^* R_{e/20} / n_T = 1 * 245 / 1,1 = 222,7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

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

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

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_p + c = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_n - p} + c = (0,5274 \cdot 48) / (2 \cdot 222,7 \cdot 1 - 0,5274) + 5,5 = 5,557 \text{ mm}$$

$$5,557 \text{ MM} \leq 10 \text{ MM}$$

Заключение: Условие работоспособности выполнено

Допускаемое давление:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 222,7 \cdot 1 \cdot (10 - 5,5) / (48 + 10 - 5,5) = 38,18 \text{ МПа}$$

$$38,18 \text{ МПа} \geq 0,5274 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Минимальное расстояние между “одинокими” штуцерами:

$$b_0 = 2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} = 2 \cdot (48 \cdot (10 - 5,5))^{1/2} = 29,39 \text{ mm}$$

Расчётная длина для расчёта от действия осевой силы:

$$l_F = 3400 \text{ mm}$$

Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием (п. 5.3.4)

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:


$$[F]_n = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3,142 \cdot (48 + 10 - 5,5) \cdot (10 - 5,5) \cdot 222,7 = 1,653 \cdot 10^5 \text{ H}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:

$$[F]_{E1} = \frac{31.0 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (\xi - c)}{D} \right]^{2.5} = 310 \cdot 10^{-6} \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot 48^2 / (1,8) \cdot (100 \cdot (10 - 5,5) / 48)^{2.5} = 2,125 \cdot 10^7 \text{ H}$$



Приведённая длина: $l_{пр} = 6800 \text{ мм}$

Инв. № подл.	19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
<div>5,557 мм ≤ 10 мм</div> <div>Заключение: Условие работоспособности выполнено</div> <div>Допускаемое давление:</div> <div>$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 222,7 \cdot 1 \cdot (10 - 5,5) / (48 + 10 - 5,5) = 38,18 \text{ МПа}$</div> <div>38,18 МПа ≥ 0,5274 МПа</div> <div>Заключение: Условие прочности выполнено</div> <div>Минимальное расстояние между “одиночными” штуцерами:</div> <div>$b_0 = 2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} = 2 \cdot (48 \cdot (10 - 5,5))^{1/2} = 29,39 \text{ мм}$</div> <div>Расчётная длина для расчёта от действия осевой силы:</div> <div>$l_F = 3400 \text{ мм}$</div> <div>Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием (п. 5.3.4)</div> <div>Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:</div> <div>$[F]_H = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3,142 \cdot (48 + 10 - 5,5) \cdot (10 - 5,5) \cdot 222,7 = 1,653 \cdot 10^5 \text{ Н}$</div> <div>Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:</div> <div>$[F]_{E1} = \frac{31.0 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2.5} = 310 \cdot 10^{-6} \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot 48^2 / (1,8) \cdot (100 \cdot (10 - 5,5) / 48)^{2.5} = 2,125 \cdot 10^7 \text{ Н}$</div> <div></div> <div>Приведённая длина: $l_{np} = 6800 \text{ мм}$</div>					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

E-10K.00.00.000 PP

Лист
225

Гибкость:

$$\lambda = \frac{2.83 \cdot l_{np}}{D + s - c} = 2.83 \cdot 6800 / (48 + 10 - 5,5) = 303,1$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия общей устойчивости:

$$[F]_{\text{уст}} = \frac{\pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot E}{n_y} \cdot \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2 = 3,142 \cdot (48 + 10 - 5,5) \cdot (10 - 5,5) \cdot 1,99 \cdot 10^5 / (1,8) \cdot (3,142 / 303,1)^2 = 8818 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия устойчивости:

$$[F]_{\text{уст}} = \min \{ [F]_{\text{пр}}, [F]_{\text{уст}} \} = \min \{ 2,125 \cdot 10^7, 8818 \} = 8818 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие:

$$[F] = \frac{[F]_{\text{пр}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\text{пр}}}{[F]_{\text{уст}}} \right)^2}} = 1,653 \cdot 10^5 / (1 + (1,653 \cdot 10^5 / 8818)^2)^{1/2} = 8805 \text{ Н}$$

$$8805 \text{ Н} \geq 526,4 \text{ Н}$$

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.

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0 / 0 + 526,4 / 8805 + 0 / 0 + (0 / 0)^2 = 0,05978 \leq 1$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Для расчёта обечайки от действия седловых опор:

$$B_1 = \min \left\{ 1,0; 9,45 \cdot \frac{D}{1} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (s - c)}} \right\} = \min \{ 1,0, 9,45 \cdot 48 / 3400 \cdot (48 / (100 \cdot (10 - 5,5)))^{1/2} \} = 0,04357$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости:

$$[p]_{\text{уст}} = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D}{1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2,5} = 20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot 48 / (1,8 \cdot 0,04357 \cdot 3400) \cdot (100 \cdot (10 - 5,5) / 48)^{2,5} = 200,5 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$[p]_{\text{пр}} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 222,7 \cdot (10 - 5,5) / (48 + 10 - 5,5) = 38,18 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_{\text{пр}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\text{пр}}}{[p]_{\text{уст}}} \right)^2}} = 38,18 / (1 + (38,18 / 200,5)^2)^{1/2} = 37,51 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление: $[p] = 37,51 \text{ МПа}$

Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием (п. 2.3.4)

Допускаемое осевое сжимающее усилие:

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	E-10K.00.00.000 PP					Лист
										226
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

$$[F] = \frac{[F]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\Pi}}{[F]_{\text{E1}}}\right)^2}} = 1,653 \cdot 10^5 / (1 + (1,653 \cdot 10^5 / 2,125 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 1,653 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием (п. 5.3.3)

Допускаемое осевое растягивающее усилие:

$$[F] = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = 3,142 \cdot (48 + 10 - 5,5) \cdot (10 - 5,5) \cdot 222,7 \cdot 1 = 1,653 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны растяжения:

$$[M]_{\text{тр}} = \frac{D}{4} \cdot [F] = 48 / 4 \cdot 1,653 \cdot 10^5 = 1984 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны сжатия:

$$[M]_{\text{сж}} = \frac{D}{4} \cdot [F]_{\Pi} = 48 / 4 \cdot 1,653 \cdot 10^5 = 1984 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_{\text{E}} = \frac{D}{3,5} \cdot [F]_{\text{E1}} = 48 / 3,5 \cdot 2,125 \cdot 10^7 = 2,914 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости:

$$[M]_{\text{уст}} = \frac{[M]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\Pi}}{[M]_{\text{E}}}\right)^2}} = 1984 / (1 + (1984 / 2,914 \cdot 10^5)^2)^{1/2} = 1984 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \min \{M_{\text{тр}}, M_{\text{уст}}\} = \min \{1984, 1984\} = 1984 \text{ Н м}$$

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности:

$$[Q]_{\Pi} = 0,25 \cdot \pi \cdot D \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 0,25 \cdot 3,142 \cdot 48 \cdot (10 - 5,5) \cdot 222,7 = 3,778 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Расчётная длина для расчёта седловых опор:

$l_s = 4600 \text{ мм}$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

$$[Q]_{\text{E}} = \frac{2,4 \cdot E \cdot (s - c)^3}{n_y} \cdot \left[0,18 + 3,3 \frac{D(s - c)}{l_s^2} \right] = \frac{2,4 \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot (10 - 5,5)^3}{4600^2} \cdot \left[0,18 + 3,3 \cdot 48 \cdot (10 - 5,5) / 4600^2 \right] = 9,673 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

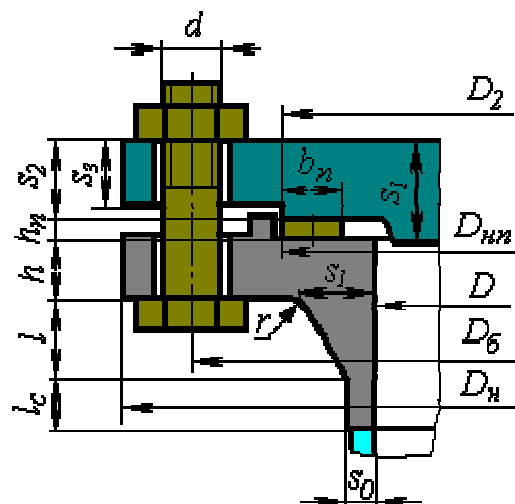
Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\Pi}}{[Q]_{\text{E}}}\right)^2}} = 3,778 \cdot 10^4 / (1 + (3,778 \cdot 10^4 / 9,673 \cdot 10^5)^2)^{1/2} = 3,776 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Инов. № подл.	19746.4	Подпись и дата					Инов. № дубл.	Подпись и дата					

Фланец DN800 с крышкой

Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.4-2007 и ГОСТ Р 52857.2-2007



Исходные данные

Параметры крышки:

Материал:	09Г2С
Толщина стенки, s_1 :	32 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c_1 :	4 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, c_2 :	1 мм
Прибавка технологическая, c_3 :	0 мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, c :	5 мм
Толщина в месте прокладки, s_2 :	32 мм
Толщина вне уплотнения, s_3 :	26 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(КП265) Gr.
Смежный элемент:	Штуцер МН DN800
Материал смежного элемента:	09Г2С
Толщина стенки смежного элемента:	22 мм
Внутренний диаметр фланца, D :	800 мм
Наружный диаметр фланца, D_n :	945 мм
Толщина фланца, h :	40 мм
Сумма прибавок, c :	4 мм
Длина конической части втулки, l :	42 мм

Изнв. № подл.	Изнв. № дубл.	Взам. инв. №	Подпись и дата					
19746.4								
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				
					E-10K.00.00.000 PP			
					Лист			
					228			

$E_{\phi} = 1,895 \cdot 10^5 \text{ МПа}$
Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре $T = 115,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$:
 $\alpha_{\phi} = 0,119 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}$
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):
 $[\sigma]_{\phi}^{20} = \eta \cdot \min(R_{eL} / n_T; R_{mT} / n_B; R_{m10nT} / n_d; R_{p1.0/10nT} / n_n) = 1 \cdot \min(245 / 1,5; 440 / 2,4; - / -; - / -) = 163,3 \text{ МПа}$
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$:
 $E_{\phi}^{20} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Характеристики прокладки:

Тип и материал прокладки	Коэффициент m	Удельное давление обжатия $q_{обж}$, МПа	Допускаемое удельное давление $[q]$, МПа	Коэффициент обжатия K	Условный модуль сжатия E_n , МПа
Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали	3	69	-	-	-

Эффективная ширина прокладки:

$b_0 = 12 \text{ мм}$

Примечание:
$$\begin{cases} b_0 = b_{np} & \text{при } b_{np} \leq 15,0 \text{ мм} \\ b_0 = 3,8 \cdot \sqrt{b_{np}} & \text{при } b_{np} > 15,0 \text{ мм} \end{cases}$$

Рабочий наружный диаметр прокладки:

$D_{np} = 865 \text{ мм}$

Средний эффективный диаметр прокладки:

$D_{\text{ср}} = D_{np} - b_0 = 865 - 12 = 853 \text{ мм}$

Для металлических и асбометаллических прокладок $y_n = 0$.

Расчётные параметры болтов (шпилек):

Рабочая длина болта (шпильки):

$L_{\text{б0}} = h + s_2 + h_{\text{ш}} = 32 + 40 + 4,5 = 76,5 \text{ мм}$

Площадь сечения шпильки (по внутреннему диаметру резьбы):

$f_0 = 0,225 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$

Эффективная длина шпильки:

$L_{\text{с}} = L_{\text{б0}} + 0,56 \cdot d = 76,5 + 0,56 \cdot 20 = 87,7 \text{ мм}$

Податливость шпилек:

$$y_{\text{с}} = \frac{L_{\text{с}}}{E_{\text{с}}^{20} \cdot f_{\text{с}} \cdot n} = 87,7 / (2,18 \cdot 10^5 \cdot 0,225 \cdot 10^{-3} \cdot 40) = 0,447 \cdot 10^{-7} \text{ мм/Н}$$

Расчётные параметры крышки:

$$K_{np} = \frac{D_{\text{ш}}}{D_{\text{ср}}} = 945 / 853 = 1,108$$

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата					
19746.4									
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата					Лист
					E-10K.00.00.000 PP				230

$$x_{кр} = \frac{0.67 \cdot [K_{кр}^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K_{кр}) - 1]}{(K_{кр} - 1) \cdot \left[K_{кр}^2 - 1 + (1.857 \cdot K_{кр}^2 + 1) \cdot \left(\frac{s_1}{s_2} \right)^3 \right]} = \frac{(0.67 \cdot (1,108^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg(1,108)) - 1)) / ((1,108 - 1) \cdot [1,108^2 - 1 + (1.857 \cdot 1,108^2 + 1) \cdot (32/32)^3])}{1} = 1,23$$

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

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

Угловая податливость крышки:

$$y_{кр} = \frac{x_{кр}}{E_{кр}^{20} \cdot s_2^3} = 1,23 / (1,99 \cdot 10^5 \cdot 32^3) = 0,108 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{Н м}$$

Расчётные параметры фланца:

$$l_0 = \sqrt{D \cdot s_0} = (800 \cdot 9)^{1/2} = 84,85 \text{ мм}$$

$$\beta_F = 0,818$$

$$K = \frac{D_K}{D + 2 \cdot c} = 945 / (800 + 2 \cdot 0) = 1,181$$

$$\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (1,181^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 1,181) - 1) / ((1.05 + 1.945 \cdot 1,181^2) \cdot (1,181 - 1)) = 1,845$$

$$\beta_V = 0,1837$$

$$\beta_U = \frac{K^2 (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (1,181^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 1,181) - 1) / (1.36 \cdot (1,181^2 - 1) \cdot (1,181 - 1)) = 12,91$$

$$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot s_0^2} = (0,818 \cdot 40 + 84,85) / (1,845 \cdot 84,85) + 0,1837 \cdot 40^3 / (12,91 \cdot 84,85 \cdot 9^2) = 0,8836$$

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_\Phi = \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot l_0} = 0.91 \cdot 0,1837 / (1,99 \cdot 10^5 \cdot 0,8836 \cdot 9^2 \cdot 84,85) = 0,7925 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{Н м}$$

Плечи моментов:

$$a = 0$$

$$b = 0.5 \cdot (D_6 - D_{сн}) = 0.5 \cdot (905 - 853) = 26 \text{ мм}$$

$$\beta = \frac{s_1}{s_0} = 23 / 9 = 2,556$$

$$x = \frac{1}{\sqrt{(D + 2c) \cdot (s_0 - c)}} = 42 / ((800 + 2 \cdot 0) \cdot (9 - 0))^{1/2} = 0,495$$

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата				Инов. № дубл.	Подпись и дата			
	Взам. инв. №								
$\beta_U = \frac{K^2(1+8.55 \cdot \lg K) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (1,181^2 * (1+8.55*\lg 1,181) - 1) / (1.36 * (1,181^2 - 1) * (1,181 - 1)) = 12,91$									
$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + 1_0}{\beta_T \cdot 1_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot 1_0 \cdot s_0^2} = (0,818 * 40 + 84,85) / (1,845 * 84,85) + 0,1837 * 40^3 / (12,91 * 84,85 * 9^2) = 0,8836$									
Угловая податливость фланца при затяжке:									
$\gamma_\Phi = \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot 1_0} = 0.91 * 0,1837 / (1,99 \cdot 10^5 * 0,8836 * 9^2 * 84,85) = 0,7925 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{Н м}$									
Плечи моментов:									
$a = 0$									
$b = 0.5 \cdot (D_6 - D_{\text{см}}) = 0.5 * (905 - 853) = 26 \text{ мм}$									
$\beta = \frac{s_1}{s_0} = 23 / 9 = 2,556$									
$x = \frac{1}{\sqrt{(D+2c) \cdot (s_0 - c)}} = 42 / ((800 + 2 * 0) * (9 - 0))^{1/2} = 0,495$									

$$\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (2,556 - 1) * 0,495 / (0,495 + (1 + 2,556) / 4) = 1,556$$

Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:

$$s_3 = \kappa \cdot (s_0 - c) = 1,556 * (9 - 0) = 14,01 \text{ мм}$$

$$e = 0,5 \cdot (D_{\text{вн}} - (D + 2 \cdot e) - s_3) = 0,5 * (853 - (800 + 2 * 0) - 14,01) = 19,5 \text{ мм}$$

Расчёт нагрузок:

Равнодействующая давления:

$$Q_{\text{п}} = 0,785 \cdot D_{\text{вн}}^2 \cdot p = 0,785 * 853^2 * 0,3531 = 2,017 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Усилие на прокладке в расчётных условиях, необходимое для обеспечения герметичности:

$$R_{\text{п}} = \pi \cdot D_{\text{вн}} \cdot b_0 \cdot m \cdot |p| = 3,142 * 853 * 12 * 3 * |0,3531| = 3,406 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке:

$$P_{\text{обж}} = 0,5 \cdot \pi \cdot D_{\text{вн}} \cdot b_0 \cdot q_{\text{обж}} = 0,5 * 3,142 * 853 * 12 * 69 = 1,109 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$\eta = y_{\text{п}} + y_{\text{е}} + y_{\text{ф}}' \cdot b'^2 + y_{\text{ф}}'' \cdot b''^2 = 0 + 0,447 \cdot 10^{-7} + 0,108 \cdot 10^{-4} * 26^2 + 0,7925 \cdot 10^{-5} * 26^2 = 0,2657 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения с крышкой, нагруженного внутренним давлением:

$$\alpha = 1 - \frac{y_{\text{п}} - (y_{\text{ф}}' \cdot e + y_{\text{ф}}'' \cdot b) \cdot b}{\eta} = 1 - (0 - (0,7925 \cdot 10^{-5} * 19,5 + 0,108 \cdot 10^{-4} * 26) * 26) / 0,2657 \cdot 10^{-6} = 1,744$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в расчётных условиях:

$$P_{\text{с1}} = \alpha \cdot Q_{\text{п}} + R_{\text{п}} = 1,744 * 2,017 \cdot 10^5 + 3,406 \cdot 10^4 = 3,857 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или сечению наименьшего диаметра:

$$A_{\text{б}} = n \cdot f_{\text{б}} = 40 * 0,225 \cdot 10^{-3} = 0,009000 \text{ м}^2$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов:

$$P_{\text{с2}} = \max \{ P_{\text{обж}}; 0,4 \cdot A_{\text{б}} \cdot [\sigma]_{\text{б}}^{20} \} = \max \{ 1,109 \cdot 10^6; 0,4 * 0,009000 * 230 = 8,28 \cdot 10^5 \} = 1,109 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

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:

$$[\sigma]_{\text{б}}^{\text{т}} = \xi \cdot K_{\text{уп}} \cdot K_{\text{уз}} \cdot K_{\text{ут}} \cdot [\sigma]_{\text{б}}^{20} = 1,2 * 1 * 1 * 1 * 230 = 276 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в условиях затяжки:

$$P_{\text{б}}^{\text{т}} = \max \{ P_{\text{с1}}; P_{\text{с2}} \} = \max \{ 3,857 \cdot 10^5; 1,109 \cdot 10^6 \} = 1,109 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{\text{с1}} = \frac{P_{\text{б}}^{\text{т}}}{A_{\text{б}}} \leq [\sigma]_{\text{б}}^{\text{т}}$$

$$\sigma_{\text{с1}} = \frac{P_{\text{б}}^{\text{т}}}{A_{\text{б}}} = 1,109 \cdot 10^6 / 0,009000 = 123,3 \text{ МПа}$$

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата						Лист
										232
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP					

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при $\sigma_{61} \geq 120$ МПа выбирается по рис. Л.1 ГОСТ 52857.4-2007:

$$M_{кр} = 137 \text{ Н м}$$

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 расчётных условиях:

$$[\sigma]_6^p = K_{yp} \cdot K_{yz} \cdot K_{yx} \cdot [\sigma]_6 = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 229,5 = 229,5 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в расчётных условиях:

$$P_6^p = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot Q_{\pi} = 1,109 \cdot 10^6 + (1 - 1,744) \cdot 2,017 \cdot 10^5 = 9,594 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности в расчётных условиях:

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^p}{A_6} \leq [\sigma]_6^p$$

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^p}{A_6} = 9,594 \cdot 10^5 / 0,009000 = 106,6 \text{ МПа}$$

$106,6 \text{ МПа} \leq 229,5 \text{ МПа}$, **Условие прочности выполнено**

Болтовая нагрузка в условиях затяжки:

$$P_6^M = \max\{P_{b1}; P_{b2}\} = \max\{3,857 \cdot 10^5; 1,109 \cdot 10^6\} = 1,109 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} \leq [\sigma]_6^M$$

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} = 1,109 \cdot 10^6 / 0,009000 = 123,3 \text{ МПа}$$

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при $\sigma_{61} \geq 120$ МПа выбирается по рис. Л.1 ГОСТ 52857.4-2007:

$$M_{кр} = 137 \text{ Н м}$$

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:

$$C_F = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_6}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}}} \right\} = \max \{ 1; (3,142 \cdot 905 / 40 / (2 \cdot 20 + 6 \cdot 40 / (3 + 0.5)))^{1/2} \} = 1$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке:

$$M^M = C_F \cdot P_6^M \cdot b = 1 \cdot 1,109 \cdot 10^6 \cdot 26 = 2,885 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

$$D^* = (D + 2 \cdot c)_{\text{при } (D + 2 \cdot c) \geq 20 \cdot (s_1 - c)} = 800 + 2 \cdot 0 \text{ при } (800 + 2 \cdot 0) \geq 20 \cdot (23 - 0) = 800 \text{ мм}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении s_1 :

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 2,885 \cdot 10^4 / (0,8836 \cdot (23 - 4)^2 \cdot 800) = 113 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_R^M = \frac{1,33 \cdot \beta_F \cdot h + 1,0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M^M = (1,33 \cdot 0,818 \cdot 40 + 84,85) / (0,8836 \cdot 40^2 \cdot 84,85 \cdot 800) \cdot 2,885 \cdot 10^4 = 38,58 \text{ МПа}$$

$$\beta_F = \frac{1}{K - 1} \cdot \left(0,69 + 5,72 \cdot \frac{K^2 \cdot l_g K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (1,181 - 1) \cdot (0,69 + 5,72 \cdot 1,181^2 \cdot l_g 1,181 / (1,181^2 - 1)) = 11,86$$

Изнв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изнв. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-10K.00.00.000 PP				Лист
				233

$$\beta_z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (1,181^2 + 1) / (1,181^2 - 1) = 6,059$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_z \cdot \sigma_R^M = 11,86 \cdot 2,885 \cdot 10^4 / (40^2 \cdot 800) - 6,059 \cdot 38,58 = 33,61 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении s_1 (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_I^M + \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_I^M + \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_M^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_I^M + \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_I^M + \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ |113 + 38,58|; |113 + 33,61| \} = 151,6 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1):

$$[\sigma]_M^{20} = 1,5 \cdot [\sigma]_B^{20} = 1,5 \cdot 163,3 = 245 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_M^{20} = 1 \cdot 245 = 245 \text{ МПа}$$

151,6 МПа \leq 245 МПа, **Условие прочности выполнено**

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при расчётных условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \left\{ P_E^P \cdot b + Q_{\pi} \cdot e; |Q_{\pi}| \cdot e \right\} = 1 \cdot \max \{ 9,594 \cdot 10^5 \cdot 26 + 2,017 \cdot 10^5 \cdot 19,5; |2,017 \cdot 10^5| \cdot 19,5 \} = 2,888 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в расчётных условиях в сечении s_1 :

$$\sigma_I^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 2,888 \cdot 10^4 / (0,8836 \cdot (23 - 4)^2 \cdot 800) = 113,2 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в расчётных условиях:

$$\sigma_R^P = \frac{1,33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M^P = (1,33 \cdot 0,818 \cdot 40 + 84,85) / (0,8836 \cdot 40^2 \cdot 84,85 \cdot 800) \cdot 2,888 \cdot 10^4 = 38,63 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в расчётных условиях:

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_z \cdot \sigma_R^P = 11,86 \cdot 2,888 \cdot 10^4 / (40^2 \cdot 800) - 6,059 \cdot 38,63 = 33,65 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в расчётных условиях в сечении s_1 :

$$\sigma_{\text{лм}}^P = \frac{Q_{\pi}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = 2,017 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot (800 + 23) \cdot (23 - 4)) = 4,105 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в расчётных условиях в сечении s_1 :

$$\max \left\{ \left| \sigma_I^P - \sigma_{\text{лм}}^P + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_I^P - \sigma_{\text{лм}}^P + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_I^P + \sigma_{\text{лм}}^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_M$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_I^P - \sigma_{\text{лм}}^P + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_I^P - \sigma_{\text{лм}}^P + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_I^P + \sigma_{\text{лм}}^P \right| \right\} = \max \{ |113,2 - 4,105 + 38,63|; |113,2 - 4,105 + 33,65|; |113,2 + 4,105| \} = 147,7 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1):

$$[\sigma]_M = 1,5 \cdot [\sigma]_B = 1,5 \cdot 138,4 = 207,6 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_M = 1 \cdot 207,6 = 207,6 \text{ МПа}$$

147,7 МПа \leq 207,6 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$f = \max \left\{ \frac{C_{36}}{1 + A}; 1,0 \right\} = \max \{ 5,359 / (1 + 1,556); 1,0 \} = 2,097$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении s_0 :

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_I^M = 2,097 \cdot 113 = 237 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении s_0 (п. 8.5.2):

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата				
	Взам. инв. №				
	Инов. № дубл.				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<div>E-10K.00.00.000 PP</div> <div>Лист 234</div>

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1):

$$[\sigma]_R^{20} - 3 \cdot [\sigma]_0^{20} = 3 \cdot 163,3 = 490 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 490 = 637 \text{ МПа}$$

237 МПа ≤ 637 МПа, **Условие прочности выполнено**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в расчётных условиях в сечении s_0 :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 2,097 \cdot 113,2 = 237,3 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в расчётных условиях в сечении s_0 :

$$\sigma_{0mm}^P = \frac{Q_{\pi}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = 2,017 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot (800 + 9) \cdot (9 - 4)) = 15,87 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в расчётных условиях в сечении s_0 :

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 0,3531 \cdot 800 / (2 \cdot (9 - 4)) = 28,24 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в расчётных условиях в сечении s_0 :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^P \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^P - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^P \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^P - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \max\{|237,3 \pm 15,87|; |0.3 \cdot 237,3 \pm 28,24|; |0.7 \cdot 237,3 \pm (15,87 - 28,24)|\} = 253,2 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_0 = 3 \cdot 138,4 = 415,2 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 \cdot 415,2 = 539,8 \text{ МПа}$$

253,2 МПа ≤ 539,8 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие статической прочности в расчётных условиях в сечении s_0 :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} \leq [\sigma]_0$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} = \max\{|28,24|; |15,87|\} = 28,24 \text{ МПа}$$

28,24 МПа ≤ 138,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_0^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max\{|38,58|; |33,61|\} = 38,58 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_0^{20} = 1 \cdot 163,3 = 163,3 \text{ МПа}$$

38,58 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие статической прочности в расчётных условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_0$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} = \max\{|38,63|; |33,65|\} = 38,63 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_0 = 1 \cdot 138,4 = 138,4 \text{ МПа}$$

38,63 МПа ≤ 138,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

Инв. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	E-10K.00.00.000 PP					Лист
										235
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

Жёсткость фланца:

Угол поворота фланца в расчётных условиях:

$$\Theta = M^P \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E^{20}}{E} = 2,888 \cdot 10^4 * 0,7925 \cdot 10^{-5} * 1,99 \cdot 10^5 / 1,895 \cdot 10^5 = 0,2403^{\circ}$$

Допускаемый угол поворота фланца:

$$[\Theta] = 0,444^{\circ}$$

Коэффициент увеличения допускаемого угла поворота фланцев: $K_{\Theta} = 1$

Условие выполнения жесткости фланцев:

$$\Theta \leq K_{\Theta} \cdot [\Theta] = 1 * 0,444 = 0,444^{\circ}$$

Условие жёсткости выполнено

В соответствии с п. 4.7 ГОСТ Р 52857.4–2007 допускается не учитывать нагрузку от температурных деформаций при выполнении условия:

$$\max\{t_{\Phi}; t_{\text{кп}}; t_{\text{с}}\} \leq 100^{\circ}\text{C}$$

$$\max\{t_{\Phi}; t_{\text{кп}}; t_{\text{с}}\} = \max\{115,2; 115,2; 102\} = 115,2^{\circ}\text{C}$$

Расчет с учетом усилий от температурных деформаций не производится.

В соответствии с п. 4.7 ГОСТ Р 52857.4–2007 допускается не учитывать нагрузку от температурных деформаций при выполнении условия:

$$0 \leq \frac{\alpha_{\Phi} \cdot h \cdot (t_{\Phi} - 20^{\circ}\text{C}) + \alpha_{\text{кп}} \cdot h_{\text{кп}} \cdot (t_{\text{кп}} - 20^{\circ}\text{C})}{\alpha_{\text{с}} \cdot (h + h_{\text{кп}}) \cdot (t_{\text{с}} - 20^{\circ}\text{C})} - 1 \leq 0,1$$

$$\frac{\alpha_{\Phi} \cdot h \cdot (t_{\Phi} - 20^{\circ}\text{C}) + \alpha_{\text{кп}} \cdot h_{\text{кп}} \cdot (t_{\text{кп}} - 20^{\circ}\text{C})}{\alpha_{\text{с}} \cdot (h + h_{\text{кп}}) \cdot (t_{\text{с}} - 20^{\circ}\text{C})} - 1 = \frac{[0,119 \cdot 10^{-4} * 40 * (115,2 - 20^{\circ}\text{C}) + 0,1175 \cdot 10^{-4} * 32 * (115,2 - 20^{\circ}\text{C})] / [0,134 \cdot 10^{-4} * (40 + 32) * (102 - 20^{\circ}\text{C})] - 1}{0,02566}$$

Расчет с учетом усилий от температурных деформаций не производится.

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

Коэффициент ослабления для днищ, не имеющих отверстий $K_0 = 1,0$

Температура фланца (кольца), t_{Φ} : $115,2^{\circ}\text{C}$

Свойства материала крышки

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре $T = 115,2^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$[\sigma]_{\text{кр}} = 175 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре $T = 115,2^{\circ}\text{C}$:

$$E_{\text{кр}} = 1,895 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С при температуре $T = 115,2^{\circ}\text{C}$:

$$\alpha_{\text{кр}} = 0,1175 \cdot 10^{-4}^{\circ}\text{C}$$

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

$$[\sigma]_{\text{кр}}^{20} = 196 \text{ МПа}$$

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

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

Днища и крышки с дополнительным краевым моментом, нагруженные избыточным давлением

Равнодействующая давления:

$$Q_{\text{д}} = p \cdot \frac{\pi \cdot D_{\text{вн}}^2}{4} = 0,3531 * 3,142 * 853^2 / 4 = 2,018 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата					
19746.4									
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата					
					E-10K.00.00.000 PP				Лист
									236

$$\gamma = \frac{1}{y_{\Pi} + y_{\epsilon} \cdot \frac{E_{\epsilon}^{20}}{E_{\epsilon}} + \left(y_{\Phi} \cdot \frac{E_{\Phi}^{20}}{E_{\Phi}} + y_{\Psi} \cdot \frac{E_{\Psi}^{20}}{E_{\Psi}} \right) \cdot b^2} = \frac{1 / (0 + 0,447 \cdot 10^{-7} \cdot 2,18 \cdot 10^5 / 2,149 \cdot 10^5 + (0,7925 \cdot 10^{-5} \cdot 1,99 \cdot 10^5 / 1,895 \cdot 10^5 + 0,108 \cdot 10^{-4} \cdot 1,99 \cdot 10^5 / 1,895 \cdot 10^5) \cdot 26^2)}{=} = 3,604 \cdot 10^6 \text{ Н/мм}$$

Нагрузка от температурных деформаций:

$$Q_t = \gamma \cdot \left(\alpha_{\Phi}' \cdot h' \cdot (t_{\Phi 1} - 20^{\circ}C) + \alpha_{\Phi}'' \cdot h'' \cdot (t_{\Phi 2} - 20^{\circ}C) - \alpha_{\epsilon} \cdot (h' + h'') \cdot (t_{\epsilon} - 20^{\circ}C) \right) = \frac{3,604 \cdot 10^6 \cdot (0,1175 \cdot 10^{-4} \cdot 32 \cdot (115,2 - 20^{\circ}C) + 0,119 \cdot 10^{-4} \cdot 40 \cdot (115,2 - 20^{\circ}C) - 0,134 \cdot 10^{-4} \cdot (32 + 40) \cdot (102 - 20^{\circ}C))}{=} = 7317 \text{ Н}$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в расчётных условиях:

$$P_{\epsilon 1} = \max \left\{ \begin{array}{l} \alpha \cdot Q_{\Pi} + R_{\Pi} \\ \alpha \cdot Q_{\Pi} + R_{\Pi} - Q_t \end{array} \right\} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,744 \cdot 2,017 \cdot 10^5 + 3,406 \cdot 10^4 = 3,857 \cdot 10^5 \\ 1,744 \cdot 2,017 \cdot 10^5 + 3,406 \cdot 10^4 - 7317 = 3,784 \cdot 10^5 \end{array} \right\} = 3,857 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Болтовая нагрузка в расчётных условиях:

$$P_{\epsilon}^p = P_{\epsilon}^M + (1 - \alpha) \cdot Q_{\Pi} + Q_t = \frac{1,109 \cdot 10^6}{7317} + (1 - 1,744) \cdot 2,017 \cdot 10^5 + 7317 = 9,668 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

$$\psi = \frac{P_{\epsilon}^p}{Q_{\Pi}} = 9,668 \cdot 10^5 / 2,018 \cdot 10^5 = 4,792$$

$$K_{\epsilon} = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{1 + 3 \cdot \psi \cdot \left(\frac{D_3}{D_{\epsilon \Pi}} - 1 \right)}{\frac{D_3}{D_{\epsilon \Pi}}}} = 0,41 \cdot [(1 + 3 \cdot 4,792 \cdot (905 / 853 - 1)) / (905 / 853)]^{1/2} = 0,5452$$

Поправочный коэффициент для допускаемого давления $K_p = 1,0$

Допускаемое давление:

$$[p] = \left(\frac{s_1 - c}{K_0 \cdot K_{\epsilon} \cdot D_p} \right)^2 \cdot [\sigma] \cdot \Phi \cdot K_p = ([32 - 5] / [1 \cdot 0,5452 \cdot 853])^2 \cdot 175 \cdot 1 \cdot 1 = 0,5898 \text{ МПа}$$

0,5898 МПа \geq 0,3531 МПа

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Днища и крышки, нагруженные избыточным давлением

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_{\Pi} + c = K_{\epsilon} \cdot K_0 \cdot D_p \cdot \sqrt{\frac{p}{\Phi \cdot [\sigma] \cdot K_p}} + c = 0,5452 \cdot 1 \cdot 853 \cdot (0,3531 / [1 \cdot 175 \cdot 1])^{1/2} + 5 = 25,89 \text{ мм}$$

25,89 мм \leq 32 мм

Заключение: **Условие прочности выполнено**

$$K_{\gamma} = 0,8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_{\epsilon \Pi}} - 1} = 0,8 \cdot [905 / 853 - 1]^{1/2} = 0,1975$$

$$\Phi = \max \left\{ \frac{P_{\epsilon}^p}{[\sigma]}; \frac{P_{\epsilon}^M}{[\sigma]^{20}} \right\} = \max \{ 9,668 \cdot 10^5 / 175; 1,109 \cdot 10^6 / 196 \} = 0,005524 \text{ м}^2$$

Расчётная толщина крышки в месте уплотнения с учётом прибавок:

$$s_{2p} + c = \max \left\{ K_{\gamma} \cdot \sqrt{\Phi}; \frac{0,6}{D_{\epsilon \Pi}} \cdot \Phi \right\} + c = \max \{ 0,1975 \cdot 0,005524^{1/2}; 0,6 \cdot 0,005524 / 853 \} + 5 = 19,68 \text{ мм}$$

19,68 мм \leq 32 мм

Заключение: **Условие прочности выполнено**

$$K_{\gamma}' = 0,8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_2} - 1} = 0,8 \cdot [905 / 865 - 1]^{1/2} = 0,172$$

Расчётная толщина вне зоны уплотнения с учётом прибавок:

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	E-10K.00.00.000 PP					Лист 237
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

$$s_{зр} + c = \max \left\{ K_7' \cdot \sqrt{\Phi}; \frac{0.6}{D_2} \cdot \Phi \right\} + c = \max \{ 0,172 * 0,005524^{1/2}; 0.6 * 0,005524 / 865 \} + 5 = 17,79 \text{ мм}$$

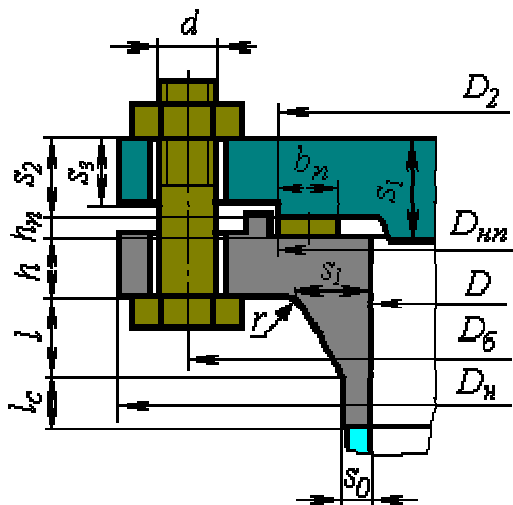
17,79 мм ≤ 26 мм

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инв. № подл.	Подпись и дата				Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
19746.4							
					E-10K.00.00.000 PP		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист		
					238		

Фланец DN700 с крышкой

Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.4-2007 и ГОСТ Р 52857.2-2007



Исходные данные

Параметры крышки:

Материал:	09Г2С
Толщина стенки, s_1 :	32 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c_1 :	4 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, c_2 :	1 мм
Прибавка технологическая, c_3 :	0 мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, c :	5 мм
Толщина в месте прокладки, s_2 :	32 мм
Толщина вне уплотнения, s_3 :	26 мм
Наименьший диаметр наружной утоненной части, D_2 :	763 мм
Наружный диаметр крышки, D_n :	840 мм

Параметры фланца:

Тип фланца:	Приварные встык
Исполнение фланца:	Выступ-впадина
Диаметр болтовой окружности, D_6 :	800 мм

Материал фланца:	09Г2С(КП265) Gr.
Смежный элемент:	Штуцер А1 DN700
Материал смежного элемента:	09Г2С
Толщина стенки смежного элемента:	22 мм
Внутренний диаметр фланца, D:	700 мм
Наружный диаметр фланца, D _н :	840 мм
Толщина фланца, h:	40 мм
Сумма прибавок, с:	4 мм
Длина конической части втулки, l:	33 мм

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c_1 :	1 мм
					Прибавка технологическая, c_3 :	0 мм
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, c :	5 мм
					Толщина в месте прокладки, s_2 :	32 мм
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	Толщина вне уплотнения, s_3 :	26 мм
					Наименьший диаметр наружной утоненной части, D_2 :	763 мм
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	Наружный диаметр крышки, D_H :	840 мм
					Параметры фланца:	
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	Тип фланца:	Приварные встык
					Исполнение фланца:	Выступ-впадина
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	Диаметр болтовой окружности, D_6 : 800 мм	
					Материал фланца: 09Г2С(КП265) Gr.	
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	Смежный элемент: Штуцер А1 DN700	
					Материал смежного элемента: 09Г2С	
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	Толщина стенки смежного элемента: 22 мм	
					Внутренний диаметр фланца, D : 700 мм	
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	Наружный диаметр фланца, D_H : 840 мм	
					Толщина фланца, h : 40 мм	
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	Сумма прибавок, c : 4 мм	
					Длина конической части втулки, l : 33 мм	
Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	E-10K.00.00.000 PP	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист	
					239	

$E_{\phi} = 1,895 \cdot 10^5 \text{ МПа}$
Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре $T = 115,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$:
 $\alpha_{\phi} = 0,119 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}$
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):
 $[\sigma]_{\phi}^{20} = \eta \cdot \min(R_{eL} / n_T; R_{mT} / n_B; R_{m10nT} / n_d; R_{p1.0/10nT} / n_n) = 1 \cdot \min(245 / 1,5; 440 / 2,4; - / -; - / -) = 163,3 \text{ МПа}$
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$:
 $E_{\phi}^{20} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Характеристики прокладки:

Тип и материал прокладки	Коэффициент m	Удельное давление обжатия $q_{обж}$, МПа	Допускаемое удельное давление $[q]$, МПа	Коэффициент обжатия K	Условный модуль сжатия E_n , МПа
Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали	3	69	-	-	-

Эффективная ширина прокладки:

$b_0 = 12 \text{ мм}$

Примечание:
$$\begin{cases} b_0 = b_{np} & \text{при } b_{np} \leq 15.0 \text{ мм} \\ b_0 = 3.8 \cdot \sqrt{b_{np}} & \text{при } b_{np} > 15.0 \text{ мм} \end{cases}$$

Рабочий наружный диаметр прокладки:

$D_{np} = 763 \text{ мм}$

Средний эффективный диаметр прокладки:

$D_{\sigma} = D_{np} - b_0 = 763 - 12 = 751 \text{ мм}$

Для металлических и асбометаллических прокладок $y_n = 0$.

Расчётные параметры болтов (шпилек):

Рабочая длина болта (шпильки):

$L_{\sigma 0} = h + s_2 + h_n = 32 + 40 + 4,5 = 76,5 \text{ мм}$

Площадь сечения шпильки (по внутреннему диаметру резьбы):

$f_{\sigma} = 0,225 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$

Эффективная длина шпильки:

$L_{\sigma} = L_{\sigma 0} + 0,56 \cdot d = 76,5 + 0,56 \cdot 20 = 87,7 \text{ мм}$

Податливость шпилек:

$$y_{\sigma} = \frac{L_{\sigma}}{E_{\sigma}^{20} \cdot f_{\sigma} \cdot n} = 87,7 / (2,18 \cdot 10^5 \cdot 0,225 \cdot 10^{-3} \cdot 32) = 0,5587 \cdot 10^{-7} \text{ мм/Н}$$

Расчётные параметры крышки:

$$K_{np} = \frac{D_{np}}{D_{\sigma}} = 840 / 751 = 1,119$$

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата					
19746.4									
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата					
					E-10K.00.00.000 PP				Лист
									241

$$x_{кр} = \frac{0.67 \cdot [K_{кр}^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K_{кр}) - 1]}{(K_{кр} - 1) \cdot \left[K_{кр}^2 - 1 + (1.857 \cdot K_{кр}^2 + 1) \cdot \left(\frac{s_1}{s_2} \right)^3 \right]} = \frac{(0.67 \cdot (1.119^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg(1.119)) - 1)) / ((1.119 - 1) \cdot [1.119^2 - 1 + (1.857 \cdot 1.119^2 + 1) \cdot (32/32)^3])}{1} = 1.22$$

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

$$E_{кр}^{20} = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Угловая податливость крышки:

$$y_{кр} = \frac{x_{кр}}{E_{кр}^{20} \cdot s_2^3} = 1.22 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 32^3) = 0.1072 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{Н м}$$

Расчётные параметры фланца:

$$l_0 = \sqrt{D \cdot s_0} = (700 \cdot 9)^{1/2} = 79.37 \text{ мм}$$

$$\beta_F = 0.8414$$

$$K = \frac{D_K}{D + 2 \cdot c} = 840 / (700 + 2 \cdot 0) = 1.2$$

$$\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (1.2^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 1.2) - 1) / ((1.05 + 1.945 \cdot 1.2^2) \cdot (1.2 - 1)) = 1.837$$

$$\beta_V = 0.2332$$

$$\beta_U = \frac{K^2 (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (1.2^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 1.2) - 1) / (1.36 \cdot (1.2^2 - 1) \cdot (1.2 - 1)) = 11.82$$

$$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot s_0^2} = (0.8414 \cdot 40 + 79.37) / (1.837 \cdot 79.37) + 0.2332 \cdot 40^3 / (11.82 \cdot 79.37 \cdot 9^2) = 0.9715$$

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_\Phi = \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot l_0} = 0.91 \cdot 0.2332 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 0.9715 \cdot 9^2 \cdot 79.37) = 0.9781 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{Н м}$$

Плечи моментов:

$$a = 0$$

$$b = 0.5 \cdot (D_B - D_{сн}) = 0.5 \cdot (800 - 751) = 24.5 \text{ мм}$$

$$\beta = \frac{s_1}{s_0} = 20 / 9 = 2.222$$

$$x = \frac{1}{\sqrt{(D + 2c) \cdot (s_0 - c)}} = 33 / ((700 + 2 \cdot 0) \cdot (9 - 0))^{1/2} = 0.4158$$

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата				Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата			
$\beta_U = \frac{K^2(1+8.55 \cdot \lg K) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (1,2^2 \cdot (1+8.55 \cdot \lg 1,2) - 1) / (1.36 \cdot (1,2^2 - 1) \cdot (1,2 - 1)) = 11,82$										
$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + 1_0}{\beta_T \cdot 1_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot 1_0 \cdot s_0^2} = (0,8414 \cdot 40 + 79,37) / (1,837 \cdot 79,37) + 0,2332 \cdot 40^3 / (11,82 \cdot 79,37 \cdot 9^2) = 0,9715$										
Угловая податливость фланца при затяжке:										
$y_\Phi = \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot 1_0} = 0.91 \cdot 0,2332 / (1,99 \cdot 10^5 \cdot 0,9715 \cdot 9^2 \cdot 79,37) = 0,9781 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{Н м}$										
Плечи моментов:										
$a = 0$										
$b = 0.5 \cdot (D_6 - D_{\text{сш}}) = 0.5 \cdot (800 - 751) = 24,5 \text{ мм}$										
$\beta = \frac{s_1}{s_0} = 20 / 9 = 2,222$										
$x = \frac{1}{\sqrt{(D + 2c) \cdot (s_0 - c)}} = 33 / ((700 + 2 \cdot 0) \cdot (9 - 0))^{1/2} = 0,4158$										
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP				Лист	
									242	

$$\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (2,222 - 1) \cdot 0,4158 / (0,4158 + (1 + 2,222) / 4) = 1,416$$

Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:

$$s_3 = \kappa \cdot (s_0 - c) = 1,416 \cdot (9 - 0) = 12,74 \text{ мм}$$

$$e = 0,5 \cdot (D_{\text{вн}} - (D + 2 \cdot e) - s_3) = 0,5 \cdot (751 - (700 + 2 \cdot 0) - 12,74) = 19,13 \text{ мм}$$

Расчёт нагрузок:

Равнодействующая давления:

$$Q_{\text{п}} = 0,785 \cdot D_{\text{вн}}^2 \cdot p = 0,785 \cdot 751^2 \cdot 0,353 = 1,563 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Усилие на прокладке в расчётных условиях, необходимое для обеспечения герметичности:

$$R_{\text{п}} = \pi \cdot D_{\text{вн}} \cdot b_0 \cdot m \cdot |p| = 3,142 \cdot 751 \cdot 12 \cdot 3 \cdot |0,353| = 2,998 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке:

$$P_{\text{обж}} = 0,5 \cdot \pi \cdot D_{\text{вн}} \cdot b_0 \cdot q_{\text{обж}} = 0,5 \cdot 3,142 \cdot 751 \cdot 12 \cdot 69 = 9,768 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

$$\eta = y_{\text{п}} + y_{\text{е}} + y_{\text{ф}}' \cdot b'^2 + y_{\text{ф}}'' \cdot b''^2 = 0 + 0,5587 \cdot 10^{-7} + 0,1072 \cdot 10^{-4} \cdot 24,5^2 + 0,9781 \cdot 10^{-5} \cdot 24,5^2 = 0,2706 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения с крышкой, нагруженного внутренним давлением:

$$\alpha = 1 - \frac{y_{\text{п}} - (y_{\text{ф}}' \cdot e + y_{\text{ф}}'' \cdot b) \cdot b}{\eta} = 1 - (0 - (0,9781 \cdot 10^{-5} \cdot 19,13 + 0,1072 \cdot 10^{-4} \cdot 24,5) \cdot 24,5) / 0,2706 \cdot 10^{-6} = 1,711$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в расчётных условиях:

$$P_{\text{с1}} = \alpha \cdot Q_{\text{п}} + R_{\text{п}} = 1,711 \cdot 1,563 \cdot 10^5 + 2,998 \cdot 10^4 = 2,973 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или сечению наименьшего диаметра:

$$A_{\text{б}} = n \cdot f_{\text{б}} = 32 \cdot 0,225 \cdot 10^{-3} = 0,007200 \text{ м}^2$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов:

$$P_{\text{с2}} = \max \{ P_{\text{обж}}; 0,4 \cdot A_{\text{б}} \cdot [\sigma]_{\text{б}}^{20} \} = \max \{ 9,768 \cdot 10^5; 0,4 \cdot 0,007200 \cdot 230 = 6,624 \cdot 10^5 \} = 9,768 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Расчёт без учета стесненности температурных деформаций

Расчёт болтов(шпилек):

Коэффициент увеличения допускаемых напряжений при затяжке: $\xi = 1,2$

Коэффициент условий работы: $K_{\text{уп}} = 1$

Коэффициент условий затяжки: $K_{\text{уз}} = 1$

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при затяжке:

$$[\sigma]_{\text{б}}^{\text{т}} = \xi \cdot K_{\text{уп}} \cdot K_{\text{уз}} \cdot K_{\text{у}} \cdot [\sigma]_{\text{б}}^{20} = 1,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 276 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в условиях затяжки:

$$P_{\text{б}}^{\text{т}} = \max \{ P_{\text{с1}}; P_{\text{с2}} \} = \max \{ 2,973 \cdot 10^5; 9,768 \cdot 10^5 \} = 9,768 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{\text{с1}} = \frac{P_{\text{б}}^{\text{т}}}{A_{\text{б}}} \leq [\sigma]_{\text{б}}^{\text{т}}$$

$$\sigma_{\text{с1}} = \frac{P_{\text{б}}^{\text{т}}}{A_{\text{б}}} = 9,768 \cdot 10^5 / 0,007200 = 135,7 \text{ МПа}$$

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	E-10K.00.00.000 PP					Лист
										243
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при $\sigma_{61} \geq 120$ МПа выбирается по рис. Л.1 ГОСТ 52857.4-2007:

$$M_{кр} = 151,9 \text{ Н м}$$

При наличии смазки величина $M_{кр}$ снижается на 25% и составляет $0.75 \cdot M_{кр} = 113,9$ Н м

$135,7 \text{ МПа} \leq 276 \text{ МПа}$, **Условие прочности выполнено**

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при расчётных условиях:

$$[\sigma]_6^p = K_{yp} \cdot K_{yz} \cdot K_{yt} \cdot [\sigma]_6 = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 229,5 = 229,5 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в расчётных условиях:

$$P_6^p = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot Q_{\pi} = 9,768 \cdot 10^5 + (1 - 1,711) \cdot 1,563 \cdot 10^5 = 8,657 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности в расчётных условиях:

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^p}{A_6} \leq [\sigma]_6^p$$

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^p}{A_6} = 8,657 \cdot 10^5 / 0,007200 = 120,2 \text{ МПа}$$

$120,2 \text{ МПа} \leq 229,5 \text{ МПа}$, **Условие прочности выполнено**

Болтовая нагрузка в условиях затяжки:

$$P_6^M = \max\{P_{b1}; P_{b2}\} = \max\{2,973 \cdot 10^5; 9,768 \cdot 10^5\} = 9,768 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} \leq [\sigma]_6^M$$

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} = 9,768 \cdot 10^5 / 0,007200 = 135,7 \text{ МПа}$$

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при $\sigma_{61} \geq 120$ МПа выбирается по рис. Л.1 ГОСТ 52857.4-2007:

$$M_{кр} = 151,9 \text{ Н м}$$

При наличии смазки величина $M_{кр}$ снижается на 25% и составляет $0.75 \cdot M_{кр} = 113,9$ Н м

Расчёт ответного фланца:

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:

$$C_F = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_6}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}}} \right\} = \max\{1; (3,142 \cdot 800 / 32 / (2 \cdot 20 + 6 \cdot 40 / (3 + 0.5)))^{1/2}\} = 1$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке:

$$M^M = C_F \cdot P_6^M \cdot b = 1 \cdot 9,768 \cdot 10^5 \cdot 24,5 = 2,393 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

$$D^* = (D + 2 \cdot c)_{\text{при } (D + 2 \cdot c) \geq 20 \cdot (s_1 - c)} = 700 + 2 \cdot 0 \text{ при } (700 + 2 \cdot 0) \geq 20 \cdot (20 - 0) = 700 \text{ мм}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении s_1 :

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 2,393 \cdot 10^4 / (0,9715 \cdot (20 - 4)^2 \cdot 700) = 137,5 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_R^M = \frac{1,33 \cdot \beta_F \cdot h + 1,0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M^M = (1,33 \cdot 0,8414 \cdot 40 + 79,37) / (0,9715 \cdot 40^2 \cdot 79,37 \cdot 700) \cdot 2,393 \cdot 10^4 = 34,4 \text{ МПа}$$

$$\beta_F = \frac{1}{K - 1} \cdot \left(0,69 + 5,72 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (1,2 - 1) \cdot (0,69 + 5,72 \cdot 1,2^2 \cdot \lg 1,2 / (1,2^2 - 1)) = 10,86$$

Изнв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изнв. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-10K.00.00.000 PP				Лист
				244

$$\beta_z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (1,2^2 + 1) / (1,2^2 - 1) = 5,545$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_z \cdot \sigma_R^M = 10,86 \cdot 2,393 \cdot 10^4 / (40^2 \cdot 700) - 5,545 \cdot 34,4 = 41,32 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении s_1 (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_I^M + \sigma_R^M \right|, \left| \sigma_I^M + \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_M^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_I^M + \sigma_R^M \right|, \left| \sigma_I^M + \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ |137,5 + 34,4|; |137,5 + 41,32| \} = 178,8 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1):

$$[\sigma]_M^{20} = 1,5 \cdot [\sigma]_B^{20} = 1,5 \cdot 163,3 = 245 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_M^{20} = 1 \cdot 245 = 245 \text{ МПа}$$

178,8 МПа ≤ 245 МПа, **Условие прочности выполнено**

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при расчётных условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \left\{ P_F^P \cdot b + Q_{\pi} \cdot e; |Q_{\pi}| \cdot e \right\} = 1 \cdot \max \{ 8,657 \cdot 10^5 \cdot 24,5 + 1,563 \cdot 10^5 \cdot 19,13; |1,563 \cdot 10^5| \cdot 19,13 \} = 2,42 \cdot 10^4 \text{ Н м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в расчётных условиях в сечении s_1 :

$$\sigma_I^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 2,42 \cdot 10^4 / (0,9715 \cdot (20 - 4)^2 \cdot 700) = 139 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в расчётных условиях:

$$\sigma_R^P = \frac{1,33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M^P = (1,33 \cdot 0,8414 \cdot 40 + 79,37) / (0,9715 \cdot 40^2 \cdot 79,37 \cdot 700) \cdot 2,42 \cdot 10^4 = 34,78 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в расчётных условиях:

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_z \cdot \sigma_R^P = 10,86 \cdot 2,42 \cdot 10^4 / (40^2 \cdot 700) - 5,545 \cdot 34,78 = 41,78 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в расчётных условиях в сечении s_1 :

$$\sigma_{mm}^P = \frac{Q_{\pi}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = 1,563 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot (700 + 20) \cdot (20 - 4)) = 4,318 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в расчётных условиях в сечении s_1 :

$$\max \left\{ \left| \sigma_I^P - \sigma_{mm}^P + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_I^P - \sigma_{mm}^P + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_I^P + \sigma_{mm}^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_M$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_I^P - \sigma_{mm}^P + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_I^P - \sigma_{mm}^P + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_I^P + \sigma_{mm}^P \right| \right\} = \max \{ |139 - 4,318 + 34,78|; |139 - 4,318 + 41,78|; |139 + 4,318| \} = 176,5 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1):

$$[\sigma]_M = 1,5 \cdot [\sigma]_B = 1,5 \cdot 138,4 = 207,6 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_M = 1 \cdot 207,6 = 207,6 \text{ МПа}$$

176,5 МПа ≤ 207,6 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$f = \max \left\{ \frac{C_{36}}{1 + A}, 1,0 \right\} = \max \{ 4,274 / (1 + 1,222); 1,0 \} = 1,923$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении s_0 :

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_I^M = 1,923 \cdot 137,5 = 264,4 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении s_0 (п. 8.5.2):

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата				
	Взам. инв. №				
	Инов. № дубл.				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<div>E-10K.00.00.000 PP</div> <div>Лист 245</div>

$$\sigma_0^M \leq 1,3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1):

$$[\sigma]_R^{20} - 3 \cdot [\sigma]_0^{20} = 3 \cdot 163,3 = 490 \text{ МПа}$$

$$1,3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1,3 \cdot 490 = 637 \text{ МПа}$$

264,4 МПа ≤ 637 МПа, **Условие прочности выполнено**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в расчётных условиях в сечении s_0 :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1,923 \cdot 139 = 267,4 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в расчётных условиях в сечении s_0 :

$$\sigma_{0mm}^P = \frac{Q_{\pi}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = 1,563 \cdot 10^5 / (3,142 \cdot (700 + 9) \cdot (9 - 4)) = 14,03 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в расчётных условиях в сечении s_0 :

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 0,353 \cdot 700 / (2 \cdot (9 - 4)) = 24,71 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в расчётных условиях в сечении s_0 :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^P \right|; \left| 0,3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0,7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^P - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1,3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^P \right|; \left| 0,3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0,7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^P - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \max \{ |267,4 \pm 14,03|; |0,3 \cdot 267,4 \pm 24,71|; |0,7 \cdot 267,4 \pm (14,03 - 24,71)| \} = 281,4 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ Р 52857.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_0 = 3 \cdot 138,4 = 415,2 \text{ МПа}$$

$$1,3 \cdot [\sigma]_R = 1,3 \cdot 415,2 = 539,8 \text{ МПа}$$

281,4 МПа ≤ 539,8 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие статической прочности в расчётных условиях в сечении s_0 :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} \leq [\sigma]_0$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} = \max \{ |24,71|; |14,03| \} = 24,71 \text{ МПа}$$

24,71 МПа ≤ 138,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_0^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ |34,4|; |41,32| \} = 41,32 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_0^{20} = 1 \cdot 163,3 = 163,3 \text{ МПа}$$

41,32 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие статической прочности в расчётных условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_0$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} = \max \{ |34,78|; |41,78| \} = 41,78 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_0 = 1 \cdot 138,4 = 138,4 \text{ МПа}$$

41,78 МПа ≤ 138,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

Изн. № подл.	Подпись и дата	Изн. № дубл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	Изн. № подл.
19746.4							
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP		
					Лист		
					246		

Жёсткость фланца:

Угол поворота фланца в расчётных условиях:

$$\Theta = M^P \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E^{20}}{E} = 2,42 \cdot 10^4 * 0,9781 \cdot 10^{-5} * 1,99 \cdot 10^5 / 1,895 \cdot 10^5 = 0,2486^{\circ}$$

Допускаемый угол поворота фланца:

$$[\text{H}] = 0,419^\circ$$

Коэффициент увеличения допускаемого угла поворота фланцев: $K_{\theta} = 1$

Условие выполнения жесткости фланцев:

$$K_{\text{H}} \leq K_{\text{H}} \cdot [\text{H}^+] = 1 \cdot 0,419 = 0,419^\circ$$

Условие жёсткости выполнено

В соответствии с п. 4.7 ГОСТ Р 52857.4–2007 допускается не учитывать нагрузку от температурных деформаций при выполнении условия:

$$\max \{t_{\Phi}; t_{\text{KP}}; t_6\} \leq 100^\circ \text{C}$$

$$\max\{t_{\phi}; t_{xp}; t_6\} = \max\{115,2; 115,2; 102\} = 115,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Расчет с учетом усилий от температурных деформаций не производится.

В соответствии с п. 4.7 ГОСТ Р 52857.4–2007 допускается не учитывать нагрузку от температурных деформаций при выполнении условия:

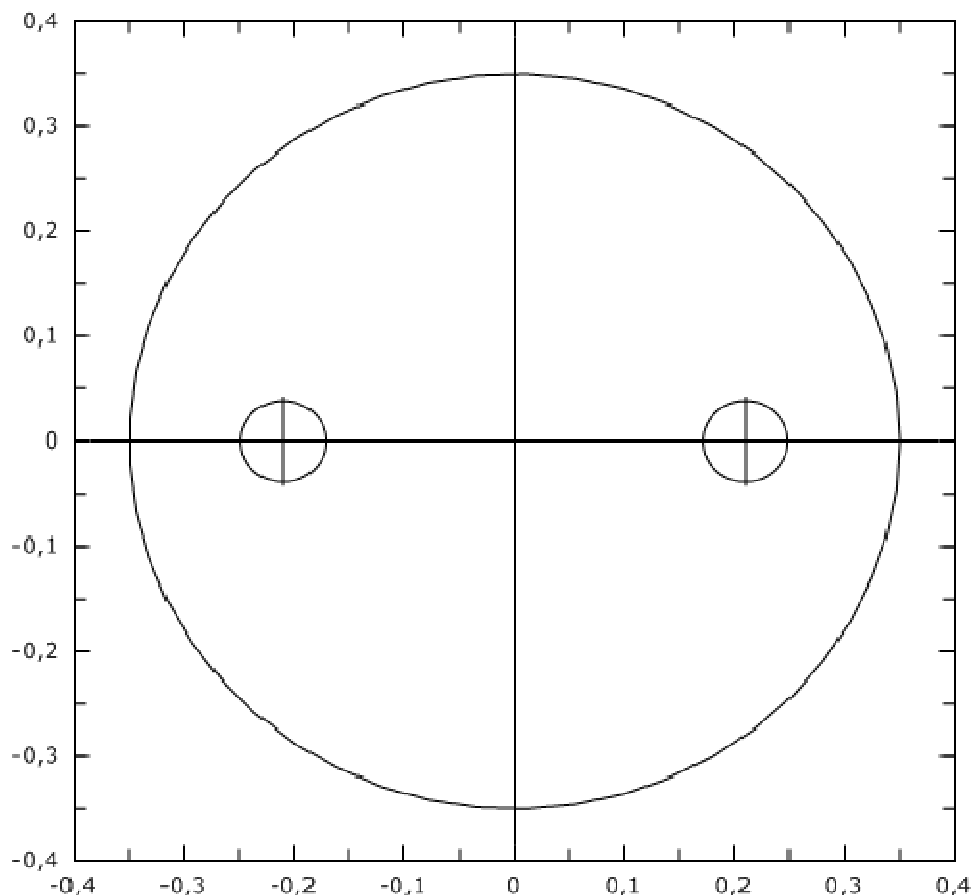
$$0 \leq \frac{\alpha_{\Phi} \cdot h \cdot (t_{\Phi} - 20^{\circ}\text{C}) + \alpha_{\text{вп}} \cdot h_{\text{вп}} \cdot (t_{\text{вп}} - 20^{\circ}\text{C})}{\alpha_s \cdot (h + h_{\text{вп}}) \cdot (t_s - 20^{\circ}\text{C})} - 1 \leq 0.1$$

$$\frac{\alpha_{\psi} \cdot h \cdot (t_{\psi} - 20^{\circ}\text{C}) + \alpha_{\text{xp}} \cdot h_{\text{xp}} \cdot (t_{\text{xp}} - 20^{\circ}\text{C})}{\alpha_6 \cdot (h + h_{\text{xp}}) \cdot (t_6 - 20^{\circ}\text{C})} - 1 = \frac{[0,119 \cdot 10^{-4} \cdot 40 \cdot (115,2 - 20^{\circ}\text{C}) + 0,1175 \cdot 10^{-4} \cdot 32 \cdot (115,2 - 20^{\circ}\text{C})]}{[0,134 \cdot 10^{-4} \cdot (40 + 32) \cdot (102 - 20^{\circ}\text{C})]} - 1 = 0,02566$$

Расчет с учетом усилий от температурных деформаций не производится.

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-10K.00.00.000 PP				Лист
				247

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



Номер штуцера, i Название штуцера Хорда, d_i, мм

1 Штуцер O1 DN80 78

2 Штуцер O1 (2) 78

Коэффициент ослабления для днищ, имеющих отверстия (число отверстий: 2):

$$K_0 = \frac{1 - \left(\frac{\sum d_i}{D_p} \right)^3}{1 - \left(\frac{\sum d_i}{D_p} \right)} = 1,118$$

Температура фланца (кольца), t_ф: 115,2 °C

Свойства материала крышки

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре T = 115,2 °C (расчётные условия):

[σ]_{кр} = 175 МПа

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре T = 115,2 °C:

E_{кр} = 1,895·10⁵ МПа

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С при температуре T = 115,2 °C:

α_{кр} = 0,1175·10⁻⁴ °C

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

[σ]_{кр}²⁰ = 196 МПа

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

Подпись и дата		Изн. № дубл.		Взам. инв. №		Подпись и дата		Изн. № подл.	19746.4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP				Лист
									248

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

Положение наиболее опасного сечения:

Угол наиболее опасного сечения, Φ : 0 °

Днища и крышки с дополнительным краевым моментом, нагруженные избыточным давлением

Равнодействующая давления:

$$Q_{\pi} = p \cdot \frac{\pi \cdot D_{\pi}^2}{4} = 0,353 \cdot 3,142 \cdot 751^2 / 4 = 1,564 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

$$\gamma = \frac{1}{y_{\pi} + y_{\phi} \cdot \frac{E_{\phi}^{20}}{E_{\phi}} + \left(y_{\phi} \cdot \frac{E_{\phi}^{20}}{E_{\phi}} + y_{xp} \cdot \frac{E_{xp}^{20}}{E_{xp}} \right) \cdot b^2} = \frac{1 / (0 + 0,5587 \cdot 10^{-7} \cdot 2,18 \cdot 10^5 / 2,149 \cdot 10^5 + (0,9781 \cdot 10^{-5} \cdot 1,99 \cdot 10^5 / 1,895 \cdot 10^5 + 0,1072 \cdot 10^{-4} \cdot 1,99 \cdot 10^5 / 1,895 \cdot 10^5) \cdot 24,5^2)}{=} = 3,543 \cdot 10^6 \text{ Н/мм}$$

Нагрузка от температурных деформаций:

$$Q_t = \gamma \cdot \left(\alpha'_{\phi} \cdot h' \cdot (t_{\phi 1} - 20^{\circ}C) + \alpha'_{\phi} \cdot h'' \cdot (t_{\phi 2} - 20^{\circ}C) - \alpha_{\phi} \cdot (h' + h'') \cdot (t_{\phi} - 20^{\circ}C) \right) = \frac{3,543 \cdot 10^6 \cdot (0,1175 \cdot 10^{-4} \cdot 32 \cdot (115,2 - 20^{\circ}C) + 0,119 \cdot 10^{-4} \cdot 40 \cdot (115,2 - 20^{\circ}C) - 0,134 \cdot 10^{-4} \cdot (32 + 40) \cdot (102 - 20^{\circ}C))}{=} = 7192 \text{ Н}$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в расчётных условиях:

$$P_{\phi 1} = \max \left\{ \begin{matrix} \alpha \cdot Q_{\pi} + R_{\pi} \\ \alpha \cdot Q_{\pi} + R_{\pi} - Q_t \end{matrix} \right\} = \max \left\{ \begin{matrix} 1,711 \cdot 1,563 \cdot 10^5 + 2,998 \cdot 10^4 = 2,973 \cdot 10^5 \\ 1,711 \cdot 1,563 \cdot 10^5 + 2,998 \cdot 10^4 - 7192 = 2,901 \cdot 10^5 \end{matrix} \right\} = 2,973 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Болтовая нагрузка в расчётных условиях:

$$P_{\phi}^p = P_{\phi}^M + (1 - \alpha) \cdot Q_{\pi} + Q_t = \frac{9,768 \cdot 10^5}{7192} + (1 - 1,711) \cdot 1,563 \cdot 10^5 + 7192 = 8,729 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

$$\psi = \frac{P_{\phi}^p}{Q_{\pi}} = 8,729 \cdot 10^5 / 1,564 \cdot 10^5 = 5,583$$

$$K_{\phi} = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{1 + 3 \cdot \psi \cdot \left(\frac{D_3}{D_{\phi \pi}} - 1 \right)}{\frac{D_3}{D_{\phi \pi}}}} = 0,41 \cdot [(1 + 3 \cdot 5,583 \cdot (800 / 751 - 1)) / (800 / 751)]^{1/2} = 0,5747$$

Поправочный коэффициент для допускаемого давления $K_p = 1,0$

Допускаемое давление:

$$[p] = \left(\frac{s_1 - c}{K_0 \cdot K_{\phi} \cdot D_p} \right)^2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi \cdot K_p = [(32 - 5) / [1,118 \cdot 0,5747 \cdot 751]]^2 \cdot 175 \cdot 1 \cdot 1 = 0,5476 \text{ МПа}$$

$$0,5476 \text{ МПа} \geq 0,353 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Днища и крышки, нагруженные избыточным давлением

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_{\phi} + c = K_{\phi} \cdot K_0 \cdot D_p \cdot \sqrt{\frac{p}{\varphi \cdot [\sigma] \cdot K_p}} + c = 0,5747 \cdot 1,118 \cdot 751 \cdot \sqrt{(0,353 / [1 \cdot 175 \cdot 1])^{1/2}} + 5 = 26,68 \text{ мм}$$

$$26,68 \text{ мм} \leq 32 \text{ мм}$$

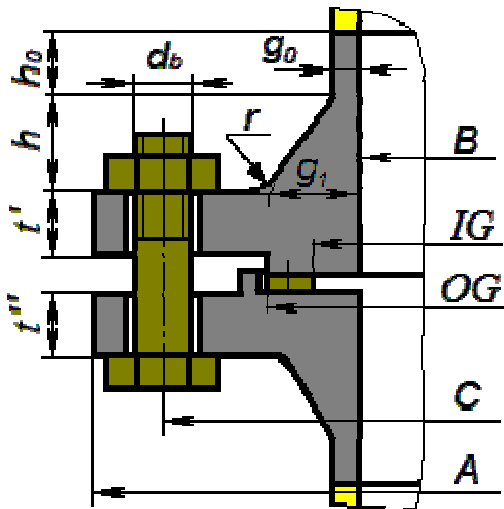
Заключение: **Условие прочности выполнено**

$$K_{\phi} = 0,8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_{\phi \pi}} - 1} = 0,8 \cdot [800 / 751 - 1]^{1/2} = 0,2043$$

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата				
	Взам. инв. №				
	Инов. № дубл.				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<div>E-10K.00.00.000 PP</div> <div>Лист 249</div>

Фланец DN100

Расчёт на прочность и герметичность по ASME VIII-2



Исходные данные

Тип фланца: Приварные встык

Исполнение: Выступ-впадина

Теплоизоляция: Нет

Свободный/интегральный: -

Диаметр болтовой окружности, C: 190 мм

Данные первого фланца (кольца):

Смежный элемент: Штуцер LT1 DN100

Материал смежного элемента: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281

Материал фланца (кольца): 09Г2С(КП265) Gr.

Наружный диаметр фланца (кольца), A: 230 мм

Толщина фланца (кольца), t: 21 мм

Сумма прибавок, c: 4 мм

Внешняя коррозия фланца, c_f: 0 мм

Внутренний диаметр фланца, B: 96 мм

Длина конической части втулки, h: 27,5 мм

Длина цилиндрической части втулки, h₀: 9,5 мм

Толщина цилиндрической части втулки, g₀: 7 мм

Толщина конической части втулки, g₁: 18 мм

Радиус перехода, r: 5 мм

Шпильки:

Материал: 35X

Наружный диаметр, d_b: 20 мм

Количество, n: 8

Радиальная коррозия крепежа, c_b: 0 мм

Прокладка:

Подпись и дата		Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP	Лист
Изн. № подл.	19746.4							251

Материал прокладки: Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали
Толщина, h_n : 3,2 мм
Наружный диаметр, OG: 149 мм
Внутренний диаметр, IG: 129 мм

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётное осевое растягивающее усилие, F: 142,2 Н
Расчётный изгибающий момент, M: 0 Н м
Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,3531 МПа
Расчётная температура элементов соединения:
Температура фланца (кольца), t_f : 115,2 °C
Температура фланца (кольца), t_f : 115,2 °C
Температура болтов (шпилек), t_b : 102 °C

Свойства материала болтов (шпилек)

Допускаемые напряжения для материала 35X при температуре T = 102 °C (расчётные условия):
 $S_b = \min\{R_e^{20} / n_{T20}; R_m^{20} / n_{B20}; R_e / n_T; R_m / n_B\} = \min(590 / 4; 736 / 5; 568,2 / 1,5; 725,2 / 5) = 145 \text{ МПа}$
Модуль продольной упругости для материала 35X при температуре T = 102 °C:
 $E_b = 2,099 \cdot 10^5 \text{ МПа}$
Коэффициент линейного расширения для материала 35X при температуре T = 102 °C:
 $\alpha_b = 0,1191 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$
Допускаемые напряжения для материала 35X при температуре T = 20 °C (расчётные условия):
 $S_a = \min\{R_e^{20} / n_{T20}; R_m^{20} / n_{B20}; R_e^{20} / n_T\} = \min(590 / 4; 736 / 5; 590 / 1,5) = 147,2 \text{ МПа}$
Модуль продольной упругости для материала 35X при температуре T = 20 °C:
 $E_b^{20} = 2,15 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала смежного элемента фланца 1 Штуцер LT1 DN100

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 120 °C (расчётные условия):
 $S_{nol} = 157,6 \text{ МПа}$
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 20 °C (расчётные условия):
 $S_{ngl} = 183 \text{ МПа}$

Свойства материала фланца (кольца) 1

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 115,2 °C (расчётные условия):
 $S_{fo1} = \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{207,6 / 1,5; 440 / 2,4\} = 138,4 \text{ МПа}$
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 115,2 °C:
 $E_1 = 1,895 \cdot 10^5 \text{ МПа}$
Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 115,2 °C:
 $\alpha_1 = 0,119 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 20 °C (расчётные условия):
 $S_{gl} = \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{245 / 1,5; 440 / 2,4\} = 163,3 \text{ МПа}$
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 20 °C:
 $E^{20}_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётные параметры первого фланца:

Внутренний диаметр фланца (с учетом коррозии):
 $B = B + 2 \cdot c = 96 + 2 \cdot 4 = 104 \text{ мм}$

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	E-10K.00.00.000 PP					Лист
19746.4										252
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

Диаметр втулки с учетом коррозии (для фланцев, приварных встык):

$\varnothing_0 = \varnothing_0 - c = 7 - 4 = 3 \text{ мм}$

Больший диаметр конической втулки с учетом коррозии:

$\varnothing_1 = \varnothing_1 - c = 18 - 4 = 14 \text{ мм}$

Толщина фланца, с учетом коррозии:

$t = t - c_f = 21 - 0 = 21 \text{ мм}$

Характеристики прокладки:

Тип и материал про- кладки	Прокладочный коэффициент, m	Давление обжатия, у, МПа	Допускаемое удель- ное давление [q], МПа	Кoeffи- циент обжа- тияK	Условный мо- дуль сжатия E _n , МПа
Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали	3	69	—	—	—

Ширина, используемая для определения базовой контактной ширины прокладки через b₀, на основании возможной контактной ширины прокладки:

$N = \frac{OG - IG}{2} = (149 - 129) / 2 = 10 \text{ мм}$

Базовая контактная ширина прокладки:

$b_0 = \frac{N}{2} = 10 / 2 = 5 \text{ мм}$

Диаметр окружности приложения реакции со стороны прокладки:

Если b₀ ≤ 6 мм, G равно среднему диаметру контактирующей поверхности прокладки.

$G = \frac{OG + \max\{B', B'', IG\}}{2} = (149 + \max\{96; 96; 129\}) / 2 = 139 \text{ мм}$

Ширина, используемая для определения базовой контактной ширины прокладки через b₀, на основании возможной контактной ширины прокладки:

$N = \frac{OG - IG}{2} = (149 - 129) / 2 = 10 \text{ мм}$

Базовая контактная ширина прокладки:

$b_0 = \frac{N}{2} = 10 / 2 = 5 \text{ мм}$

Диаметр окружности приложения реакции со стороны прокладки:

Если b₀ ≤ 6 мм, G равно среднему диаметру контактирующей поверхности прокладки.

$G = \frac{OG + \max\{B', B'', IG\}}{2} = (149 + \max\{96; 96; 129\}) / 2 = 139 \text{ мм}$

Эффективная контактная ширина прокладки:

$b = \begin{cases} b_0 & \text{если } b_0 \leq 6 \text{ мм} \\ 2.5 \cdot \sqrt{b_0} & \text{если } b_0 > 6 \text{ мм} \end{cases} = 5 \text{ мм}$

Расчёт нагрузок

Проектная болтовая нагрузка для расчётных условий (для несамонапрягающихся прокладок):

$W_b = 0.785 \cdot G^2 \cdot p + 2 \cdot b \cdot \pi \cdot G \cdot m \cdot p = 0.785 \cdot 139^2 \cdot 0.3531 + 2 \cdot 5 \cdot 3.142 \cdot 139 \cdot 3 \cdot 0.3531 = 9980 \text{ Н}$

Величина растягивающей внешней силы:

$F_A = 142,2 \text{ Н}$

Сжимающими нагрузками пренебрегают, и в этом случае F_A приравнивается нулю.

Изн. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-10K.00.00.000 PP				Лист 253

Внешний изгибающий момент:

$$M_{\text{в}} = 0 \text{ Н м}$$

$$W_{\text{в}} = \pi \cdot b \cdot G \cdot y = 3,142 \cdot 5 \cdot 139 \cdot 69 = 1,507 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Общая расчетная площадь сечения болтов:

$$A_{\text{м}} = \max \left[\frac{W_0 + F_A + \frac{4 \cdot M_{\text{в}}}{G}}{S_{\text{бо}}}; \frac{W_{\text{в}}}{S_{\text{бг}}} \right] = \max[(9980 + 142,2 + 4 \cdot 0 / 139) / 145; 1,507 \cdot 10^5 / 147,2] = 0,001023 \text{ м}^2$$

Диаметр сечения болта (шпильки) с учетом коррозии:

$$d_{\text{бс}} = 20 \text{ мм}$$

Площадь сечения болта (шпильки) (по внутреннему диаметру резьбы с учетом коррозии):

$$f_0 = 0,225 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Площадь поперечного сечения болтов по внутреннему диаметру резьбы или минимальному диаметру стержня:

$$A_{\text{б}} = n \cdot f_0 = 8 \cdot 0,225 \cdot 10^{-3} = 0,001800 \text{ м}^2$$

Расчёт болтов(шпилек):

Условие прочности болтов:

$$A_{\text{м}} \leq A_{\text{б}}$$

$$0,001023 \text{ м}^2 \leq 0,001800 \text{ м}^2$$

Условие прочности выполнено

Расчёт напряжений первого фланца:

Равнодействующая давления на внутренней поверхности фланца:

$$H_{\text{Д}} = 0,785 \cdot B^2 \cdot p = 0,785 \cdot 104^2 \cdot 0,3531 = 2998 \text{ Н}$$

Плечо момента для силы $H_{\text{Д}}$ (фланцы интегрального типа, или другие, рассчитываемые аналогично):

$$h_{\text{Д}} = \frac{C - B - g_1}{2} = (190 - 104 - 14) / 2 = 36 \text{ мм}$$

Равнодействующая давления:

$$H = 0,785 \cdot G^2 \cdot p = 0,785 \cdot 139^2 \cdot 0,3531 = 5355 \text{ Н}$$

Разница между общей равнодействующей давления и равнодействующей на внутренней поверхности фланца:

$$H_{\text{Т}} = H - H_{\text{Д}} = 5355 - 2998 = 2357 \text{ Н}$$

Радиальное расстояние от реакции прокладки до болтовой окружности:

$$h_{\text{Г}} = \frac{C - G}{2} = (190 - 139) / 2 = 25,5 \text{ мм}$$

Плечо для нагрузки $H_{\text{Т}}$ (интегральные фланцы, а также иные, рассчитываемые аналогично):

$$h_{\text{Т}} = \frac{1}{2} \left[\frac{C - B}{2} + h_{\text{Г}} \right] = 1/2 \cdot [(190 - 104) / 2 + 25,5] = 34,25 \text{ мм}$$

Нагрузка на прокладку (разница между проектной болтовой нагрузкой и равнодействующей давления), в расчётах:

$$H_{\text{Г}} = W_0 - H = 9980 - 5355 = 4625 \text{ Н}$$

Болтовой интервал:

$$B_{\text{с}} = \frac{\pi \cdot C}{n} = 3,142 \cdot 190 / 8 = 74,61 \text{ мм}$$

Номинальный диаметр болта:

$$a = d_{\text{б}} = 20 \text{ мм}$$

Коэффициент болтового интервала:

Изн. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	E-10K.00.00.000 PP					Лист
										254
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

$$B_{sc} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{B_g}{2 \cdot a + t}} \right\} = \max \{ 1; (74,61 / (2 \cdot 20 + 21))^{1/2} \} = 1,106$$

$$X_g = \frac{g_1}{g_0} = 14 / 3 = 4,667$$

Коэффициент

$$h_o = \sqrt{B \cdot g_0} = (104 \cdot 3)^{1/2} = 17,66 \text{ мм}$$

$$X_h = \frac{h}{h_o} = 27,5 / 17,66 = 1,557$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$F = 0,5643$$

Расчетные коэффициенты:

$$e = \frac{F}{h_o} = 0,5643 / 17,66 = 0,03195 \text{ 1/мм}$$

$$K = \frac{A}{B} = 230 / 104 = 2,212$$

$$T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg K) - 1}{(1,0472 + 1,9448 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (2,212^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg 2,212) - 1) / ((1,0472 + 1,9448 \cdot 2,212^2) \cdot (2,212 - 1)) = 1,431$$

$$U = \frac{K^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg K) - 1}{1,36136 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (2,212^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg 2,212) - 1) / (1,36136 \cdot (2,212^2 - 1) \cdot (2,212 - 1)) = 2,853$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$V = 0,02682$$

Коэффициент d для интегральных фланцев:

$$d = \frac{U}{V} \cdot h_o \cdot g_0^2 = 2,853 / 0,02682 \cdot 17,66 \cdot 3^2 = 0,1691 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$$

$$L = \frac{t \cdot e + 1}{T} + \frac{t^3}{d} = (21 \cdot 0,03195 + 1) / 1,431 + 21^3 / 0,1691 \cdot 10^{-4} = 1,715$$

Момент инерции сечения фланца при изгибе (интегральные фланцы с втулкой):

$$I = \frac{0,0874 \cdot L \cdot g_0^2 \cdot h_o \cdot B}{V} = 0,0874 \cdot 1,715 \cdot 3^2 \cdot 17,66 \cdot 104 / 0,02682 = 0,9241 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

$$G_{wg} = 0,5 \cdot (g_0 + g_1) = 0,5 \cdot (3 + 14) = 8,5 \text{ мм}$$

$$A_R = 0,5 \cdot (A - B) = 0,5 \cdot (230 - 104) = 63 \text{ мм}$$

Так как $t \geq G_{wg}$,

$$A_A = A_R = 63 \text{ мм}$$

$$B_B = t = 21 \text{ мм}$$

$$K_{AB} = \left(A_A \cdot B_B^3 \right) \cdot \left[\frac{1}{3} - 0,21 \cdot \left(\frac{B_B}{A_A} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{12} \cdot \left\{ \frac{B_B}{A_A} \right\}^4 \right) \right] = (63 \cdot 21^3) \cdot [1/3 - 0,21 \cdot (21/63) \cdot (1 - 1/12 \cdot (21/63)^4)] = 0,1537 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$$

$$C_c = h = 27,5 \text{ мм}$$

$$D_{DG} = G_{wg} = 8,5 \text{ мм}$$

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата				
	Инов. № дубл.				
	Взам. инв. №				
	Подпись и дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP
					Лист
					255

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_b$$

8,397 МПа ≤ 138,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

Болтовая нагрузка в условиях монтажа:

$$W_g = \left(\frac{A_m + A_b}{2} \right) \cdot S_{bg} = (0,001023 + 0,001800) / 2 \cdot 147,2 = 2,078 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Изгибающий момент в условиях монтажа (внутреннее давление):

$$M_g = \frac{W_g \cdot (C - G) \cdot B_{sc} \cdot F_s}{2} = 2,078 \cdot 10^5 \cdot (190 - 139) \cdot 1,106 \cdot 1 / 2 = 5861 \text{ Н м}$$

Продольные напряжения во втулке, в условиях монтажа:

$$S_H = \frac{f \cdot M_g}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 5861 / (1,715 \cdot 14^2 \cdot 104) = 167,6 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min\{1,5 \cdot S_{Hg}; 2,5 \cdot S_{Heg}\}$$

$$\min\{1,5 \cdot S_{Hg}; 2,5 \cdot S_{Heg}\} = \min\{1,5 \cdot 163,3; 2,5 \cdot 183\} = 245 \text{ МПа}$$

167,6 МПа ≤ 245 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_g}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 \cdot 21 \cdot 0,03195 + 1) \cdot 5861 / (1,715 \cdot 21^2 \cdot 104) = 141 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{Rg}$$

141 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Касательные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_g}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 2,596 \cdot 5861 / (21^2 \cdot 104) - 1,514 \cdot 141 = 118,3 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{Tg}$$

118,3 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (167,6 + 141) / 2 = 154,3 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{Hg}$$

154,3 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (167,6 + 118,3) / 2 = 143 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{Hg}$$

143 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие прочности выполнено

Жесткость фланца

- для расчётных условий:

Коэффициент жесткости для интегральных фланцев:

$K_R = 0,3$

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, расчётные условия):

Инов. № подл.	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	$S_T = \frac{Y \cdot M_g}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 2,596 * 5861 / (21^2 * 104) - 1,514 * 141 = 118,3 \text{ МПа}$ <p>Условие прочности:</p> $S_T \leq S_g$ <p>118,3 МПа ≤ 163,3 МПа, Условие прочности выполнено</p> $\frac{S_H + S_R}{2} = (167,6 + 141) / 2 = 154,3 \text{ МПа}$ <p>Условие прочности:</p> $\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_g$ <p>154,3 МПа ≤ 163,3 МПа, Условие прочности выполнено</p> $\frac{S_H + S_T}{2} = (167,6 + 118,3) / 2 = 143 \text{ МПа}$ <p>Условие прочности:</p> $\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_g$ <p>143 МПа ≤ 163,3 МПа, Условие прочности выполнено</p> <p>Условие прочности выполнено</p> <p><i>Жесткость фланца</i></p> <p>- для расчётных условий:</p> <p>Коэффициент жесткости для интегральных фланцев:</p> <p>K_R = 0.3</p> <p>Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, расчётные условия):</p>						
19746.4										
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP					Лист
										257

$$J = \frac{52.14 \cdot V \cdot M_o}{L \cdot E_{yo} \cdot \sigma_o^2 \cdot K_R \cdot h_o} = (52.14 \cdot 0,02682 \cdot 344,2) / (1,715 \cdot 1,895 \cdot 10^5 \cdot 3^2 \cdot 0,3 \cdot 17,66) = 0,03106$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1.0$$

$$0,03106 \leq 1.0$$

Условие жёсткости выполнено

- для условий монтажа:

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, условия монтажа):

$$J = \frac{52.14 \cdot V \cdot M_g}{L \cdot E_{yg} \cdot \sigma_o^2 \cdot K_R \cdot h_o} = (52.14 \cdot 0,02682 \cdot 5861) / (1,715 \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot 3^2 \cdot 0,3 \cdot 17,66) = 0,5035$$

Условие жесткости:

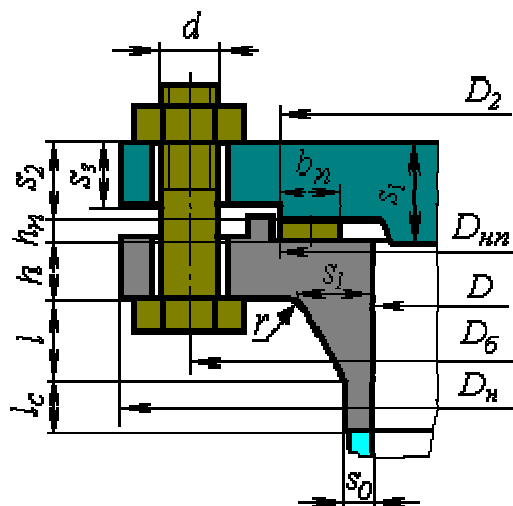
$$J \leq 1.0$$

$$0,5035 \leq 1.0$$

Условие жёсткости выполнено

Крышка DN100

Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.4-2007 и ГОСТ Р 52857.2-2007



Исходные данные

Параметры крышки:

Материал: 09Г2С(КП265) Gr.

Толщина стенки, s_1 : 26 мм

Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c_1 : 4 мм

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

Прибавка технологическая, c_3 : 0 мм

Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, c : 4,8 мм

Толщина в месте прокладки, s_2 : 24 мм

Толщина вне уплотнения, s_3 : 20 мм

Наименьший диаметр наружной утоненной части, D_2 : 149 мм

Наружный диаметр крышки, D_n : 230 мм

Параметры фланца:

Тип фланца: Приварные встык

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

E-10K.00.00.000 PP

$E_{\phi}^{20} = 2,18 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала смежного элемента фланца 2 Штуцер LT2 DN100

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 120 °С (расчётные условия):

$[\sigma]_{ш} = 157,5 \text{ МПа}$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 20 °С (расчётные условия):

$[\sigma]_{ш}^{20} = 183 \text{ МПа}$

Свойства материала фланца

Температура фланца (кольца), t_{ϕ} : 115,2 °С

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 115,2 °С (расчётные условия):

$[\sigma]_{\phi} = \eta \cdot \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B; R_{m/10^{0,5}/t} / n_D; R_{p1,0/10^{0,5}/t} / n_p) = 1 \cdot \min\{207,6 / 1,5; 398,7 / 2,4; - / -; - / -\} = 138,4 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 115,2 °С:

$E_{\phi} = 1,895 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 115,2 °С:

$\alpha_{\phi} = 0,119 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 20 °С (расчётные условия):

$[\sigma]_{\phi}^{20} = \eta \cdot \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B; R_{m/10^{0,5}/t} / n_D; R_{p1,0/10^{0,5}/t} / n_p) = 1 \cdot \min\{245 / 1,5; 440 / 2,4; - / -; - / -\} = 163,3 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 20 °С:

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

Характеристики прокладки:

Тип и материал прокладки	Коэффициент m	Удельное давление обжатия $q_{обж}$, МПа	Допускаемое удельное давление $[q]$, МПа	Коэффициент обжатия K	Условный модуль сжатия E_n , МПа
Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали	3	69	-	-	-

Эффективная ширина прокладки:

$b_0 = 10 \text{ мм}$

Примечание:
$$\begin{cases} b_0 = b_{np} & \text{при } b_{np} \leq 15,0 \text{ мм} \\ b_0 = 3,8 \cdot \sqrt{b_{np}} & \text{при } b_{np} > 15,0 \text{ мм} \end{cases}$$

Рабочий наружный диаметр прокладки:

$D_{np} = 149 \text{ мм}$

Средний эффективный диаметр прокладки:

$D_{ср} = D_{np} - b_0 = 149 - 10 = 139 \text{ мм}$

Для металлических и асбометаллических прокладок $y_n = 0$.

Расчётные параметры болтов (шпилек):

Рабочая длина болта (шпильки):

$L_{б0} = h + s_2 + h_{ш} = 24 + 20,5 + 3,2 = 47,7 \text{ мм}$

Площадь сечения шпильки (по внутреннему диаметру резьбы):

$f_0 = 0,225 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP	Лист
						260

Эффективная длина шпильки:

$$L_{\text{с}} = L_{\text{с0}} + 0,56 \cdot d = 47,7 + 0,56 \cdot 20 = 58,9 \text{ мм}$$

Податливость шпилек:

$$y_{\text{с}} = \frac{L_{\text{с}}}{E_{\text{с}}^{20} \cdot f_{\text{с}} \cdot n} = 58,9 / (2,18 \cdot 10^5 \cdot 0,225 \cdot 10^{-3} \cdot 8) = 0,1501 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

Расчётные параметры крышки:

$$K_{\text{кр}} = \frac{D_{\text{к}}}{D_{\text{ст}}} = 230 / 139 = 1,655$$

$$x_{\text{кр}} = \frac{0,67 \cdot [K_{\text{кр}}^2 \cdot (1 + 8,55 \cdot \lg K_{\text{кр}}) - 1]}{(K_{\text{кр}} - 1) \cdot [K_{\text{кр}}^2 - 1 + (1,857 \cdot K_{\text{кр}}^2 + 1) \cdot \left(\frac{s_1}{s_2}\right)^3]} = \frac{0,67 \cdot (1,655^2 \cdot (1 + 8,55 \cdot \lg(1,655)) - 1)}{(1,655 - 1) \cdot [1,655^2 - 1 + (1,857 \cdot 1,655^2 + 1) \cdot (26/24)^3]} = 0,7408$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 20 °С:

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

Угловая податливость крышки:

$$y_{\text{кр}} = \frac{x_{\text{кр}}}{E_{\text{кр}}^{20} \cdot s_2^3} = 0,7408 / (1,99 \cdot 10^5 \cdot 24^3) = 0,1543 \cdot 10^{-4} \text{ °/Н м}$$

Расчёт нагрузок:

Равнодействующая давления:

$$Q_{\text{д}} = 0,785 \cdot D_{\text{ст}}^2 \cdot p = 0,785 \cdot 139^2 \cdot 0,3531 = 5355 \text{ Н}$$

Усилие на прокладке в расчётных условиях, необходимое для обеспечения герметичности:

$$R_{\text{п}} = \pi \cdot D_{\text{ст}} \cdot b_0 \cdot m \cdot |p| = 3,142 \cdot 139 \cdot 10 \cdot 3 \cdot |0,3531| = 4625 \text{ Н}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке:

$$P_{\text{обж}} = 0,5 \cdot \pi \cdot D_{\text{ст}} \cdot b_0 \cdot q_{\text{обж}} = 0,5 \cdot 3,142 \cdot 139 \cdot 10 \cdot 69 = 1,507 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

$$\eta = y_{\text{п}} + y_{\text{с}} + y_{\text{ф}}' \cdot b'^2 + y_{\text{ф}}'' \cdot b''^2 = 0 + 0,1501 \cdot 10^{-6} + 0,1543 \cdot 10^{-4} \cdot 25,5^2 + 0,1456 \cdot 10^{-4} \cdot 25,5^2 = 0,4905 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения с крышкой, нагруженного внутренним давлением:

$$\alpha = 1 - \frac{y_{\text{п}} - (y_{\text{ф}}' \cdot e + y_{\text{кр}} \cdot b) \cdot b}{\eta} = 1 - (0 - (0,1456 \cdot 10^{-4} \cdot 15,01 + 0,1543 \cdot 10^{-4} \cdot 25,5) \cdot 25,5) / 0,4905 \cdot 10^{-6} = 1,555$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в расчётных условиях:

$$P_{\text{с1}} = \alpha \cdot Q_{\text{д}} + R_{\text{п}} = 1,555 \cdot 5355 + 4625 = 1,295 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или сечению наименьшего диаметра:

$$A_{\text{с}} = n \cdot f_{\text{с}} = 8 \cdot 0,225 \cdot 10^{-3} = 0,001800 \text{ м}^2$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов:

$$P_{\text{с2}} = \max \{ P_{\text{обж}}; 0,4 \cdot A_{\text{с}} \cdot [\sigma]_{\text{с}}^{20} \} = \max \{ 1,507 \cdot 10^5; 0,4 \cdot 0,001800 \cdot 230 = 1,656 \cdot 10^5 \} = 1,656 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Расчёт без учета стесненности температурных деформаций

Расчёт болтов(шпилек):

Коэффициент увеличения допускаемых напряжений при затяжке: $\xi = 1,2$

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата	E-10K.00.00.000 PP					Лист
										261
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

Коэффициент условий работы: $K_{yp} = 1$
 Коэффициент условий затяжки: $K_{yз} = 1$
 Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при затяжке:

$$[\sigma]_6^M = \xi \cdot K_{yp} \cdot K_{yз} \cdot K_{yt} \cdot [\sigma]_6^{20} = 1,2 * 1 * 1 * 1 * 230 = 276 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в условиях затяжки:

$$P_6^M = \max\{P_{b1}; P_{b2}\} = \max\{1,295 \cdot 10^4; 1,656 \cdot 10^5\} = 1,656 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} \leq [\sigma]_6^M$$

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} = 1,656 \cdot 10^5 / 0,001800 = 92 \text{ МПа}$$

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при $\sigma_{61} < 120 \text{ МПа}$:

$$M_{зп} = 0,3 \cdot \frac{P_6^M \cdot d}{n} = 0,3 * 1,656 \cdot 10^5 * 20 / 8 = 124,2 \text{ Н м}$$

При наличии смазки величина $M_{кр}$ снижается на 25% и составляет $0,75 * M_{кр} = 93,15 \text{ Н м}$
 $92 \text{ МПа} \leq 276 \text{ МПа}$, **Условие прочности выполнено**

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при расчётных условиях:

$$[\sigma]_6^P = K_{yp} \cdot K_{yз} \cdot K_{yt} \cdot [\sigma]_6 = 1 * 1 * 1 * 229,5 = 229,5 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в расчётных условиях:

$$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot Q_d = 1,656 \cdot 10^5 + (1 - 1,555) * 5355 = 1,626 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности в расчётных условиях:

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} \leq [\sigma]_6^P$$

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} = 1,626 \cdot 10^5 / 0,001800 = 90,35 \text{ МПа}$$

$90,35 \text{ МПа} \leq 229,5 \text{ МПа}$, **Условие прочности выполнено**

Болтовая нагрузка в условиях затяжки:

$$P_6^M = \max\{P_{b1}; P_{b2}\} = \max\{1,295 \cdot 10^4; 1,656 \cdot 10^5\} = 1,656 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} \leq [\sigma]_6^M$$

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} = 1,656 \cdot 10^5 / 0,001800 = 92 \text{ МПа}$$

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при $\sigma_{61} < 120 \text{ МПа}$:

$$M_{зп} = 0,3 \cdot \frac{P_6^M \cdot d}{n} = 0,3 * 1,656 \cdot 10^5 * 20 / 8 = 124,2 \text{ Н м}$$

При наличии смазки величина $M_{кр}$ снижается на 25% и составляет $0,75 * M_{кр} = 93,15 \text{ Н м}$

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), $t_{ф}$: $115,2 \text{ } ^\circ\text{C}$

Свойства материала крышки

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре $T = 115,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (расчётные условия):

$$[\sigma]_{кр} = \eta * \min(R_{e/t} / n_T; R_{m/t} / n_B; R_{m/10n/t} / n_D; R_{p1,0/10n/t} / n_n) = 1 * \min\{207,6 / 1,5; 398,7 / 2,4; - / -; - / -\} = 138,4 \text{ МПа}$$

Изнв. № подл.	19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изнв. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
E-10K.00.00.000 PP					Лист
					262

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

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Болтовая нагрузка в расчётных условиях:
					$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot Q_{\pi} + Q_t = \frac{1,656 \cdot 10^5}{3023} + (1 - 1,555) \cdot 5355 + 1,656 \cdot 10^5 = 1,656 \cdot 10^5 \text{ Н}$ $\psi = \frac{P_6^P}{Q_{\pi}} = 1,656 \cdot 10^5 / 5358 = 30,92$ $K_6 = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{1 + 3 \cdot \psi \cdot \left(\frac{D_3}{D_{\text{сп}}} - 1 \right)}{\frac{D_3}{D_{\text{сп}}}}} = 0,41 \cdot [(1 + 3 \cdot 30,92 \cdot (190 / 139 - 1)) / (190 / 139)]^{1/2} = 2,076$
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Нарушено условие применимости расчётных формул:
					$\frac{s_1 - c}{D_p} \leq 0,11$ <p>В этом случае поправочный коэффициент для допускаемого давления:</p> $K_p = \frac{2,2}{1 + \sqrt{1 + \left(6 \cdot \frac{s_1 - c}{D_p} \right)^2}} = 2,2 / [1 + (6 \cdot [26 - 4,8] / 139)^2]^{1/2} = 0,934$ <p>Допускаемое давление:</p> $[p] = \left(\frac{s_1 - c}{K_0 \cdot K_6 \cdot D_p} \right)^2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi \cdot K_p = ([26 - 4,8] / [1 \cdot 2,076 \cdot 139])^2 \cdot 138,4 \cdot 1 \cdot 0,934 = 0,6979 \text{ МПа}$ <p>0,6979 МПа \geq 0,3531 МПа</p> <p>Заключение: Условие прочности выполнено</p>
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<div> <div>19746.4</div> <div>Е-10К.00.00.000 РР</div> </div>
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист 263

Днища и крышки, нагруженные избыточным давлением

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_p + c = K_6 \cdot K_0 \cdot D_p \cdot \sqrt{\frac{p}{\varphi \cdot [\sigma] \cdot K_p}} + c = 2,076 \cdot 1 \cdot 139 \cdot (0,3531 / [1 \cdot 138,4 \cdot 0,934])^{1/2} + 4,8 = 19,88 \text{ мм}$$

19,88 мм ≤ 26 мм

Заключение: **Условие прочности выполнено**

$$K_7 = 0,8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_{сп}} - 1} = 0,8 \cdot [190 / 139 - 1]^{1/2} = 0,4846$$

$$\Phi = \max \left\{ \frac{P_6^p}{[\sigma]}; \frac{P_6^m}{[\sigma]^{20}} \right\} = \max \{ 1,656 \cdot 10^5 / 138,4; 1,656 \cdot 10^5 / 163,3 \} = 0,001197 \text{ м}^2$$

Расчётная толщина крышки в месте уплотнения с учётом прибавок:

$$s_{2p} + c = \max \left\{ K_7 \cdot \sqrt{\Phi}; \frac{0,6}{D_{сп}} \cdot \Phi \right\} + c = \max \{ 0,4846 \cdot 0,001197^{1/2}; 0,6 \cdot 0,001197 / 139 \} + 4,8 = 21,56 \text{ мм}$$

21,56 мм ≤ 24 мм

Заключение: **Условие прочности выполнено**

$$K_7' = 0,8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_2} - 1} = 0,8 \cdot [190 / 149 - 1]^{1/2} = 0,4197$$

Расчётная толщина вне зоны уплотнения с учётом прибавок:

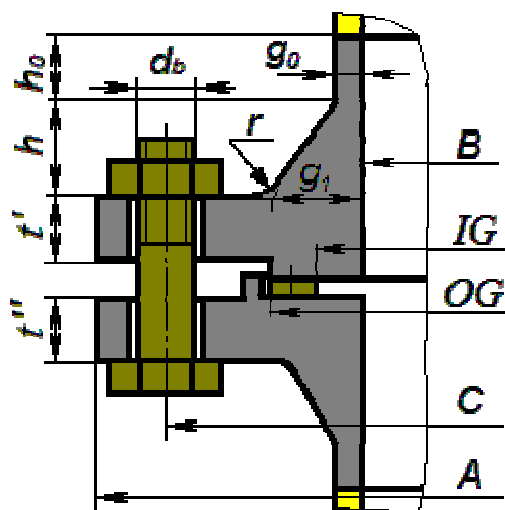
$$s_{3p} + c = \max \left\{ K_7' \cdot \sqrt{\Phi}; \frac{0,6}{D_2} \cdot \Phi \right\} + c = \max \{ 0,4197 \cdot 0,001197^{1/2}; 0,6 \cdot 0,001197 / 149 \} + 4,8 = 19,32 \text{ мм}$$

19,32 мм ≤ 20 мм

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Фланцевое соединение DN80

Расчёт на прочность и герметичность по ASME VIII-2



Исходные данные

Тип фланца: Приварные встык
Исполнение: Выступ-впадина

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-10K.00.00.000 PP				Лист
				264

Теплоизоляция: Нет

Свободный/интегральный: -

Диаметр болтовой окружности, С: 160 мм

Данные первого фланца (кольца):

Смежный элемент: Штуцер O1 DN80

Материал смежного элемента: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281

Материал фланца (кольца): 09Г2С(КП265) Gr.

Наружный диаметр фланца (кольца), А: 195 мм

Толщина фланца (кольца), t: 21 мм

Сумма прибавок, с: 4 мм

Внешняя коррозия фланца, c_f : 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(КП265) Gr.

Наружный диаметр фланца (кольца), А: 195 мм

Толщина фланца (кольца), t: 21 мм

Сумма прибавок, с: 4 мм

Внешняя коррозия фланца, сф: 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

Шпильки:

Материал: 35Х

Наружный диаметр, d_b : 16 мм

Количество, n: 8

Радиальная коррозия крепежа, c_b : 0 мм

Прокладка:

Материал прокладки: Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали

Толщина, $h_{\text{п}}$: 3,2 мм

Наружный диаметр, OG: 120 мм

Внутренний диаметр, IG: 106 мм

Расчёт в расчётных условиях

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Толщина фланца (кольца), t:	21 мм
					Сумма прибавок, с:	4 мм
19746.4					Внешняя коррозия фланца, c _ф :	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, r:	5 мм
					Шпильки:	
					Материал:	35X
					Наружный диаметр, d _б :	16 мм
					Количество, n:	8
					Радиальная коррозия крепежа, c _б :	0 мм
					Прокладка:	
					Материал прокладки:	Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали
					Толщина, h _п :	3,2 мм
					Наружный диаметр, OG:	120 мм
					Внутренний диаметр, IG:	106 мм
					Расчёт в расчётных условиях	
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	E-10K.00.00.000 PP	
					265	
19746.4					Изм.	Лист
					№ докум.	Подп.
					Дата	

Условия нагружения:

Расчётное осевое растягивающее усилие, F: 2900 Н
Расчётный изгибающий момент, M: 989,9 Н м
Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,3508 МПа
Расчётная температура элементов соединения:
Температура фланца (кольца), t_f : 115,2 °C
Температура фланца (кольца), t_f : 115,2 °C
Температура болтов (шпилек), t_b : 102 °C

Свойства материала болтов (шпилек)

Допускаемые напряжения для материала 35X при температуре T = 102 °C (расчётные условия):

$$S_b = \min\{R_e^{20} / n_{T20}; R_m^{20} / n_{B20}; R_e / n_T; R_m / n_B\} = \min(590 / 4; 736 / 5; 568,2 / 1,5; 725,2 / 5) = 145 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 35X при температуре T = 102 °C:

$$E_b = 2,099 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 35X при температуре T = 102 °C:

$$\alpha_b = 0,1191 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$$

Допускаемые напряжения для материала 35X при температуре T = 20 °C (расчётные условия):

$$S_a = \min\{R_e^{20} / n_{T20}; R_m^{20} / n_{B20}; R_e^{20} / n_T\} = \min(590 / 4; 736 / 5; 590 / 1,5) = 147,2 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 35X при температуре T = 20 °C:

$$E_b^{20} = 2,15 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала смежного элемента фланца 1 Штуцер 01 DN80

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 120 °C (расчётные условия):

$$S_{n01} = 157,6 \text{ МПа}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 20 °C (расчётные условия):

$$S_{ng1} = 183 \text{ МПа}$$

Свойства материала смежного элемента фланца 2

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 115,2 °C (расчётные условия):

$$S_{n02} = 158,2 \text{ МПа}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 20 °C (расчётные условия):

$$S_{ng2} = 183 \text{ МПа}$$

Свойства материала фланца (кольца) 1

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 115,2 °C (расчётные условия):

$$S_{f01} = \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{207,6 / 1,5; 440 / 2,4\} = 138,4 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 115,2 °C:

$$E_1 = 1,895 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 115,2 °C:

$$\alpha_1 = 0,119 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 20 °C (расчётные условия):

$$S_{g1} = \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{245 / 1,5; 440 / 2,4\} = 163,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 20 °C:

$$E^{20}_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала фланца (кольца) 2

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 115,2 °C (расчётные условия):

$$S_{f02} = \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{207,6 / 1,5; 440 / 2,4\} = 138,4 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 115,2 °C:

Изн. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	E-10K.00.00.000 PP					Лист
										266
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

$E_2= 1,895 \cdot 10^5$ МПа
Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре $T = 115,2$ °С:
 $\alpha_2= 0,119 \cdot 10^{-4}$ °С
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре $T = 20$ °С (расчётные условия):
 $S_{g2}= \min(R_{eT} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min(245 / 1,5; 440 / 2,4) = 163,3$ МПа
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре $T = 20$ °С:
 $E^{20}_2= 1,99 \cdot 10^5$ МПа

Расчётные параметры первого фланца:

Внутренний диаметр фланца (с учетом коррозии):
 $B = B + 2 \cdot c = 78 + 2 \cdot 4 = 86$ мм
Диаметр втулки с учетом коррозии (для фланцев, приварных встык):
 $\xi_0 = \xi_0 - c = 6 - 4 = 2$ мм
Больший диаметр конической втулки с учетом коррозии:
 $\xi_1 = \xi_1 - c = 17 - 4 = 13$ мм
Толщина фланца, с учетом коррозии:
 $t = t - c_f = 21 - 0 = 21$ 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 обжатияК	Условный модуль сжатия E_m , МПа
Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали	3	69	—	—	—

Ширина, используемая для определения базовой контактной ширины прокладки через b_0 , на основании возможной контактной ширины прокладки:

$$N = \frac{OG - IG}{2} = (120 - 106) / 2 = 7 \text{ мм}$$

Базовая контактная ширина прокладки:

$$b_0 = \frac{N}{2} = 7 / 2 = 3,5 \text{ мм}$$

Диаметр окружности приложения реакции со стороны прокладки:
Если $b_0 \leq 6$ мм, G равно среднему диаметру контактирующей поверхности прокладки.

$$G = \frac{OG + \max\{B', B'', IG\}}{2} = (120 + \max\{78; 78; 106\}) / 2 = 113 \text{ мм}$$

Ширина, используемая для определения базовой контактной ширины прокладки через b_0 , на основании возможной контактной ширины прокладки:

$$N = \frac{OG - IG}{2} = (120 - 106) / 2 = 7 \text{ мм}$$

Базовая контактная ширина прокладки:

$$b_0 = \frac{N}{2} = 7 / 2 = 3,5 \text{ мм}$$

Диаметр окружности приложения реакции со стороны прокладки:
Если $b_0 \leq 6$ мм, G равно среднему диаметру контактирующей поверхности прокладки.

Изн. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата						Лист 267
					Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
E-10K.00.00.000 PP										

$$G = \frac{OG + \max[B', B'', IG]}{2} = (120 + \max\{78; 78; 106\}) / 2 = 113 \text{ MM}$$

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 расчётных условий (для несамоуплотняющихся прокладок):

$$W_0 = 0.785 \cdot G^2 \cdot p + 2 \cdot b \cdot \pi \cdot G \cdot m \cdot p = 0.785 \cdot 113^2 \cdot 0,3508 + 2 \cdot 3,5 \cdot 3,142 \cdot 113 \cdot 3 \cdot 0,3508 = 6132 \text{ H}$$

Величина растягивающей внешней силы:

$$F_A = 2900 \text{ H}$$

Сжимающими нагрузками пренебрегают, и в этом случае F_A приравнивается нулю.

Внешний изгибающий момент:

$$M_F = 989,9 \text{ H}_M$$

$$W_{gs} = \pi \cdot b \cdot G \cdot y = 3,142 \cdot 3,5 \cdot 113 \cdot 69 = 8,573 \cdot 10^4 \text{ H}$$

Общая расчетная площадь сечения болтов:

$$A_m = \max \left[\frac{W_o + F_A + \frac{4 \cdot M_E}{G}}{S_{bo}}; \frac{W_S}{S_{bg}} \right] = \max[(6132 + 2900 + 4 \cdot 989,9 / 113) / 145; 8,573 \cdot 10^4 / 147,2] = 0,5824 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Диаметр сечения болта (шпильки) с учетом коррозии:

$$d_{bc} = 16 \text{ mm}$$

Площадь сечения болта (шпильки) (по внутреннему диаметру резьбы с учетом коррозии):

$$f_6 = 0,144 \cdot 10^{-3} \text{ M}^2$$

Площадь поперечного сечения болтов по внутреннему диаметру резьбы или минимальному диаметру стержня:

$$A_b = n \cdot f_b = 8 \cdot 0,144 \cdot 10^{-3} = 0,001152 \text{ m}^2$$

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:

$$H_D = 0.785 \cdot B^2 \cdot p = 0.785 \cdot 86^2 \cdot 0,3508 = 2037 \text{ H}$$

Плечо момента для силы H_D (фланцы интегрального типа, или другие, рассчитываемые аналогично):

$$h_D = \frac{C - B - g_1}{2} = (160 - 86 - 13) / 2 = 30,5 \text{ mm}$$

Равнодействующая давления:

$$H = 0.785 \cdot G^2 \cdot p = 0.785 * 113^2 * 0,3508 = 3517 \text{ H}$$

Разница между общей равнодействующей давления и равнодействующей на внутренней поверхности фланца:

$$H_T = H - H_D = 3517 - 2037 = 1480 \text{ H}$$

Радиальное расстояние от реакции прокладки до болтовой окружности:

$$h_G = \frac{C-G}{2} = (160-113)/2 = 23,5 \text{ mm}$$

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$f_6 = 0,144 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ Площадь поперечного сечения болтов по внутреннему диаметру резьбы или минимальному диаметру стержня: $A_b = n \cdot f_b = 8 * 0,144 \cdot 10^{-3} = 0,001152 \text{ м}^2$ Расчёт болтов(шпилек): Условие прочности болтов: $A_m \leq A_b$ $0,5824 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \leq 0,001152 \text{ м}^2$ Условие прочности выполнено Расчёт напряжений первого фланца: Равнодействующая давления на внутренней поверхности фланца: $H_D = 0.785 \cdot B^2 \cdot p = 0.785 * 86^2 * 0,3508 = 2037 \text{ Н}$ Плечо момента для силы H_D (фланцы интегрального типа, или другие, рассчитываемые аналогично): $h_D = \frac{C - B - g_1}{2} = (160 - 86 - 13) / 2 = 30,5 \text{ мм}$ Равнодействующая давления: $H = 0.785 \cdot G^2 \cdot p = 0.785 * 113^2 * 0,3508 = 3517 \text{ Н}$ Разница между общей равнодействующей давления и равнодействующей на внутренней поверхности фланца: $H_T = H - H_D = 3517 - 2037 = 1480 \text{ Н}$ Радиальное расстояние от реакции прокладки до болтовой окружности: $h_G = \frac{C - G}{2} = (160 - 113) / 2 = 23,5 \text{ мм}$

Инв. № подл.	19746.4						E-10K.00.00.000 PP	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	268			

$$h_T = \frac{1}{2} \left[\frac{C-B}{2} + h_G \right] = 1/2 * [(160 - 86) / 2 + 23,5] = 30,25 \text{ mm}$$
$$B_s = \frac{\pi \cdot C}{n} = 3,142 * 160 / 8 = 62,83 \text{ mm}$$
$$B_{sc} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{B_s}{2 \cdot a + t}} \right\} = \max \{ 1; (62,83 / (2 \cdot 16 + 21))^{1/2} \} = 1,089$$

$$B_B = t$$

$$= 21 \text{ мм}$$

$$K_{AB} = \left(A_A \cdot B_B^3 \right) \cdot \left[\frac{1}{3} - 0.21 \cdot \left(\frac{B_B}{A_A} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{12} \cdot \left\{ \frac{B_B}{A_A} \right\}^4 \right) \right] = (54,5 \cdot 21^3) \cdot [1/3 - 0.21 \cdot (21/54,5) \cdot (1 - 1/12 \cdot \{21/54,5\}^4)] = 0,1275 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$$

$$C_C = h$$

$$= 27,5 \text{ мм}$$

$$D_{DG} = G_{wg}$$

$$= 7,5 \text{ мм}$$

$$K_{CD} = \left(C_C \cdot D_{DG}^3 \right) \cdot \left[\frac{1}{3} - 1.05 \cdot \left(\frac{D_{DG}}{C_C} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{192} \cdot \left\{ \frac{D_{DG}}{C_C} \right\}^4 \right) \right] = (27,5 \cdot 7,5^3) \cdot [1/3 - 1.05 \cdot (7,5/27,5) \cdot (1 - 1/192 \cdot \{7,5/27,5\}^4)] = 0,545 \cdot 10^{-9} \text{ м}^4$$

Полярный момент сечения фланца (интегральные фланцы, плоские фланцы с втулкой):

$$I_P = K_{AB} + K_{CD} = 0,1275 \cdot 10^{-6} + 0,545 \cdot 10^{-9} = 0,128 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$$

Компонент проектного момента на фланце, как результат действия внешнего изгибающего момента и/или осевой силы:

$$M_{oe} = 4 \cdot M_E \cdot \left[\frac{I}{0.3846 \cdot I_P + I} \right] \cdot \left[\frac{h_D}{C - 2 \cdot h_D} \right] + F_A \cdot h_D = 4 \cdot 989,9 \cdot [0,6802 \cdot 10^{-7} / (0.3846 \cdot 0,128 \cdot 10^{-6} + 0,6802 \cdot 10^{-7})] \cdot [30,5 / (160 - 2 \cdot 30,5)] + 2900 \cdot 30,5 = 796,1 \text{ Н м}$$

Коэффициент момента для расчета свободных колец:

$$F_S = 1$$

Изгибающий момент в расчётных условиях (внутреннее давление):

$$M_o = [(H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G) \cdot B_{SC} + M_{oe}] \cdot F_S = [(2037 \cdot 30,5 + 1480 \cdot 30,25 + 2616 \cdot 23,5) \cdot 1,089 + 796,1] \cdot 1 = 979,4 \text{ Н м}$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$f = 1$$

Продольные напряжения во втулке, в расчётных условиях:

$$S_H = \frac{f \cdot M_o}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 979,4 / (1,934 \cdot 13^2 \cdot 86) = 34,84 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min \{ 1.5 \cdot S_{\sigma}; 2.5 \cdot S_{\sigma 0} \}$$

$$\min \{ 1.5 \cdot S_{\sigma}; 2.5 \cdot S_{\sigma 0} \} = \min \{ 1.5 \cdot 138,4; 2.5 \cdot 157,6 \} = 207,6 \text{ МПа}$$

34,84 МПа ≤ 207,6 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, расчётные условия:

$$S_R = \frac{(1.33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_o}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1.33 \cdot 21 \cdot 0,03436 + 1) \cdot 979,4 / (1,934 \cdot 21^2 \cdot 86) = 26,17 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{\sigma}$$

26,17 МПа ≤ 138,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left(0.66845 + 5.7169 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (2,267 - 1) \cdot (0.66845 + 5.7169 \cdot 2,267^2 \cdot \lg 2,267 / (2,267^2 - 1)) = 2,518$$

$$Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (2,267^2 + 1) / (2,267^2 - 1) = 1,483$$

Касательные напряжения во фланце, расчётные условия:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_o}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 2,518 \cdot 979,4 / (21^2 \cdot 86) - 1,483 \cdot 26,17 = 26,23 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

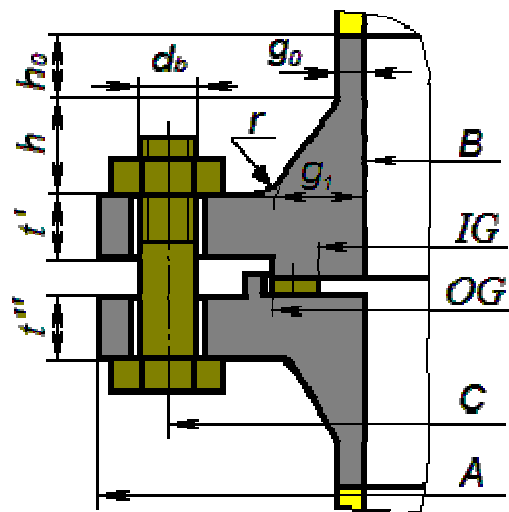
$$S_T \leq S_{\sigma}$$

26,23 МПа ≤ 138,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<div>E-10K.00.00.000 PP</div> <div>Лист</div> <div>270</div>

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, C: 125 мм

Данные первого фланца (кольца):

Смежный элемент: Штуцер V DN50
Материал смежного элемента: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281
Материал фланца (кольца): 09Г2С(КП265) Gr.
Наружный диаметр фланца (кольца), A: 160 мм
Толщина фланца (кольца), t: 17 мм
Сумма прибавок, c: 4 мм
Внешняя коррозия фланца, c_f: 0 мм
Внутренний диаметр фланца, B: 48 мм
Длина конической части втулки, h: 22,5 мм
Длина цилиндрической части втулки, h₀: 5,5 мм
Толщина цилиндрической части втулки, g₀: 5 мм
Толщина конической части втулки, g₁: 14 мм
Радиус перехода, r: 5 мм

Данные второго фланца (кольца):

Смежный элемент:
Материал смежного элемента: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281
Материал фланца (кольца): 09Г2С(КП265) Gr.
Наружный диаметр фланца (кольца), A: 160 мм
Толщина фланца (кольца), t: 17 мм

Изн.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP	Лист
19746.4						273

Сумма прибавок, с: 4 мм
Внешняя коррозия фланца, с_г: 0 мм
Внутренний диаметр фланца, В: 48 мм
Длина конической части втулки, h: 22,5 мм
Длина цилиндрической части втулки, h₀: 5,5 мм
Толщина цилиндрической части втулки, g₀: 5 мм
Толщина конической части втулки, g₁: 14 мм
Радиус перехода, г: 5 мм

Шпильки:

Материал: 35Х
Наружный диаметр, d_б: 16 мм
Количество, n: 4
Радиальная коррозия крепежа, с_б: 0 мм

Прокладка:

Материал прокладки: Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали
Толщина, h_п: 3,2 мм
Наружный диаметр, OG: 87 мм
Внутренний диаметр, IG: 74 мм

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётное осевое растягивающее усилие, F: 1500 Н
Расчётный изгибающий момент, M: 282,8 Н м
Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,3541 МПа
Расчётная температура элементов соединения:
Температура фланца (кольца), t_ф: 115,2 °С
Температура фланца (кольца), t_ф: 115,2 °С
Температура болтов (шпилек), t_б: 102 °С

Свойства материала болтов (шпилек)

Допускаемые напряжения для материала 35Х при температуре T = 102 °С (расчётные условия):

$S_b = \min\{R_e^{20} / n_{T20}; R_m^{20} / n_{B20}; R_e / n_T; R_m / n_B\} = \min(590 / 4; 736 / 5; 568,2 / 1,5; 725,2 / 5) = 145 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости для материала 35Х при температуре T = 102 °С:

$E_b = 2,099 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Коэффициент линейного расширения для материала 35Х при температуре T = 102 °С:

$\alpha_b = 0,1191 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$

Допускаемые напряжения для материала 35Х при температуре T = 20 °С (расчётные условия):

$S_a = \min\{R_e^{20} / n_{T20}; R_m^{20} / n_{B20}; R_e^{20} / n_T\} = \min(590 / 4; 736 / 5; 590 / 1,5) = 147,2 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости для материала 35Х при температуре T = 20 °С:

$E^{20}_b = 2,15 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала смежного элемента фланца 1 Штуцер V DN50

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 120 °С (расчётные условия):

$S_{n01} = 157,6 \text{ МПа}$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 20 °С (расчётные условия):

$S_{ng1} = 183 \text{ МПа}$

Изн. № подл.	19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,3541 МПа
						Расчётная температура элементов соединения:
						Температура фланца (кольца), t _ф : 115,2 °С
						Температура фланца (кольца), t _ф : 115,2 °С
						Температура болтов (шпилек), t _б : 102 °С
						Свойства материала болтов (шпилек)
						Допускаемые напряжения для материала 35Х при температуре Т = 102 °С (расчётные условия):
						S _б =min{R _с ²⁰ / n _{Т20} ; R _м ²⁰ / n _{В20} ; R _е / n _Т ; R _м / n _В }=min (590 / 4; 736 / 5; 568,2 / 1,5; 725,2 / 5)= 145 МПа
						Модуль продольной упругости для материала 35Х при температуре Т = 102 °С:
						E _б = 2,099·10 ⁵ МПа
						Коэффициент линейного расширения для материала 35Х при температуре Т = 102 °С:
						α _б = 0,1191·10 ⁻⁴ °С
						Допускаемые напряжения для материала 35Х при температуре Т = 20 °С (расчётные условия):
						S _а =min{R _с ²⁰ / n _{Т20} ; R _м ²⁰ / n _{В20} ; R _е ²⁰ / n _Т }=min (590 / 4; 736 / 5; 590 / 1,5)= 147,2 МПа
						Модуль продольной упругости для материала 35Х при температуре Т = 20 °С:
						E _б ²⁰ = 2,15·10 ⁵ МПа
						Свойства материала смежного элемента фланца 1 Штуцер V DN50
						Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре Т = 120 °С (расчётные условия):
						S _{но1} = 157,6 МПа
						Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре Т = 20 °С (расчётные условия):
						S _{нг1} = 183 МПа
Изн. № подл.	19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP	
						Лист
						274

Свойства материала смежного элемента фланца 2

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 115,2 °С (расчётные условия):
 $S_{no2}= 158,2 \text{ МПа}$
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 20 °С (расчётные условия):
 $S_{ng2}= 183 \text{ МПа}$

Свойства материала фланца (кольца) 1

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 115,2 °С (расчётные условия):
 $S_{fo1}= \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{207,6 / 1,5; 440 / 2,4\}= 138,4 \text{ МПа}$
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 115,2 °С:
 $E_1= 1,895 \cdot 10^5 \text{ МПа}$
Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 115,2 °С:
 $\alpha_1= 0,119 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 20 °С (расчётные условия):
 $S_{g1}= \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{245 / 1,5; 440 / 2,4\}= 163,3 \text{ МПа}$
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 20 °С:
 $E^{20}_1= 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Свойства материала фланца (кольца) 2

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 115,2 °С (расчётные условия):
 $S_{fo2}= \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{207,6 / 1,5; 440 / 2,4\}= 138,4 \text{ МПа}$
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 115,2 °С:
 $E_2= 1,895 \cdot 10^5 \text{ МПа}$
Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 115,2 °С:
 $\alpha_2= 0,119 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 20 °С (расчётные условия):
 $S_{g2}= \min(R_{e/t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{245 / 1,5; 440 / 2,4\}= 163,3 \text{ МПа}$
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 20 °С:
 $E^{20}_2= 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётные параметры первого фланца:

Внутренний диаметр фланца (с учетом коррозии):
 $B = B + 2 \cdot c = 48 + 2 \cdot 4 = 56 \text{ мм}$
Диаметр втулки с учетом коррозии (для фланцев, приварных встык):
 $\xi_0 = \xi_0 - c = 5 - 4 = 1 \text{ мм}$
Больший диаметр конической втулки с учетом коррозии:
 $\xi_1 = \xi_1 - c = 14 - 4 = 10 \text{ мм}$
Толщина фланца, с учетом коррозии:
 $t = t - c_f = 17 - 0 = 17 \text{ мм}$

Расчётные параметры второго фланца:

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 _n , МПа
Спирально-навитая с	3	69	-	-	-

Изн. № подл.	19746.4	Подпись и дата		Взам. инв. №		Инв. № дубл.		Подпись и дата							Лист
										E-10K.00.00.000 PP					275
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата											

$$K = \frac{A}{B} = 160 / 56 = 2,857$$

$$T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55246 \cdot \lg K) - 1}{(1.0472 + 1.9448 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (2,857^2 \cdot (1 + 8.55246 \cdot \lg 2,857) - 1) / ((1.0472 + 1.9448 \cdot 2,857^2) \cdot (2,857 - 1)) = 1,241$$

$$U = \frac{K^2(1 + 8.55246 \cdot \lg K) - 1}{1.36136 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (2,857^2 \cdot (1 + 8.55246 \cdot \lg 2,857) - 1) / (1.36136 \cdot (2,857^2 - 1) \cdot (2,857 - 1)) = 2,153$$

Коэффициент d для интегральных фланцев:

$$d = \frac{U}{V} \cdot h_0 \cdot g_0^2 = 2,153 / 0,003385 \cdot 7,483 \cdot 1^2 = 0,4761 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$L = \frac{t \cdot e + 1}{T} + \frac{t^3}{d} = (17 \cdot 0,03749 + 1) / 1,241 + 17^3 / 0,4761 \cdot 10^5 = 2,352$$

Момент инерции сечения фланца при изгибе (интегральные фланцы с втулкой):

$$I = \frac{0.0874 \cdot L \cdot g^2 \cdot h_o \cdot B}{V} = 0.0874 * 2,352 * 1 * 7,483 * 56 / 0,003385 = 0,2545 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$$

$$G_{avg} = 0.5 \cdot (g_0 + g_1) = 0.5 \cdot (1 + 10) = 5,5 \text{ MM}$$

$$A_R = 0.5 \cdot (A - B) = 0.5 \cdot (160 - 56) = 52 \text{ mm}$$

Так как $t \geq C_{avg}$,

$$A_A = A_R = 52 \text{ mm}$$

$$B_p - t = 17 \text{ mm}$$

$$K_{AB} = \left(A_A \cdot B_B^3 \right) \cdot \left[\frac{1}{3} - 0.21 \cdot \left(\frac{B_B}{A_A} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{12} \cdot \left\{ \frac{B_B}{A_A} \right\}^4 \right) \right] = (52 \cdot 17^3) \cdot [1/3 - 0.21 \cdot (17/52) \cdot (1 - 1/12 \cdot \{17/52\}^4)] = 0,6764 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$$

$$C_F = h = 22,5 \text{ mm}$$

$$D_{DG} = G_{avg} = 5,5 \text{ mm}$$

$$K_{CD} = (C_c \cdot D_{DG}^3) \cdot \left[\frac{1}{3} - 1.05 \cdot \left(\frac{D_{DG}}{C_c} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{192} \cdot \left\{ \frac{D_{DG}}{C_c} \right\}^4 \right) \right] = (22,5 \cdot 5,5^3) \cdot [1/3 - 1.05 \cdot (5,5/22,5) \cdot (1 - 1/192 \cdot \{5,5/22,5\}^4)] = 0,287 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$$

Полярный момент сечения фланца (интегральные фланцы, плоские фланцы с втулкой):

$$I_T = K_{AB} + K_{CD} = 0,6764 \cdot 10^{-7} + 0,287 \cdot 10^{-9} = 0,6792 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$$

Компонент проектного момента на фланце, как результат действия внешнего изгибающего момента и/или осевой силы:

$$M_{ot} = 4 \cdot M_E \cdot \left[\frac{I}{0,3846 \cdot I_p + I} \right] \cdot \left[\frac{h_D}{C - 2 \cdot h_D} \right] + F_A \cdot h_D = 4 \cdot 282,8 \cdot [0,2545 \cdot 10^{-7} / (0,3846 \cdot 0,6792 \cdot 10^{-7} + 0,2545 \cdot 10^{-7})] \cdot [29,5 / (125 - 2 \cdot 29,5)] + 1500 \cdot 29,5 = 293,8 \text{ H}_M$$

Коэффициент момента для расчета свободных колец:

$$F_S = 1$$

Изгибающий момент в расчётных условиях (внутреннее давление):

$$M_{\theta} = \left[(H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G) \cdot B_{sc} + M_{os} \right] \cdot F_s \Big|_{1/} = \frac{[(871,8 \cdot 29,5 + 929,7 \cdot 28,38 + 1746 \cdot 22,25) \cdot 1,415 + 293,8]}{H_M} = 422,5$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$f = 1$$

Продольные напряжения во втулке, в расчётных условиях:

$$S_H = \frac{f \cdot M_o}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 422,5 / (2,352 \cdot 10^2 \cdot 56) = 32,08 \text{ МПа}$$

Инв. № подл.	19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	$C_c = h = 22,5 \text{ мм}$ $D_{DG} = G_{wg} = 5,5 \text{ мм}$ $K_{CD} = \left(C_c \cdot D_{DG}^3 \right) \cdot \left[\frac{1}{3} - 1,05 \cdot \left(\frac{D_{DG}}{C_c} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{192} \cdot \left\{ \frac{D_{DG}}{C_c} \right\}^4 \right) \right] = (22,5 * 5,5^3) * [1/3 - 1,05 * (5,5 / 22,5) * (1 - 1/192 * \{5,5 / 22,5\}^4)] = 0,287 \cdot 10^{-9} \text{ м}^4$
						<p>Полярный момент сечения фланца (интегральные фланцы, плоские фланцы с втулкой):</p> $I_p = K_{AB} + K_{CD} = 0,6764 \cdot 10^{-7} + 0,287 \cdot 10^{-9} = 0,6792 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$ <p>Компонент проектного момента на фланце, как результат действия внешнего изгибающего момента и/или осевой силы:</p> $M_{ot} = 4 \cdot M_E \cdot \left[\frac{I}{0,3846 \cdot I_p + I} \right] \cdot \left[\frac{h_D}{C - 2 \cdot h_D} \right] + F_A \cdot h_D = 4 * 282,8 * [0,2545 \cdot 10^{-7} / (0,3846 * 0,6792 \cdot 10^{-7} + 0,2545 \cdot 10^{-7})] * [29,5 / (125 - 2 * 29,5)] + 1500 * 29,5 = 293,8 \text{ Н м}$ <p>Коэффициент момента для расчета свободных колец:</p> $F_s = 1$ <p>Изгибающий момент в расчётных условиях (внутреннее давление):</p> $M_o = \left[(H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G) \cdot B_{sc} + M_{ot} \right] \cdot F_s = [(871,8 * 29,5 + 929,7 * 28,38 + 1746 * 22,25) * 1,415 + 293,8] * 1 = 422,5 \text{ Н м}$ <p>Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):</p> $f = 1$ <p>Продольные напряжения во втулке, в расчётных условиях:</p> $S_H = \frac{f \cdot M_o}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 * 422,5 / (2,352 * 10^2 * 56) = 32,08 \text{ МПа}$
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<div>E-10K.00.00.000 PP</div> <div>Лист 278</div>	

$$S_R = \frac{(1.33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_{\Sigma}}{L \cdot t^2 \cdot E} = (1.33 \cdot 17 \cdot 0,03749 + 1) \cdot 2228 / (2,352 \cdot 17^2 \cdot 56) = 108,2 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{\Sigma}$$

108,2 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Касательные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_{\Sigma}}{t^2 \cdot E} - Z \cdot S_R = 1,959 \cdot 2228 / (17^2 \cdot 56) - 1,279 \cdot 108,2 = 131,4 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{\Sigma}$$

131,4 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (169,2 + 108,2) / 2 = 138,7 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{\Sigma}$$

138,7 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (169,2 + 131,4) / 2 = 150,3 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\Sigma}$$

150,3 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие прочности выполнено

Жесткость фланца

- для расчётных условий:

Коэффициент жесткости для интегральных фланцев:

$$K_R = 0.3$$

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, расчётные условия):

$$J = \frac{52.14 \cdot V \cdot M_{\Sigma}}{L \cdot E_{\Sigma} \cdot E_0^2 \cdot K_R \cdot h_0} = (52.14 \cdot 0,003385 \cdot 422,5) / (2,352 \cdot 1,895 \cdot 10^5 \cdot 1^2 \cdot 0,3 \cdot 7,483) = 0,07454$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1.0$$

$$0,07454 \leq 1.0$$

Условие жёсткости выполнено

- для условий монтажа:

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, условия монтажа):

$$J = \frac{52.14 \cdot V \cdot M_{\Sigma}}{L \cdot E_{\Sigma} \cdot E_0^2 \cdot K_R \cdot h_0} = (52.14 \cdot 0,003385 \cdot 2228) / (2,352 \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot 1^2 \cdot 0,3 \cdot 7,483) = 0,3743$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1.0$$

$$0,3743 \leq 1.0$$

Условие жёсткости выполнено

Расчёт напряжений второго фланца:

Параметры первого и второго фланцев полностью совпадают, расчёт второго фланца не проводится

Условие прочности выполнено

Жесткость фланца

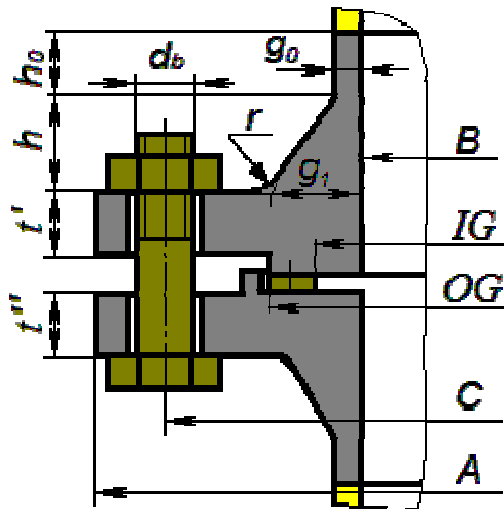
Параметры первого и второго фланцев полностью совпадают, расчёт второго фланца не проводится

Изн. № подл.	19746.4	Подпись и дата	Подпись и дата	Изн. № дубл.	Изн. № дубл.	Взам. инв. №	Взам. инв. №	Подпись и дата	Подпись и дата	Изн. № подл.	19746.4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP						Лист
										280	

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-10K.00.00.000 PP				
Лист				
281				

Фланцевое соединение DN50-Rc1/2

Расчёт на прочность и герметичность по ASME VIII-2



Исходные данные

Тип фланца: Приварные встык

Исполнение: Выступ-впадина

Теплоизоляция: Нет

Свободный/интегральный: -

Диаметр болтовой окружности, С: 125 мм

Данные первого фланца (кольца):

Смежный элемент: Штуцер P1 DN50

Материал смежного элемента: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281

Материал фланца (кольца): 09Г2С(КП265) Gr.

Наружный диаметр фланца (кольца), А: 160 мм

Толщина фланца (кольца), t: 17 мм

Сумма прибавок, с: 4 мм

Внешняя коррозия фланца, сф: 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(КП265) Gr.

Наружный диаметр фланца (кольца), А: 160 мм

Толщина фланца (кольца), t: 21 мм

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	Свободный/интегральный: -
					Диаметр болтовой окружности, С: 125 мм
19746.4					Данные первого фланца (кольца):
					Смежный элемент: Штуцер P1 DN50
					Материал смежного элемента: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281
					Материал фланца (кольца): 09Г2С(КП265) Gr.
					Наружный диаметр фланца (кольца), А: 160 мм
					Толщина фланца (кольца), t: 17 мм
					Сумма прибавок, с: 4 мм
					Внешняя коррозия фланца, с _г : 0 мм
					Внутренний диаметр фланца, В: 48 мм
					Длина конической части втулки, h: 22,5 мм
					Длина цилиндрической части втулки, h ₀ : 5,5 мм
					Толщина цилиндрической части втулки, g ₀ : 5 мм
					Толщина конической части втулки, g ₁ : 14 мм
					Радиус перехода, г: 5 мм
					Данные второго фланца (кольца):
					Смежный элемент:
					Материал смежного элемента: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281
					Материал фланца (кольца): 09Г2С(КП265) Gr.
					Наружный диаметр фланца (кольца), А: 160 мм
					Толщина фланца (кольца), t: 21 мм
					E-10K.00.00.000 PP
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
					Лист
					282

Сумма прибавок, с:	4 мм
Внешняя коррозия фланца, с _г :	0 мм
Внутренний диаметр фланца, В:	21 мм
Длина конической части втулки, h:	22,5 мм
Длина цилиндрической части втулки, h ₀ :	1,5 мм
Толщина цилиндрической части втулки, g ₀ :	18,5 мм
Толщина конической части втулки, g ₁ :	27,5 мм
Радиус перехода, г:	5 мм

Шпильки:

Материал:	35Х
Наружный диаметр, d_b :	16 мм
Количество, n :	4
Радиальная коррозия крепежа, c_p :	0 мм

Радиальная коррозия крепежа, c_b : 0 мм

Прокладка:

Материал прокладки:	Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали
Толщина, h_n :	3,2 мм
Наружный диаметр, OG:	87 мм
Внутренний диаметр, IG:	74 мм

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётное осевое сжимающее усилие, F: 0 Н
 Расчётный изгибающий момент, M: 0 Н м
 Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,3541 МПа
 Расчётная температура элементов соединения:
 Температура фланца (кольца), t_f : 115,2 °C
 Температура фланца (кольца), t_{ϕ} : 115,2 °C
 Температура болтов (шпилек), t_b : 102 °C

Свойства материала болтов (шпилек)

Допускаемые напряжения для материала 35Х при температуре $T = 102\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_b = \min\{R_e^{20} / n_{T20}; R_m^{20} / n_{R20}; R_e / n_T; R_m / n_R\} = \min(590/4; 736/5; 568,2/1,5; 725,2/5) = 145 \text{ MPa}$$

Модуль продольной упругости для материала 35Х при температуре $T = 102\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_6 = 2,099 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 35Х при температуре $T = 102\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\alpha_6 = 0,1191 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$$

Допускаемые напряжения для материала 35Х при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_a = \min\{R_e^{20} / n_{T20}; R_m^{20} / n_{B20}; R_e^{20} / n_T\} = \min(590/4; 736/5; 590/1,5) = 147,2 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 35Х при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_{6=20}^{20} = 2,15 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала смежного элемента фланца 1 Штуцер P1 DN50

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{no1}} = 157,6 \text{ МПа}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{ng1} = 183 \text{ МПа}$$

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<p>Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,3541 МПа</p> <p>Расчётная температура элементов соединения:</p> <p>Температура фланца (кольца), $t_{\text{ф}}$: 115,2 °C</p> <p>Температура фланца (кольца), $t_{\text{ф}}$: 115,2 °C</p> <p>Температура болтов (шпилек), $t_{\text{б}}$: 102 °C</p> <p>Свойства материала болтов (шпилек)</p> <p>Допускаемые напряжения для материала 35X при температуре T = 102 °C (расчётные условия):</p> <p>$S_b = \min\{R_e^{20} / n_{T20}; R_m^{20} / n_{B20}; R_e / n_T; R_m / n_B\} = \min(590 / 4; 736 / 5; 568,2 / 1,5; 725,2 / 5) = 145 \text{ МПа}$</p> <p>Модуль продольной упругости для материала 35X при температуре T = 102 °C:</p> <p>$E_6 = 2,099 \cdot 10^5 \text{ МПа}$</p> <p>Коэффициент линейного расширения для материала 35X при температуре T = 102 °C:</p> <p>$\alpha_6 = 0,1191 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$</p> <p>Допускаемые напряжения для материала 35X при температуре T = 20 °C (расчётные условия):</p> <p>$S_a = \min\{R_e^{20} / n_{T20}; R_m^{20} / n_{B20}; R_e^{20} / n_T\} = \min(590 / 4; 736 / 5; 590 / 1,5) = 147,2 \text{ МПа}$</p> <p>Модуль продольной упругости для материала 35X при температуре T = 20 °C:</p> <p>$E_{60}^{20} = 2,15 \cdot 10^5 \text{ МПа}$</p> <p>Свойства материала смежного элемента фланца 1 Штуцер P1 DN50</p> <p>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 120 °C (расчётные условия):</p> <p>$S_{n01} = 157,6 \text{ МПа}$</p> <p>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 20 °C (расчётные условия):</p> <p>$S_{ng1} = 183 \text{ МПа}$</p>
					<div> <div>19746.4</div> <div>Е-10К.00.00.000 РР</div> <div>283</div> </div>
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата	<div>Изм.</div> <div>Лист</div> <div>№ докум.</div> <div>Подп.</div> <div>Дата</div>

Свойства материала смежного элемента фланца 2

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 115,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{но}2} = 158,2 \text{ МПа}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{нг}2} = 183 \text{ МПа}$$

Свойства материала фланца (кольца) 1

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре $T = 115,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{fo}1} = \min(R_{\text{e}t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{207,6 / 1,5; 440 / 2,4\} = 138,4 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре $T = 115,2\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_1 = 1,895 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре $T = 115,2\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\alpha_1 = 0,119 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{g}1} = \min(R_{\text{e}t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{245 / 1,5; 440 / 2,4\} = 163,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E^{20}_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Свойства материала фланца (кольца) 2

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре $T = 115,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{fo}2} = \min(R_{\text{e}t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{207,6 / 1,5; 440 / 2,4\} = 138,4 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре $T = 115,2\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_2 = 1,895 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре $T = 115,2\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\alpha_2 = 0,119 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):

$$S_{\text{g}2} = \min(R_{\text{e}t} / n_T; R_m^{20} / n_B) = \min\{245 / 1,5; 440 / 2,4\} = 163,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E^{20}_2 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётные параметры первого фланца:

Внутренний диаметр фланца (с учетом коррозии):

$$B = B + 2 \cdot c = 48 + 2 \cdot 4 = 56 \text{ мм}$$

Диаметр втулки с учетом коррозии (для фланцев, приварных встык):

$$\xi_0 = \xi_0 - c = 5 - 4 = 1 \text{ мм}$$

Больший диаметр конической втулки с учетом коррозии:

$$\xi_1 = \xi_1 - c = 14 - 4 = 10 \text{ мм}$$

Толщина фланца, с учетом коррозии:

$$t = t - c_f = 17 - 0 = 17 \text{ мм}$$

Расчётные параметры второго фланца:

Внутренний диаметр фланца (с учетом коррозии):

$$B = B + 2 \cdot c = 21 + 2 \cdot 4 = 29 \text{ мм}$$

Диаметр втулки с учетом коррозии (для фланцев, приварных встык):

$$\xi_0 = \xi_0 - c = 18,5 - 4 = 14,5 \text{ мм}$$

Больший диаметр конической втулки с учетом коррозии:

$$\xi_1 = \xi_1 - c = 27,5 - 4 = 23,5 \text{ мм}$$

Толщина фланца, с учетом коррозии:

Изн. № подл.	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата					
19746.4								
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP			
					Лист			
					284			

$$h_o = \sqrt{B \cdot g_0} = (56 \cdot 1)^{1/2} = 7,483 \text{ мм}$$

$$X_h = \frac{h}{h_o} = 22,5 / 7,483 = 3,007$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$F = 0,2805$$

Расчетные коэффициенты:

$$e = \frac{F}{h_o} = 0,2805 / 7,483 = 0,03749 \text{ 1/мм}$$

$$K = \frac{A}{B} = 160 / 56 = 2,857$$

$$T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg K) - 1}{(1,0472 + 1,9448 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (2,857^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg 2,857) - 1) / ((1,0472 + 1,9448 \cdot 2,857^2) \cdot (2,857 - 1)) = 1,241$$

$$U = \frac{K^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg K) - 1}{1,36136 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (2,857^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \lg 2,857) - 1) / (1,36136 \cdot (2,857^2 - 1) \cdot (2,857 - 1)) = 2,153$$

Коэффициент d для интегральных фланцев:

$$d = \frac{U}{V} \cdot h_o \cdot g_0^2 = 2,153 / 0,003385 \cdot 7,483 \cdot 1^2 = 0,4761 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$$

$$L = \frac{t \cdot e + 1}{T} + \frac{t^3}{d} = (17 \cdot 0,03749 + 1) / 1,241 + 17^3 / 0,4761 \cdot 10^{-5} = 2,352$$

Момент инерции сечения фланца при изгибе (интегральные фланцы с втулкой):

$$I = \frac{0,0874 \cdot L \cdot g_0^2 \cdot h_o \cdot B}{V} = 0,0874 \cdot 2,352 \cdot 1 \cdot 7,483 \cdot 56 / 0,003385 = 0,2545 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

$$G_{wg} = 0,5 \cdot (g_0 + g_1) = 0,5 \cdot (1 + 10) = 5,5 \text{ мм}$$

$$A_R = 0,5 \cdot (A - B) = 0,5 \cdot (160 - 56) = 52 \text{ мм}$$

Так как $t \geq G_{wg}$,

$$A_A = A_R = 52 \text{ мм}$$

$$B_B = t = 17 \text{ мм}$$

$$K_{AB} = (A_A \cdot B_B^3) \cdot \left[\frac{1}{3} - 0,21 \cdot \left(\frac{B_B}{A_A} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{12} \cdot \left\{ \frac{B_B}{A_A} \right\}^4 \right) \right] = (52 \cdot 17^3) \cdot [1/3 - 0,21 \cdot (17/52) \cdot (1 - 1/12 \cdot \{17/52\}^4)] = 0,6764 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

$$C_C = h = 22,5 \text{ мм}$$

$$D_{DG} = G_{wg} = 5,5 \text{ мм}$$

$$K_{CD} = (C_C \cdot D_{DG}^3) \cdot \left[\frac{1}{3} - 1,05 \cdot \left(\frac{D_{DG}}{C_C} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{192} \cdot \left\{ \frac{D_{DG}}{C_C} \right\}^4 \right) \right] = (22,5 \cdot 5,5^3) \cdot [1/3 - 1,05 \cdot (5,5/22,5) \cdot (1 - 1/192 \cdot \{5,5/22,5\}^4)] = 0,287 \cdot 10^{-9} \text{ м}^4$$

Полярный момент сечения фланца (интегральные фланцы, плоские фланцы с втулкой):

$$I_p = K_{AB} + K_{CD} = 0,6764 \cdot 10^{-7} + 0,287 \cdot 10^{-9} = 0,6792 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

Компонент проектного момента на фланце, как результат действия внешнего изгибающего момента и/или осевой силы:

$$M_{os} = 4 \cdot M_E \cdot \left[\frac{I}{0,3846 \cdot I_p + I} \right] \cdot \left[\frac{h_D}{C - 2 \cdot h_D} \right] + F_A \cdot h_D = 4 \cdot 0 \cdot [0,2545 \cdot 10^{-7} / (0,3846 \cdot 0,6792 \cdot 10^{-7} + 0,2545 \cdot 10^{-7})] \cdot [29,5 / (125 - 2 \cdot 29,5)] + 0 \cdot 29,5 = 0 \text{ Н м}$$

Коэффициент момента для расчета свободных колец:

Подпись и дата					
Инв. № дубл.					
Взам. инв. №					
Подпись и дата					
Инв. № подл.	19746.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
E-10K.00.00.000 PP					Лист
					287

$$F_s = 1$$

Изгибающий момент в расчётных условиях (внутреннее давление):

$$M_o = [(H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G) \cdot B_{sc} + M_{oe}] \cdot F_s = [(871,8 \cdot 29,5 + 929,7 \cdot 28,38 + 1746 \cdot 22,25) \cdot 1,415 + 0] \cdot 1 = 128,7 \text{ Н м}$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$f = 1$$

Продольные напряжения во втулке, в расчётных условиях:

$$S_H = \frac{f \cdot M_o}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 128,7 / (2,352 \cdot 10^2 \cdot 56) = 9,776 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min\{1,5 \cdot S_b; 2,5 \cdot S_{no}\}$$

$$\min\{1,5 \cdot S_b; 2,5 \cdot S_{no}\} = \min\{1,5 \cdot 138,4; 2,5 \cdot 157,6\} = 207,6 \text{ МПа}$$

9,776 МПа ≤ 207,6 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, расчётные условия:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_o}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 \cdot 17 \cdot 0,03749 + 1) \cdot 128,7 / (2,352 \cdot 17^2 \cdot 56) = 6,25 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_b$$

6,25 МПа ≤ 138,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left(0,66845 + 5,7169 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (2,857 - 1) \cdot (0,66845 + 5,7169 \cdot 2,857^2 \cdot \lg 2,857 / (2,857^2 - 1)) = 1,959$$

$$Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (2,857^2 + 1) / (2,857^2 - 1) = 1,279$$

Касательные напряжения во фланце, расчётные условия:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_o}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 1,959 \cdot 128,7 / (17^2 \cdot 56) - 1,279 \cdot 6,25 = 7,592 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_b$$

7,592 МПа ≤ 138,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (9,776 + 6,25) / 2 = 8,013 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_b$$

8,013 МПа ≤ 138,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (9,776 + 7,592) / 2 = 8,684 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_b$$

8,684 МПа ≤ 138,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

Болтовая нагрузка в условиях монтажа:

$$W_g = \left(\frac{A_m + A_b}{2} \right) \cdot S_{bg} = (0,3853 \cdot 10^{-3} + 0,576 \cdot 10^{-3}) / 2 \cdot 147,2 = 7,075 \cdot 10^{-4} \text{ Н}$$

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:

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP	Лист
19746.4						288

0,3743 ≤ 1.0
Условие жёсткости выполнено

Расчёт напряжений второго фланца:

Равнодействующая давления на внутренней поверхности фланца:

$H_D = 0.785 \cdot B^2 \cdot p = 0.785 \cdot 29^2 \cdot 0.3541 = 233,8 \text{ Н}$

Плечо момента для силы H_D (фланцы интегрального типа, или другие, рассчитываемые аналогично):

$h_D = \frac{C - B - g_1}{2} = (125 - 29 - 23,5) / 2 = 36,25 \text{ мм}$

Разница между общей равнодействующей давления и равнодействующей на внутренней поверхности фланца:

$H_T = H - H_D = 1801 - 233,8 = 1568 \text{ Н}$

Плечо для нагрузки H_T (интегральные фланцы, а также иные, рассчитываемые аналогично):

$h_T = \frac{1}{2} \left[\frac{C - B}{2} + h_G \right] = 1/2 \cdot [(125 - 29) / 2 + 22,25] = 35,12 \text{ мм}$

Коэффициент болтового интервала:

$B_{sc} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{B_s}{2 \cdot a + t}} \right\} = \max \{ 1; (98,17 / (2 \cdot 16 + 21))^{1/2} \} = 1,361$

$X_g = \frac{g_1}{g_0} = 23,5 / 14,5 = 1,621$

Коэффициент

$h_o = \sqrt{B \cdot g_0} = (29 \cdot 14,5)^{1/2} = 20,51 \text{ мм}$

$X_h = \frac{h}{h_o} = 22,5 / 20,51 = 1,097$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$F = 0,774$

Расчетные коэффициенты:

$e = \frac{F}{h_o} = 0,774 / 20,51 = 0,03774 \text{ 1/мм}$

$K = \frac{A}{B} = 160 / 29 = 5,517$

$T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55246 \cdot \lg K) - 1}{(1.0472 + 1.9448 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (5,517^2 \cdot (1 + 8.55246 \cdot \lg 5,517) - 1) / ((1.0472 + 1.9448 \cdot 5,517^2) \cdot (5,517 - 1)) = 0,8177$

$U = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55246 \cdot \lg K) - 1}{1.36136 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (5,517^2 \cdot (1 + 8.55246 \cdot \lg 5,517) - 1) / (1.36136 \cdot (5,517^2 - 1) \cdot (5,517 - 1)) = 1,229$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$V = 0,2141$

Коэффициент d для интегральных фланцев:

$d = \frac{U}{V} \cdot h_o \cdot g_0^2 = 1,229 / 0,2141 \cdot 20,51 \cdot 14,5^2 = 0,2475 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$

$L = \frac{t \cdot e + 1}{T} + \frac{t^3}{d} = (21 \cdot 0,03774 + 1) / 0,8177 + 21^3 / 0,2475 \cdot 10^{-4} = 2,566$

Момент инерции сечения фланца при изгибе (интегральные фланцы с втулкой):

$I = \frac{0.0874 \cdot L \cdot g_0^2 \cdot h_o \cdot B}{V} = 0.0874 \cdot 2,566 \cdot 14,5 \cdot 20,51 \cdot 29 / 0,2141 = 0,131 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$

Подпись и дата		Инва. № дубл.		Взам. инв. №		Подпись и дата		Инва. № подл.	19746.4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP				Лист
									290

$$G_{\text{шг}} = 0.5 \cdot (g_0 + g_1) = 0.5 \cdot (14,5 + 23,5) = 19 \text{ мм}$$

$$A_R = 0.5 \cdot (A - B) = 0.5 \cdot (160 - 29) = 65,5 \text{ мм}$$

Так как $t \geq G_{\text{шг}}$,

$$A_A = A_R = 65,5 \text{ мм}$$

$$B_B = t = 21 \text{ мм}$$

$$K_{AB} = \left(A_A \cdot B_B^3 \right) \cdot \left[\frac{1}{3} - 0.21 \cdot \left(\frac{B_B}{A_A} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{12} \cdot \left\{ \frac{B_B}{A_A} \right\}^4 \right) \right] = (65,5 \cdot 21^3) \cdot [1/3 - 0.21 \cdot (21/65,5) \cdot (1 - 1/12 \cdot \{21/65,5\}^4)] = 0,1614 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$$

$$C_C = h = 22,5 \text{ мм}$$

$$D_{DG} = G_{\text{шг}} = 19 \text{ мм}$$

$$K_{CD} = \left(C_C \cdot D_{DG}^3 \right) \cdot \left[\frac{1}{3} - 1.05 \cdot \left(\frac{D_{DG}}{C_C} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{192} \cdot \left\{ \frac{D_{DG}}{C_C} \right\}^4 \right) \right] = (22,5 \cdot 19^3) \cdot [1/3 - 1.05 \cdot (19/22,5) \cdot (1 - 1/192 \cdot \{19/22,5\}^4)] = (-0,8503 \cdot 10^{-7}) \text{ м}^4$$

Полярный момент сечения фланца (интегральные фланцы, плоские фланцы с втулкой):

$$I_P = K_{AB} + K_{CD} = 0,1614 \cdot 10^{-6} + (-0,8503 \cdot 10^{-7}) = 0,7636 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

Компонент проектного момента на фланце, как результат действия внешнего изгибающего момента и/или осевой силы:

$$M_{oe} = 4 \cdot M_E \cdot \left[\frac{I}{0.3846 \cdot I_P + I} \right] \cdot \left[\frac{h_D}{C - 2 \cdot h_D} \right] + F_A \cdot h_D = 4 \cdot 0 \cdot [0,131 \cdot 10^{-6} / (0.3846 \cdot 0,7636 \cdot 10^{-7} + 0,131 \cdot 10^{-6})] \cdot [36,25 / (125 - 2 \cdot 36,25)] + 0 \cdot 36,25 = 0 \text{ Н м}$$

Изгибающий момент в расчётных условиях (внутреннее давление):

$$M_o = [(H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G) \cdot B_{sc} + M_{oe}] \cdot F_s = [(233,8 \cdot 36,25 + 1568 \cdot 35,12 + 1746 \cdot 22,25) \cdot 1,361 + 0] \cdot 1 = 139,4 \text{ Н м}$$

Коэффициент напряжений (Таблица 4.16.5):

$$f = 1$$

Продольные напряжения во втулке, в расчётных условиях:

$$S_H = \frac{f \cdot M_o}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 139,4 / (2,566 \cdot 23,5^2 \cdot 29) = 3,391 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min \{ 1.5 \cdot S_{\text{нб}} ; 2.5 \cdot S_{\text{но}} \}$$

$$\min \{ 1.5 \cdot S_{\text{нб}} ; 2.5 \cdot S_{\text{но}} \} = \min \{ 1.5 \cdot 138,4 ; 2.5 \cdot 158,2 \} = 207,6 \text{ МПа}$$

3,391 МПа ≤ 207,6 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, расчётные условия:

$$S_R = \frac{(1.33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_o}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1.33 \cdot 21 \cdot 0,03774 + 1) \cdot 139,4 / (2,566 \cdot 21^2 \cdot 29) = 8,722 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{\text{нб}}$$

8,722 МПа ≤ 138,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left(0.66845 + 5.7169 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (5,517 - 1) \cdot (0.66845 + 5.7169 \cdot 5,517^2 \cdot \lg 5,517 / (5,517^2 - 1)) = 1,119$$

$$Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (5,517^2 + 1) / (5,517^2 - 1) = 1,068$$

Касательные напряжения во фланце, расчётные условия:

Инов. № подл.	19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<div>E-10K.00.00.000 PP</div> <div>Лист 291</div>

$$S_T = \frac{Y \cdot M_o}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 1,119 \cdot 139,4 / (21^2 \cdot 29) - 1,068 \cdot 8,722 = 2,875 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_b$$

2,875 МПа ≤ 138,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (3,391 + 8,722) / 2 = 6,056 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_b$$

6,056 МПа ≤ 138,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (3,391 + 2,875) / 2 = 3,133 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_b$$

3,133 МПа ≤ 138,4 МПа, **Условие прочности выполнено**

Изгибающий момент в условиях монтажа (внутреннее давление):

$$M_g = \frac{W_g \cdot (C - G) \cdot B_{sc} \cdot F_g}{2} = 7,075 \cdot 10^4 \cdot (125 - 80,5) \cdot 1,361 \cdot 1 / 2 = 2142 \text{ Н м}$$

Продольные напряжения во втулке, в условиях монтажа:

$$S_H = \frac{f \cdot M_g}{L \cdot g_1^2 \cdot B} = 1 \cdot 2142 / (2,566^2 \cdot 23,5^2 \cdot 29) = 52,12 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_H \leq \min\{1,5 \cdot S_{tg}; 2,5 \cdot S_{ng}\}$$

$$\min\{1,5 \cdot S_{tg}; 2,5 \cdot S_{ng}\} = \min\{1,5 \cdot 163,3; 2,5 \cdot 183\} = 245 \text{ МПа}$$

52,12 МПа ≤ 245 МПа, **Условие прочности выполнено**

Радиальные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_R = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_g}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 \cdot 21 \cdot 0,03774 + 1) \cdot 2142 / (2,566 \cdot 21^2 \cdot 29) = 134,1 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_R \leq S_{tg}$$

134,1 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Касательные напряжения во фланце, условия монтажа:

$$S_T = \frac{Y \cdot M_g}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_R = 1,119 \cdot 2142 / (21^2 \cdot 29) - 1,068 \cdot 134,1 = 44,19 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$S_T \leq S_{tg}$$

44,19 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_R}{2} = (52,12 + 134,1) / 2 = 93,1 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\frac{S_H + S_R}{2} \leq S_{tg}$$

93,1 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\frac{S_H + S_T}{2} = (52,12 + 44,19) / 2 = 48,16 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата				
	Инв. № дубл.				
	Взам. инв. №				
	Подпись и дата				
	Инв. № подл.				
<div><div>$\min\{1.5 \cdot S_{\text{г}}; 2.5 \cdot S_{\text{нг}}\} = \min\{1.5 \cdot 163,3; 2.5 \cdot 183\} = 245 \text{ МПа}$$52,12 \text{ МПа} \leq 245 \text{ МПа, Условие прочности выполнено}$<p>Радиальные напряжения во фланце, условия монтажа:</p>$S_{\text{R}} = \frac{(1,33 \cdot t \cdot e + 1) \cdot M_{\text{г}}}{L \cdot t^2 \cdot B} = (1,33 \cdot 21 \cdot 0,03774 + 1) \cdot 2142 / (2,566 \cdot 21^2 \cdot 29) = 134,1 \text{ МПа}$<p>Условие прочности:</p>$S_{\text{R}} \leq S_{\text{г}}$$134,1 \text{ МПа} \leq 163,3 \text{ МПа, Условие прочности выполнено}$<p>Касательные напряжения во фланце, условия монтажа:</p>$S_{\text{T}} = \frac{Y \cdot M_{\text{г}}}{t^2 \cdot B} - Z \cdot S_{\text{R}} = 1,119 \cdot 2142 / (21^2 \cdot 29) - 1,068 \cdot 134,1 = 44,19 \text{ МПа}$<p>Условие прочности:</p>$S_{\text{T}} \leq S_{\text{г}}$$44,19 \text{ МПа} \leq 163,3 \text{ МПа, Условие прочности выполнено}$$\frac{S_{\text{H}} + S_{\text{R}}}{2} = (52,12 + 134,1) / 2 = 93,1 \text{ МПа}$<p>Условие прочности:</p>$\frac{S_{\text{H}} + S_{\text{R}}}{2} \leq S_{\text{г}}$$93,1 \text{ МПа} \leq 163,3 \text{ МПа, Условие прочности выполнено}$$\frac{S_{\text{H}} + S_{\text{T}}}{2} = (52,12 + 44,19) / 2 = 48,16 \text{ МПа}$<p>Условие прочности:</p></div></div>					
					E-10K.00.00.000 PP
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист
					292

$$\frac{S_H + S_T}{2} \leq S_{\text{г}}$$

48,16 МПа ≤ 163,3 МПа, **Условие прочности выполнено**

Условие прочности выполнено

Жесткость фланца

- для расчётных условий:

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, расчётные условия):

$$J = \frac{52.14 \cdot V \cdot M_{\text{г}}}{L \cdot E_{\text{гг}} \cdot \text{г}_0^2 \cdot K_R \cdot h_{\text{г}}} = (52.14 \cdot 0.2141 \cdot 139.4) / (2.566 \cdot 1.895 \cdot 10^5 \cdot 14.5^2 \cdot 0.3 \cdot 20.51) = 0.002474$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1.0$$

$$0.002474 \leq 1.0$$

Условие жёсткости выполнено

- для условий монтажа:

Показатель жесткости фланца (интегральные фланцы, условия монтажа):

$$J = \frac{52.14 \cdot V \cdot M_{\text{г}}}{L \cdot E_{\text{гг}} \cdot \text{г}_0^2 \cdot K_R \cdot h_{\text{г}}} = (52.14 \cdot 0.2141 \cdot 2142) / (2.566 \cdot 1.99 \cdot 10^5 \cdot 14.5^2 \cdot 0.3 \cdot 20.51) = 0.03621$$

Условие жесткости:

$$J \leq 1.0$$

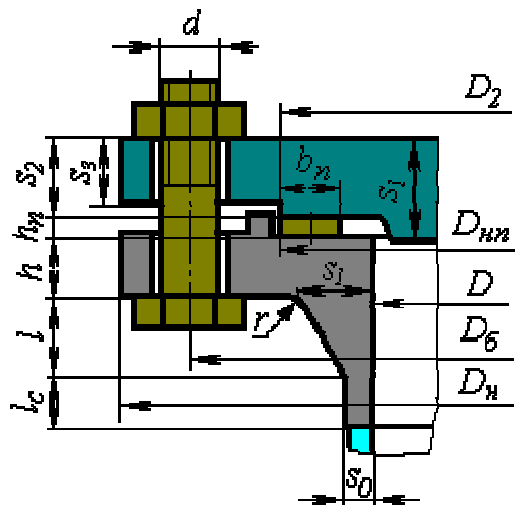
$$0.03621 \leq 1.0$$

Условие жёсткости выполнено

Инов. № подл. 19746.4	Подпись и дата		Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
</					

Крышка DN50

Расчёт на прочность по ГОСТ Р 52857.4-2007 и ГОСТ Р 52857.2-2007



Исходные данные

Параметры крышки:

Материал: 09Г2С(КП265) Gr.

Толщина стенки, s_1 : 21 мм

Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c_1 : 4 мм

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

Прибавка технологическая, сз: 0 мм

Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, с: 4,8 мм

Толщина в месте прокладки, s_2 : 20 мм

Толщина вне уплотнения, s_3 : 16 мм

Наименьший диаметр наружной утоненной части, D_2 : 87 мм

Наружный диаметр крышки, D_н: 160 мм

Параметры фланца:

Тип фланца: Приварные встык

Исполнение фланца: Выступ-впадина

Диаметр болтовой окружности, D_6 : 125 мм

Материал фланца: 09Г2С(КП265) Gr.

Смежный элемент: Патрубок TW DN50

Материал смежного элемента: 09Г2С(КП265) Gr.

Толщина стенки смежного элемента: 10 мм

Внутренний диаметр фланца, D: 48 мм

Наружный диаметр фланца, D_n : 160 мм

Толщина фланца, h: 17 мм

Сумма прибавок, с: 4 мм

Длина конической части втулки, l: 22,5 мм

Изн. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c_1 : 1 мм				
					Прибавка для компенсации минусового допуска, c_2 : 0,8 мм				
					Прибавка технологическая, c_3 : 0 мм				
					Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, c : 4,8 мм				
					Толщина в месте прокладки, s_2 : 20 мм				
					Толщина вне уплотнения, s_3 : 16 мм				
					Наименьший диаметр наружной утоненной части, D_2 : 87 мм				
					Наружный диаметр крышки, D_H : 160 мм				
					Параметры фланца:				
					Тип фланца: Приварные встык				
Изн. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	Исполнение фланца: Выступ-впадина				
					Диаметр болтовой окружности, D_6 : 125 мм				
					Материал фланца: 09Г2С(КП265) Gr.				
					Смежный элемент: Патрубок TW DN50				
					Материал смежного элемента: 09Г2С(КП265) Gr.				
					Толщина стенки смежного элемента: 10 мм				
					Внутренний диаметр фланца, D : 48 мм				
					Наружный диаметр фланца, D_H : 160 мм				
					Толщина фланца, h : 17 мм				
					Сумма прибавок, c : 4 мм				
Изн. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	Длина конической части втулки, l : 22,5 мм				
					E-10K.00.00.000 PP				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист				
					294				

Длина цилиндрической части втулки, l_с: 5,5 мм
Толщина цилиндрической части втулки, s₀: 5 мм
Толщина конической части втулки, s₁: 14 мм
Радиус перехода, r: 5 мм

Шпильки:

Материал: 35Х
Наружный диаметр, d: 16 мм
Количество, n: 4
Контроль затяжки: Нет

Прокладка:

Материал прокладки: Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали
Толщина, h_п: 3,2 мм
Наружный диаметр, D_{н.п}: 87 мм
Ширина, b_п: 6,5 мм
Коэффициент прочности сварного шва:

$\Phi_p = 1$

Расчёт в расчётных условиях

Условия нагружения:

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,3531 МПа

Расчёт фланца по ГОСТ Р 52857.4-2007:

Свойства материала болтов (шпилек)

Температура болтов (шпилек), t_б: 102 °С
Номинальные допускаемые напряжения для материала 35Х при температуре T = 102 °С :
[σ]_б= 229,5 МПа
Модуль продольной упругости для материала 35Х при температуре T = 102 °С:
E_б= 2,149·10⁵ МПа
Коэффициент линейного расширения для материала 35Х при температуре T = 102 °С:
α_б= 0,134·10⁻⁴ °С
Номинальные допускаемые напряжения для материала 35Х при температуре T = 20 °С :
[σ]²⁰_б= 230 МПа
Модуль продольной упругости для материала 35Х при температуре T = 20 °С:
E²⁰_б= 2,18·10⁵ МПа

Свойства материала смежного элемента фланца 2 Патрубок TW DN50

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 120 °С (расчётные условия):
[σ]_ш= η*min(R_{е/t} / n_T; R_{м/t} / n_B; R_{м/10ⁿ/t} / n_D; R_{p1,0/10ⁿ/t} / n_n) = 1*min{206,8 / 1,5; 403 / 2,4; - / -; - / -}= 137,9 МПа
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 20 °С (расчётные условия):
[σ]²⁰_ш= η*min(R_{е/t} / n_T; R_{м/t} / n_B; R_{м/10ⁿ/t} / n_D; R_{p1,0/10ⁿ/t} / n_n) = 1*min{245 / 1,5; 440 / 2,4; - / -; - / -}= 163,3 МПа

Свойства материала фланца

Температура фланца (кольца), t_ф: 115,2 °С
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 115,2 °С (расчётные условия):
[σ]_ф= η*min(R_{е/t} / n_T; R_{м/t} / n_B; R_{м/10ⁿ/t} / n_D; R_{p1,0/10ⁿ/t} / n_n) = 1*min{207,6 / 1,5; 398,7 / 2,4; - / -; - / -}= 138,4 МПа
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 115,2 °С:

Подпись и дата		Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP	Лист
Изн. № дубл.								295
Взам. инв. №								
Подпись и дата								
Изн. № подл.	19746.4							

$E_{\phi} = 1,895 \cdot 10^5 \text{ МПа}$
Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре $T = 115,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$:
 $\alpha_{\phi} = 0,119 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}$
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчётные условия):
 $[\sigma]_{\phi}^{20} = \eta \cdot \min(R_{eL} / n_T; R_{mT} / n_B; R_{m10nT} / n_d; R_{p1.0/10nT} / n_n) = 1 \cdot \min(245 / 1,5; 440 / 2,4; - / -; - / -) = 163,3 \text{ МПа}$
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$:
 $E_{\phi}^{20} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Характеристики прокладки:

Тип и материал прокладки	Коэффициент m	Удельное давление обжатия $q_{обж}$, МПа	Допускаемое удельное давление $[q]$, МПа	Коэффициент обжатия K	Условный модуль сжатия E_n , МПа
Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали	3	69	-	-	-

Эффективная ширина прокладки:

$b_0 = 6,5 \text{ мм}$

Примечание:
$$\begin{cases} b_0 = b_{np} & \text{при } b_{np} \leq 15,0 \text{ мм} \\ b_0 = 3,8 \cdot \sqrt{b_{np}} & \text{при } b_{np} > 15,0 \text{ мм} \end{cases}$$

Рабочий наружный диаметр прокладки:

$D_{np} = 87 \text{ мм}$

Средний эффективный диаметр прокладки:

$D_{\text{ср}} = D_{np} - b_0 = 87 - 6,5 = 80,5 \text{ мм}$

Для металлических и асбометаллических прокладок $y_n = 0$.

Расчётные параметры болтов (шпилек):

Рабочая длина болта (шпильки):

$L_{\text{б0}} = h + s_2 + h_{\pi} = 20 + 17 + 3,2 = 40,2 \text{ мм}$

Площадь сечения шпильки (по внутреннему диаметру резьбы):

$f_0 = 0,144 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$

Эффективная длина шпильки:

$L_{\text{с}} = L_{\text{б0}} + 0,56 \cdot d = 40,2 + 0,56 \cdot 16 = 49,16 \text{ мм}$

Податливость шпилек:

$$y_{\text{с}} = \frac{L_{\text{с}}}{E_{\phi}^{20} \cdot f_{\text{с}} \cdot n} = 49,16 / (2,18 \cdot 10^5 \cdot 0,144 \cdot 10^{-3} \cdot 4) = 0,3915 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

Расчётные параметры крышки:

$$K_{np} = \frac{D_{\pi}}{D_{\text{ср}}} = 160 / 80,5 = 1,988$$

Изн. № подл.	19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
E-10K.00.00.000 PP					Лист
					296

$$x_{кр} = \frac{0.67 \cdot [K_{кр}^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K_{кр}) - 1]}{(K_{кр} - 1) \cdot [K_{кр}^2 - 1 + (1.857 \cdot K_{кр}^2 + 1) \cdot \left(\frac{s_1}{s_2}\right)^3]} = \frac{(0.67 \cdot (1.988^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg(1.988)) - 1)) / ((1.988 - 1) \cdot [1.988^2 - 1 + (1.857 \cdot 1.988^2 + 1) \cdot (21/20)^3])}{1} = 0.7014$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С(КП265) Gr. при температуре T = 20 °С:

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

Угловая податливость крышки:

$$y_{кр} = \frac{x_{кр}}{E_{кр}^{20} \cdot s_2^3} = 0.7014 / (1,99 \cdot 10^5 \cdot 20^3) = 0,2524 \cdot 10^{-4} \text{ °/Н м}$$

Расчёт нагрузок:

Равнодействующая давления:

$$Q_d = 0.785 \cdot D_{ст}^2 \cdot p = 0.785 \cdot 80,5^2 \cdot 0,3531 = 1796 \text{ Н}$$

Усилие на прокладке в расчётных условиях, необходимое для обеспечения герметичности:

$$R_{п} = \pi \cdot D_{ст} \cdot b_0 \cdot m \cdot |p| = 3,142 \cdot 80,5 \cdot 6,5 \cdot 3 \cdot |0,3531| = 1741 \text{ Н}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке:

$$P_{обж} = 0.5 \cdot \pi \cdot D_{ст} \cdot b_0 \cdot q_{обж} = 0.5 \cdot 3,142 \cdot 80,5 \cdot 6,5 \cdot 69 = 5,671 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

$$\eta = y_{п} + y_{с} + y_{ф}^{I} \cdot b^{I2} + y_{ф}^{II} \cdot b^{II2} = 0 + 0,3915 \cdot 10^{-6} + 0,2524 \cdot 10^{-4} \cdot 22,25^2 + 0,2366 \cdot 10^{-4} \cdot 22,25^2 = 0,8141 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения с крышкой, нагруженного внутренним давлением:

$$\alpha = 1 - \frac{y_{п} - (y_{ф}^{I} \cdot e + y_{кр} \cdot b) \cdot b}{\eta} = 1 - (0 - (0,2366 \cdot 10^{-4} \cdot 11,03 + 0,2524 \cdot 10^{-4} \cdot 22,25) \cdot 22,25) / 0,8141 \cdot 10^{-6} = 1,392$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в расчётных условиях:

$$P_{с1} = \alpha \cdot Q_d + R_{п} = 1,392 \cdot 1796 + 1741 = 4242 \text{ Н}$$

Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или сечению наименьшего диаметра:

$$A_{с} = n \cdot f_{с} = 4 \cdot 0,144 \cdot 10^{-3} = 0,576 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов:

$$P_{с2} = \max \{ P_{обж}; 0.4 \cdot A_{с} \cdot [\sigma]_{с}^{20} \} = \max \{ 5,671 \cdot 10^4; 0.4 \cdot 0,576 \cdot 10^{-3} \cdot 230 = 5,299 \cdot 10^4 \} = 5,671 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Расчёт без учета стесненности температурных деформаций

Расчёт болтов(шпилек):

Коэффициент увеличения допускаемых напряжений при затяжке: $\xi = 1,2$

Коэффициент условий работы: $K_{yp} = 1$

Коэффициент условий затяжки: $K_{yз} = 1$

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при затяжке:

$$[\sigma]_{с}^{п} = \xi \cdot K_{yp} \cdot K_{yз} \cdot K_{yt} \cdot [\sigma]_{с}^{20} = 1,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 276 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в условиях затяжки:

$$P_{с}^{п} = \max \{ P_{с1}; P_{с2} \} = \max \{ 4242; 5,671 \cdot 10^4 \} = 5,671 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{с1} = \frac{P_{с}^{п}}{A_{с}} \leq [\sigma]_{с}^{п}$$

Изн. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	
19746.4					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
					E-10K.00.00.000 PP
					Лист
					297

Днища и крышки с дополнительным краевым моментом, нагруженные избыточным давлением

Равнодействующая давления:

$$Q_d = p \cdot \frac{\pi \cdot D_{сП}^2}{4} = 0,3531 \cdot 3,142 \cdot 80,5^2 / 4 = 1797 \text{ Н}$$

$$\gamma = \frac{1}{y_{II} + y_6 \cdot \frac{E_6^{20}}{E_6} + \left(y_{\Phi} \cdot \frac{E_{\Phi}^{20}}{E_{\Phi}} + y_{xp} \cdot \frac{E_{xp}^{20}}{E_{xp}} \right) \cdot b^2} = \frac{1 / (0 + 0,3915 \cdot 10^{-6} \cdot 2,18 \cdot 10^5 / 2,149 \cdot 10^5 + (0,2366 \cdot 10^{-4} \cdot 1,99 \cdot 10^5 / 1,895 \cdot 10^5 + 0,2524 \cdot 10^{-4} \cdot 1,99 \cdot 10^5 / 1,895 \cdot 10^5) \cdot 22,25^2)}{1,189 \cdot 10^6} = 1,189 \cdot 10^6 \text{ Н/мм}$$

Нагрузка от температурных деформаций:

$$Q_t = \gamma \cdot \left(\alpha'_{\Phi} \cdot h' \cdot (t_{\Phi 1} - 20^0 \text{C}) + \alpha'_{\Phi} \cdot h'' \cdot (t_{\Phi 2} - 20^0 \text{C}) - \alpha_6 \cdot (h' + h'') \cdot (t_6 - 20^0 \text{C}) \right) = \frac{1,189 \cdot 10^6 \cdot (0,119 \cdot 10^{-4} \cdot 20 \cdot (115,2 - 20^0 \text{C}) + 0,119 \cdot 10^{-4} \cdot 17 \cdot (115,2 - 20^0 \text{C}) - 0,134 \cdot 10^{-4} \cdot (20 + 17) \cdot (102 - 20^0 \text{C}))}{1523} = 1523 \text{ Н}$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в расчётных условиях:

$$P_{61} = \max \left\{ \begin{matrix} \alpha \cdot Q_d + R_{II} \\ \alpha \cdot Q_d + R_{II} - Q_t \end{matrix} \right\} = \max \left\{ \begin{matrix} 1,392 \cdot 1796 + 1741 = 4242 \\ 1,392 \cdot 1796 + 1741 - 1523 = 2719 \end{matrix} \right\} = 4242 \text{ Н}$$

Болтовая нагрузка в расчётных условиях:

$$P_6^p = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot Q_d + Q_t = \frac{5,671 \cdot 10^4}{1523} + (1 - 1,392) \cdot 1796 + 1523 = 5,753 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

$$\psi = \frac{P_6^p}{Q_d} = 5,753 \cdot 10^4 / 1797 = 32,02$$

$$K_6 = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{1 + 3 \cdot \psi \cdot \left(\frac{D_3}{D_{сП}} - 1 \right)}{\frac{D_3}{D_{сП}}}} = 0,41 \cdot [(1 + 3 \cdot 32,02 \cdot (125 / 80,5 - 1)) / (125 / 80,5)]^{1/2} = 2,42$$

Нарушено условие применимости расчётных формул:

$$\frac{s_1 - c}{D_p} \leq 0,11$$

В этом случае поправочный коэффициент для допускаемого давления:

$$K_p = \frac{2,2}{1 + \sqrt{1 + \left(6 \cdot \frac{s_1 - c}{D_p} \right)^2}} = 2,2 / [1 + (1 + (6 \cdot [21 - 4,8] / 80,5)^2)^{1/2}] = 0,8568$$

Допускаемое давление:

$$[p] = \left(\frac{s_1 - c}{K_0 \cdot K_6 \cdot D_p} \right)^2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi \cdot K_p = ([21 - 4,8] / [1 \cdot 2,42 \cdot 80,5])^2 \cdot 138,4 \cdot 1 \cdot 0,8568 = 0,82 \text{ МПа}$$

$$0,82 \text{ МПа} \geq 0,3531 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Днища и крышки, нагруженные избыточным давлением

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_{\Phi} + c = K_6 \cdot K_0 \cdot D_p \cdot \sqrt{\frac{p}{\varphi \cdot [\sigma] \cdot K_p}} + c = 2,42 \cdot 1 \cdot 80,5 \cdot (0,3531 / [1 \cdot 138,4 \cdot 0,8568])^{1/2} + 4,8 = 15,43 \text{ мм}$$

$$15,43 \text{ мм} \leq 21 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Изн. № подл. 19746.4	Подпись и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подпись и дата	E-10K.00.00.000 PP					Лист 299
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

$$K_7 = 0.8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_{\text{сн}}} - 1} = 0.8 \cdot [125 / 80,5 - 1]^{1/2} = 0,5948$$

$$\Phi = \max \left\{ \frac{P_6^P}{[\sigma]}; \frac{P_6^M}{[\sigma]^{20}} \right\} = \max \{ 5,753 \cdot 10^4 / 138,4; 5,671 \cdot 10^4 / 163,3 \} = 0,4157 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Расчётная толщина крышки в месте уплотнения с учётом прибавок:

$$s_{2p} + c = \max \left\{ K_7 \cdot \sqrt{\Phi}; \frac{0.6}{D_{\text{сн}}} \cdot \Phi \right\} + c = \max \{ 0,5948 \cdot 0,4157 \cdot 10^{-3 \cdot 1/2}; 0.6 \cdot 0,4157 \cdot 10^{-3} / 80,5 \} + 4,8 = 16,93 \text{ мм}$$

$$16,93 \text{ мм} \leq 20 \text{ мм}$$

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:

$$s_{2p} + c = \max \left\{ K_7' \cdot \sqrt{\Phi}; \frac{0.6}{D_2} \cdot \Phi \right\} + c = \max \{ 0,5287 \cdot 0,4157 \cdot 10^{-3 \cdot 1/2}; 0.6 \cdot 0,4157 \cdot 10^{-3} / 87 \} + 4,8 = 15,58 \text{ мм}$$

$$15,58 \text{ мм} \leq 16 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата
19746.4				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
E-10K.00.00.000 PP				Лист
				300

Расчет фундаментных болтов на прочность от действия осевой растягивающей силы

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

Исходные данные

Плотность грунтовых вод	$\gamma_B =$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	Н/мм ³
Теоретический собственный вес сосуда	$G =$	$24 \cdot 10^4$	Н
Внутренний диаметр аппарата	$D =$	3000	мм
Расчетная длина аппарат	$L =$	7500	мм

Параметры фундаментных болтов

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

Результаты расчета на прочность фундаментных болтов

Результирующая вертикальная нагрузка, вызванная всплытием подземного сосуда

$$N = 1,25 \gamma_B \frac{\pi D^2 L}{4} - 0,9 G = 4,47 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

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

$$\frac{N}{N_{bt}} = 5,74$$

Условие прочности

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

Изн.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP	Лист
Изн.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		301
Изн.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Список литературы

- 1) ГОСТ Р 52857.4-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений.
- 2) ГОСТ Р 52857.5-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет обечаек и днищ от воздействия опорных нагрузок.
- 3) ASME VIII, Div 2, 2013.
- 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 52857.1-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования.
- 6) 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.
- 7) ГОСТ Р 52630-2012. Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия
- 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

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	E-10K.00.00.000 PP	Лист 302